

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE FÍSICA E ESCOLA DE ENGENHARIA**

**Carolina Ferlauto Charão**

**INTEGRAÇÃO E AUTOMAÇÃO DE UM SISTEMA DE *MAGNETRON*  
*SPUTTERING* PARA DEPOSIÇÃO DE NANOPARTÍCULAS METÁLICAS SOBRE  
AMOSTRAS EM PÓ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito parcial para obtenção do grau  
de Bacharel em Engenharia Física pela  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul.  
Orientador: Prof. Marcus V. Castegnaro

**Porto Alegre**

**2024**

## RESUMO

Os métodos de preparação e modificação de materiais são fundamentais no desenvolvimento e aprimoramento de processos e sistemas voltados à produção, conversão e armazenamento de energia, sendo essenciais para a transição energética para fontes renováveis e limpas. Em especial catalisadores baseados em semicondutores na forma de pó e modificados pela dispersão de cocatalisadores metálicos têm se mostrado sistemas promissores para produção de  $H_2$  verde. Um dos métodos desenvolvidos para a dispersão de cocatalisadores metálicos sobre amostras particuladas/em pó baseia-se na deposição de nanopartículas metálicas por *sputtering* ou *pulverização catódica*. Apesar de ser amplamente utilizado na fabricação de filmes finos, esse método ainda encontra limitações técnicas quando aplicado à produção de amostras em pó. Nesse projeto, são propostas soluções de engenharia baseadas na automação e integração do processo de deposição por *magnetron sputtering* buscando garantir a reprodutibilidade e o controle das propriedades de catalisadores voltados à produção de  $H_2$  verde e preparados por meio dessa técnica no laboratório NanoREAP-UFRGS. Inicialmente, avaliou-se a metodologia e a instrumentação atualmente empregadas no laboratório. A partir dessa análise e de abordagens relatadas na literatura ou empregadas pela indústria, buscamos soluções para as principais limitações do sistema. As soluções mais promissoras e adequadas ao cronograma inicial foram implementadas e testadas. Espera-se que as soluções propostas neste projeto contribuam para alavancar a qualidade das amostras em pó preparadas por *magnetron sputtering* pelo grupo de pesquisa, permitindo que novos e mais eficientes catalisadores sejam preparados e utilizados na produção de  $H_2$  verde. Além disso, espera-se que a metodologia reportada nesse texto possa ser modificada, melhorada e aplicada no controle e otimização de outros processos essenciais para a pesquisa em materiais e áreas afins.

## ABSTRACT

The methods for preparing and modifying materials are fundamental for the development and improvement of processes and systems applied to energy production, conversion, and storage, being essential for the energy transition to renewable and clean sources. In particular, semiconductor-based powder catalysts modified by the dispersion of metallic cocatalysts have proven to be promising systems for green hydrogen production. One of the methods for dispersing metallic cocatalysts on powder samples relies on the deposition of metallic nanoparticles by sputtering. Although widely used for thin films depositions, this method still faces technical limitations when applied to the production of powder samples. This project proposes engineering solutions based on automation and integration of the *magnetron sputtering* deposition process to ensure reproducibility and control of the properties of catalysts aimed at green hydrogen production, prepared using this technique at NanoREAP-UFRGS. Initially, the methodology and instrumentation currently employed in the laboratory were evaluated. Based on this analysis and approaches reported in the literature or used in industry, we sought solutions to the main limitations of the system. The most promising and suitable solutions for the initial schedule were implemented and tested. It is expected that the solutions proposed in this project will contribute to enhancing the quality of powder samples prepared by *magnetron sputtering* by the research group, allowing the preparation and application of new and more efficient catalysts in green hydrogen production. Furthermore, it is expected that the methodology reported in this text can be modified, improved, and applied to control and optimize other essential processes for research in materials and related fields.

## **AGRADECIMENTOS**

Expresso minha profunda gratidão à minha família pelo apoio inabalável que têm oferecido em todas as circunstâncias. Sou igualmente grata ao meu namorado por estar ao meu lado continuamente, independentemente das decisões que tomei. Agradeço aos meus amigos por sua colaboração em amenizar as pressões acadêmicas. Por fim, expresso minha sincera apreciação ao meu orientador por sua prontidão em prestar assistência em prazos restritos.

## **SUMÁRIO**

<b>MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS.....</b>	<b>4</b>
<b>PLANEJAMENTO, EXECUÇÃO E RESULTADOS.....</b>	<b>6</b>
<b>ETAPA 1:.....</b>	<b>7</b>
<b>ETAPA 2:.....</b>	<b>23</b>
<b>ETAPA 3:.....</b>	<b>30</b>
<b>CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS.....</b>	<b>41</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>42</b>

## MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

A conversão de energia presente em combustíveis, especialmente para fins térmicos e elétricos, tem sido essencial para o progresso tecnológico, mas também é responsável por impactos ambientais significativos. Nesse contexto, o estudo de energias renováveis e a busca por fontes de energia menos poluentes tornaram-se uma prioridade. O hidrogênio é destacado como um vetor energético promissor, embora sua produção atual dependa majoritariamente de processos químicos baseados em combustíveis fósseis, como a reforma a vapor do metano, que gera grandes emissões de CO<sub>2</sub>. Por sua vez, o chamado H<sub>2</sub> verde é um combustível limpo produzido através da dissociação da molécula da água por fotó(eletrólise) utilizando apenas energias renováveis (como solar, eólica ou hídrica) e sem emissões de poluentes. Apesar de a reação de separação da água ser uma reação química bem conhecida, sua aplicação em larga escala para produção de H<sub>2</sub> verde ainda enfrenta uma série de desafios. [1][2][3][4].

Nesse cenário, a síntese de materiais avançados, com controle sobre suas propriedades estruturais e eletrônicas, tem sido um dos focos principais da pesquisa no tema. No caso da fotólise da água, os fotocatalisadores são frequentemente baseados em semicondutores como TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, BiVO<sub>4</sub>, SrTiO<sub>3</sub> e Ta<sub>2</sub>N<sub>5</sub>, que possuem propriedades estruturais e eletrônicas adequadas para facilitar a reação e podem ser modificados por diversas estratégias para aprimorar sua eficiência, como a modificação de suas superfícies por meio da deposição de cocatalisadores metálicos. Essa estratégia permite aumentar a eficiência na conversão de energia solar, reduzir a recombinação de cargas e melhorar a resistência à fotocorrosão, fatores críticos que comprometem a eficiência e estabilidade de muitos fotocatalisadores. [5][6][7][8].

Técnicas como *Atomic Layer Deposition* (ALD), pirólise, eletrodeposição e *sputtering* têm sido amplamente utilizadas para depositar metais, na forma de átomos isolados, clusters ou nanoestruturas, sobre semicondutores. Estudos mostraram que essas modificações aumentam significativamente a atividade fotoquímica dos materiais, ilustrando o potencial das técnicas de modificação na produção de hidrogênio de maneira mais eficiente e sustentável [5][6][7][8]. Independentemente da técnica escolhida, o controle preciso dos parâmetros de síntese é essencial para garantir a uniformidade das amostras, a dispersão adequada dos metais e a obtenção de superfícies cataliticamente ativas, otimizando o desempenho dos catalisadores. Entre essas técnicas, temos a deposição por *sputtering*, um processo em que, de modo simplificado, íons de um gás inerte, como o argônio, são

acelerados em direção a um material alvo em uma câmara de vácuo, ejetando átomos do alvo que se depositam em um substrato. O método permite controlar propriedades do material depositado, como composição e estrutura, ajustando parâmetros como tempo de deposição, potência e pressão.

Uma das variações desse processo, o *magnetron sputtering*, utiliza campos magnéticos para aumentar a eficiência da deposição, melhorando parâmetros como a densidade de corrente e a taxa de deposição [9][10]. Em geral essas deposições são feitas sobre substratos sólidos e empregadas na preparação de filmes finos, já no Laboratório de Nanomateriais para Energia Renovável e Fotossíntese Artificial – NanoREAP, no Instituto de Física da UFRGS, o *magnetron sputtering* é uma ferramenta importante na modificação de materiais particulados, tipicamente semicondutores na forma de pó. Essa aplicação específica do *sputtering* apresenta desafios relevantes, principalmente no que diz respeito à obtenção de amostras homogêneas e reprodutíveis. Esses aspectos serão discutidos em maior detalhe no próximo capítulo, juntamente com soluções já implementadas em sistemas similares e com aquelas que propomos neste trabalho.

O objetivo principal deste projeto é examinar e aprimorar a instrumentação e a metodologia empregadas no grupo de pesquisa NanoREAP para deposição de metais sobre amostras particulares, por meio da técnica de *magnetron sputtering*. Através de abordagens simples e de estratégias criativas, pretende-se desenvolver alternativas viáveis que atendam às necessidades do laboratório, contornando as barreiras financeiras impostas pelo alto custo dos sistemas comerciais [12] e permitindo, através do controle sobre o processo de síntese, o desenvolvimento de catalisadores mais eficientes para a produção de  $H_2$  verde.

O projeto foi dividido em três etapas, que serão apresentadas no capítulo a seguir. Apesar de relacionadas, as etapas do trabalho foram conduzidas de modo independente e, para refletir isso, o capítulo a seguir trata delas separadamente, destacando o planejamento, a execução e os resultados de cada uma antes de relacioná-las ao final do capítulo.

## PLANEJAMENTO, EXECUÇÃO E RESULTADOS

A automação e integração de sistemas são práticas fundamentais tanto na indústria quanto na academia, visando aumentar a eficiência, a precisão e a reprodutibilidade de processos complexos. Na indústria, a automação é amplamente aplicada em linhas de produção, como na fabricação de eletrônicos e automóveis, onde robôs programados realizam tarefas repetitivas com alta precisão e velocidade, reduzindo erros humanos e custos operacionais, conectando máquinas e sensores para otimizar o desempenho global da linha de produção. Na academia, especialmente em laboratórios de pesquisa, a automação é utilizada em experimentos que requerem controle preciso de condições, como temperatura e pressão, ou na manipulação de equipamentos de medição.

A integração se dá pelo uso de softwares que interligam diferentes instrumentos, permitindo a coleta e análise de dados automatizados, facilitando experimentos dentro da física experimental, assim em áreas como química e ciência de materiais. Exemplos incluem o uso de plataformas como LabVIEW ou MATLAB para controlar experimentos e processar resultados em tempo real. A integração e automação também é aplicada em sistemas comerciais dedicados à deposição de filmes finos, via *magnetron sputtering*, garantindo que diferentes parâmetros de deposição sejam controlados e monitorados simultaneamente [\[14\]\[15\]\[16\]](#).

É nesse contexto que se insere esse projeto, cujo planejamento e execução seguiram as 3 etapas seguintes.

Na Etapa 1, foi avaliada a instrumentação atual do sistema de *magnetron sputtering*, assim identificamos eventuais problemas e limitações instrumentais e metodológicas.

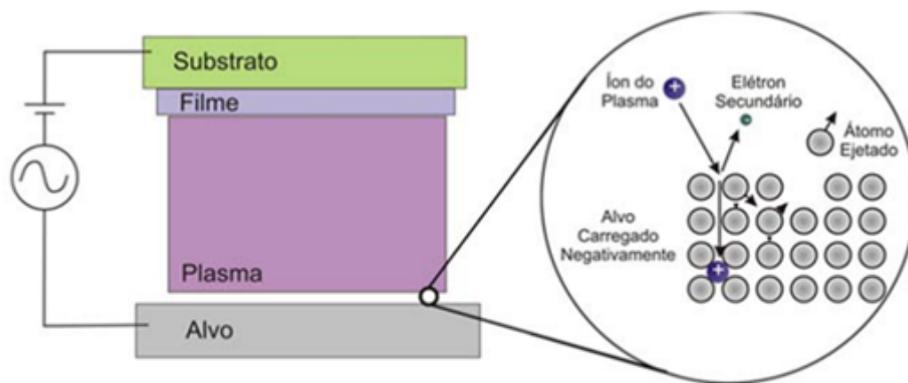
Na Etapa 2, foram desenvolvidas, com base nos resultados da Etapa 1 e em uma revisão bibliográfica, algumas soluções de automação voltadas ao controle dos instrumentos envolvidos na deposição.

Por fim, na Etapa 3, focou-se na melhoria do sistema de homogeneização das amostras. Após uma busca por abordagens já reportadas na literatura e/ou aplicadas na indústria, desenvolveu-se e testou-se de uma nova instrumentação com um sistema de rotação controlado por motor de passo e integrada aos demais processos que precedem e sucedem a deposição.

## ETAPA 1:

### **Avaliação da instrumentação do sistema de *magnetron sputtering* e da metodologia empregadas na deposição de metais sobre amostras em pó.**

*Sputtering* (ou pulverização catódica) é um processo de deposição física de vapor (PVD, *physical vapor deposition*) largamente aplicado na fabricação de filmes finos voltados para os mais variados usos industriais e científicos. O processo de *sputtering* ocorre em uma câmara de vácuo, onde é colocado o material que se deseja depositar (que compõe o alvo) e os materiais sobre os quais se deseja fazer a deposição (substratos). Os principais elementos de um sistema dedicado à preparação de filmes finos por *sputtering* são mostrados na Figura [1], retirada do texto [9].



*Figura 1* Exemplo de sistema dedicado à preparação de filmes finos por *sputtering*, retirada do texto [9].

Pode-se dizer que uma das desvantagens do *sputtering* é o fato de ser uma técnica cuja instrumentação baseia-se em tecnologia de vácuo, bastante complexa, delicada e cara. Já entre suas vantagens, destaca-se o controle que o método fornece sobre as propriedades composicionais, morfológicas, eletrônicas e estruturais dos materiais depositados sobre líquidos, pós ou filmes [22][23][24][26][27]. Isso é alcançado ajustando-se parâmetros como: tempo de deposição, potência da fonte, pressão na câmara de vácuo, posição e movimento relativo entre alvo e substrato [25].

Entre as variações dessa técnica, está o *Magnetron sputtering*, que utiliza campos magnéticos para aumentar a eficiência do bombardeamento de íons no alvo e, conseqüentemente, a taxa de deposição do material sobre o substrato. Neste método, um conjunto de ímãs é posicionado atrás do alvo, gerando um campo magnético que confina o

plasma em uma região próxima à superfície do alvo, aumentando assim a densidade de corrente de descarga e a eficiência do processo de deposição.

Como vemos na Figura [2a], a formação de um perfil de corrosão em forma de anel na superfície do alvo, para um dos alvos do NanoREAP, resultado da introdução do campo eletromagnético, que ocasiona uma alteração na distribuição e movimento dos elétrons e íons do plasma, como pode ser visto na Figura [2b], do artigo [10],

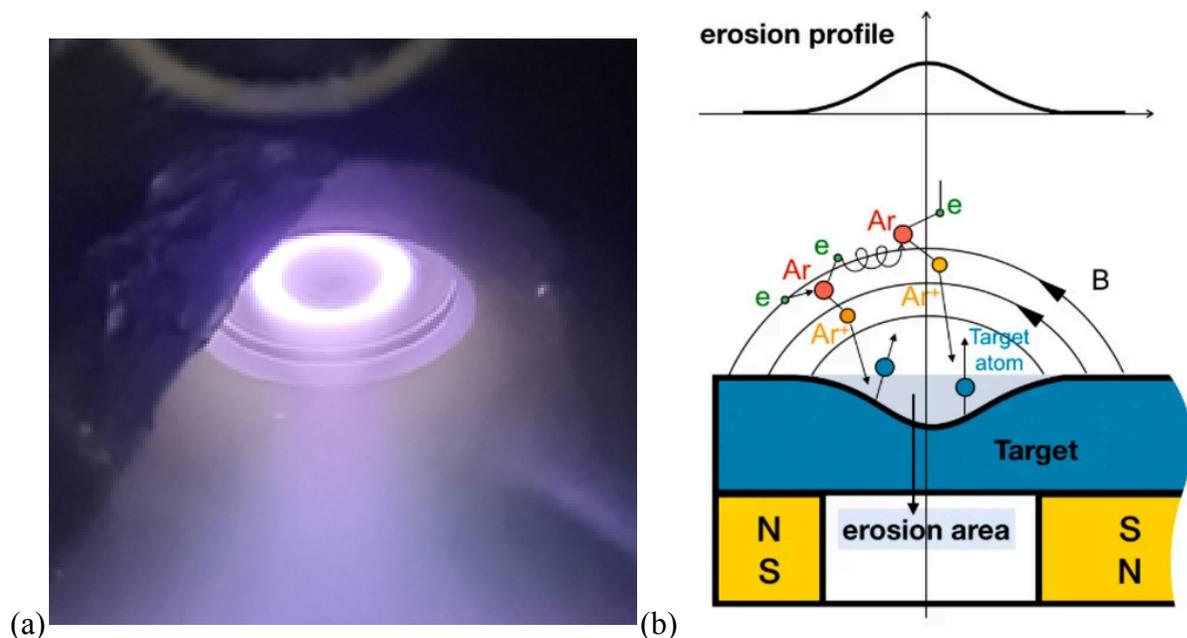


Figura 2(a) Fotografia de um alvo de bismuto com o plasma aberto, mostrando o padrão circular típico da erosão por *magnetron sputtering*; (b) Forma do anel de corrosão, do artigo [10].

