

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA

Jônatas José Nascimento Alves

PROJETO CONCEITUAL DE UM REATOR DE DEPOSIÇÃO FÍSICA DE VAPOR
(PVD) TIPO MAGNETRON SPUTTERING

MANAUS

2025

Jônatas José Nascimento Alves

**PROJETO CONCEITUAL DE UM REATOR DE DEPOSIÇÃO FÍSICA DE VAPOR
(PVD) TIPO MAGNETRON SPUTTERING**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Escola Superior de Tecnologia da Universidade
do Estado do Amazonas, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Dantas dos Santos

MANAUS

2025

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.

A474p Alves, Jônatas José Nascimento
 Projeto Conceitual de um reator de deposição física de vapor
 (PVD) tipo magnetron sputtering / Jônatas José Nascimento Alves.
 Manaus : [s.n], 2025.
 48 f.: color.; 21.0 cm.

 TCC - Graduação em Engenharia Mecânica- Universidade do
Estado do Amazonas, Manaus, 2025.
 Inclui Bibliografia.
 Orientador: SANTOS, M. D..

 1. PVD. 2. Filmes Finos. 3. Projeto conceitual. 4. Reator de
deposição. I. SANTOS, M. D. (Orient.) II. Universidade do Estado
do Amazonas. III. Título

CDU(1997)621

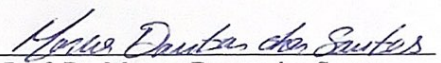
Jônatas José Nascimento Alves

**PROJETO CONCEITUAL DE UM REATOR DE DEPOSIÇÃO FÍSICA DE VAPOR
(PVD) TIPO MAGNETRON SPUTTERING**

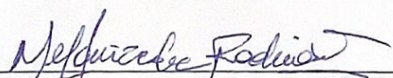
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca avaliadora do curso de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas como pré-requisito para obtenção da aprovação na disciplina de TCC II.

Trabalho aprovado. Manaus – Amazonas, 4 de dezembro de 2025

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Marcos Dantas dos Santos
Universidade do Estado do Amazonas (UEA)
(Orientador)


Prof. Dr. Arístides Rivera Torres
Universidade do Estado do Amazonas (UEA)


Prof. Dr. Melquizedec Arcos Rodrigues
Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à Deus e minha família, mais precisamente meus pais, Joniomá e Bárbara, por desde o momento em que nasci, terem se comprometido com minha educação e formação como ser, mesmo quando eu era apenas um estreante neste jogo o qual chamamos de vida. Agradeço também à Ana Beatriz, que, neste período de finalização de curso entrou na minha vida, e que sempre foi um ponto de refrigério. Agradeço ao meu orientador, Professor Marcos Dantas, pela paciência, tempo investido, orientação e instrução, que tenhamos mais professores com tal disponibilidade e compromisso admiráveis. Gostaria também de agradecer aos projetos Baja UEA e Viper Racing, que reforçaram ainda mais a paixão pela engenharia mecânica. A todos os amigos, que acompanham esta jornada, dos quais alguns caminharam junto a mim nesta graduação, meus sinceros agradecimentos por fazer o processo ficar mais leve e divertido. Todos citados aqui, tem uma participação especial em minha formação.

EPÍGRAFE

“A ciência estuda o que é; a engenharia cria o que nunca foi.”

(Theodore von Kármán)

RESUMO

O objetivo deste Trabalho de Conclusão de Curso é criar o projeto conceitual de um reator de Deposição Física de Vapor (PVD) com a técnica de *magnetron sputtering*, a fim de atender à demanda regional por equipamentos avançados para a deposição de filmes finos e revestimentos funcionais. A pesquisa começa com a observação de que o estado do Amazonas enfrenta grandes desafios em termos de infraestrutura científica, o que afeta diretamente o progresso em campos estratégicos como nanotecnologia, engenharia de materiais e tribologia. Nesse cenário, a pesquisa apresenta um modelo conceitual sólido, acessível e eficaz, que pode fomentar a independência acadêmica e reforçar a habilidade de pesquisa na região. Para embasar o desenvolvimento do reator, foi conduzida uma extensa pesquisa teórica sobre métodos de PVD, usos industriais e parâmetros operacionais críticos, como pressão, composição do gás, geometria da câmara e tratamento do plasma. Desafios tecnológicos significativos também foram examinados, incluindo controle da taxa de deposição, eficiência energética, estabilidade do plasma e restrições à escalabilidade. O estudo analisa projetos acadêmicos e industriais já existentes, possibilitando a comparação de configurações, a identificação de boas práticas e a aceleração do processo de definição conceitual. O método utilizado fundamentou-se na abordagem sistemática de projeto de engenharia proposta por Pahl e Beitz, englobando as fases de definição da tarefa, coleta de requisitos, criação e análise de alternativas, e escolha da configuração ideal. Desenvolveram-se opções que envolviam diversos tipos de *magnetron*, sistemas de vácuo, controle de gases, fontes de potência e estratégias de resfriamento, as quais foram, posteriormente, analisadas por meio de uma matriz de decisão ponderada. A configuração escolhida — câmara cilíndrica compacta, *magnetron* planar, bomba turbomolecular e controle básico de gases — demonstrou o melhor equilíbrio entre eficácia, custo, durabilidade e simplicidade na manutenção. Os resultados demonstram que o modelo conceitual atende aos requisitos operacionais típicos para produção de filmes finos metálicos e compostos, permitindo taxas de deposição controláveis, elevada uniformidade e manutenção simplificada. Além de propor uma solução tecnicamente viável, o trabalho evidencia o impacto potencial da implementação do reator para o desenvolvimento científico e tecnológico do estado do Amazonas, contribuindo para reduzir dependências externas, formar recursos humanos especializados e estimular futuras pesquisas e inovações em engenharia de superfícies.

Palavras-chave: PVD; *sputtering*; filmes finos; projeto conceitual; reator de deposição

ABSTRACT

The objective of this work is to develop the conceptual design of a Physical Vapor Deposition (PVD) reactor using the magnetron sputtering technique, in order to meet the regional demand for advanced equipment capable of depositing thin films and functional coatings. The study begins by recognizing that the state of Amazonas faces significant challenges related to scientific infrastructure, which directly hinders progress in strategic fields such as nanotechnology, materials engineering, and tribology. Within this context, the research proposes a solid, accessible, and efficient conceptual model that can foster academic autonomy and strengthen the region's research capabilities. To support the reactor's development, an extensive theoretical review was conducted on PVD methods, industrial applications, and critical operational parameters such as pressure, gas composition, chamber geometry, and plasma conditioning. Important technological challenges were also examined, including deposition rate control, energy efficiency, plasma stability, and scalability constraints. The study evaluates existing academic and industrial reactor designs, enabling comparison of configurations, identification of best practices, and acceleration of the conceptual decision-making process. The methodology employed is grounded in the systematic engineering design approach proposed by Pahl and Beitz, encompassing task clarification, requirements gathering, generation and assessment of design alternatives, and selection of the optimal configuration. Various design options were developed—covering different magnetron types, vacuum systems, gas-flow control mechanisms, power supplies, and cooling strategies—and subsequently evaluated using a weighted decision matrix. The selected configuration, consisting of a compact cylindrical chamber, planar magnetron, turbomolecular pump, and basic gas-control system, offered the best balance among efficiency, cost, durability, and ease of maintenance. The results demonstrate that the conceptual model satisfies typical operational requirements for producing metallic and compound thin films, ensuring controllable deposition rates, high uniformity, and simplified maintenance. Beyond presenting a technically feasible solution, the study highlights the potential impact of implementing such a reactor on the scientific and technological development of the state of Amazonas, contributing to reduced external dependence, the training of specialized personnel, and the stimulation of future research and innovation in surface engineering.

Key Words: PVD; *sputtering; thin films; conceptual design; deposition reactor*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de deposição por pulverização	12
Figura 2 - Painel do princípio de operação das telas sensíveis ao toque resistivas.	19
Figura 3 - Peças Seleccionadas de motores revestidas por DLC, incluindo ta-C	20
Figura 4 - Características e parâmetros das câmaras	21
Figura 5- Distribuição regional das infraestruturas de ICTs no Brasil.....	22
Figura 6 - Reator PVD magnetron sputtering.....	24
Figura 7 - Vista transversal do revestimento multicamada de TiAlN/TiAlON/Si ₃ N ₄ em meio claro	25
Figura 8 - Equipamento PECVD para deposição de filme por plasma	26
Figura 9 - Ilustração de um equipamento LPCVD para crescimento de filme.....	26
Figura 10 - Fluxograma da metodologia de concepção de projeto adotado neste trabalho.....	29
Figura 11 - Proposta conceitual para a câmara do reator	35
Figura 12 - Layout do conceito do Reator	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos Técnicos e Operacionais do Reator PVD	33
Tabela 2 - Alternativas conceituais para a câmara cilíndrica	35
Tabela 3 - Alternativas conceituais para a bomba de vácuo.....	36
Tabela 4 - Alternativas conceituais para o controle de gases	37
Tabela 5 - Alternativas conceituais para o controle de temperatura.....	37
Tabela 6 - Alternativas conceituais para o controle de Bias	37
Tabela 7 - Alternativas conceituais para a funcionalidade e materiais.....	38
Tabela 8 - Matriz de Decisão Ponderada para Seleção de Configuração	38
Tabela 9 - Orçamento prévio dos componentes principais.....	42