O procedimento de deposição por *magnetron sputtering* sobre substratos planos é amplamente difundido, porém, seu uso para deposição sobre pós ainda envolve grandes desafios [28], mas cujas soluções valem o esforço, uma vez que amostras na forma de pó encontram diversas aplicações científicas e tecnológicas. Para a produção fotocatalítica de  $H_2$ , por exemplo, pós semicondutores modificados pela adição de cocatalisadores via *magnetron sputtering* têm sido investigados e diferentes abordagens têm sido testadas, buscando aumentar o controle sobre as propriedades dos catalisadores através dos parâmetros de deposição [29].

Vários estudos investigam os efeitos dos parâmetros de deposição sobre a dispersão, a concentração e a morfologia de NPs metálicas depositadas por *sputtering*. Em um trabalho [11] interessante e completo, os autores variaram sistematicamente a distância de trabalho entre o alvo e o substrato, o tempo de deposição, a temperatura do alvo, a tensão aplicada, a

corrente de descarga e a pressão do gás para determinar seus efeitos na dispersão e na distribuição de tamanhos de NPs de ouro depositadas sobre líquidos iônicos. Mostraram que, como esperado, a concentração de ouro disperso sobre o pó é proporcional ao tempo de deposição, mas a morfologia das NPs não depende do tempo de deposição.

Os resultados também indicaram que a relação entre o tempo de deposição, a concentração e a morfologia das nanopartículas (NPs) é afetada pela temperatura do alvo. Em particular, temperaturas mais baixas levaram à formação de NPs de ouro menores e com uma distribuição de tamanhos mais estreita. Além disso, foi observado que a pressão de argônio depende da tensão aplicada e da corrente de descarga. A pressão de argônio aumenta quase linearmente com o aumento da corrente de descarga, desde que a tensão aplicada seja constante. No entanto, os autores destacaram que, apesar dessa variação na pressão, o tamanho das NPs não sofre alterações significativas. Para pressões de argônio baixas, eles propõem que os átomos e/ou íons de argônio não interagem com as partículas de ouro no espaço entre o alvo e o meio de captura, não afetando o processo de deposição.

Em resumo, a temperatura do alvo e a tensão aplicada têm uma forte influência sobre o tamanho das NPs de ouro geradas no meio de captura, enquanto a distância de trabalho entre o alvo e a superfície do meio de captura, o tempo de deposição e a corrente de descarga têm pouca ou nenhuma influência. Segundo o artigo, para gerar NPs menores e controlar seus tamanhos, são desejáveis temperaturas mais baixas no alvo e voltagens aplicadas mais altas.

Tendo em mente a importância do controle fino sobre tais parâmetros, avaliou-se a instrumentação e a metodologia utilizados nas deposições feitas no NanoREAP, onde há um sistema projetado e montado pelo grupo, com apoio dos setores de eletrônica, mecânica e vidros do Instituto de Física. Apesar de ser amplamente utilizado e de garantir amostras adequadas e reprodutíveis para uma série de pós já testados, não leva a bons resultados em outros, produzindo amostras com distribuições não homogêneas de metais sobre os pós. Além disso, segundo o grupo, amostras mais homogêneas são obtidas quando são utilizados volumes pequenos de pó. Assim, o processo precisa ser repetido algumas vezes para que se obtenha uma quantidade suficiente de amostra para aplicações catalíticas. Isto torna o processo mais lento, cansativo e custoso. Além disso, torna-o mais sujeito a erros humanos e pode amplificar os efeitos das variações dos parâmetros listados anteriormente.

O sistema do laboratório, mostrado na Figura [3], consiste em um *magnetron sputtering* de fonte DC, cuja câmara de vácuo onde ocorre a preparação das amostras, a chamada câmara de deposição ou principal, tem seus principais elementos mostrados na

Figura [4(a)]. À câmara de deposição, estão conectados: a fonte ou canhão; sensores de pressão do tipo *Penning*, *Pirani* e *Wide-range*; passantes elétricos para gases e água que resfria o alvo, prevenindo danos ou mesmo a fusão dele; e um conjunto de bombas de vácuo e válvulas responsável por garantir a pressão adequada para as diferentes etapas do processo.

Durante o bombeamento da câmara, diferentes rotinas são usadas, dependendo da configuração inicial do sistema (ventilado ou em vácuo). Aqui abordaremos o processo que parte de uma configuração em que a amostra em pó já foi introduzida na câmara de deposição e o sistema foi bombeado pela bomba auxiliar da turbo por cerca de 2 horas. Esse processo em geral baixa a pressão até a ordem de  $5 \times 10^{-4}$  mbar, permitindo o acionamento da bomba turbomolecular, que reduz em duas ordens de grandeza a pressão na câmara em tempos que dependem da quantidade e propriedades de cada amostra e variam entre 1 e 6 horas. Durante esse bombeamento, uma válvula do tipo *plate* é mantida aberta. A posição do êmbolo móvel da *plate* determina se ela está aberta, fechada (câmara isolada das bombas) ou parcialmente aberta (bombeamento parcial, necessário durante deposições) e é controlada por um pistão pneumático.

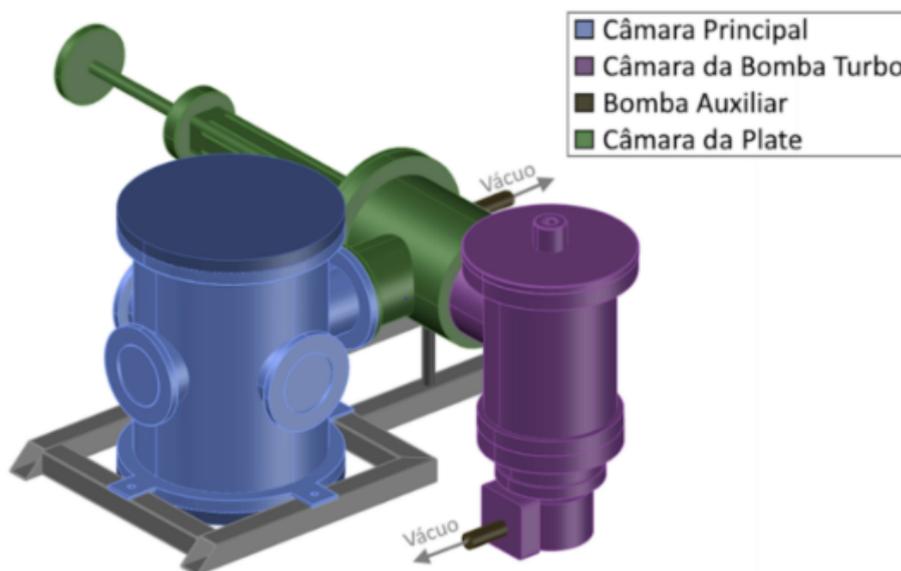


Figura 3 Sistema de *magnetron sputtering*, retirada do manual [12].

Na figura [4(a)], também adaptada do manual [12], temos o esquema interno da câmara principal, mostrando os principais instrumentos envolvidos no processo de deposição. Uma barreira física (obturador ou *shutter*) é posicionada entre o porta-amostra e a fonte (magnetron) para impedir que aconteça a deposição do material pulverização do alvo sobre o

substrato em períodos anteriores e posteriores ao tempo de deposição, uma vez que o *shutter*, quando fechado, previne a dispersão do metal pela câmara.

O porta-amostra contendo pó é colocado sobre um mecanismo de vibração cuja frequência e amplitude são ajustáveis através do controle da corrente (amplitude e frequência) que percorre um eletroímã e gera campos eletromagnéticos alternados que atuam sobre um ímã de neodímio localizado sob a plataforma à qual o porta-amostra é preso. Na Figura [4(b)] temos imagens do porta amostra do NanoREAP, uma delas mostra um dos problemas relatados pelos pesquisadores: alguns tipos de pós aglomeram durante a vibração, formando esferas de tamanhos variados. Nessas esferas, poucas partículas do pó (as da superfície de esferas) acabam com quantidades muito maiores do metal depositado do que a grande maioria das partículas (parte interna). Assim, se durante uma deposição sobre determinado pó acontecer esse efeito, ou se acontecer a formação de vales e nós (também visível na Figura [10]), a amostra não será homogênea como esperado.

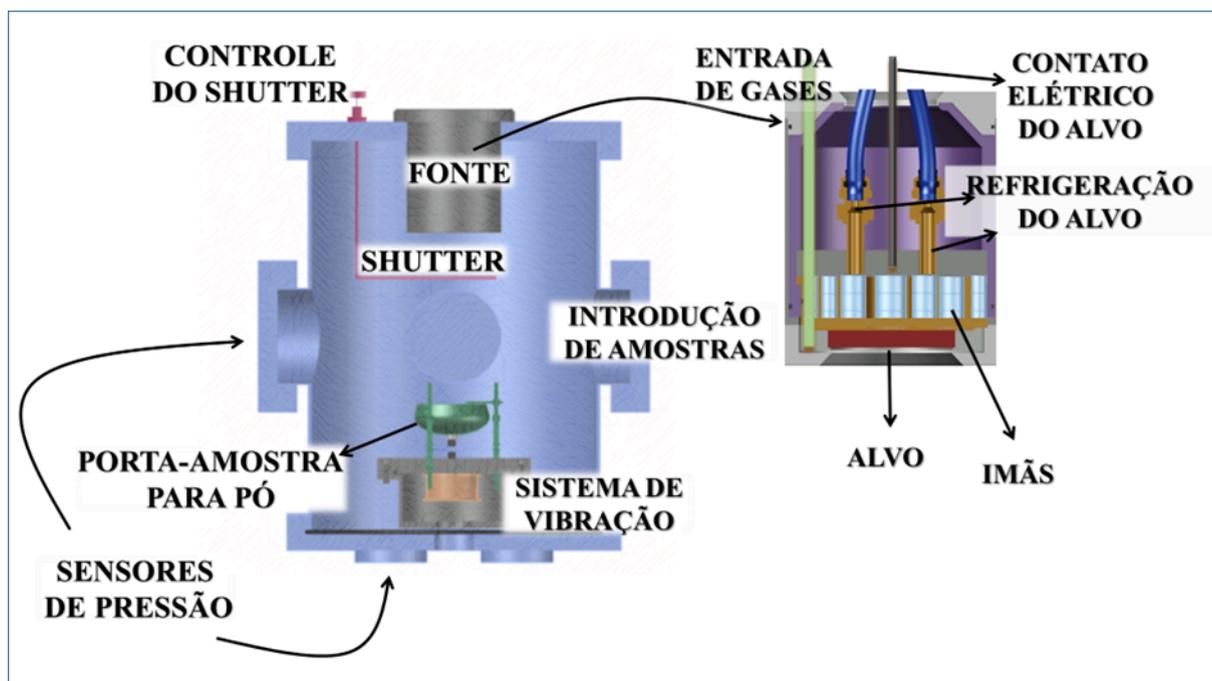


Figura 4(a) Esquema interno da câmara principal, adaptada do manual [12].

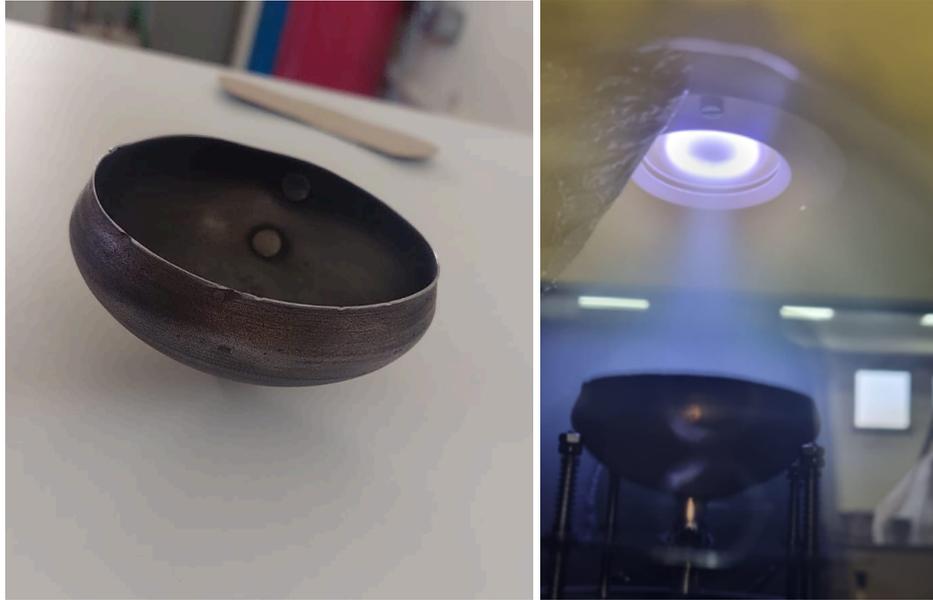


Figura 4(b) Imagem do interior da câmara principal durante uma deposição e do porta-amostra de pó.

Possíveis maneiras de contornar essa limitação envolveriam abordagens pré-deposição, como passar o pó por peneiras mais finas, secá-lo em temperaturas maiores ou tempo maiores. Aqui, trataremos de soluções baseadas nos materiais e métodos do processo de deposição, tentando resolver um dos principais problemas da deposição de metais por *magnetron sputtering*: garantir que a dispersão dos metais seja uniforme.

A maioria das metodologias propostas envolve a agitação mecânica do pó durante a deposição, o que parece uma tarefa simples, mas, como estamos tratando de um processo que ocorre em vácuo (parte dele em alto vácuo), o que impõe uma série de restrições aos materiais e métodos que podem ser aplicados. Algumas das abordagens mais comuns são abordadas a seguir, com exemplos representativos. Uma boa discussão do tópico é feita no artigo [28]. Uma estratégia de homogeneização bastante usada baseia-se na rotação de um recipiente levemente inclinado, como no esquema da Figura [5]. Usando um sistema desse tipo, Schmid e seus colaboradores [30] agitaram microesferas de vidro utilizado porta-amostra rotativo inclinado, conseguindo movimentos delicados, que evitaram danos às partículas, e permitiram recobrimentos uniformes.

O formato dos recipientes nos quais os pós são mantidos em movimento durante a deposição também é um fator importante e foi testado em alguns trabalhos. Em um deles, feito no mesmo grupo de pesquisa, foram testados diferentes formatos para os recipientes capazes de comportar até 1 litro de substrato particulado. Apesar do volume

significativamente maior do que o usado em [30], i.e. 16 ml, o mesmo formato (Figura [5]) resultou em revestimentos mais uniformes.

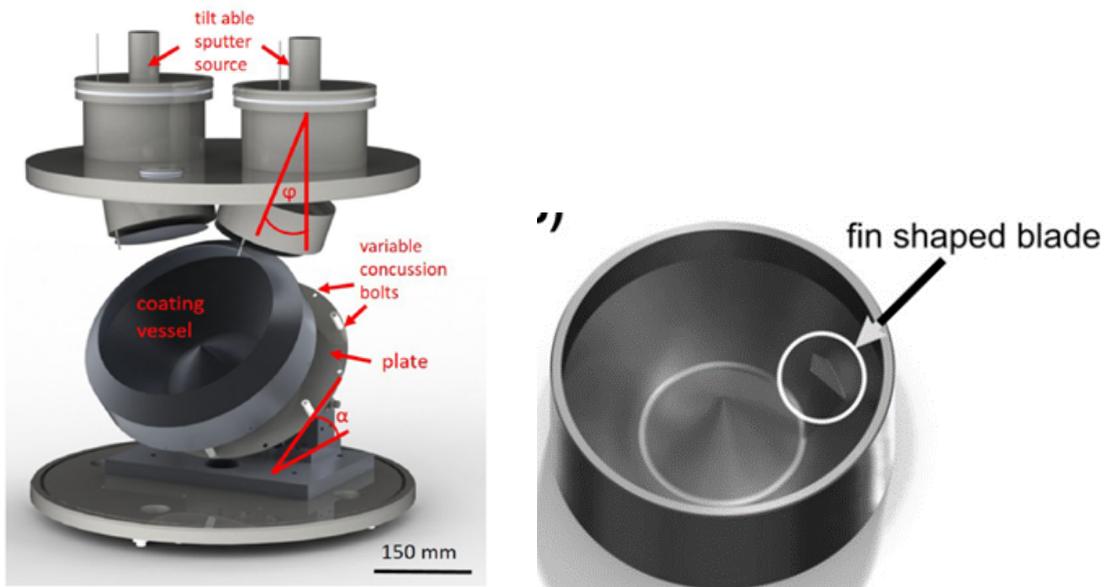


Figura 5 Porta-amostra rotativo inclinado de Schmid e seus colaboradores.

O sistema proposto pelo grupo nesses trabalhos mostrou-se uma excelente solução para o recobrimento das microesferas, como desvantagem, os autores relatam que a inclinação do recipiente limitava a exposição do pó à fonte de sputtering, reduzindo a eficiência do processo. Cabe destacar que os processos para os quais o sistema dos trabalhos daquele grupo de pesquisa foi otimizado difere dos que nos interessam. Enquanto eles pretendiam depositar filmes metálicos contínuos sobre suportes de formato e tamanho muito homogêneo, no NanoREAP são feitas deposições sobre diversos materiais, com uma vasta gama de formatos, densidades e tamanhos de partícula. Além disso, não se busca recobrir completamente o material semiconductor, e, sim, depositar aglomerados metálicos de dimensões nanométricas ao longo da superfície. Ou seja, a uniformidade que buscamos não diz respeito ao recobrimento total das partículas, mas sim à criação de sítios metálicos em quantidades e com tamanhos similares ao longo da superfície de todas as partículas.

De qualquer forma, a homogeneização por rotação é um método bem estabelecido e aplicado por outros grupos, mas sempre com variações que se adequam às especificidades dos materiais que serão preparados. Dois exemplos dessas variações aparecem na Figura [6].

Na [parte b](#), é mostrado um sistema que utiliza um barril hexagonal oscilante, projetado para evitar a aglomeração das partículas durante o processo de deposição,

garantindo uma dispersão homogênea das NPs de Pt sobre a superfície das partículas de  $\text{TiO}_2$ . A implementação desse sistema, que está representado na Figura [7], retirada do artigo [32], resultou na formação de NPs menores e mais dispersas, melhorando significativamente a eficiência do catalisador. As taxas de produção de  $\text{H}_2$  alcançadas com este método foram até 10 vezes superiores às obtidas por métodos convencionais.

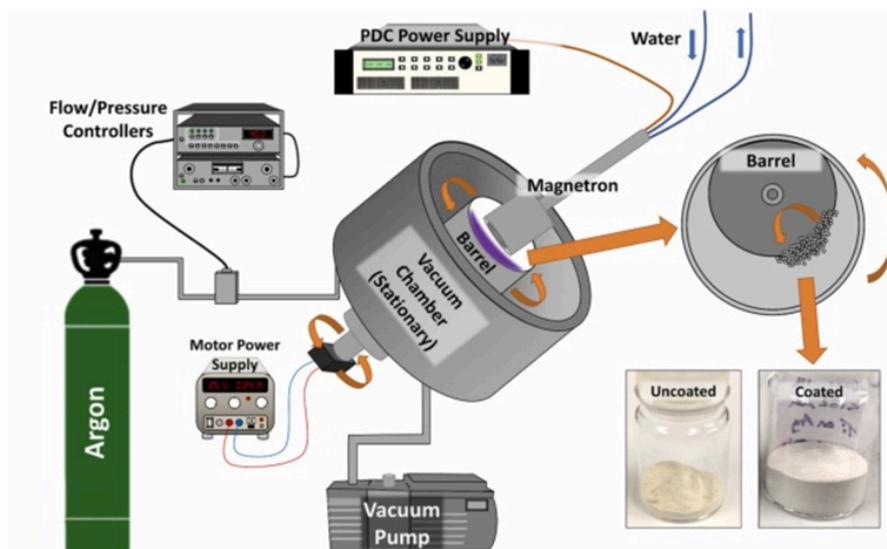


Figura 6(a) Variação de homogeneização por rotação - Diagrama esquemático da configuração PVD, ilustrando o tombamento do pó dentro do barril e o pó de Ag revestido vs. não revestido. [33]

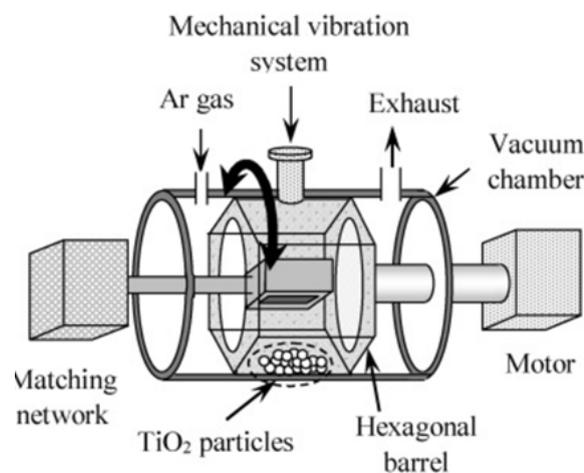
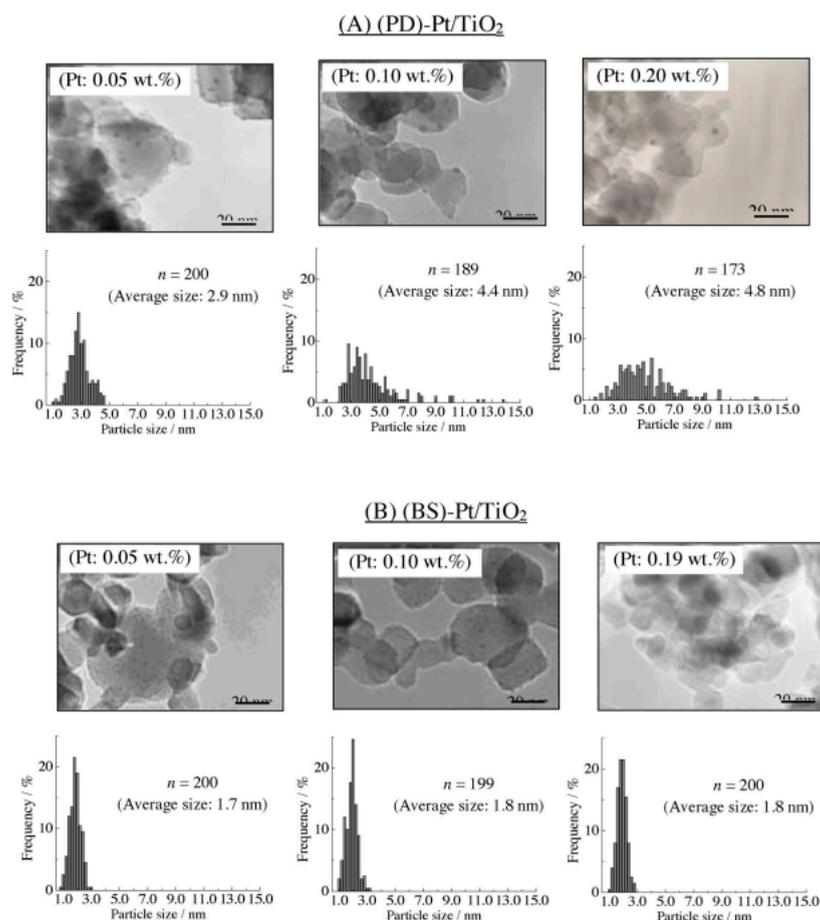


Figura 6(b) Barril hexagonal oscilante, projetado para evitar a aglomeração das partículas durante o processo de deposição. [32]

No artigo [32], as amostras preparadas pelo método de pulverização em barril poligonal foram denominadas como (BS)-Pt/TiO<sub>2</sub>. Além disso, amostras com composições semelhantes foram preparadas por um dos métodos convencionais, a fotodeposição. Para cada amostra, foram adicionados 1g de TiO<sub>2</sub> e diferentes quantidades de H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub>·6H<sub>2</sub>O (para obter diferentes composições) em um fotoreator contendo uma solução aquosa de metanol. A mistura foi irradiada por 12 horas usando uma lâmpada de mercúrio de alta pressão de 400 W. A reação foi feita em atmosfera inerte mantendo a temperatura de 25 °C com circulação de água. As amostras obtidas foram denominadas (PD)-Pt/TiO<sub>2</sub>.

Note que o aumento na concentração de Pt nas amostras preparadas por *sputtering* não afetou o tamanho médio das NPs, enquanto o tamanho médio e a dispersão de tamanhos das amostras obtidas por fotodeposição aumentam quando maiores quantidades de Pt são depositadas no pó.



*Figura 7* Imagens TEM típicas (tensão de aceleração, 200 kV) e distribuições de tamanho de partículas (n: número de contagens de partículas) de amostras (A) (PD)-Pt/TiO<sub>2</sub> e (B) (BS)-Pt/TiO<sub>2</sub>.

Além das soluções envolvendo movimento rotacional do porta-amostra, outras baseiam-se em oscilações ao longo do eixo vertical, ressonantes ou não, e até mesmo de frequência variável. Uma das mais eficientes, mas que envolve altos custos, foi aplicada por Shaw et al., que utilizaram um dispositivo de agitação comercial dentro da câmara de deposição. Esse sistema aplicava vibrações controladas ao porta-amostra durante o processo, permitindo a agitação homogênea de diferentes tipos de pós enquanto eram revestidos com Pd. Essa abordagem demonstrou ser eficiente, especialmente em configurações de vácuo alto, no entanto seu custo torna essa solução proibitiva na academia, onde instrumentações são desenvolvidas pelos próprios pesquisadores

Na Figura [8], é mostrado um desses casos. O sistema foi utilizado no trabalho [31] e é bastante similar ao utilizado atualmente no NanoREAP e baseia-se na vibração

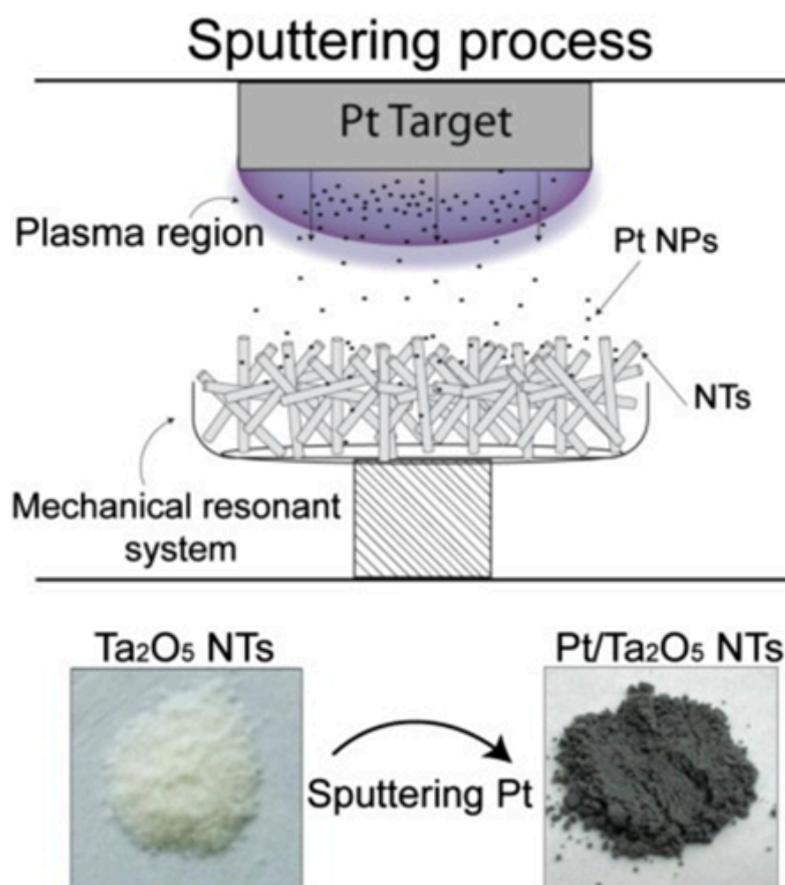
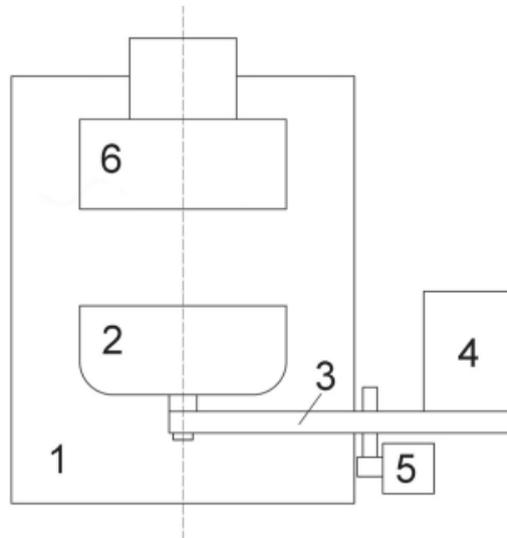


Figura 8 Sistema que aplica vibrações controladas ao porta-amostra durante o processo.

Na Figura [9], retirada do artigo [7], vemos outras dessas propostas. No esquema, os autores representam o aparato em que a deposição sobre pó é feita, sendo 1 a câmara de

vácuo, 2 o recipiente da amostra, 3 uma haste, 4 um gerador de frequência, 5 um motor de passos e 6 o alvo. Os autores testaram o aparato em diferentes configurações e compararam as amostras obtidas. O principal problema reportado pelos autores são as aglomerações de pó em pontos específicos durante a deposição, levando à distribuição não uniforme do material depositado sobre o pó.



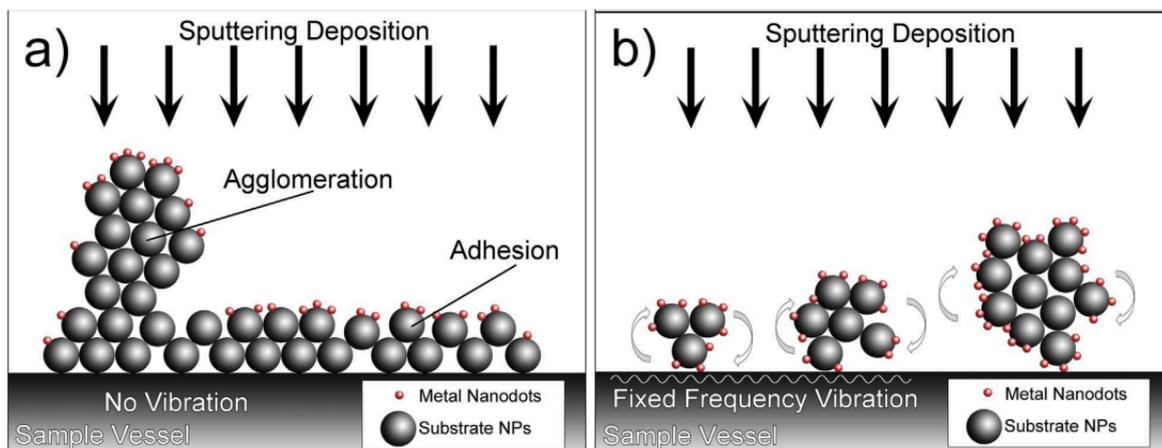
*Figura 9* Esquema de deposição sobre pó, retirada do artigo [7].

Em testes de deposições feitos no NanoREAP, foram visíveis essas aglomerações de pó em pontos específicos durante a deposição, Figura [10], como mencionado no início desta etapa, nas esferas, apenas uma pequena quantidade de partículas de pó (localizadas na superfície das esferas) acaba recebendo uma quantidade significativamente maior de metal depositado em comparação com a maioria das partículas (que se encontram no interior). Portanto, se durante o processo de deposição sobre o pó ocorrer esse fenômeno, ou se houver a formação de vales e nós, a amostra resultante não apresentará a homogeneidade esperada.



Figura 10 Aglomerações do pó em pontos específicos durante testes feitos no NanoREAP.

A solução aplicada pelos autores para assegurar que todas as partículas sejam adequadamente envolvidas pelo material depositado baseia-se na vibração (associada ou não à rotação) do porta-amostra. Em uma tentativa de trazer uma maior eficiência para a deposição, os autores mostraram que, quando a agitação é feita com frequência variável, pode-se quebrar e dispersar as partículas com maior facilidade durante a deposição. A figura [11], também retirada do artigo [7], mostra em (a) a aglomeração de nanopartículas com uma deposição sem vibração, em (b) mostra a aglomeração com uma frequência fixa, as quais não podem ser completamente quebradas e em (c) mostra como as esferas podem ser dispersas e completamente envoltas pela deposição com uma frequência variável.



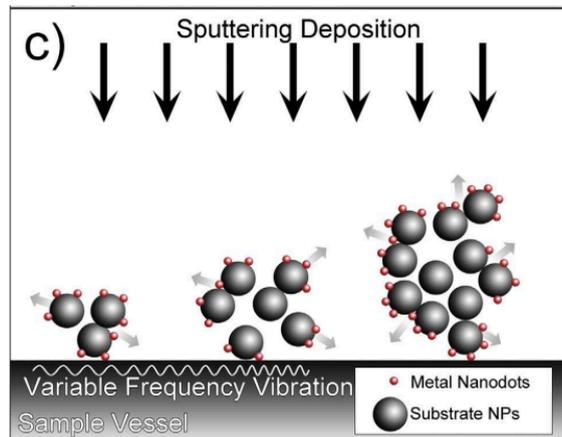
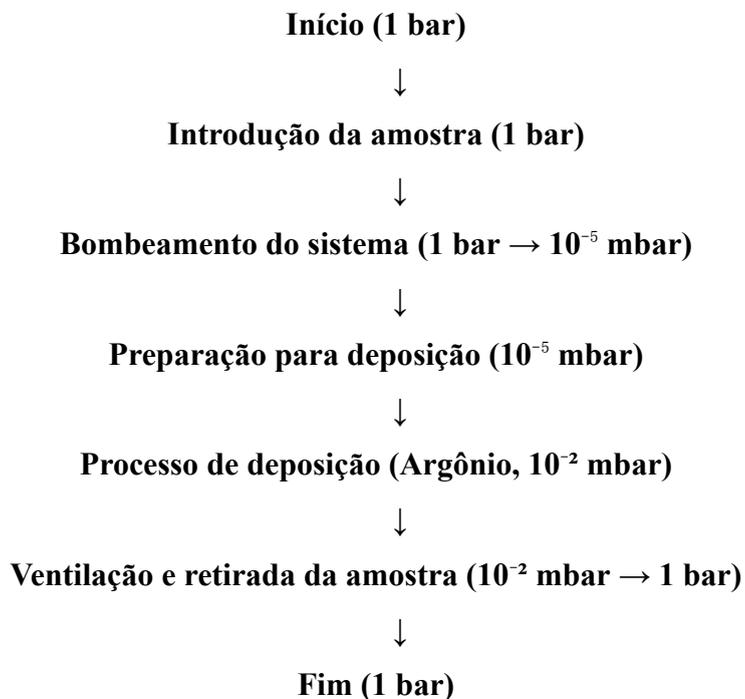


Figura 11 Esquema de dispersão de nanopartículas na deposição por *magnetron sputtering*, retirada do artigo [7] .