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 Contextualização	12
1.2 Formulação do problema	13
1.3 Objetivos.....	13
1.3.1 Objetivo Geral	13
1.3.2 Objetivos Específicos	13
1.4 Justificativa.....	14
1.5 Estrutura do trabalho	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 Introdução ao PVD e <i>Sputtering</i>	17
2.2 Aplicações e desafios na indústria.....	18
2.2.1 Indústria eletrônica e de semicondutores	18
2.2.2 Indústria de revestimentos funcionais e mecânicos.....	19
2.2.3 Indústria óptica e energias renováveis.....	20
2.2.4 Desafios tecnológicos do processo na Indústria	20
2.3 Relevância regional e carência de equipamentos	22
2.4 Projetos de reatores de PVD em meio Acadêmico.....	23
3. METODOLOGIA	28
3.1 Levantamento de Requisitos.....	30
3.2 Geração de Alternativas Conceituais.....	31
3.3 Seleção da Configuração Ótima	31
3.4 Desenvolvimento do Modelo Conceitual	32
4. RESULTADOS	33
4.1 Fase 2 - Projeto Conceitual.....	33
4.1.1 Levantamento de requisitos	33
4.1.2 Alternativas conceituais.....	35
4.1.3 Seleção da configuração ótima	38
4.1.4 Desenvolvimento do Modelo conceitual	39
5. CONCLUSÃO	44
6. REFERÊNCIAS	46

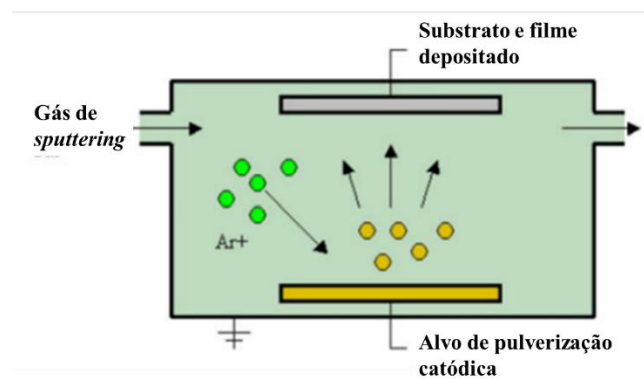
1. INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo, é apresentado a contextualização do tema, seguindo da formulação do problema, como também o objetivo geral e objetivos específicos, encerrando com a justificativa central deste trabalho e sua estruturação.

1.1 Contextualização

A deposição física de vapor, popularmente conhecida como PVD (*Physical Vapor Deposition*), vem se destacando como uma excelente alternativa tecnológica para a fabricação de filmes finos e revestimentos, sendo amplamente utilizada em áreas como eletrônica, óptica, mecânica entre outras. De acordo com Shahidi et al. (2015), entre as diversas técnicas de PVD, se destaca o *Sputtering*, devido à sua versatilidade, permitindo a obtenção de camadas finas com alto grau de precisão e aderência sobre uma ampla gama de substratos, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Sistema de deposição por pulverização



Fonte: Wei, (2009).

Apesar da alta aplicabilidade e relevância da técnica no campo da engenharia, observa-se uma carência de desenvolvimento no Brasil, em especial em regiões como o estado do Amazonas. Isso se deve à falta de acesso a equipamentos de deposição física de vapor, como reatores, o que é causado por fatores como falta de investimentos, má gestão e a ausência de foco em centros acadêmicos para esse tipo de tecnologia. Esse cenário acaba limitando o avanço tecnológico e científico da região, restringindo também a participação do Amazonas no cenário científico nacional.

Neste contexto, o desenvolvimento de um reator de deposição física de vapor tipo *sputtering* ajudará a promover avanços significativos na pesquisa e no desenvolvimento regional, contribuindo para superar as dificuldades atuais na produção de superfícies metálicas.

1.2 Formulação do problema

Considerando que:

- I. A técnica de *sputtering* oferece alta precisão na deposição de filmes finos, com amplas aplicações industriais;
- II. Há uma carência de equipamentos de PVD em regiões como o estado do Amazonas, limitando a pesquisa e o desenvolvimento local; e
- III. A construção de um reator de PVD pode contribuir significativamente para o avanço da ciência e tecnologia da região.

A questão norteadora deste trabalho é:

Como projetar um reator de PVD, na modalidade *Sputtering*, que seja acessível e eficiente, promovendo o desenvolvimento científico tecnológico no estado do Amazonas?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver o projeto conceitual de um reator de deposição PVD utilizando a técnica de *Sputtering*, com o objetivo de suprir a carência de equipamentos na região e promover o avanço de pesquisas na área de materiais e revestimentos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- I. Integrar conceitos de engenharia mecânica, química e ciência dos materiais no desenvolvimento do reator;
- II. Garantir que o projeto atenda a padrões globais de qualidade e eficiência; e
- III. Incentivar pesquisas sobre deposição de filmes finos e revestimentos no estado do Amazonas.

1.4 Justificativa

A pesquisa é relevante ao considerar a necessidade de desenvolvimento tecnológico e científico no campo de deposição de filmes finos e revestimentos no estado do Amazonas. A técnica de PVD, especialmente o *sputtering*, permite a deposição de uma vasta gama de materiais inorgânicos, além de oferecer revestimentos de espessura nanométrica que melhoram características como dureza, resistência ao desgaste e resistência à oxidação (Shahidi; Moazzenchi; Ghoranneviss, 2015).

Espera-se que os resultados deste projeto promovam avanços significativos no cenário científico e tecnológico regional, abrindo espaço para futuras pesquisas que possam até incluir o desenvolvimento da construção do equipamento.

Embora o Amazonas seja um importante centro de biodiversidade e tenha um grande potencial para o avanço de tecnologias sustentáveis, ele enfrenta desafios significativos na infraestrutura de pesquisa científica, particularmente em campos como a ciência de materiais e a nanotecnologia. A escassez de equipamentos sofisticados, como reatores PVD do tipo *sputtering*, restringe a habilidade de conduzir experimentos locais de alta complexidade, forçando os pesquisadores a recorrerem a instituições situadas em outras áreas do Brasil. Esta dependência não só eleva os gastos, como também posterga projetos de investigação. A instalação de um reator PVD no Amazonas poderia proporcionar vantagens significativas, tais como o aprimoramento das habilidades de pesquisa local, a capacitação de pessoal qualificado e a diminuição da necessidade de laboratórios externos. Isso promoveria o estabelecimento de um cenário de inovação tecnológica, atraindo investimentos de companhias com interesse em criar materiais e tecnologias sustentáveis.

Podemos destacar alguns pontos tais como:

1. Avanço científico e tecnológico:

- I. Geração de novos conhecimentos sobre o processo de deposição física de vapor (PVD) e engenharia de superfícies;
- II. Formação de recursos humanos qualificados tais como alunos de graduação, pós-graduação e técnicos especializados; e
- III. Integração com linhas de pesquisa em nanotecnologia, tribologia e ciência dos materiais.

2. Impacto industrial e econômico

- I. Desenvolvimento de revestimentos com maior vida útil de ferramenta e redução de custos produtivos;
- II. Estímulo à indústria local e regional, diminuindo a dependência de importação de tecnologias; e
- III. Possibilidade de parcerias com o polo industrial de Manaus para aplicações diretas em manufatura, eletrônicos e metalmecânica.

3. Sustentabilidade e meio ambiente

- I. Redução do uso de fluidos de corte em usinagem (com corte a seco ou mínima lubrificação);
- II. Diminuição do consumo de energia pela maior eficiência dos processos; e
- III. Menor geração de resíduos industriais, alinhado à Política Nacional de Resíduos Sólidos.

4. Inovação e competitividade

- I. Potencial para registro de patentes de novos revestimentos ou processos híbridos;
- II. Fortalecimento do ecossistema de inovação do Amazonas, com possibilidade de *spin-offs* e *startups* tecnológicas; e
- III. Inserção em redes nacionais e internacionais de pesquisa em engenharia de superfície.

Assim, a realização deste projeto de TCC se insere em um contexto de carência tecnológica, mas com grandes potenciais transformadores para o ecossistema de pesquisa e inovação na região. O presente trabalho tem como objetivo propor o projeto conceitual de um reator PVD tipo *sputtering*, voltado para suprir a demanda regional por equipamentos de alta tecnologia. Para tanto, será realizada uma revisão dos principais componentes, parâmetros operacionais e abordagens de design de reatores PVD, com foco nas melhores práticas para otimização dos processos de deposição e na viabilidade da implementação na realidade local.

1.5 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em seis capítulos. O primeiro capítulo apresenta a introdução da pesquisa, incluindo a contextualização, formulação do problema, objetivos e justificativa. No segundo capítulo, será abordado o referencial teórico, discutindo as técnicas de PVD, *sputtering* e engenharia de materiais. O terceiro capítulo traz a metodologia adotada

na pesquisa, enquanto o quarto capítulo foca no desenvolvimento do projeto conceitual do reator. Os resultados e discussões serão apresentados no quinto capítulo. Por fim, o sexto capítulo oferece as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Introdução ao PVD e *Sputtering*

A crescente demanda por tecnologias que permitem o controle preciso da deposição de filmes finos em substratos tem impulsionado o uso de técnicas de Deposição Física de Vapor (PVD), especialmente o processo de *sputtering*. Este método, amplamente utilizado na indústria de semicondutores, fabricação de dispositivos ópticos e revestimentos protetores, destaca-se pela sua capacidade de proporcionar camadas de alta pureza, com controle detalhado sobre espessura, composição e uniformidade (Baptista et al., 2018). O *sputtering* envolve a ejeção de átomos de um material alvo (*target*), que são depositados em um substrato após serem desintegrados por íons energizados, geralmente argônio (Ar^+), em um ambiente de plasma (Li et al., 2023).