Os exemplos anteriores são algumas das estratégias reportadas para garantir a homogeneidade e reprodutibilidade de amostras obtidas por *magnetron sputtering* sobre amostras em pó. Eles mostram a importância de soluções inovadoras e eficientes no contexto em que se insere esse projeto, onde também foi avaliado o restante do procedimento de deposição, que é apresentado no fluxograma de etapas e ordem de pressão a seguir e resumido também no texto seguinte.



Partindo, como antes, da situação em que a amostra já está na câmara de deposição e sendo bombeada apenas pela bomba mecânica auxiliar da turbo, o operador acompanha a pressão do sistema até que esteja o adequada para ativação da turbo, ou seja, na casa de  $10^{-3}$  mbar ou menor. Caso a leitura dos sensores esteja nessa faixa, o usuário ativa a bomba turbo e aguarda o tempo necessário para que a pressão dentro da câmara seja menor do que  $2 \times 10^{-5}$  mbar. Assim, pode-se dar sequência ao processo e inicia-se a preparação do sistema para a deposição.

Liga-se o banho termostático que faz parte do sistema fechado de refrigeração que passa pelo alvo. Caso esteja operando corretamente e a pressão ainda esteja na faixa adequada, a válvula *plate* é parcialmente fechada, através de uma chave seletora e do movimento manual de um parafuso que impede o fechamento completo. Depois, já com a câmara sob bombeamento parcial, é aberta a válvula para gases que libera a entrada de gás argônio e o fluxo é ajustado para que se obtenha a pressão desejada para abertura e manutenção do plasma na potência de deposição.

Na fonte de tensão são configurados os valores de corrente e tensão de forma manual, até que o plasma seja formado e atinja-se a potência de deposição escolhida. Este ajuste é crucial para o controle do processo, como discutido anteriormente. Ainda com o *shutter* fechado, o sistema de vibração é ligado e ajustado para configuração que havia sido definida como ideal para homogeneizar o tipo de pó usado como substrato, o que, infelizmente, não pode ser garantido no sistema atual. Manualmente o *shutter* é aberto para iniciar o processo de deposição. Após o tempo determinado, que é contado pelo usuário com um cronômetro, é fechado o *shutter* para interromper a deposição. O sistema de vibração é desligado o mais rápido possível. Isso é importante para evitar que partículas de pó sejam aspiradas para dentro da bomba turbo. Então, a potência da fonte é reduzida até zero e é fechada a entrada de argônio para interromper o fluxo de gás e aberta a *plate* para bombear o Ar remanescente.

É interessante notar que todas as tarefas envolvidas no processo descrito no texto acima, e representado no fluxograma [12] a seguir, são realizadas manualmente pelo operador.

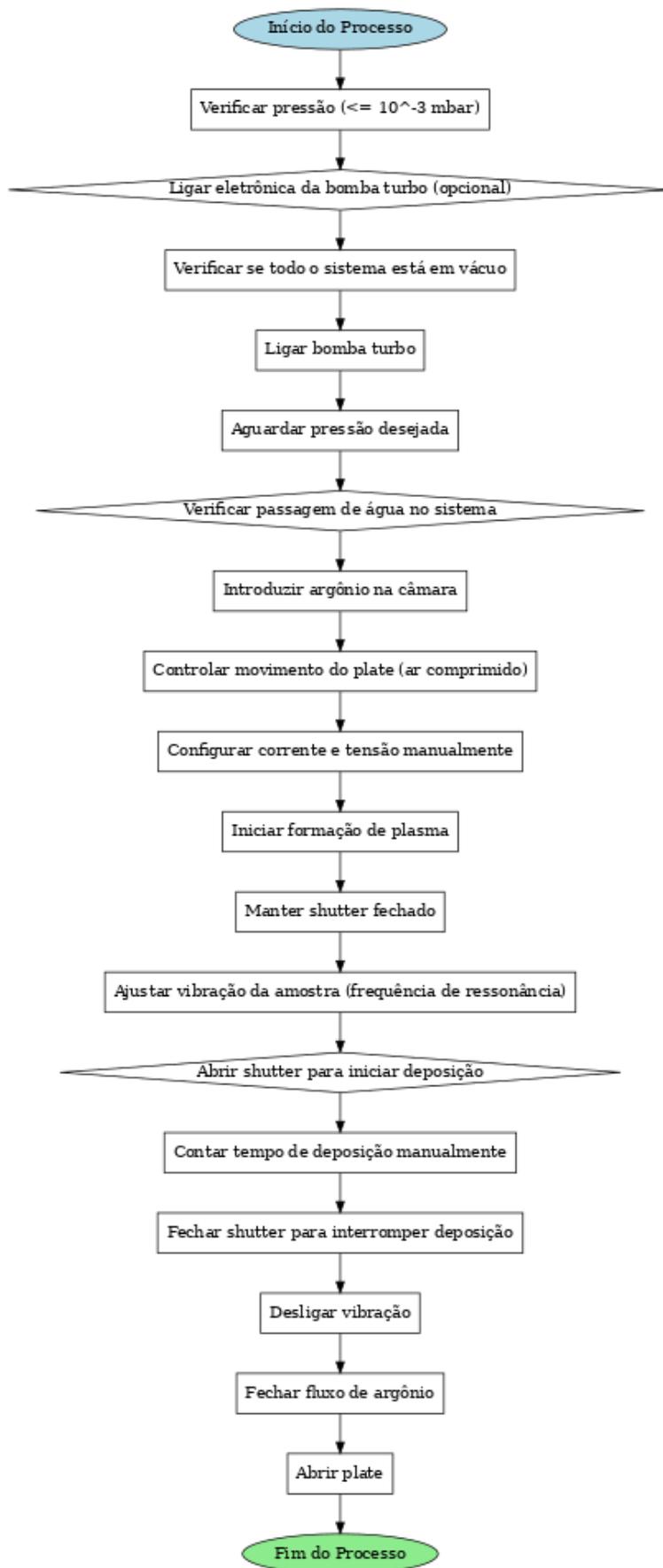


Figura 12 Fluxograma do processo de deposição.

A integração e automação dos processos manuais descritos no texto podem trazer avanços significativos na homogeneidade, reprodutibilidade e eficiência do sputtering no laboratório. Por exemplo, a automatização do ajuste da frequência de vibração do porta-amostra, em conjunto com sistemas automáticos de controle de pressão, fluxo de gás e acionamento do *shutter*, permitiria maior precisão e menor dependência de intervenções humanas. Além disso, a implementação de sensores e atuadores conectados a uma interface centralizada possibilitaria o monitoramento em tempo real e ajustes dinâmicos durante o processo, tornando-o mais estável e garantindo maior uniformidade nas amostras e otimizando o desempenho do equipamento. A próxima seção apresenta algumas soluções propostas neste projeto e, em mais detalhes, as que foram testadas.

## ETAPA 2:

### **Proposta, implementação e teste de soluções de engenharia para a automação e integração do sistema de MS.**

#### ➤ Automação do controle do tempo de deposição

Conforme destacado anteriormente, o tempo de deposição é um dos fatores mais críticos para se obter o resultado desejado na amostra. O controle manual de abertura e fechamento do *shutter*, localizado logo abaixo do canhão do sistema, associado ao controle do tempo, realizado com o auxílio de um cronômetro, pode introduzir erros humanos no processo, comprometendo a precisão do tempo de deposição. Propomos, portanto, a automação desse procedimento, garantindo que o período em que o obturador permanece aberto corresponda de forma precisa ao tempo de deposição da amostra.

Pensando nisso, foi implementado um código, mostrado no [anexo A](#), baseado no qual, foi implementado o controle remoto de motor de passo, utilizando um microcontrolador ESP32. A rotina estabelece uma conexão Wi-Fi, cria um servidor web assíncrono e permite que o usuário controle o motor por meio de uma interface acessível pelo navegador. O motor é configurado para mover-se entre duas posições, previamente configuradas: "Aberto" e "Fechado". O sistema inicia-se sempre na posição definida como "Fechado", e o motor pode ser movido para "Aberto" manualmente ou programado para retornar automaticamente à posição fechada após um tempo declarado no próprio servidor. A classe *MotorController* gerencia a posição do motor, o tempo de espera e o movimento seguro do motor.

O servidor web apresenta uma interface gráfica simples com botões para abrir e fechar o motor, além de um campo para definir o tempo de espera, como mostrado na figura abaixo [13]. O sistema usa a biblioteca *TaskScheduler* para verificar periodicamente se o motor deve retornar à posição fechada, garantindo uma operação autônoma e segura. Além disso, a função *shutdownServer* assegura que, mesmo em caso de falha ou desligamento, o motor sempre retornará à posição fechada, proporcionando uma operação confiável e automatizada.

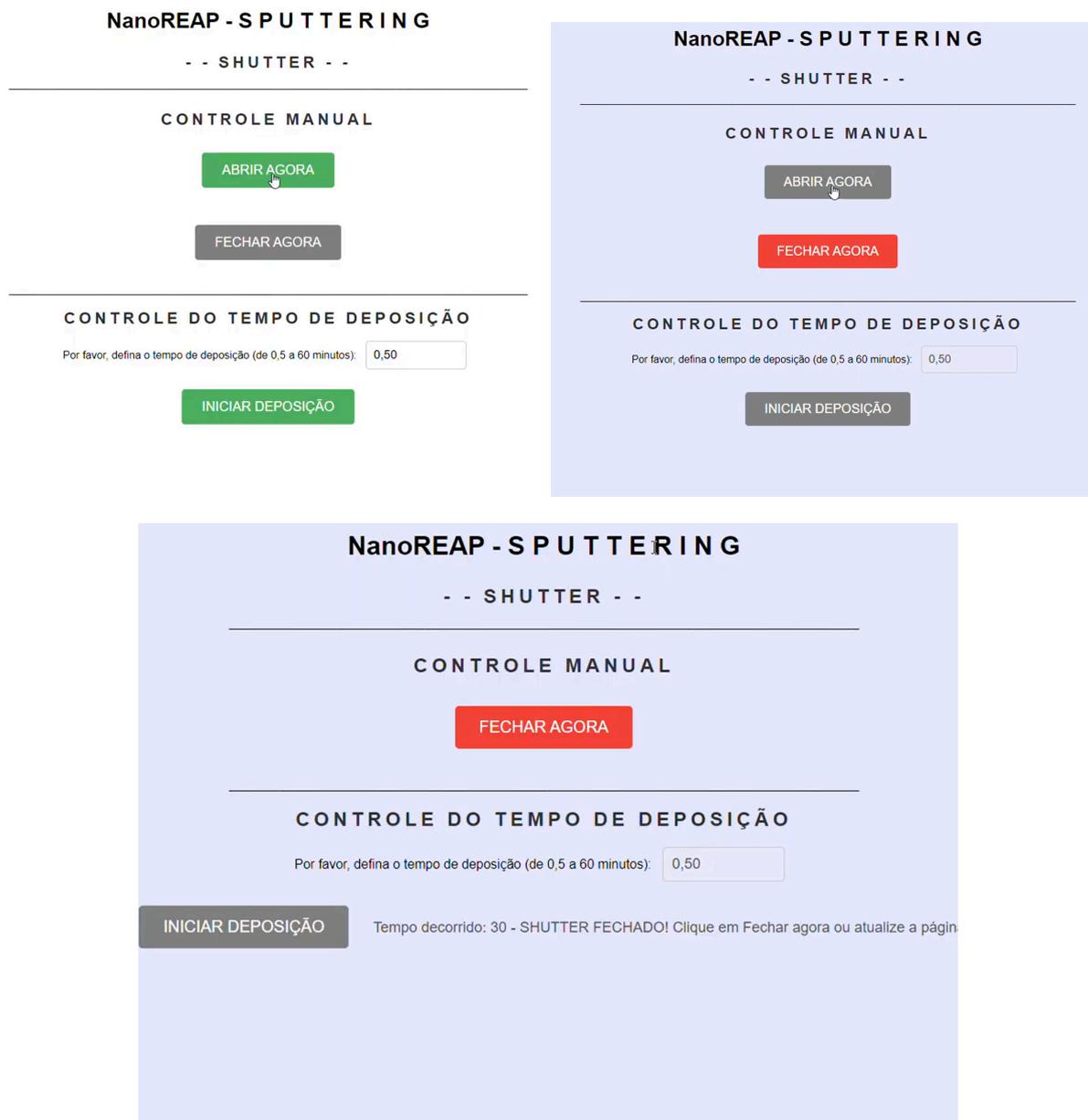
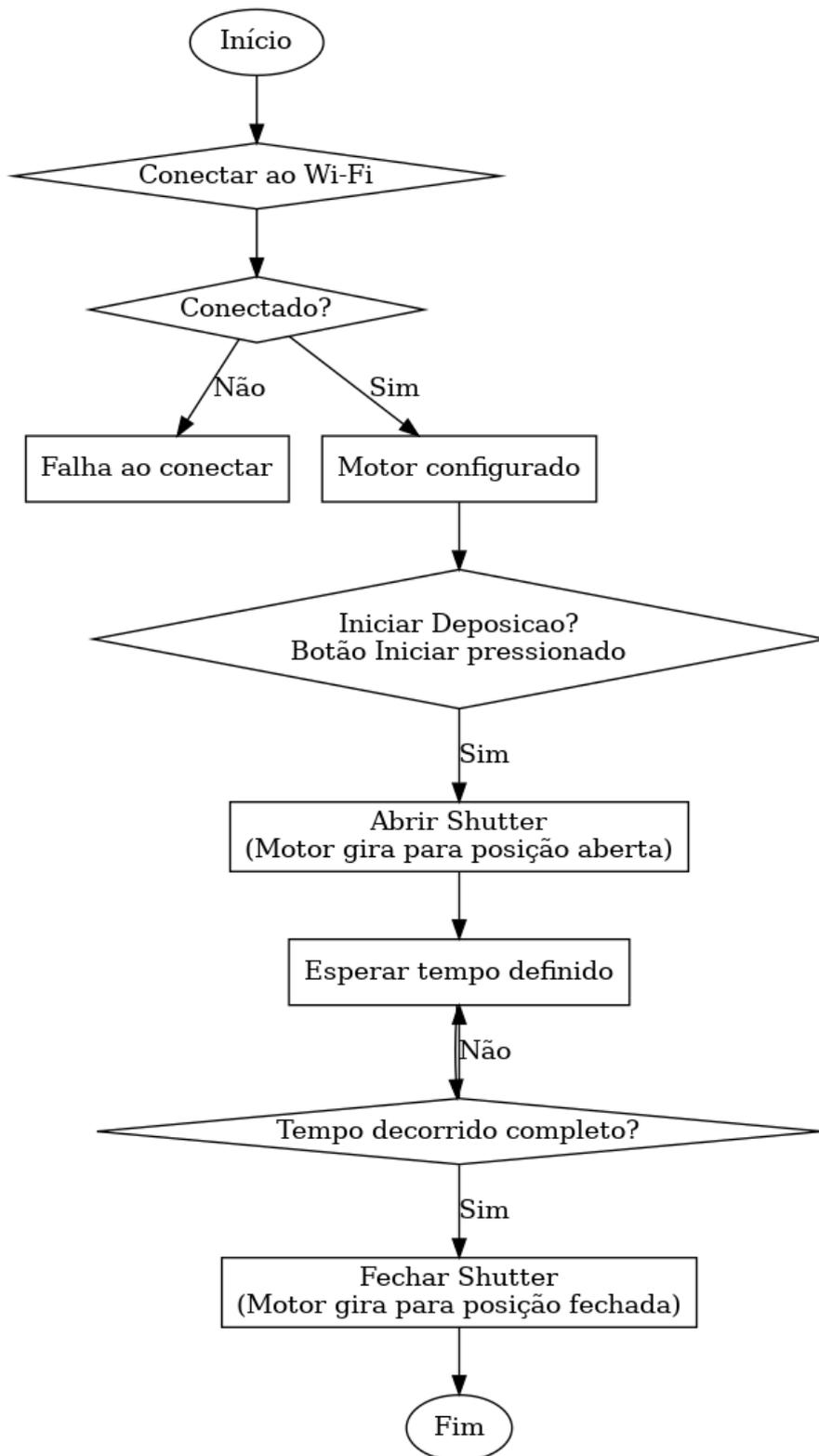


Figura 13 Servidor web de interface gráfica simples com botões para abrir e fechar o motor, além de um campo para definir o tempo de espera.