No contexto da pesquisa científica, os reatores de PVD são essenciais para o desenvolvimento de materiais com propriedades avançadas. No entanto, regiões periféricas, como o norte do Brasil, enfrentam desafios significativos devido à carência de infraestrutura tecnológica e equipamentos de alto desempenho para pesquisa científica (Stegmann et al., 2024). Essa limitação restringe o progresso em áreas cruciais como ciência dos materiais e engenharia, dificultando a formação de profissionais capacitados (Turchi; Morais, 2017). A ausência de instalações adequadas pode comprometer o desenvolvimento de pesquisas estratégicas e inovações tecnológicas.

Projetar um reator PVD do tipo *sputtering* voltado para a pesquisa é uma iniciativa crucial para preencher essa lacuna. O desenvolvimento de um reator customizado permitirá não apenas a superação da falta de infraestrutura local, mas também a criação de uma plataforma experimental que favorece a inovação. Isso é particularmente relevante em áreas como nanotecnologia e energia renovável, que dependem de revestimentos finos com propriedades específicas para avanços tecnológicos. A literatura aponta que, além de fornecer controle sobre os parâmetros de deposição, reatores PVD podem ser projetados para garantir uma distribuição uniforme do plasma e otimização do processo de *sputtering*, utilizando simulações numéricas como CFD (*Computational Fluid Dynamics*) e FEM (*Finite Element Method*) (Śliwa et al., 2016).

Além dos benefícios técnicos, a implantação de equipamentos de pesquisa avançada no Norte do Brasil pode gerar impactos positivos em termos de desenvolvimento regional. (Turchi; Morais, 2017) discute como a criação de infraestrutura científica em áreas carentes pode

aumentar a competitividade internacional das instituições locais, promover a capacitação da mão de obra qualificada e atrair investimentos para setores de alta tecnologia.

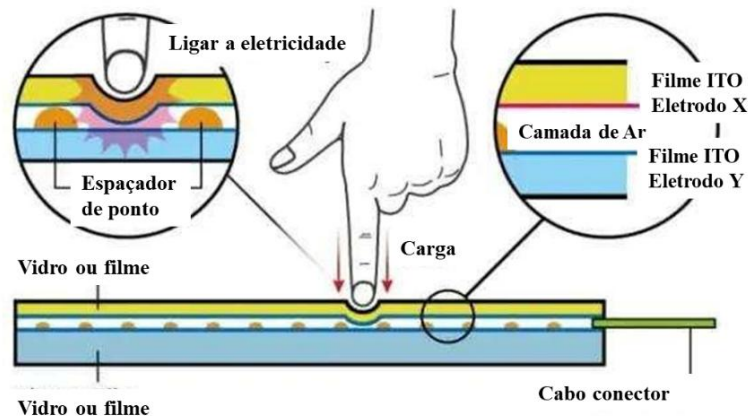
2.2 Aplicações e desafios na indústria

A técnica de *Sputtering*, especificamente a Deposição Física de Vapor (PVD), é amplamente empregada em várias indústrias por sua habilidade de produzir filmes finos de excelente qualidade. Este procedimento é notável por possibilitar a deposição controlada de materiais em variados substratos, proporcionando melhorias na dureza, resistência à corrosão e propriedades ópticas e elétricas dos revestimentos (Greene, 2017; Kelly; Arnell, 1999). O *sputtering* é uma técnica amplamente utilizada e com alto nível de versatilidade, permitindo a deposição de uma gama de materiais, resultando em filmes com propriedades físicas e químicas personalizadas para determinados tipos de aplicações (Society of Vacuum Coaters, 2023).

2.2.1 Indústria eletrônica e de semicondutores

A técnica de *sputtering* é crucial na produção de dispositivos semicondutores, onde se requer uma precisão e pureza extremas na deposição de camadas transparentes. O procedimento é empregado na formação de camadas de dielétricos, condutores e semicondutores em chips de eletrônica. Essas películas finas são fundamentais para a redução de tamanho de componentes, possibilitando maior eficácia e capacidade de processamento em aparelhos como memórias e microprocessadores. Adicionalmente, o *sputtering* é usado para depositar óxidos condutores transparentes, conforme apresentado na Figura 2, como o ITO (óxido de índio-estanho), usados em telas sensíveis ao toque e displays LED. A precisão e a homogeneidade desses revestimentos são fundamentais para o rendimento dos aparelhos, e o domínio dos parâmetros de deposição durante o *sputtering* possibilita a modificação de características ópticas e elétricas dos filmes depositados (Chavan et al., 2023; Patel et al., 2024).

Figura 2 - Painel do princípio de operação das telas sensíveis ao toque resistivas.

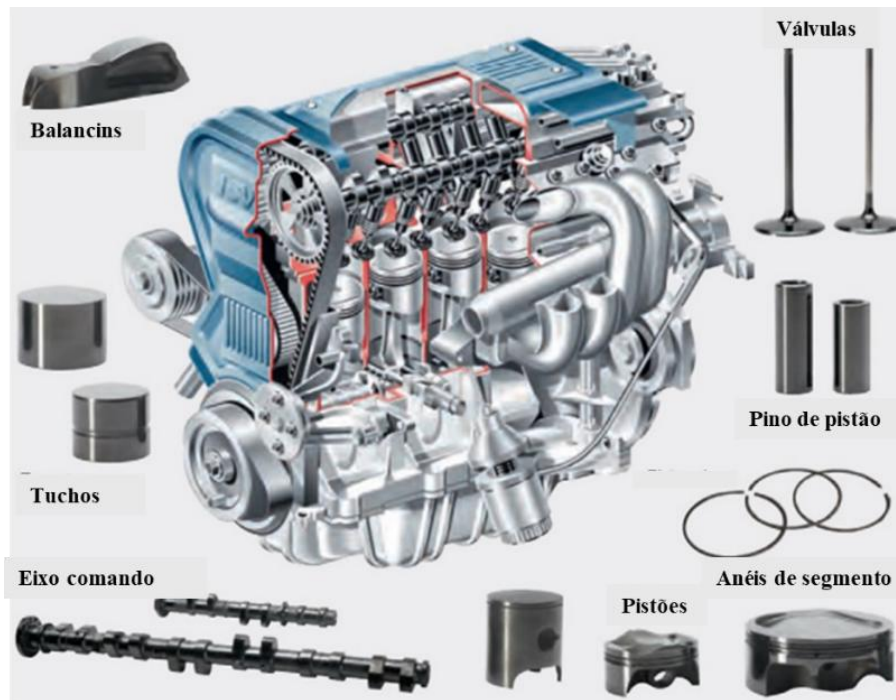


Fonte: Adaptado de Reshine Displays (2024).

2.2.2 Indústria de revestimentos funcionais e mecânicos

No campo dos revestimentos mecânicos, o *sputtering* é empregado para aprimorar a resistência ao desgaste e à corrosão de peças de metal. Materiais como titânio (Ti), nitreto de titânio (TiN) e cromo (Cr) são utilizados em revestimentos de ferramentas de corte e peças automotivas para potencializar sua durabilidade e performance. Pesquisas sugerem que a utilização de filmes finos por *sputtering* pode estender consideravelmente a durabilidade dessas ferramentas em contextos industriais exigentes (Society of Vacuum Coaters, 2023). Em usos tribológicos, que visam diminuir o atrito entre as superfícies interagindo, é bastante frequente a utilização de filmes de carbono do tipo diamante (DLC) como apresentados na Figura 3. A técnica de *sputtering* possibilita a regulação exata da espessura e composição desses filmes, fundamentais para usos em motores e sistemas de transmissão de veículos, onde o desempenho a longo prazo é uma prioridade.

Figura 3 - Peças Seleccionadas de motores revestidas por DLC, incluindo ta-C



Fonte: Vetter, (2014).

2.2.3 Indústria óptica e energias renováveis

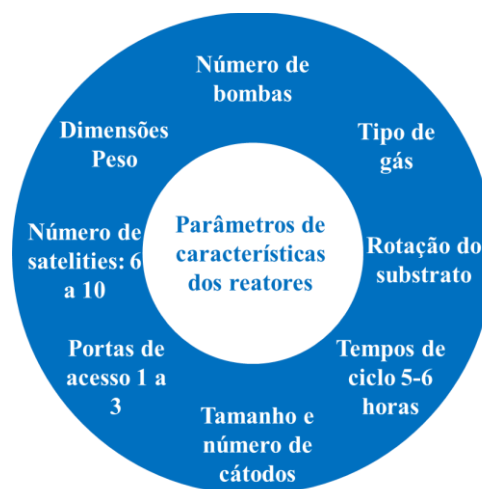
No setor óptico, o *sputtering* serve para aplicar revestimentos antirreflexo em lentes e aparelhos ópticos, tais como filtros de luz e espelhos de alta precisão (Saccoman, 2023). Essas coberturas devem ser extremamente homogêneas para assegurar a eficácia e a qualidade visual dos produtos. A técnica possibilita modificar as características ópticas dos filmes, tais como transmitância e refletância, através do gerenciamento da composição e estrutura do filme depositado. No campo das energias renováveis, a técnica de *sputtering* é fundamental na produção de células solares de filmes finos. Materiais como o telureto de cádmio (CdTe) e o sulfeto de cobre-índio-gálio (CIGS) são depositados por meio de técnicas de *sputtering*, formando camadas que absorvem a luz nas células solares. Essas tecnologias têm se mostrado promissoras para a produção de energia limpa e eficiente, sendo um campo em crescimento contínuo devido à demanda por soluções energéticas sustentáveis (Machkih; Oubaki; Makha, 2024; Ramanujam et al., 2020).

2.2.4 Desafios tecnológicos do processo na Indústria

I. Controle de parâmetros e qualidade do filme.

Um dos maiores obstáculos no procedimento de *sputtering* é a regulação exata dos parâmetros de deposição, tais como pressão do plasma, tensão aplicada e composição do gás como identificados na Figura 4. Pequenas alterações nesses parâmetros podem resultar em alterações relevantes nas características dos filmes depositados, tais como adesão, estrutura cristalina e uniformidade. A gestão dessas variáveis é crucial para assegurar a excelência do produto, particularmente em setores que necessitam de alta precisão, como a eletrônica e a óptica (Baptista et al., 2018).