O fluxograma a seguir define resume a rotina implementada pelo código do Anexo A.



*Figura 14* Fluxograma da rotina que define um tempo de operação para um motor de passo via WebServer utilizando o microcontrolador ESP32. O motor move-se entre duas posições pré-definidas, abrindo e fechando o shutter.

Esse código é mais extenso e detalhado, mas o fluxograma criado se concentra nos principais blocos lógicos do código, tais como:

1. **Conectar ao Wi-Fi.**
2. **Configuração do motor de passo.**
3. **Interação via servidor web** (como abrir ou fechar o motor e iniciar movimento com tempo de espera).
4. **Execução de tarefas do agendador.**
5. **Fechamento do servidor e retorno à posição inicial.**

A instrumentação e o código, mostraram-se adequados à tarefa. Além disso, essa primeira solução serviu para testarmos software e hardware que foram usados no restante do projeto.

A automação do controle de abertura e fechamento do *shutter* elimina a interferência manual e possibilita um controle mais preciso do tempo de deposição, que é diretamente proporcional à concentração do material depositado na amostra. Essa melhoria reduz a variabilidade entre amostras e efeitos dos erros humanos, garantindo maior reprodutibilidade dos resultados e permitindo um processo mais confiável e eficiente no laboratório. Mais à frente apresentaremos uma proposta de integração do *shutter* ao porta-amostra.

#### ➤ Integração 1: Segurança da Turbo ao Ligar

Um sistema de integração foi proposto para garantir que a bomba turbo só seja acionada sob condições seguras e desativadas se essas condições deixarem de ser satisfeitas. Além disso, a rotina controla a abertura e fechamento da válvula *plate*, usando sensores e dispositivos integrados via ESP32, usando a Arduino IDE para escrever e compilar os códigos, cujas entradas incluem a posição da *plate*, indicada por 2 sensores de fim de curso (L1 e L2), e as leituras dos dois piranis (V1, na câmara de deposição e V2, entre a turbo e sua auxiliar).

A bomba só pode ser ligada se a *plate* estiver fechada (L1 ativado e L2 desativado) e ambos os piranis indicarem pressão adequada (estado "underange"  $< 1 \times 10^{-3}$  mbar). Também permite o acionamento se a *plate* estiver aberta (L1 desativado e L2 ativado) e a pressão for adequada e o operador fornecer um comando via serial ao microcontrolador.

Nessas condições, um relé R1 é ativado, permitindo a alimentação da eletrônica que controla a turbo. Esse relé permanece ativo até eventual falta de energia ou até que a pressão suba ( $> 1\text{mbar}$ ) e permaneça na faixa por mais de 1 segundos.

Além disso, um relé R2 controla a abertura da *plate*, mas só a libera após um comando humano, via porta serial ou servidor web. Assim, garante-se um começo de deposição seguro.

O fluxograma a seguir implementa as condições descritas para o controle da bomba turbo; o código de referência está no [anexo B.1](#) do texto.

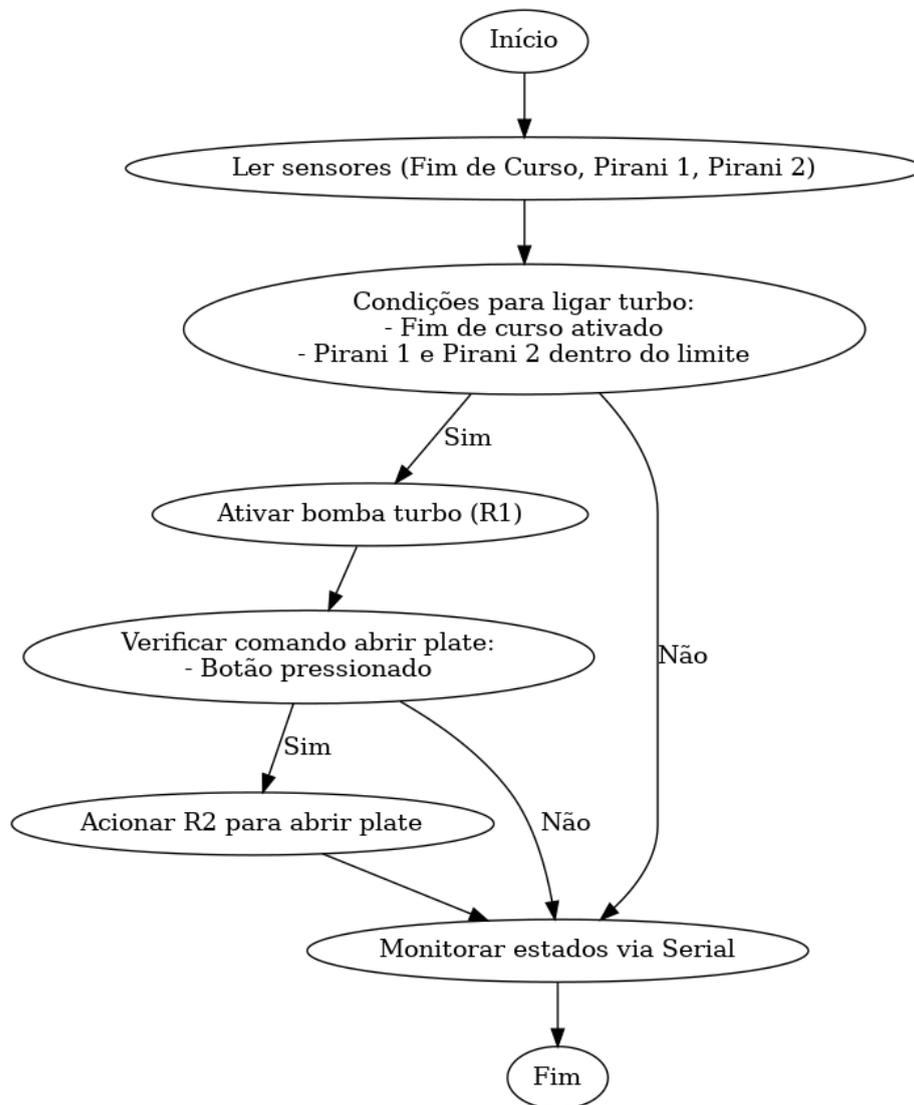


Figura 15 Fluxograma que implementa as condições descritas para o controle da bomba turbo.

A integração dessa parte do sistema melhora o controle do processo de deposição, eliminando a necessidade de verificações manuais e minimizando riscos operacionais. Ao condicionar o acionamento da bomba turbo a parâmetros de segurança automáticos, como a posição da *plate* e a pressão adequada medida pelos piranis, o sistema reduz a chance de erros humanos e garante um ambiente controlado antes da deposição. Essa automação aumenta a confiabilidade e a eficiência do processo, promovendo um controle mais preciso e seguro.

➤ Integração 2: Preparando o sistema para a deposição

Nesta etapa, o sistema é configurado para garantir que as condições adequadas sejam atendidas antes de iniciar o processo de deposição. O controle é baseado na posição da *plate*, na pressão medida, no fluxo monitorado e em comandos humanos para decisões críticas.

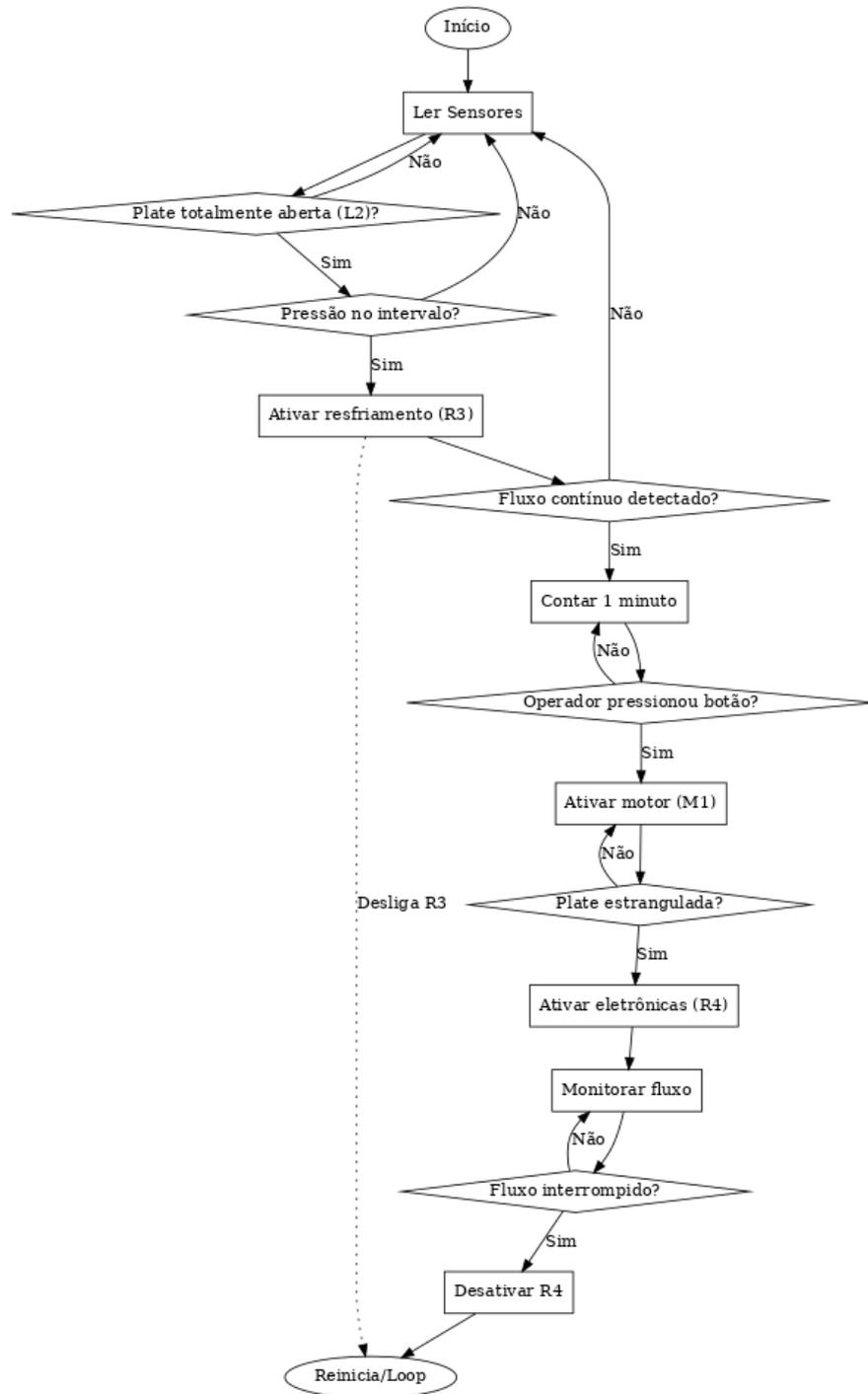
Inicialmente, a posição da *plate* é verificada através do sensor de fim de curso L2, que confirma se a *plate* está completamente aberta. Simultaneamente, a pressão é lida pelo sensor “zoio,” garantindo que os parâmetros estejam dentro do intervalo seguro. Caso essas condições sejam atendidas, o relé R3 é ativado, alimentando o sistema de resfriamento do alvo/canhão, essencial para o controle térmico durante a deposição. Este relé permanece ativo enquanto houver energia.

Com o resfriamento iniciado, o fluxo é monitorado continuamente, a cada segundo. Após um minuto de fluxo estável, o sistema realiza uma nova verificação: lê o estado dos sensores L1 e L2 para confirmar a posição da *plate*, verifica o fluxo, e avalia a posição do motor M1, que controla o limitador de estrangulamento da *plate*. Se a *plate* está totalmente aberta (L2 = HIGH e L1 = LOW), o motor fora da posição de estrangulamento e o fluxo operacional, o sistema solicita a confirmação do operador para continuar o processo.

O operador deve decidir se deseja prosseguir com o estrangulamento da *plate*. Caso a resposta seja negativa, o sistema aguarda novas instruções. Caso o operador autorize e todas as condições permaneçam adequadas, o motor M1 é acionado para mover o limitador até a posição de estrangulamento. Em seguida, o sistema verifica se a *plate* está efetivamente estrangulada (sinais L2 e L3 em LOW e posição do motor confirmada). Após essa validação, o sistema notifica o operador por meio de LEDs, mensagens ou alertas sonoros e finalmente, o relé R4 é ativado, liberando as eletrônicas necessárias para a deposição, como a fonte do canhão, o *shutter* e o sistema de vibração/rotação. A ativação da fonte permanece manual, mas o funcionamento de R4 é condicionado ao fluxo contínuo, sendo desativado automaticamente caso o fluxo pare. Por outro lado, o relé R3 só será desativado em caso de

falta de energia, garantindo a segurança térmica do sistema. Essa integração promove um controle seguro, automatizado e condicionado às decisões humanas para iniciar o processo de deposição.

O fluxograma a seguir implementa as condições descritas para a preparação do sistema de deposição; o código de referência também está no [anexo B.2](#) do texto.



*Figura 16* Fluxograma que implementa as condições descritas para a preparação do sistema de deposição

A integração descrita do controle do processo de deposição combina verificações automatizadas de condições críticas, como a posição da *plate*, pressão, fluxo e estado do motor, com decisões pontuais do operador. Essa automação reduz a interferência manual, assegurando que a deposição só comece quando todos os parâmetros estiverem dentro das condições ideais. Além disso, a ativação de sistemas essenciais, como o resfriamento e a eletrônica de deposição, está condicionada a verificações contínuas, proporcionando maior segurança e eficiência. Assim, o processo torna-se mais confiável, minimizando erros humanos e aumentando a precisão no controle da deposição.

### ETAPA 3:

#### **Projeto, implementação e teste de instrumentação para a homogeneização das amostras em pó durante a deposição.**

Após analisar os efeitos dos parâmetros de deposição, concluiu-se que a interferência do campo magnético sobre o plasma era um dos fatores que precisam ser corrigidos. Essa interferência está associada ao campo alternado e responsável pela vibração do porta-amostra. Diante disso, e das interessantes abordagens reportadas na literatura para outro problema relacionado ao porta-amostra - a homogeneização dos pós por movimento -, a Etapa 3 do projeto focou no desenvolvimento de um novo protótipo de porta-amostra com rotação mecânica, visando sua futura implementação pelo grupo de pesquisa do laboratório.

Utilizando o software “Fusion 360”, a qual os alunos da UFRGS tem acesso gratuito, com ajuda de um colega, aluno de mestrado em design de produto, Lucas Einsfeld, foram feitos desenhos do novo sistema de porta amostra, para poder ser realizada a impressão 3D do protótipo, conforme as imagens renderizadas abaixo.



*Figura 17:* Render do sistema porta amostra fechado.



*Figura 18:* Render do sistema porta amostra aberto visto de cima.



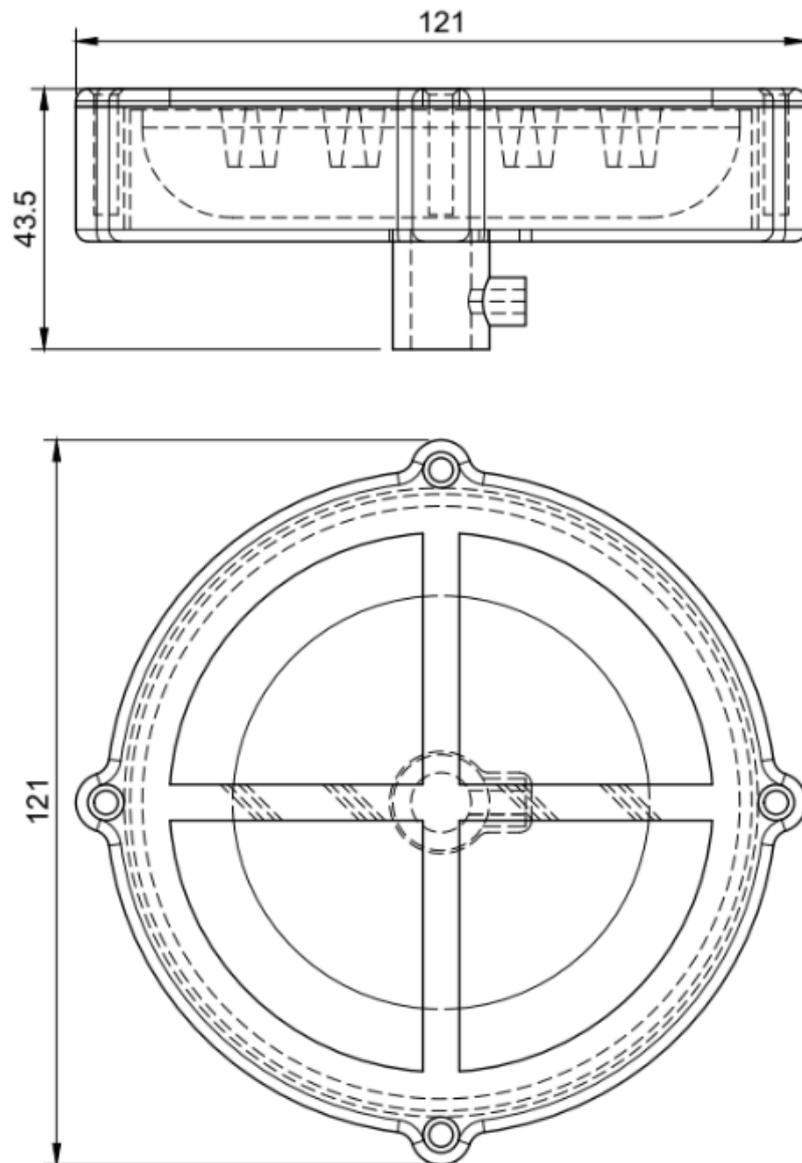
*Figura 19:* Render do sistema porta amostra aberto visto de lado.