Figura 4 - Características e parâmetros das câmaras



Fonte: Adaptado de Baptista et al., (2018).

II. Eficiência energética e custos de produção.

O *sputtering* pode ser um procedimento dispendioso e altamente energético. A eficácia na utilização do material alvo (target) é bastante reduzida, uma vez que uma parcela considerável do material é perdida durante o procedimento. Ademais, a exigência de preservar uma atmosfera plasmática de alta energia eleva o consumo de eletricidade. Inovações como o *High Power Impulse Magnetron Sputtering* (HiPIMS) estão sendo investigadas para aprimorar a eficácia do procedimento e diminuir o uso de energia, ao mesmo tempo que aprimoram a qualidade dos filmes depositados (Brenning et al., 2021).

III. Limitações de escalabilidade e equipamentos.

A escalabilidade do processo também representa um desafio significativo para aplicações em larga escala, como na indústria automotiva ou na fabricação de dispositivos com grandes áreas. A falta de infraestrutura adequada e reatores PVD em algumas regiões, como no Norte do Brasil, limita o avanço da pesquisa e desenvolvimento local. Essa carência impede

que universidades e centros de pesquisa realizem experimentos complexos, resultando em menor competitividade e inovação tecnológica regional.

2.3 Relevância regional e carência de equipamentos

A escassez de laboratórios e equipamento tecnológicos em regiões descentralizadas do Brasil representa um obstáculo importante para o progresso de pesquisas em campos estratégicos, como a criação de novos materiais para usos em energia renovável e eletrônica. Métodos como o *sputtering* são fundamentais para a aplicação de filmes finos em células solares, sensores e revestimentos antirreflexo, que possuem a capacidade de revolucionar indústrias locais. A desigualdade regional é motivada pela falta de acesso às tecnologias avançadas, de algumas áreas do país, visto que a maioria dos investimentos se concentram em zonas específicas, indicado na Figura 5 (Turchi; Morais, 2017).

Figura 5- Distribuição regional das infraestruturas de ICTs no Brasil



Fonte: IPEA (2017).

Ao aprimorar a infraestrutura de pesquisa, a região ganharia mais destaque no cenário nacional e internacional, contribuindo não só para o avanço acadêmico, mas também para o surgimento de startups e indústrias tecnológicas. Isso incrementaria a economia local e

intensificaria a competitividade do Amazonas em áreas estratégicas, como as energias renováveis e a eletrônica de ponta. Segundo Moreira; Manzatto, (2023), " A Amazônia apresenta um imenso potencial para o desenvolvimento econômico, ao mesmo tempo em que abriga uma das maiores biodiversidades do planeta. Portanto, é fundamental buscar um equilíbrio entre a exploração dos recursos naturais e a conservação do meio ambiente, garantindo que o crescimento econômico seja realizado de forma responsável e sustentável".

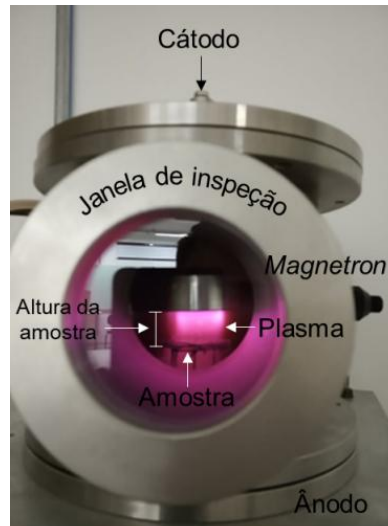
2.4 Projetos de reatores de PVD em meio Acadêmico

O projeto conceitual de reatores de Deposição Física de Vapor (PVD) por *sputtering* tem sido amplamente estudado na literatura acadêmica, tanto em âmbito nacional quanto internacional. Esses estudos abrangem desde o design e a fabricação de componentes até a otimização de parâmetros de operação para a deposição de filmes finos. Tais trabalhos fornecem subsídios teóricos e práticos para o desenvolvimento de sistemas mais eficientes e tecnologicamente avançados.

No contexto nacional, destaca-se a pesquisa de Traiano (2019), que abordou o desenvolvimento de um reator de plasma para deposição de filmes finos por *sputtering*, conforme a Figura 6. O trabalho contemplou o projeto mecânico e a fabricação dos componentes do reator, com destaque para a utilização de técnicas de manufatura subtrativa. O sistema desenvolvido foi composto por um conjunto integrado de câmara de vácuo, sistema de alimentação e *magnetron*. Os testes realizados demonstraram a eficiência do reator na

deposição de filmes de cobre, evidenciando a influência da distância entre o *magnetron* e o substrato na taxa de deposição e na uniformidade dos filmes depositados (Traiano, 2019).

Figura 6 - Reator PVD *magnetron sputtering*

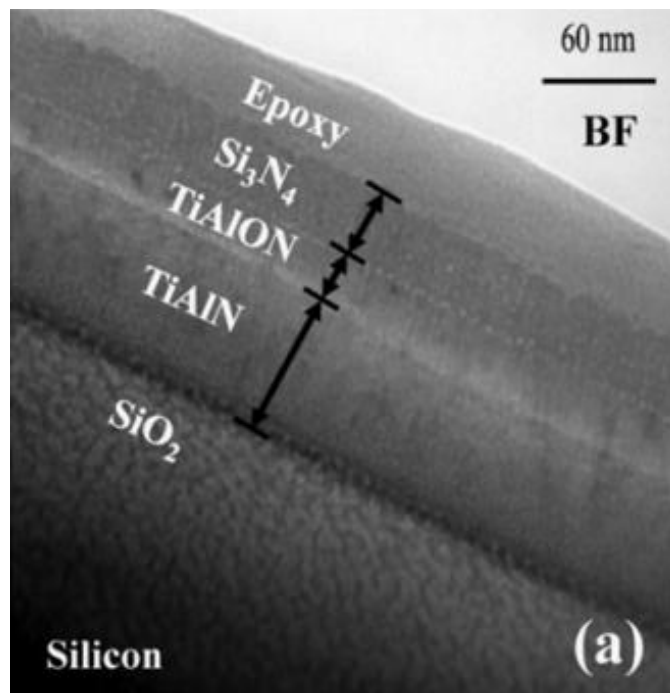


Fonte Traiano, (2019).

Em âmbito internacional, diversos estudos têm avançado no design e manufatura de reatores PVD por *sputtering*. Trabalhos publicados em países como Estados Unidos, Alemanha e Índia frequentemente investigam a otimização de parâmetros de deposição, como pressão de trabalho, tensão aplicada e geometrias do sistema, além de aprimorar a eficiência energética e reduzir os custos de operação (Baptista et al., 2018).

Outro estudo relevante mostrado na Figura 7, discute a respeito da aplicabilidade de materiais revestidos em PVD na área da energia solar, por serem uma alternativa mais estável e ecológica, sendo usado tanto em temperaturas médias quanto altas temperaturas (Selvakumar; Barshilia, 2012).

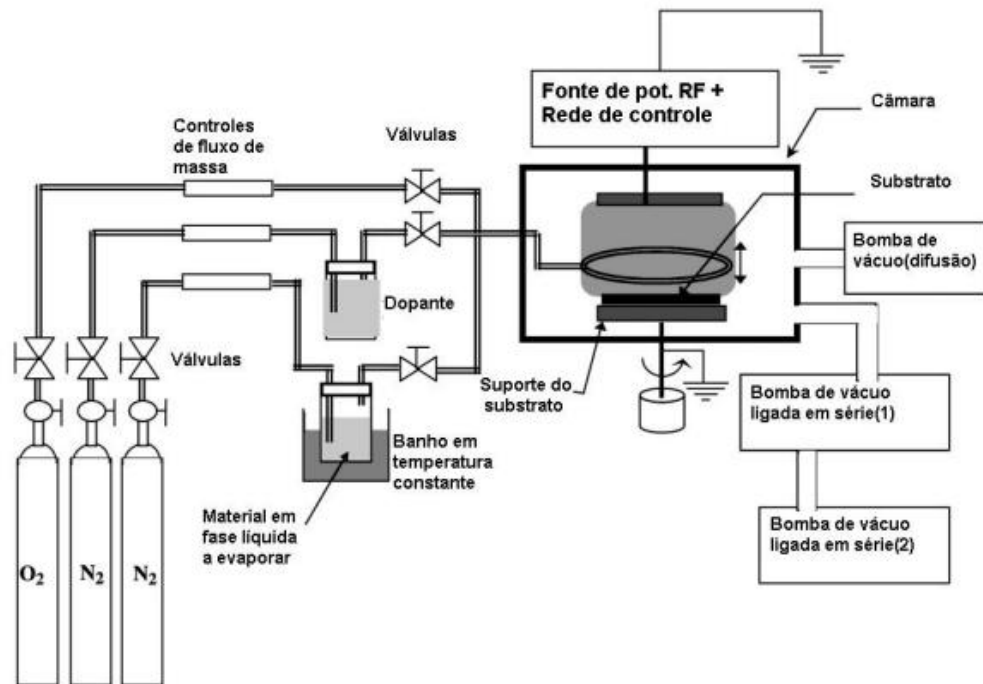
Figura 7 - Vista transversal do revestimento multicamada de TiAlN/TiAlON/Si₃N₄ em meio claro



Fonte: Barshilia et al., (2008).

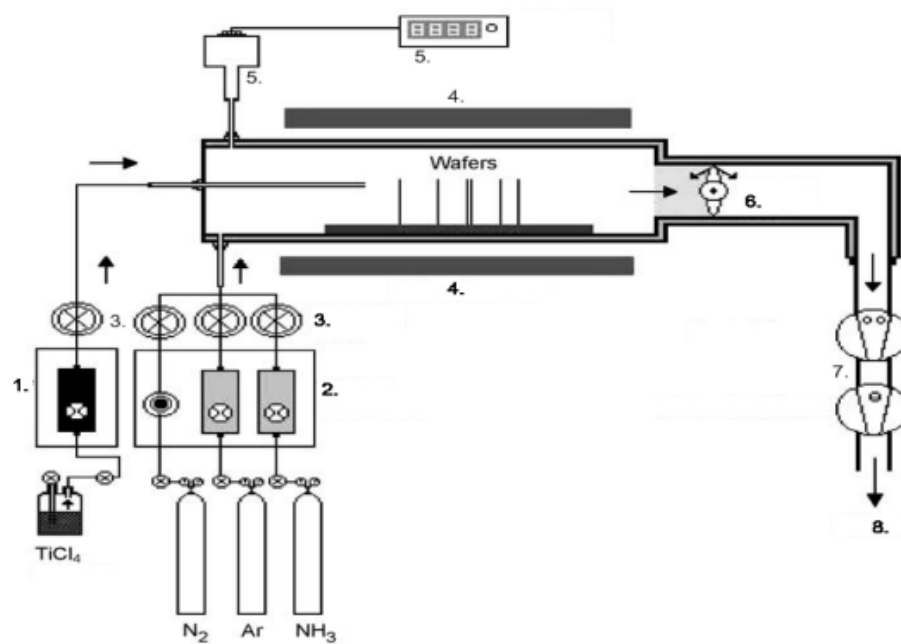
Ademais, trabalhos como os da Universidade Federal de Minas Gerais exploram os métodos LPCVD e PECVD, que são variantes importantes no campo da deposição química e física (Pereira, 2009). Tais estudos evidenciam a relevância do desenvolvimento contínuo em projetos que considerem tanto os aspectos técnicos quanto as necessidades práticas nos processos industriais como os exibidos nas Figuras 8 e 9.

Figura 8 - Equipamento PECVD para deposição de filme por plasma



Fonte: Mahajan et al., (2004).

Figura 9 - Ilustração de um equipamento LPCVD para crescimento de filme



Fonte: Ramanuja et al., (2002).

Esses estudos oferecem uma base sólida para a concepção e o desenvolvimento de reatores PVD, contribuindo para o avanço da tecnologia de deposição de filmes finos. Outrossim, evidenciam a relevância do desenvolvimento de projetos que considerem tanto os aspectos de engenharia quanto a aplicabilidade prática nos processos industriais e de pesquisa científica.

3. METODOLOGIA

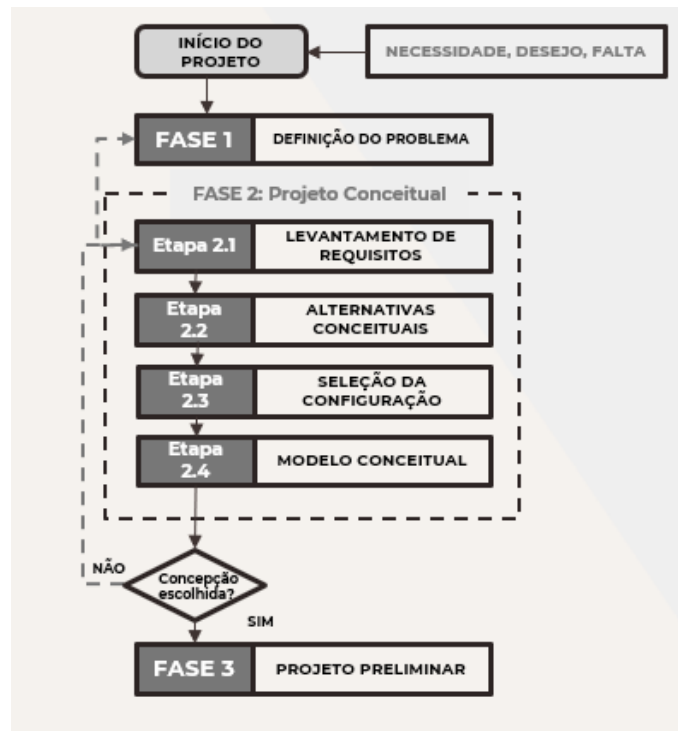
O projeto conceitual representa uma etapa fundamental no desenvolvimento de sistemas e equipamentos complexos, como reatores de Deposição Física de Vapor (PVD) por *sputtering*. Essa etapa compreende o estabelecimento dos requisitos técnicos e funcionais do sistema, a proposição de alternativas de design e a definição preliminar das especificações do produto. Segundo Pahl; Beitz, (2007), o projeto conceitual é essencial para garantir que as necessidades do usuário sejam devidamente traduzidas em soluções técnicas viáveis e inovadoras.

De acordo com Ulrich; Eppinger; Yang, (2020), o projeto conceitual é orientado pela criatividade e pela análise crítica, buscando conciliar desempenho técnico, viabilidade econômica e sustentabilidade. Para reatores de *sputtering*, isso significa considerar aspectos como a configuração do *magnetron*, o controle do fluxo de plasma e a compatibilidade com os substratos já na fase conceitual, a fim de evitar retrabalhos em etapas posteriores do projeto (Cross, 2021).

Um exemplo adicional da aplicação do projeto conceitual pode ser encontrado no trabalho sobre a concepção do sistema de alimentação de um lançador de granadas, em que a fase do projeto foi desdobrada em quatro etapas principais: abstração do problema, busca por princípios de solução, desenvolvimento detalhado das soluções propostas e avaliação dos conceitos finais (Oliveira; Júnior; Maribondo, 2009). Essa abordagem ilustra a importância da estruturação metódica no desenvolvimento eficaz de sistemas complexos.

Neste contexto, o projeto conceitual adotado neste trabalho contém as etapas de acordo com a Figura 10, servindo como base para a realização de um projeto detalhado que seja eficiente, seguro e alinhado às expectativas do usuário. No caso de reatores PVD, a adoção de boas práticas no projeto conceitual é determinante para o sucesso do equipamento e para a obtenção de filmes de alta qualidade.

Figura 10 - Fluxograma da metodologia de concepção de projeto adotado neste trabalho



Fonte: Adaptado de Pahl e Beitz, (1996).

O processo de projetar algo, no âmbito da engenharia, tem como base a identificação de uma necessidade, desejo ou falta, atuando como o estopim para o projeto. Podendo ser uma demanda do mercado, uma melhoria desejada ou a ausência de uma solução existente. Essa etapa inicial é crucial para definir o propósito do projeto (Pahl; Beitz, 2007).

De acordo com a Figura 10, a fase 1 chamada de definição do problema, com o foco específico em clarificar a tarefa, inclui coletar informações do *briefing* do projeto, dividi-las em objetivos qualitativos, tais como funcionalidades, e dados quantitativos, tais como dimensionamentos, e enfim criar uma lista de requisitos. Esta fase garante que o problema seja bem compreendido antes de avançar para o projeto conceitual, que é o objeto de estudo deste trabalho (Pahl; Beitz, 2007).

A clarificação da tarefa é entender o que se espera do projeto. Isso envolve identificar o objetivo principal, como projetar um reator para deposição de filmes finos de materiais metálicos ou cerâmicos em substratos específicos, e definir o nível de detalhe esperado, que, neste caso, é conceitual focado na arquitetura geral do sistema.

A etapa de coleta de informações, tem por objetivo reunir informações relevantes para embasar os requisitos do reator. Isso inclui revisar o *briefing* do projeto fornecido pelo orientador, consultar literatura técnica, como manuais de fabricantes e artigos científicos, e

buscar *insights* de especialistas. Informações típicas incluem o tamanho da câmara, tipo de *magnetron* fonte de energia, sistema de vácuo, controle de gás e diagnósticos. Essas informações ajudam a definir parâmetros realistas para o projeto.

Após isso as informações coletadas são organizadas em objetivos qualitativos, relacionados às funcionalidades e características desejadas, e quantitativos, que são especificações mensuráveis. A última etapa é resumir os requisitos em um enunciado claro do problema, que servirá como base para o projeto conceitual.

3.1 Levantamento de Requisitos

A primeira etapa do projeto conceitual envolve o levantamento detalhado dos requisitos técnicos e operacionais necessários ao funcionamento do reator. Os requisitos técnicos neste trabalho abrangem:

- I. Materiais-Alvo e Substratos: O sistema deve suportar uma variedade de materiais-alvo (metais, ligas metálicas, óxidos) e substratos (*wafers* de silício, vidro, metal), conforme destacado por Mattox, (1998)
- II. Sistema de Vácuo: É necessária uma pressão base na faixa de 10^{-6} Torr, alcançada por bombas turbo moleculares ou criogênicas, e uma pressão operacional entre 10^{-3} e 10^{-2} Torr durante o processo de *sputtering* (Akhtaruzzaman et al., 2021)
- III. Condições Operacionais: Incluem potência aplicada ajustável (de 100 W a 5 kW), taxa de deposição controlável (de 1 nm/min a 500 nm/min) e controle preciso da temperatura do substrato.
- IV. Facilidade de Uso: Interface de controle simples e, preferencialmente, automatizada para operação por usuários com diferentes níveis de experiência.
- V. Manutenção: Estrutura modular que permita limpeza da câmara e troca de alvos sem desmontagem complexa.
- VI. Escalabilidade: Capacidade de adaptação para substratos de tamanhos variados (ex.: de área com 25 mm^2 – 7.800 mm^2) ou para produção em pequena escala.