O novo sistema possui um recipiente interno, projetado como um cilindro com exterior liso e interior abaulado para evitar o acúmulo de pó nas bordas. A principal inovação deste protótipo é o método de homogeneização, que agora é mecânico, eliminando a necessidade de vibração do sistema. Durante a deposição, o porta-amostra gira continuamente, garantindo uma mistura mais eficiente.

A "tampa" do sistema possui um formato vazado em cruz, com pás fixadas ao seu corpo, que auxiliam na homogeneização do pó. Enquanto o porta-amostra gira, a tampa permanece fixa ao cilindro externo, que é projetado para sua fixação, de modo que apenas a parte interna do sistema se movimenta.

Há uma folga entre a tampa e o porta-amostra, bem como entre o cilindro externo e o porta-amostra, evitando que a tampa e o cilindro externo girem junto com o porta-amostra. Na parte inferior do porta-amostra, um pequeno cilindro vazado permite o encaixe do eixo de rotação. Além disso, foi adicionado um suporte lateral, semelhante a um "castelinho", para a instalação de um parafuso, caso seja necessário evitar o deslizamento do eixo e garantir a rotação correta do porta-amostra.

A seguir, são apresentados os desenhos técnicos (DTs) com as principais dimensões de cada componente.



*Figura 20: DT do sistema montado.*

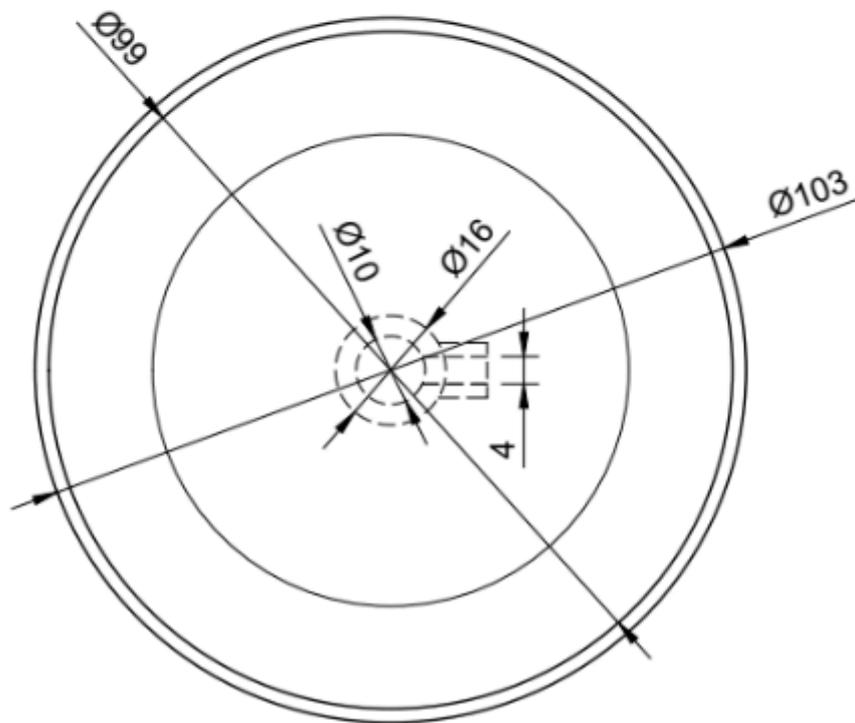
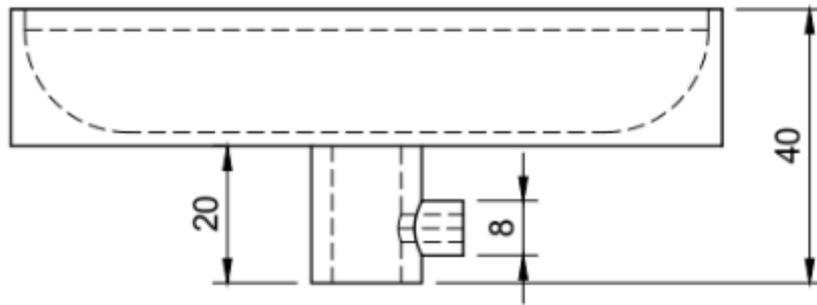


Figura 21: DT do porta amostra.

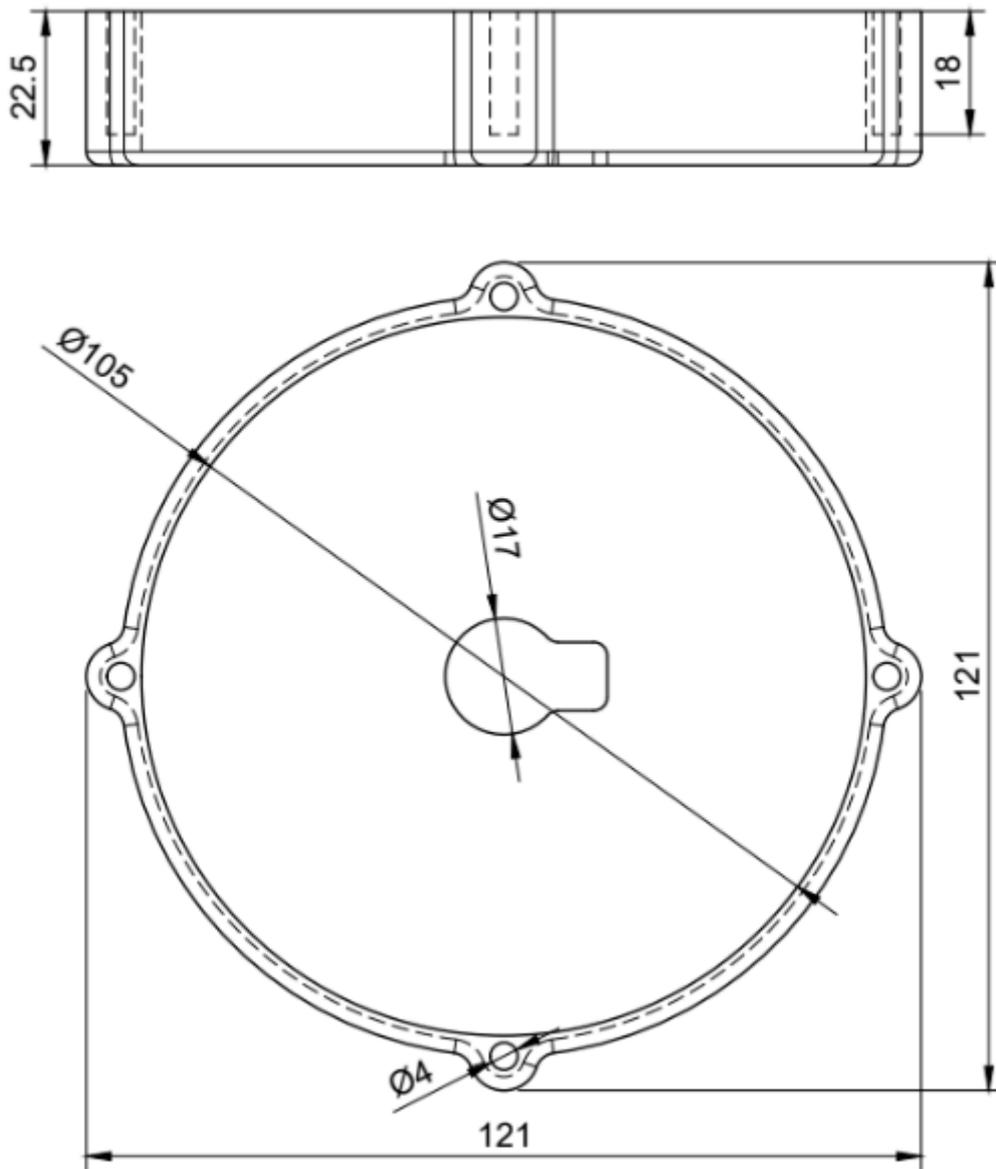


Figura 22: DT do cilindro externo para fixação da tampa.

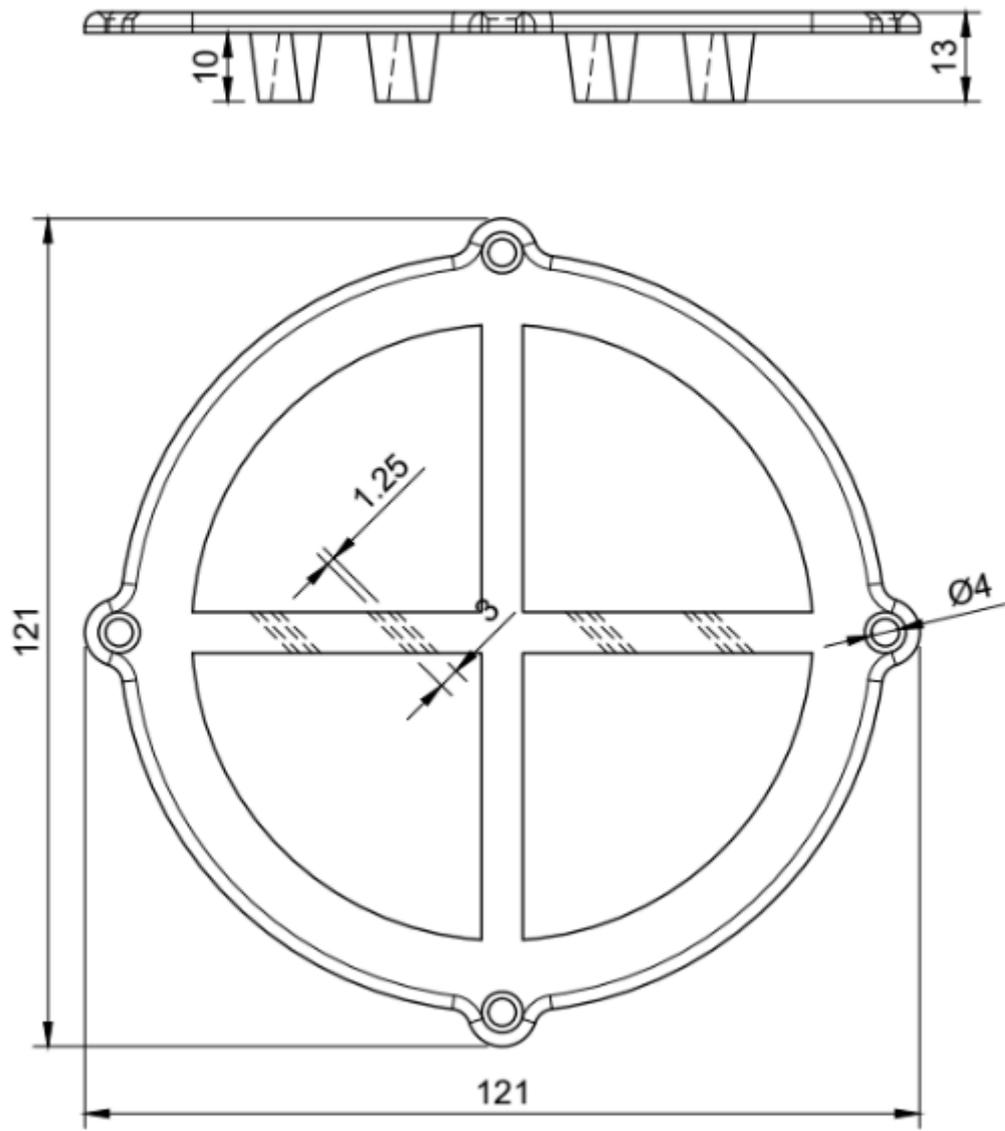
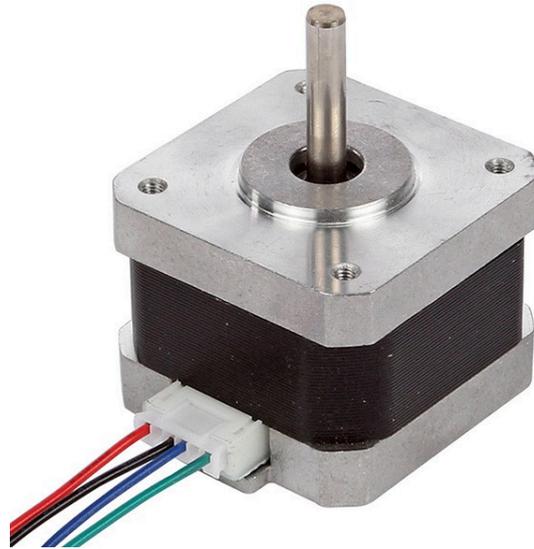


Figura 23: DT da tampa.

A etapa seguinte foi projetar o mecanismo de rotação do porta-amostra, o hardware. O motor NEMA 17 foi escolhido por sua maior potência, segundo seu datasheet [21], servindo de ponto de partida para a seleção dos demais componentes de hardware.



*Figura 24: Motor NEMA 17.*

Para viabilizar o sistema de rotação de forma eficiente, foi necessário um driver compatível com o motor NEMA 17. O Driver DRV8825 foi a opção ideal, pois suporta correntes elevadas e é dedicado a motores de passo, oferecendo uma ampla faixa de tensão e corrente. Além disso, o DRV8825 conta com proteção contra sobrecorrente e possui diversos modos de operação integrados. O módulo DRV8825 opera com uma tensão de operação entre 8,25V e 45V e corrente máxima de 2,5A, quando operando a 24V e temperatura de 25°C, segundo seu dataheet [17]. O driver também possui um potenciômetro embutido, facilitando o processo de ajuste de tensão para cálculo da corrente que irá alimentar o motor.

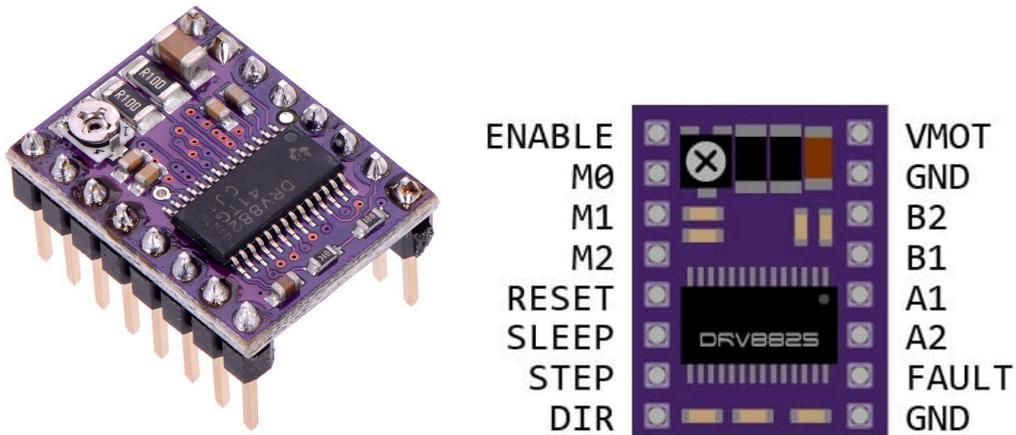


Figura 25: Driver DRV8825.

Além disso, foi utilizada uma placa *keystudio CNC Shield V4*, usada como uma placa de controle para máquinas de gravação, sendo totalmente compatível com placas de arduino NANO e permite o controle de até 3 motores de passo. [\[18\]\[19\]](#).

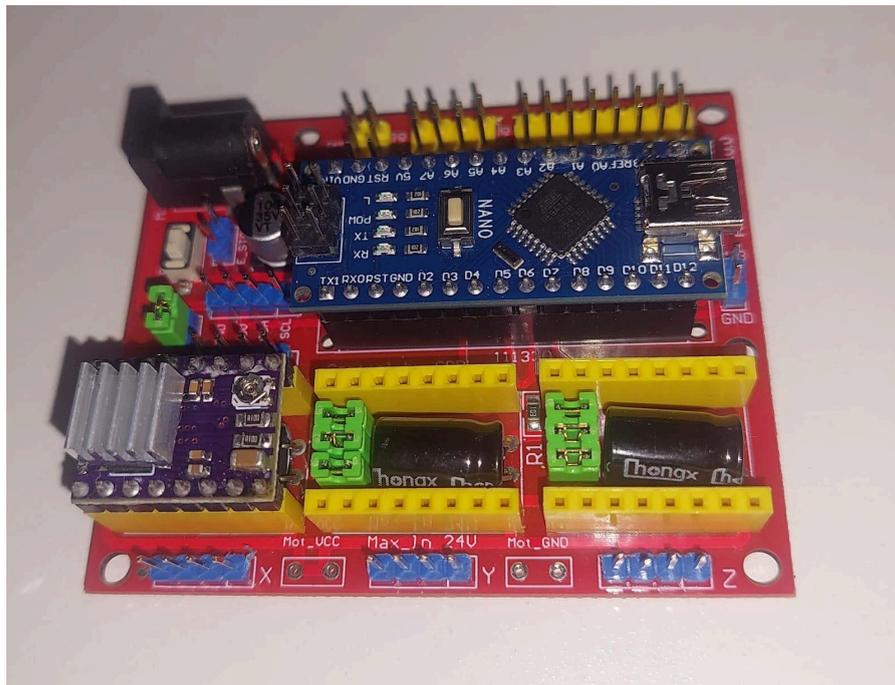


Figura 26 Placa *keystudio CNC Shield V4*, conectada com arduino NANO e driver DRV8825.