Esses requisitos foram definidos com base em especificações típicas de reatores PVD comerciais e acadêmicos, conforme descrito por Kelly; Arnell, (1999) , assegurando que o projeto atenda às demandas práticas do processo de deposição.

3.2 Geração de Alternativas Conceituais

Na segunda etapa, diferentes configurações conceituais para o reator foram desenvolvidas, utilizando esboços preliminares e modelagem computacional em softwares CAD (*Computer-Aided Design*), como *SolidWorks* ou *AutoCAD*. As alternativas consideraram variáveis como:

- I. Tipos de *Magnetron*: Configurações planar, cilíndrica ou rotativa, cada uma otimizada para uniformidade de deposição ou eficiência energética.
- II. Geometria da Câmara: Formatos cilíndrico (compacto e eficiente para vácuo) ou retangular (mais versátil para múltiplos substratos).
- III. Sistemas de Resfriamento: Refrigeração a água ou a gás para o alvo e o substrato, visando evitar superaquecimento durante longos ciclos de deposição.
- IV. Controle de Gases: Sistemas com válvulas de fluxo variável ou fixo para introdução de argônio e gases reativos (ex.: nitrogênio, oxigênio).

Cada alternativa foi analisada comparativamente com modelos existentes, e discutida com especialistas da área para incorporar conhecimentos práticos. Os critérios de avaliação incluíram eficiência do processo de *sputtering*, robustez estrutural e custo de implementação, conforme abordagem sugerida por Pahl; Beitz, (2007).

3.3 Seleção da Configuração Ótima

A terceira etapa emprega uma matriz de decisão ponderada para selecionar a configuração ótima entre as alternativas geradas. Os critérios utilizados foram:

- I. Eficiência do Processo: Taxa de deposição e uniformidade do filme (peso: 30%).
- II. Robustez Estrutural: Resistência a condições de vácuo e durabilidade dos componentes (peso: 25%).
- III. Custo de Implementação: Viabilidade econômica para construção local (peso: 25%).
- IV. Facilidade de Manutenção: Tempo e complexidade para reparos ou trocas (peso: 20%).

Cada alternativa recebeu uma pontuação de 0 a 10 para cada critério, multiplicada pelo respectivo peso, resultando em uma pontuação final. A configuração com maior pontuação foi selecionada como a base para o modelo conceitual, garantindo um equilíbrio entre desempenho técnico e viabilidade prática, conforme metodologia de (Ullman, 2008).

3.4 Desenvolvimento do Modelo Conceitual

A quarta etapa detalha o modelo conceitual selecionado, especificando os principais subsistemas do reator:

- I. Sistema de Vácuo: Composto por uma câmara de aço inoxidável, bomba mecânica para vácuo inicial (10^{-2} Torr) e bomba turbomolecular para vácuo alto (10^{-6} Torr), complementadas por válvulas de isolamento e gauges de pressão (Mattox, 1998).
- II. Eletrodos e Configuração Magnética: Adota-se um magnetron planar com campo magnético otimizado para confinar o plasma próximo ao alvo, aumentando a eficiência de *sputtering*, conforme Kelly; Arnell, (1999).
- III. Sistema de Alimentação de Gases e Controle de Plasma: Inclui reguladores de fluxo de massa para argônio (gás base) e gases reativos, integrados a um sistema de controle automático do plasma via software.
- IV. Esboço do Layout Geral: Um modelo 2D foi desenvolvido para visualizar a disposição dos componentes, simular o fluxo de gases e avaliar a acessibilidade para manutenção.

Essa etapa resulta em um projeto conceitual detalhado, pronto para análises mais profundas na fase de simulações.

4. RESULTADOS

Os resultados incluem uma lista priorizada de requisitos funcionais, restrições e desejos. Requisitos funcionais enfatizam versatilidade para depositar filmes finos (metálicos, óxidos ou nitretos) com precisão e adesão, suportando aplicações em eletrônica, óptica e mecânica. Exemplos: taxas de deposição de 0,1–1 nm/s para filmes até 1 µm e suporte a pulverização reativa com O₂ ou N₂ para revestimentos versáteis.

4.1 Fase 2 - Projeto Conceitual

4.1.1 Levantamento de requisitos

O levantamento de requisitos engloba a Tabela 1 abaixo:

Tabela 1 - Requisitos Técnicos e Operacionais do Reator PVD

Categoria	Requisito	Especificação	Justificativa/Implicação
Vácuo	Pressão Base	10 ⁻⁶ Torr	Essencial para pureza do filme e minimização de contaminação
	Pressão Operacional	10 ⁻³ a 10 ⁻² Torr	Faixa ideal para formação de plasma estável e taxa de deposição controlada
Gases do Processo	Gás de <i>Sputtering</i>	Argônio (Ar), com capacidade para outros gases inertes (Ne, Kr, Xe)	Formação do plasma e bombardeamento do alvo. A capacidade de variar o gás otimiza o rendimento e a taxa para diferentes alvos
	Gases reativos	Nitrogênio (N ₂), Oxigênio (O ₂), Metano (CH ₄)	Permite a deposição de filmes compostos (nitretos, óxidos, carbetos) através de <i>sputtering</i> reativo
	Controle de fluxo	Controle por fluxo de massa (MFC) para cada gás	Controle preciso da estequiometria do filme e mitigação do fenômeno de envenenamento do alvo
Operação	Potência do <i>Magnetron</i>	100 W a 5 kW	Influencia diretamente a taxa de deposição e densidade de plasma

	Taxa de Deposição	1 nm/min a 500 nm/min	Parâmetro de desempenho chave para eficiência do processo
	Controle de Temperatura	Sim (Substrato)	Essencial para qualidade do filme, adesão e proteção de substratos sensíveis
	Tipo de Bias	DC e RF	DC para substratos condutores; RF para substratos isolantes. O Bias RF oferece íons de maior energia e densidade
	Tensão de Bias	-50V a -200V (DC/RF)	Essencial para otimizar a adesão, a densidade e as propriedades mecânicas do filme
Funcionalidade	Facilidade de Uso	Interface intuitiva, monitoramento simplificado.	Reduz a necessidade de treinamento especializado e otimiza a operação
	Manutenção	Simplificada, redução de tempo de inatividade.	Reduz custos operacionais e aumenta a disponibilidade do equipamento
	Escalabilidade	Design modular, capacidade de expansão.	Permite adaptação a futuras necessidades de produção e pesquisa
Materiais	Alvos	Metais, Dielétricos (versatilidade)	Ampla gama de aplicações de filmes finos
	Substratos	Até 300 mm de diâmetro (versatilidade)	Atende a padrões industriais e de pesquisa para <i>wafers</i>

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2 Alternativas conceituais

Para a câmara do reator existem as seguintes possibilidades encontradas, conforme apresentado na Tabela 02:

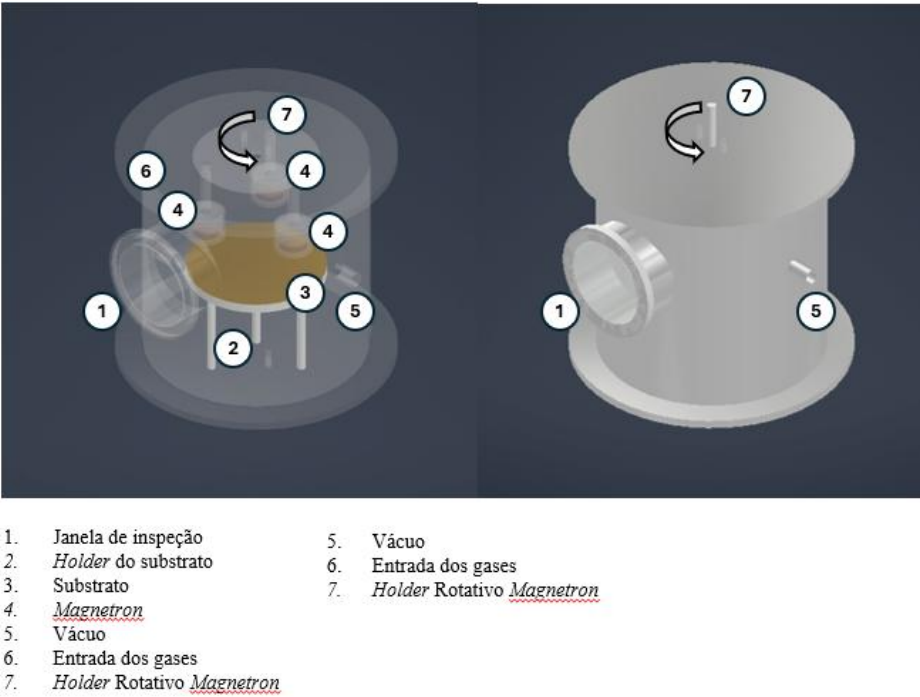
Tabela 2 - Alternativas conceituais para a câmara cilíndrica

Alternativa	Especificação	Justificativa/Implementação
Câmara Cilíndrica Compacta	Diâmetro 300-450 mm, volume ~50-100 L; aço inoxidável 304/316	Compacta e eficiente para alcance rápido de vácuo alto, ideal para laboratórios com substratos únicos; integração simples de <i>magnetron</i> planar ou cilíndrico (usada em A e B).
Câmara Retangular	Dimensões 400x400x300 mm; espaço para múltiplos substratos	Maior versatilidade para produção em batch, mas requer bombas de maior capacidade (usada em C).
Câmara Híbrida	Cilíndrica com extensões modulares; portas de acesso rápido	Reduz tempo de inatividade; acessibilidade para troca de alvos sem desmontagem total (variante em todas).

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Proposta conceitual para a câmara do reator deste projeto é exibida na Figura 11.

Figura 11 - Proposta conceitual para a câmara do reator



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a bomba de vácuo foram encontradas bombas com diferentes pressões de vácuo e especificações de tamanhos e variados fabricantes, conforme Tabela 03:

Tabela 3 - Alternativas conceituais para a bomba de vácuo

Alternativa	Especificação	Justificativa/Implementação
Bomba Turbomolecular	Capacidade 500-2000 L/s; combinada com bomba mecânica rotativa (rough até 10^{-2} Torr); gauges Pirani/ionização	Alta velocidade de bombeamento para recuperação rápida (<30 min); essencial para ciclos de pesquisa (principal em A).
Bomba Criogênica	Ou difusão com traps para óleo; pressões $<10^{-7}$ Torr	Menor contaminação por hidrocarbonetos, ideal para filmes puros em sputtering reativo (usada em B).
Sistema Híbrido	Turbomolecular + criogênica; válvulas de isolamento automáticas; capacidade escalável (1500 L/s principal)	Adaptação a diferentes pressões; tamanhos para câmaras maiores (em C).

Fonte: Elaborado pelo autor

Para controle da abertura do gás e abertura e fechamento do vácuo na câmara foram encontradas as seguintes opções no mercado conforme a Tabela 04:

Tabela 4 - Alternativas conceituais para o controle de gases

Alternativa	Especificação	Justificativa/Implementação
Válvulas de Fluxo Fixo	<i>Needle valves</i> manuais; 10-100 sccm para Ar	Baixo custo para processos não reativos; limitado em precisão (simples em A).
Válvulas MFC Variáveis	Mass flow controllers digitais; 0-500 sccm por canal (Ar + 3 reativos)	Controle preciso para estequiometria e prevenção de envenenamento; integração com software (padrão em B e C).
Sistema Multi-Canal com <i>Purging</i>	Automático; troca rápida de inertes (ex.: Kr)	Otimiza erosão uniforme; aço inoxidável com selos Viton/metal (escalável).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o controle de potência, taxa de deposição e controle de temperatura foram encontradas as seguintes alternativas conforme a Tabela 05:

Tabela 5 - Alternativas conceituais para o controle de temperatura

Alternativa	Especificação	Justificativa/Implementação
Fonte DC Contínua	100-2000 W; <i>matching</i> para alvos condutores	Simples e eficiente para metais; influência direta na densidade de plasma (em A).
Fonte RF	13.56 MHz, até 5 kW; <i>auto-tuner</i> ; PID para temperatura (ambiente-800°C)	Deposição em isolantes; controle via aquecedores resistivos (em B).
Fonte Pulsada DC/RF (HiPIMS)	<i>Duty cycle</i> ajustável; <i>lamps</i> /aquecedores para substrato	Alta taxa em picos; evita superaquecimento (em C).

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 06 representa traz alternativas para o sistema de Bias:

Tabela 6 - Alternativas conceituais para o controle de Bias

Alternativa	Especificação	Justificativa/Implementação
Bias DC Simples	-50V a -100V; para substratos condutores	Baixo custo; otimiza adesão básica (em A).
Bias RF Pulsado	-100V a -200V; capacitor de bloqueio	Maior energia iônica para densidade; mitiga arcos em compostos (em B e C).

Fonte: Elaborado pelo autor.

E por fim, a Tabela 07 traz Alternativas para Funcionalidade e Materiais do Reator PVD:

Tabela 7 - Alternativas conceituais para a funcionalidade e materiais

Alternativa	Especificação	Justificativa/Implementação
Interface Básica	Painel manual com medidores	Facilidade simples; reduz treinamento (em A).
Sistema Automatizado	PLC/LabVIEW; monitoramento remoto; troca de alvos <15 min	Reduz downtime; modularidade (em B/C).
Alvos e Substratos (Versáteis)	Metais/dielétricos; até 300 mm; holders rotativos	Ampla aplicação; escalabilidade para wafers (em todas, com rotação em C).

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.3 Seleção da configuração ótima

Para selecionar a configuração ideal, foi empregada uma matriz de decisão ponderada, adaptada de metodologias de *design* de engenharia. Os critérios foram estabelecidos com pesos baseados nas prioridades do projeto: Eficiência do Processo (30%, considerando taxa de deposição e uniformidade), Robustez Estrutural (25%, resistência a vácuo e durabilidade), Custo de Implementação (25%, viabilidade econômica local) e Facilidade de Manutenção (20%, tempo para reparos).

Cada configuração integrada recebeu pontuações de 0 a 10 em cada critério, multiplicadas pelos pesos. A Tabela 8 resume a avaliação:

Tabela 8 - Matriz de Decisão Ponderada para Seleção de Configuração

Critério	Peso (%)	Alternativa A (Planar Compacta)	Alternativa B (Cilíndrica Reativa)	Alternativa C (Rotativa Escalável)
Eficiência do Processo	30	9 (alta uniformidade em não reativos; bias DC/RF básico)	8 (boa em reativos com MFC; limitação em escala)	9 (excelente em HiPIMS; alta taxa em compostos)
Robustez Estrutural	25	9 (câmara cilíndrica simples; bombas turbomoleculares padrão)	8 (híbrida com criogênicas; maior integração)	7 (componentes rotativos; maior desgaste)
Custo de Implementação	25	9 (componentes acessíveis; sem pulsado)	6 (MFC variáveis e RF avançada)	5 (HiPIMS e rotação; alto investimento)

Critério	Peso (%)	Alternativa A (Planar Compacta)	Alternativa B (Cilíndrica Reativa)	Alternativa C (Rotativa Escalável)
Facilidade de Manutenção	20	8 (modular básica; interface manual)	7 (automação parcial; mais componentes)	6 (mecanismos complexos; downtime maior)
Pontuação Total	-	8,45	7,15	6,95

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Alternativa A obteve a maior pontuação (8,45), sendo selecionada como configuração ótima. Essa escolha justifica-se pela excelência em robustez e custo, alinhada a contextos acadêmicos onde simplicidade prevalece sobre escalabilidade industrial (Pahl; Beitz, 2007). Especificamente, a configuração planar compacta com *magnetron* planar, bomba turbo molecular, válvulas de fluxo fixo/MFC básico, fonte DC contínua e bias DC simples atende integralmente aos requisitos de vácuo, gases (Ar com reativos opcionais), operação e funcionalidade, promovendo taxas de deposição controladas e manutenção eficiente. Estudos corroboram que designs planar balanceados alcançam uniformidade superior a 90% em substratos de até 200 mm, com bias mitigando limitações em densidade iônica (Kelly; Arnell, 1999; Mattox, 1998).

4.1.4 Desenvolvimento do Modelo conceitual

Baseado na matriz de decisão ponderada, a Alternativa A destaca-se pela simplicidade, robustez e custo acessível, incorporando uma câmara cilíndrica compacta, bomba turbomolecular, válvulas de fluxo fixo ou MFC básico, fonte de potência DC contínua e bias DC simples. Essa configuração otimiza o processo de *sputtering* para deposição de filmes finos metálicos e compostos, com ênfase em uniformidade superior a 90% em substratos de até 200 mm de diâmetro, conforme evidenciado em estudos sobre designs planar balanceados (Kelly; Arnell, 1999). A seguir, detalha-se cada subsistema principal, com esboços conceituais e justificativas ancoradas em literatura técnica.

I. Subsistema de Vácuo

O sistema de vácuo é o coração do reator, responsável por manter condições de baixa pressão essenciais para a minimização de contaminação e a formação estável de plasma. Na configuração selecionada, adota-se uma câmara cilíndrica compacta de aço inoxidável 304 ou 316, com diâmetro de 300-450 mm e volume aproximado de 50-100 L, facilitando o alcance

rápido de vácuo alto (Mattox, 1998). A bomba primária é uma mecânica rotativa para vácuo *rough* (até 10^{-2} Torr), complementada por uma bomba turbomolecular com capacidade de 500-2000 L/s, que permite recuperação em menos de 30 minutos após ciclos de deposição. Medidor de pressão tipo *Pirani* e ionização são integrados para monitoramento preciso, evitando sobrecargas e garantindo pressões base de 10^{-6} Torr e operacionais de 10^{-3} a 10^{-2} Torr.

Essa escolha prioriza eficiência energética e baixa contaminação, alinhada a designs laboratoriais onde a simplicidade reduz custos operacionais. Estudos indicam que bombas turbomoleculares combinadas com câmaras cilíndricas otimizam o bombeamento diferencial, reduzindo o tempo de ciclo em até 40% comparado a sistemas retangulares (Kelly; Arnell, 1999). Para manutenção, portas de acesso rápido e válvulas de isolamento automáticas são incorporadas, permitindo trocas sem desmontagem total, conforme recomendado por Pahl; Beitz, (2007) para designs modulares.

II. Subsistema de Eletrodos e Configuração Magnética

O *magnetron* planar balanceado é adotado como configuração magnética principal, com ímãs permanentes dispostos para confinar o plasma próximo ao alvo, aumentando a eficiência de *sputtering* em até 50% em relação a designs não magnéticos (Mattox, 1998). O alvo, versátil para metais e dielétricos, é fixado em um suporte resfriado a água, com dimensões típicas de 100-200 mm de diâmetro, permitindo taxas de deposição de 1 nm/min a 500 nm/min. A fonte de potência DC contínua, ajustável de 100 W a 2 kW, fornece energia estável para alvos condutores, influenciando diretamente a densidade de plasma e a erosão uniforme do alvo.