Inicialmente, escrevemos um código, carregado num microcontrolador Arduino Nano. Utilizamos ainda: Driver DRV8825, motor de passo NEMA 17 e um Keystudio CNC Shield

V4 para fazer o motor girar a 30 rpm [20]. Pode-se verificar o código no anexo C e o fluxograma da sua lógica a seguir. Esse código pode ser facilmente estendido para permitir a integração com sensores e atuadores. Por exemplo, pode-se integrar facilmente um segundo motor, usado para controlar o shutter, permitindo o controle automatizado e integrado do tempo de deposição e do tempo de rotação do porta-amostra.

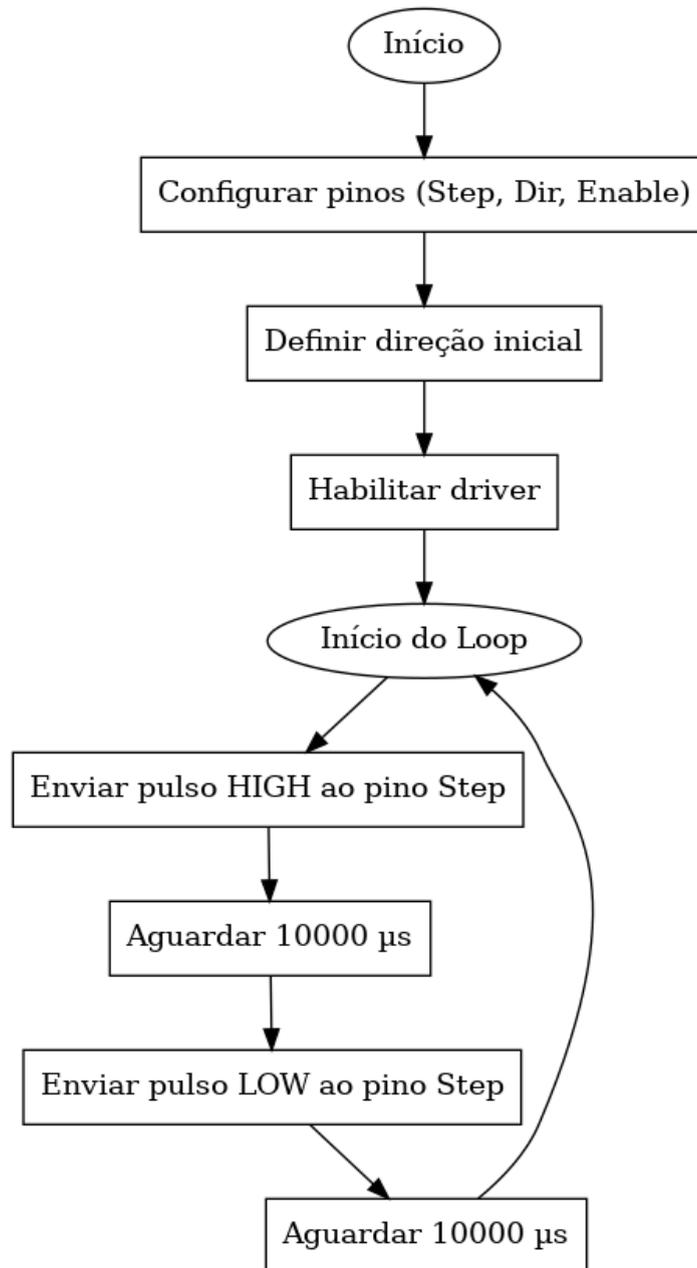


Figura 27 Fluxograma que implementa as condições para fazer o motor girar a 30 rpm.

O desenvolvimento do novo porta-amostra com rotação mecânica representa um avanço significativo no processo de deposição, ao reduzir os efeitos indesejados do campo magnético sobre o plasma, eliminando as vibrações atualmente empregadas para promover a homogeneidade do pó. Além disso, a nova instrumentação reduzirá perdas de material e aumentará a segurança do sistema, uma vez que minimiza a dispersão de partículas de pó no interior da câmara durante a deposição. Com essa melhoria, espera-se alcançar um controle mais preciso do processo, resultando em amostras mais uniformes e de maior qualidade, superando as limitações impostas pelo atual sistema vibratório.

## CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS

Neste trabalho foram desenvolvidas soluções de engenharia baseadas na atualização da instrumentação e na automação e integração do processo de deposição por *magnetron sputtering* atualmente empregados no NanoREAP. Buscou-se melhorar o controle e a reprodutibilidade do processo de deposição de cocatalisadores metálicos em amostras semicondutoras na forma de pó, aumentar a segurança e a vida útil da instrumentação e a qualidade das amostras produzidas.

A automação de processos simplifica e agiliza os processos de deposição por *magnetron sputtering*, garantindo um controle mais preciso e consistente, além de reduzir a necessidade de intervenção manual. Isso não apenas possibilita a realização de experimentos de forma mais eficiente e segura, mas também permite uma maior reprodutibilidade e adaptabilidade às exigências do laboratório, contribuindo significativamente para o avanço da pesquisa e desenvolvimento de novos materiais voltados aplicados às energias renováveis.

Além disso, foi projetada uma instrumentação alternativa para contornar as limitações relacionadas ao sistema de homogeneização dos pós durante as deposições. O protótipo do novo sistema de porta-amostra foi montado e testado, mostrando-se promissor. A implementação deste novo sistema tornará as amostras mais reprodutíveis e os resultados mais consistentes uma vez que elimina a necessidade de que o sistema opere em frequências de ressonância difíceis de encontrar e de repetir durante as deposições. Além disso, o sistema proposto elimina a interferência causada pelo campo magnético gerado pela corrente alternada que percorre a bobina e pela vibração do ímã, atualmente utilizados no sistema. Por fim, o novo porta-amostra representa uma maior segurança para o sistema, especialmente para as bombas de vácuo e sensores de pressão, visto que o movimento mais suave do pó minimiza sua dispersão no interior da câmara durante a deposição.

Para um possível seguimento do projeto pelos integrantes do laboratório, o novo porta amostra é integrável ao restante da instrumentação, o que aumenta a segurança e o controle. Enquanto o sistema atual envolve a definição manual e pouco estável dos parâmetros essenciais para seu funcionamento (freq e amp do sinal), a velocidade do motor de passo é selecionada na definição dos parâmetros de deposição e mantida constante ao longo do processo.

Por fim, além das implicações para o sistema específico estudado aqui, espera-se que a metodologia reportada nesse texto possa ser modificada, melhorada e aplicada no controle e otimização de outros processos fundamentais para a pesquisa em materiais e áreas afins.

## REFERÊNCIAS

- [1] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, E. Produção e Consumo de Hidrogênio em Refinarias no Brasil. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-667/NT-EPE-DPG-SDB-2022-01%20-%20Hidrog%C3%AAnio%20em%20Refinarias.pdf>>.
- [2] CNN, D. O que é hidrogênio verde e como ele pode ser uma fonte de energia renovável? Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/economia/macroeconomia/entenda-como-o-hidrogenio-verde-pode-ser-usado-como-fonte-de-energia-renovavel/>>.
- [3] KUMAR, M., Meena, B., Subramanyam, P. *et al.* Recent trends in photoelectrochemical water splitting: the role of cocatalysts. *NPG Asia Mater* 14, 88 (2022). Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41427-022-00436-x>>.
- [4] HUANG, D. *et al.* Wittichenite semiconductor of Cu<sub>3</sub>BiS<sub>3</sub> films for efficient hydrogen evolution from solar driven photoelectrochemical water splitting. *Nature Communications*, v. 12, n. 1, 18 jun. 2021. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41467-021-24060-5>>.
- [5] FUJISHIMA, A.; ZHANG, X.; TRYK, D. TiO<sub>2</sub> photocatalysis and related surface phenomena. *Surface Science Reports*, v. 63, n. 12, p. 515–582, 15 dez. 2008. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167572908000757?via%3Dihub>>.
- [6] ABERNAREGGI, M. *et al.* Cu and Pt clusters deposition on TiO<sub>2</sub> powders by DC magnetron sputtering for photocatalytic hydrogen production. *Catalysis Today*, v. 326, p. 15–21, 5 jul. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586118309647?via%3Dihub>>
- [7] ZHANG, Y. *et al.* Magnetron-sputtering fabrication of noble metal nanodots coated TiO<sub>2</sub> nanoparticles with enhanced photocatalytic performance. *Materials & Design*, v. 125, p. 94–99, 1 abr. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127517303398?via%3Dihub>>

[8] ZHANG, Y. et al. Magnetron-sputtering fabrication of noble metal nanodots coated TiO<sub>2</sub> nanoparticles with enhanced photocatalytic performance. *Materials & Design*, v. 125, p. 94–99, 1 abr. 2017.

Disponível em:

<[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127517303398?ref=pdf\\_download&fr=RR-2&rr=8ebb79d97b376282](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127517303398?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8ebb79d97b376282)>

[9] DOS, C. Pulverização catódica. Disponível em:

<[https://pt.wikipedia.org/wiki/Pulveriza%C3%A7%C3%A3o\\_cat%C3%B3dica](https://pt.wikipedia.org/wiki/Pulveriza%C3%A7%C3%A3o_cat%C3%B3dica)>.

[10] HUANG, H. et al. Controlling Film Thickness Distribution by Magnetron Sputtering with Rotation and Revolution. *Coatings*, v. 11, n. 5, p. 599–599, 19 maio 2021.

Disponível em:

<<https://www.mdpi.com/2079-6412/11/5/599#B9-coatings-11-00599>>

[11] HATAKEYAMA, Y.; ONISHI, K.; NISHIKAWA, K. Effects of sputtering conditions on formation of gold nanoparticles in sputter deposition technique. *RSC Advances*, v. 1, n. 9, p. 1815–1815, 1 jan. 2011.

Disponível em:

<<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2011/ra/c1ra00688f>>

[12] MANUAL. Manual de Deposição Sputtering V1.pdf. Disponível em: <[https://drive.google.com/file/d/16V8e91OO73I9EtyAD\\_kmld1SYr9idqWA/view](https://drive.google.com/file/d/16V8e91OO73I9EtyAD_kmld1SYr9idqWA/view)>. Acesso em: 2 dez. 2024.

[13] KOHLRAUSCH, E. C. et al. A high-throughput, solvent free method for dispersing metal atoms directly onto supports. *Journal of Materials Chemistry A*, v. 9, n. 47, p. 26676–26679, 1 jan. 2021.

Disponível em: <<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2021/ta/d1ta08372d>>

[14] Integração de sistemas na Indústria 4.0: tipos e dicas. Disponível em: <<https://www.zendesk.com.br/blog/integracao-de-sistemas-na-industria-4-0/>>.

[15] Labview – Didatech. Disponível em: <<https://didatech.com.br/labview/>>. Acesso em: 2 dez. 2024.

[16] MATLAB: O que é e para que serve - OPENCADD. Disponível em: <<https://www.opencadd.com.br/blog/o-que-e-matlab>>.

[17] DRV8825 Stepper Motor Controller IC. Disponível em:

<<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8825.pdf?ts=1731863013588>>.

[18] Arduino NANO +CNC Shield V4.0+A4988 User Manual Location: Home» Arduino Parts & Projects» Arduino NANO +CNC Shield V4.0+A4988 User Manual. [s.l: s.n.].

Disponível em:

<<https://udvabony.com/wp-content/uploads/2019/04/ArduinoNANOCNC-Shield-V4A4988%E5%AE%89%E8%A3%85%E6%89%8B%E5%86%8C.pdf>>. Acesso em: 2 dez. 2024.

[19] Ks0152 keystudio A4988 3D printer stepper motor driver CNC shield V4 - Keystudio Wiki. Disponível em:

<[https://wiki.keystudio.com/Ks0152\\_keystudio\\_A4988\\_3D\\_printer\\_stepper\\_motor\\_driver\\_CNC\\_shield\\_V4](https://wiki.keystudio.com/Ks0152_keystudio_A4988_3D_printer_stepper_motor_driver_CNC_shield_V4)>. Acesso em: 2 dez. 2024.

[20] How to Control Stepper Motor with DRV8825 Driver & Arduino. Disponível em:

<<https://how2electronics.com/control-stepper-motor-with-drv8825-driver-arduino/>>.

[21] Handson Technology Data Specs 17HS4401S 1.7A Torque:43N.cm Stepper Motor. [s.l: s.n.]. Disponível em:

<[https://eletrodex.org/eletrodex/Loja\\_Tray/Datasheets/Montagem/Comando-Controle/Motore/s/17HS4401S.pdf](https://eletrodex.org/eletrodex/Loja_Tray/Datasheets/Montagem/Comando-Controle/Motore/s/17HS4401S.pdf)>. Acesso em: 2 dez. 2024.

[22] PATEL, K. et al. Heating of liquid substrate by low-pressure sputtering plasma. Journal of Applied Physics, v. 131, n. 20, 24 maio 2022.

Disponível em:

<<https://pubs.aip.org/aip/jap/article-abstract/131/20/203301/2836880/Heating-of-liquid-substrate-by-low-pressure?redirectedFrom=fulltext>>

[23] MAI THANH NGUYEN; PICHAYA PATTANASATTAYAVONG; YONEZAWA, T. Detailed discussion on structure of alloy nanoparticles synthesized by magnetron sputter deposition onto liquid poly(ethylene glycol). Nanoscale Advances, 1 jan. 2024.

Disponível em: <<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2024/na/d3na00998j>>

[24] MEISCHEIN, M.; WANG, X.; LUDWIG, A. Unraveling the Formation Mechanism of Nanoparticles Sputtered in Ionic Liquid. The Journal of Physical Chemistry C, v. 125, n. 43, p. 24229–24239, 22 out. 2021.

Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jpcc.1c07621>>

[25] VAVASSORI, D. et al. Role of magnetic field and bias configuration on HiPIMS deposition of W films. Surface and Coatings Technology, v. 458, p. 129343, 18 fev. 2023.

Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897223001184>>

[26] O.K. ALEXEEVA; FATEEV, V. N. Application of the magnetron sputtering for nanostructured electrocatalysts synthesis. International Journal of Hydrogen Energy, v. 41, n. 5, p. 3373–3386, 1 fev. 2016.

Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031991502786X?via%3Dihub>>

[27] BROWN, R. et al. Plasma-Induced Heating Effects on Platinum Nanoparticle Size During Sputter Deposition Synthesis in Polymer and Ionic Liquid Substrates. *Langmuir*, v. 37, n. 29, p. 8821–8828, 13 jul. 2021.

Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.langmuir.1c01190>>

[28] PRIEDEMANN, J. L.; THOMPSON, G. B. Conformal coating of powders by magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, v. 436, p. 128242, 16 fev. 2022.

Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897222001633?via%3Dihub>>

[29] LIANG, J. et al. Magnetron sputtering enabled sustainable synthesis of nanomaterials for energy electrocatalysis. *Green Chemistry*, v. 23, n. 8, p. 2834–2867, 1 jan. 2021.

Disponível em: <<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/gc/d0gc03994b>>

[30] SCHMID, G. et al. Optimization of a container design for depositing uniform metal coatings on glass microspheres by magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, v. 205, n. 7, p. 1929–1936, 24 ago. 2010.

Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897210007255?via%3Dihub>>

[31] GONÇALVES, R. V. et al. Catalytic abatement of CO over highly stable Pt supported on Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanotubes. *Catalysis Communications*, v. 48, p. 50–54, 31 jan. 2014.

Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566736714000302?via%3Dihub>>

[32] MATSUBARA, K. et al. Photocatalytic water splitting over Pt-loaded TiO<sub>2</sub> (Pt/TiO<sub>2</sub>) catalysts prepared by the polygonal barrel-sputtering method. *Applied Catalysis B: Environmental*, v. 254, p. 7–14, out. 2019.

Disponível em:

<[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926337319303972?ref=pdf\\_download&fr=RR-2&rr=8ebb93731cb36b12](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926337319303972?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8ebb93731cb36b12)>

[33] WADGE, M. D. et al. Tailoring absorptivity of highly reflective Ag powders by pulsed-direct current magnetron sputtering for additive manufacturing processes. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 317, p. 117985–117985, 1 ago. 2023.

Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013623001309?via%3Dihub>>

## ANEXO A:

Código que define um tempo de operação para um motor de passo via WebServer utilizando o microcontrolador ESP32. Ao selecionar iniciar, o motor gira para abrir *shutter*, mantém a posição por um tempo definido e depois a fecha:

---

```
#include <WiFi.h>
#include <ESPAsyncWebServer.h>
#include <Stepper.h>
#include <TaskScheduler.h>
// Configuração da Rede Wi-Fi
const char *ssid = "";
const char *password = "";
// Configuração do motor de passo
#define STEPS_PER_REVOLUTION 360
#define IN1 21
#define IN2 19
#define IN3 18
#define IN4 5
// Criando o motor de passo
Stepper myStepper(STEPS_PER_REVOLUTION, IN1, IN3, IN2, IN4);
// Configuração do servidor web
AsyncWebServer server(80);
// Classe para controle do motor
class MotorController {
public:
    int openPosition = STEPS_PER_REVOLUTION; //Definir o número de passos até pos aberta
    int closedPosition = 0; // Posição fechada é definida como zero
    int currentPosition = 0; // Posição atual do motor
    bool isWaiting = false;
    unsigned long waitTime = 1000;
    unsigned long startTime = 0;
    unsigned long elapsedTime = 0; // Tempo decorrido para mostrar na interface
    void setupMotor() {
        myStepper.setSpeed(100);
        setInitialPositionAsClosed(); // Define a posição inicial como fechado
    }
}
```

```

// Define a posição atual como "fechado" sem mover o motor
void setInitialPositionAsClosed() {
    Serial.println("Definindo a posição inicial como Fechado");
    currentPosition = closedPosition; // Define a posição inicial como fechada
    Serial.println("Posição atual definida como Fechado");
}

void moveToClosedPosition() {
    Serial.println("Movendo para a posição Fechado");
    moveToPosition(closedPosition);
}

void moveToOpenPosition() {
    Serial.println("Movendo para a posição Aberto");
    moveToPosition(openPosition);
}

void moveToPosition(int targetPosition) {
    int stepsToMove = targetPosition - currentPosition;
    myStepper.step(stepsToMove);
    currentPosition = targetPosition;
    Serial.print("Posição Atual: ");
    Serial.println(currentPosition);
}

void startMovementWithDelay(unsigned long delay) {
    waitTime = constrain(delay, 1000, 3600000);
    Serial.println("Tempo de espera definido para: " + String(waitTime) + " ms");
    Serial.println("Movendo para a posição Aberto");
    moveToOpenPosition();
    startTime = millis();
    elapsedTime = 0; // Reseta o tempo decorrido
    isWaiting = true;
}

void checkMovementCompletion() {
    if (isWaiting) {
        elapsedTime = millis() - startTime;
        if (elapsedTime >= waitTime) {

```

```

Serial.println("Movendo para a posição Fechado");
moveToClosedPosition();
isWaiting = false;
}
}
}

// Rotina para mover o motor para a posição fechada ao desligar o servidor web
void moveToClosedOnServerShutdown() {
Serial.println("Servidor web desligado. Movendo para a posição Fechado.");
moveToClosedPosition();
}

// Função para obter o estado do motor como string para o indicador
String getPositionStatus() {
return currentPosition == closedPosition ? "Fechado" : "Aberto";
}
};

MotorController motorController;

// Função para conectar ao Wi-Fi
void connectToWiFi() {
Serial.print("Conectando a: ");
Serial.println(ssid);
WiFi.mode(WIFI_STA);
WiFi.begin(ssid, password);
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
Serial.print(".");
delay(100);
}
Serial.println("\nConectado ao Wi-Fi!");
Serial.print("Endereço IP: ");
Serial.println(WiFi.localIP());
}

// Tarefas e Scheduler
Scheduler taskScheduler;
Task taskCheckMovement(100, TASK_FOREVER, []() {
motorController.checkMovementCompletion();
}

```

```

});

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  connectToWiFi();
  motorController.setupMotor();

  // Configurações do servidor
  server.on("/", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request) {
    String html = "<html><head>";
    html += "<meta name=\"viewport\" content=\"width=device-width, initial-scale=1.0\">";
    html += "<style>";
    html += "body{font-family:Roboto, sans-serif; text-align:center; background-color:#f9f9f9; margin:0; padding:20px;}";
    html += "h2{color:#333; margin-bottom:10px;}";
    html += ".status-indicators{display:flex; justify-content:center; gap:20px; margin-bottom:20px;}";
    html += ".indicator{width:60px; height:60px; border-radius:50%; display:inline-block;}";
    html += ".closed{background-color:#4CAF50;}";
    html += ".open{background-color:#f44336;}";
    html += ".button{padding:15px 32px; margin:10px; font-size:20px; cursor:pointer; border:none; border-radius:5px; transition:background-color 0.3s;}";
    html += ".button_ON{background-color:#4CAF50; color:white;}";
    html += ".button_OFF{background-color:#f44336; color:white;}";
    html += ".disabled{background-color:gray; color:white; cursor:not-allowed;}";
    html += ".time-display{font-size:18px; margin-top:10px; color:#555;}";
    html += "input[type=number]{padding:10px; margin:10px; font-size:18px; width:150px; border:1px solid #ccc; border-radius:5px;}";
    html += "</style></head><body>";
    html += "<h2>Controle do Motor de Passo</h2>";
    // Indicadores de status
    html += "<div class=\"status-indicators\">";
    html += "<div class=\"indicator \" + String(motorController.currentPosition == motorController.closedPosition ? \"closed\" : \"open\") + \"\"></div>";
    html += "<p>Status: <strong>" + motorController.getPositionStatus() + "</strong></p>";
    html += "</div>";

    // Botão Abrir
    if (motorController.currentPosition == motorController.closedPosition) {
      html += "<p><a href=\"/abrir\"><button class=\"button button_ON\">ABRIR AGORA</button></a></p>";
    } else {

```

```

    html += "<p><button class=\"button disabled\" disabled>ABRIR AGORA</button></p>";
}
// Botão Fechar
if (motorController.currentPosition == motorController.openPosition) {
    html += "<p><a href=\"/fechar\"><button class=\"button button_OFF\">FECHAR
AGORA</button></a></p>";
} else {
    html += "<p><button class=\"button disabled\" disabled>FECHAR AGORA</button></p>";
}

// Controle com Tempo de Espera
html += "<h3>Controle com Tempo de Espera</h3>";
html += "<form action=\"/movimentar\" method=\"GET\">";
if (motorController.currentPosition == motorController.closedPosition && !motorController.isWaiting) {
    html += "Tempo de espera (ms) (1000 - 3600000): <input type=\"number\" name=\"tempo\" min=\"1000\"
max=\"3600000\" value=\"\" + String(motorController.waitTime) + "\"><br>";
    html += "<button type=\"submit\" class=\"button button_ON\">Iniciar Movimento</button>";
} else {
    html += "Tempo de espera (ms) (1000 - 3600000): <input type=\"number\" name=\"tempo\" min=\"1000\"
max=\"3600000\" value=\"\" + String(motorController.waitTime) + "\" disabled><br>";
    html += "<button class=\"button disabled\" disabled>Iniciar Movimento</button>";
}
// Mostrar tempo decorrido
if (motorController.isWaiting) {
    html += "<p class=\"time-display\">Tempo decorrido: <span id=\"elapsedTime\">0</span> segundos</p>";
    html += "<script>";
    html += "let startTime = Date.now() - " + String(motorController.elapsedTime) + " ";
    html += "let waitTime = " + String(motorController.waitTime) + " ";
    html += "function updateElapsedTime() {";
    html += "let now = Date.now();";
    html += "let elapsedTime = Math.floor((now - startTime) / 1000); // Tempo em segundos";
    html += "document.getElementById('elapsedTime').innerText = elapsedTime;";
    html += "if (elapsedTime * 1000 < waitTime) {";
    html += "requestAnimationFrame(updateElapsedTime); // Atualiza em tempo real";
    html += "}}";
    html += "updateElapsedTime()";
    html += "</script>";
}
html += "</form>";
html += "</body></html>";

```

```

    request->send(200, "text/html", html);
});
// controle
server.on("/abrir", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request) {
    motorController.moveToOpenPosition();
    request->redirect("/");
});
server.on("/fechar", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request) {
    motorController.moveToClosedPosition();
    request->redirect("/");
});
server.on("/movimentar", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request) {
    if (request->hasParam("tempo")) {
        unsigned long delay = request->getParam("tempo")->value().toInt();
        motorController.startMovementWithDelay(delay);
    }
    request->redirect("/");
});
server.begin();
// Adiciona a tarefa de verificação do movimento ao scheduler
taskScheduler.addTask(taskCheckMovement);
taskCheckMovement.enable();
}
// Função para mover o motor para a posição fechada quando o servidor web for desligado
void onServerShutdown() {
    motorController.moveToClosedOnServerShutdown();
}
void loop() {
    taskScheduler.execute();
}
// Função para desligar o servidor web e mover o motor para fechado
void shutdownServer() {
    onServerShutdown(); // Executa a rotina de retorno ao fechado
    server.end();      // Desliga o servidor web
}

```

---

## ANEXO B:

1. Segue o código para Arduino Nano que implementa as condições descritas para o controle da bomba turbo:

---

```
// Definição de pinos
const int sensorFimDeCurso = 2; // Pino do sensor de fim de curso (L1)
const int pirani1 = A0; // Pino do sensor de pressão 1 (V1)
const int pirani2 = A1; // Pino do sensor de pressão 2 (V2)
const int releR1 = 8; // Pino do relé R1 (ligar turbo)
const int releR2 = 9; // Pino do relé R2 (solenoide da plate)
const int botaoAbrirPlate = 3; // Pino do botão físico para abrir a plate

// Variáveis de estado
bool turboAtivada = false; // Estado da bomba turbo
bool plateAberta = false; // Estado da plate

// Valores de tensão que indicam "underange"
const float underangeMin = 0.1; // Valor mínimo (ajustar conforme necessário)
const float underangeMax = 0.5; // Valor máximo (ajustar conforme necessário)

// Configuração inicial
void setup() {
  pinMode(sensorFimDeCurso, INPUT);
  pinMode(releR1, OUTPUT);
  pinMode(releR2, OUTPUT);
  pinMode(botaoAbrirPlate, INPUT_PULLUP);

  digitalWrite(releR1, LOW); // Desativa R1 inicialmente
  digitalWrite(releR2, LOW); // Desativa R2 inicialmente

  Serial.begin(9600); // Comunicação serial para monitoramento
}
```

```

// Função principal
void loop() {
  // Leituras dos sensores
  bool fimDeCursoAtivado = digitalRead(sensorFimDeCurso);
  float leituraV1 = analogRead(pirani1) * (5.0 / 1023.0);
  float leituraV2 = analogRead(pirani2) * (5.0 / 1023.0);

  // Verifica condições de segurança para ligar a turbo
  if (fimDeCursoAtivado &&
      leituraV1 >= underangeMin && leituraV1 <= underangeMax &&
      leituraV2 >= underangeMin && leituraV2 <= underangeMax) {
    digitalWrite(releR1, HIGH); // Libera o relé R1 para ligar a turbo
    turboAtivada = true;
  }

  // Verifica comando para abrir a plate
  if (turboAtivada && !plateAberta && digitalRead(botaoAbrirPlate) == LOW) {
    digitalWrite(releR2, HIGH); // Libera o relé R2 para abrir a plate
    plateAberta = true;
    delay(500);          // Anti-rebounce para o botão
  }

  // Monitoramento via Serial
  Serial.print("Fim de curso: ");
  Serial.println(fimDeCursoAtivado ? "Ativado" : "Desativado");
  Serial.print("Pirani 1: ");
  Serial.println(leituraV1);
  Serial.print("Pirani 2: ");
  Serial.println(leituraV2);
  Serial.print("Turbo Ativada: ");
  Serial.println(turboAtivada ? "Sim" : "Não");
  Serial.print("Plate Aberta: ");
  Serial.println(plateAberta ? "Sim" : "Não");
  Serial.println("-----");
}

```

```
delay(100); // Pequena pausa para evitar leituras excessivas
}
```

---

2. Segue um programa para Arduino Nano que implementa as condições descritas para a preparação do sistema de deposição:
- 

```
// Definição de pinos
const int sensorL1 = 2;    // Sensor fim de curso L1 (plate aberta)
const int sensorL2 = 3;    // Sensor fim de curso L2 (plate totalmente aberta)
const int sensorL3 = 4;    // Sensor fim de curso adicional (verificação do estrangulamento)
const int sensorFluxo = 5; // Sensor de fluxo (fluxo contínuo)
const int sensorPressao = A0; // Sensor de pressão "zoio"
const int motorM1 = 6;     // Motor limitador da plate
const int releR3 = 7;      // Relé R3 (resfriamento)
const int releR4 = 8;      // Relé R4 (eletrônicas de deposição)
const int botaoConfirmacao = 9; // Botão de confirmação manual (abrir/estrangular plate)

// Variáveis de estado
bool resfriamentoAtivado = false;
bool estrangulamentoAtivado = false;

// Parâmetros de operação
const float pressaoMin = 0.1; // Pressão mínima (ajustar conforme necessário)
const float pressaoMax = 0.5; // Pressão máxima (ajustar conforme necessário)
unsigned long tempoFluxo = 0; // Armazena o tempo de início do fluxo contínuo

void setup() {
  pinMode(sensorL1, INPUT);
  pinMode(sensorL2, INPUT);
  pinMode(sensorL3, INPUT);
```

```

pinMode(sensorFluxo, INPUT);
pinMode(motorM1, OUTPUT);
pinMode(releR3, OUTPUT);
pinMode(releR4, OUTPUT);
pinMode(botaoConfirmacao, INPUT_PULLUP);

digitalWrite(releR3, LOW); // R3 desligado inicialmente
digitalWrite(releR4, LOW); // R4 desligado inicialmente

Serial.begin(9600); // Inicializa a comunicação serial
}

void loop() {
  // Leituras dos sensores
  bool plateAbertaL1 = digitalRead(sensorL1) == LOW;
  bool plateAbertaL2 = digitalRead(sensorL2) == HIGH;
  bool fluxo = digitalRead(sensorFluxo) == HIGH;
  float pressao = analogRead(sensorPressao) * (5.0 / 1023.0);

  // Ativa o resfriamento se as condições forem atendidas
  if (plateAbertaL2 && pressao >= pressaoMin && pressao <= pressaoMax &&
!resfriamentoAtivado) {
    digitalWrite(releR3, HIGH);
    resfriamentoAtivado = true;
    Serial.println("Resfriamento ativado.");
  }

  // Monitora fluxo para liberar estrangulamento
  if (resfriamentoAtivado && fluxo) {
    if (tempoFluxo == 0) {
      tempoFluxo = millis(); // Marca o início do fluxo
    } else if (millis() - tempoFluxo >= 60000) { // Após 1 minuto de fluxo contínuo
      if (plateAbertaL1 && plateAbertaL2) {
        Serial.println("Fluxo estável. Aguarde comando do operador.");
      }
    }
  }
}

```

```

if (digitalRead(botaoConfirmacao) == LOW) { // Botão pressionado
  Serial.println("Comando recebido: estrangulamento autorizado.");
  digitalWrite(motorM1, HIGH); // Move o motor para estrangular a plate
  delay(2000); // Simula o tempo de movimento do motor
  digitalWrite(motorM1, LOW);

  // Verifica se o estrangulamento foi concluído
  if (digitalRead(sensorL2) == LOW && digitalRead(sensorL3) == LOW) {
    estrangulamentoAtivado = true;
    Serial.println("Plate estrangulada.");
    digitalWrite(releR4, HIGH); // Libera as eletrônicas de deposição
    Serial.println("Relé R4 ativado. Eletrônicas liberadas.");
  }
  } else {
    Serial.println("Comando não autorizado. Aguardando.");
  }
}
} else {
  tempoFluxo = 0; // Reseta o tempo se o fluxo não for contínuo
}

// Condições para desativar R4
if (estrangulamentoAtivado && !fluxo) {
  digitalWrite(releR4, LOW);
  Serial.println("Relé R4 desativado. Fluxo interrompido.");
  estrangulamentoAtivado = false;
}

delay(100); // Pequeno atraso para evitar leituras excessivas
}

```

---

## ANEXO C

Código para fazer o motor girar a 30 rpm:

---

```
// Definindo os pinos para o motor de passos
const int stepPin = 2; // Pino de passo (Step)
const int dirPin = 5; // Pino de direção (Dir)
const int enablePin = 8; // Pino de habilitar (Enable)

// Velocidade desejada em RPM
const float targetRPM = 30.0;
// Passos por rotação do motor NEMA 17
const int stepsPerRevolution = 200;
// Cálculo dos passos por segundo para alcançar a velocidade desejada
const float stepsPerSecond = (targetRPM / 60.0) * stepsPerRevolution;
// Cálculo do tempo de atraso entre cada passo em microsegundos
const int delayMicrosecondsBetweenSteps = 1000000 / stepsPerSecond;

void setup() {
  // Configurando os pinos
  pinMode(stepPin, OUTPUT);
  pinMode(dirPin, OUTPUT);
  pinMode(enablePin, OUTPUT);

  // Definindo a direção inicial do motor (HIGH ou LOW)
  digitalWrite(dirPin, HIGH);
  // Habilitando o driver
  digitalWrite(enablePin, LOW);
}

void loop() {
  // Envia pulsos para girar o motor de passos
```

```
digitalWrite(stepPin, HIGH);  
delayMicroseconds(delayMicrosecondsBetweenSteps);  
digitalWrite(stepPin, LOW);  
delayMicroseconds(delayMicrosecondsBetweenSteps);  
}
```

---