O bias DC simples, com tensões de -50 V a -100 V aplicadas ao substrato, otimiza a adesão e densidade do filme por meio de bombardeamento iônico, mitigando defeitos como porosidade (Kelly; Arnell, 1999). Essa configuração é particularmente adequada para substratos condutores, como wafers de silício ou metais, e evita complexidades de sistemas RF, reduzindo custos de implementação em contextos acadêmicos (Ullman, 2008). Modelagens preliminares em software CAD, como *SolidWorks*, simulam o campo magnético para uniformidade otimizada, confirmando que campos de 200-500 Gauss confinados ao alvo minimizam arcos e prolongam a vida útil dos componentes.

III. Subsistema de Alimentação de Gases e Controle de Plasma

O controle de gases é essencial para a formação de plasma e a deposição reativa. Na Alternativa A, válvulas de fluxo fixo (needle valves manuais) ou MFC básicos são utilizados para introduzir argônio (Ar) como gás inerte principal, com fluxos de 10-100 sccm, e gases

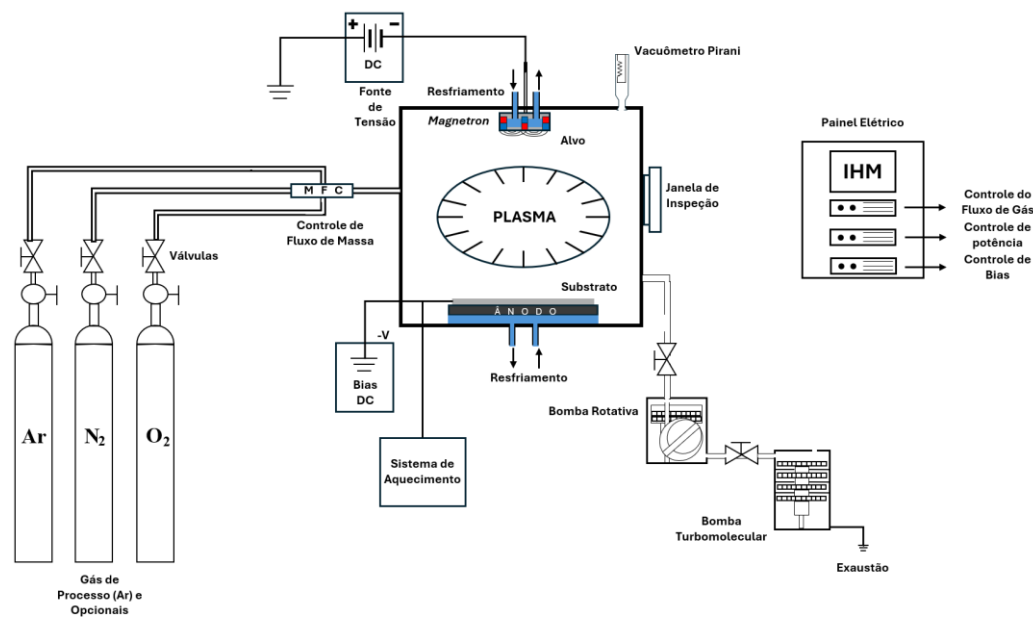
reativos opcionais como nitrogênio (N₂) ou oxigênio (O₂) para formação de nitretos ou óxidos. Os MFCs digitais garantem controle preciso da estequiometria, prevenindo o envenenamento do alvo, um fenômeno comum em sputtering reativo onde óxidos se formam na superfície do alvo, reduzindo a taxa de deposição (Kelly; Arnell, 1999).

O controle de plasma é integrado via uma interface básica com painéis manuais, monitorando parâmetros como potência e pressão em tempo real. Aquecedores resistivos controlados por PID mantêm a temperatura do substrato entre ambiente e 800°C, essencial para adesão e propriedades mecânicas do filme (Mattox, 1998). Essa abordagem simplificada, sem automação avançada, alinha-se à facilidade de uso, reduzindo a necessidade de treinamento especializado e otimizando para ambientes com recursos limitados (Pahl; Beitz, 2007). Simulações indicam que fluxos controlados de Ar a 20-50 sccm estabilizam o plasma, alcançando densidades iônicas de 10^{10} - 10^{12} cm⁻³, conforme dados experimentais de reatores semelhantes (Arora; Bao, 2021).

IV. Esboço do Layout Geral e Considerações Finais

O layout geral é visualizado em um modelo 2D conceitual desenvolvido em software CAD, com a câmara cilíndrica centralizando o *magnetron* planar no topo, o substrato oposto em um *holder* ajustável, e passagens laterais para alimentação de gases e vácuo, conforme demonstrado na figura 12. O fluxo de gases é direcionado radialmente para uniformidade, enquanto o sistema de resfriamento a água circula ao redor do alvo e substrato, evitando superaquecimento em ciclos longos (até 1 hora). A modularidade permite expansão para substratos de até 300 mm, com *holders* rotativos opcionais para maior uniformidade.

Figura 12 - Layout do conceito do Reator



Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa integração garante escalabilidade e manutenção simplificada, com tempo de troca de alvos inferiores a 15 minutos, promovendo redução de *downtime* (Ullman, 2008). O modelo conceitual atende aos requisitos priorizados, como versatilidade para filmes finos em aplicações eletrônicas e ópticas, e contribui para o desenvolvimento tecnológico regional ao priorizar componentes acessíveis localmente. Futuras análises, como simulações CFD para fluxo de plasma, podem refinar o design, mas a configuração atual demonstra viabilidade prática, respaldada por metodologias sistemáticas de engenharia (Pahl; Beitz, 2007). Em resumo, o desenvolvimento do modelo conceitual consolida a Alternativa A em um design coeso, equilibrando desempenho técnico com viabilidade econômica, pronto para transição ao projeto detalhado. A Tabela 09 demonstra um orçamento para referência:

Tabela 9 - Orçamento prévio dos componentes principais

Componente	Especificações	Preço Médio (USD)	Notas	Fontes
Câmara de Aço Inoxidável	Cilíndrica, diâmetro 300–450 mm, volume 50–100 L, 304/316	US\$ 2.000– US\$ 4.000	Fabricação personalizada	-
Bomba de Vácuo Rotativa	Vácuo rough até 10 ² Torr	US\$ 4.476,58	Edwards RV12	Marshall Scientific

Componente	Especificações	Preço Médio (USD)	Notas	Fontes
Bomba Turbomolecular	500–2000 L/s	US\$ 12.653,95	MSE PRO Turbo Molecular Pump	MSE Supplies
Medidores de Pressão	Pirani	US\$ 1.940,00	Pfeiffer Vacuum IMR 265	A & J Vacuum Services, INC.
Fonte de Magnetron	Planar (3 un.)	US\$ 8.994,00	1" Magnetron Sputter HVMSS-SPC-1	MTI Corporation
Fonte de Alimentação DC	100–2000 W	US\$ 1.500– US\$ 5.000	TruPlasma Pulsed DC Sputtering	Kurt J. Lesker Company
Controladores de Fluxo de Massa	Para Ar, N ₂ , O ₂ (3 un.)	US\$ 1.215,00	Basic OEM	Alicat Scientific
Aquecedor de Substrato c/ PID	Até 800°C, diâmetro 4"	US\$ 4.495,00	High Vacuum Heating Plate upto 800°C	MTI Corporation
Resfriador de Água	Para resfriamento de alvo/substrato	US\$ 2.160,00	Digital Temperature Controlled Recirculating Water Chiller	MTI Corporation
Total Aproximado		US\$ 39.434,53 – US\$ 44.934,53		

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela traz uma cotação prévia dos principais componentes do reator, todavia, em uma possível fase posterior de fabricação, os valores podem e deverão ser revisados com base em cotações atuais seguindo também os encargos pertinentes. Para elaboração desta estimativa, foram consultados sites especializados na oferta de componentes e subsistemas para reatores de deposição, de modo a permitir a comparação direta entre o custo dos elementos unitários e os valores praticados por equipamentos comerciais. A cotação realizada segue a linha de pesquisa, desenvolvimento e alta gama de materiais a serem aplicados, competindo em preços com reatores comerciais disponíveis com preço entre US \$ 35.000,00 e US \$ 50.000,00 para versões de pesquisa, chegando até faixas de preço entre US \$ 129.000,00 e US \$ 800.000,00 para reatores de produção industrial e automatização.

5. CONCLUSÃO

A elaboração do projeto conceitual de um reator de deposição física de vapor (PVD) por *magnetron sputtering* possibilitou a identificação, organização e sugestão de uma solução tecnológica apta a atender às demandas científicas e industriais da região amazônica. A falta de equipamentos especializados para a deposição de filmes finos restringe consideravelmente o progresso das pesquisas em materiais, nanotecnologia e engenharia de superfícies. Por conseguinte, este estudo se empenhou em apresentar uma alternativa viável, com base técnica sólida e adequada ao contexto regional.

A combinação de princípios da engenharia mecânica, ciência dos materiais, engenharia de vácuo e física de plasmas resultou no desenvolvimento de um sistema robusto, capaz de depositar filmes finos metálicos, cerâmicos e compostos com alta uniformidade, aderência e controle estequiométrico. Esse sistema atende aos rigorosos padrões globais de qualidade exigidos pela indústria e pela pesquisa científica atual. Todos os objetivos específicos foram alcançados: foi realizada uma revisão teórica completa, os componentes e subsistemas foram detalhadamente especificados, a configuração otimizada do *magnetron* balanceado foi definida e foi proposto um projeto que realmente promove a autonomia tecnológica do estado do Amazonas.

O reator conceitual apresentado possui características técnicas que o tornam competitivo em relação a equipamentos comerciais, com destaque para o custo reduzido, possibilidade de fabricação principalmente nacional e adaptação às condições locais de infraestrutura e manutenção. A estimativa de custo, variando entre R\$ 180 mil e R\$ 250 mil, representa uma redução superior a 60% em comparação com sistemas importados equivalentes. Isso torna possível a sua construção por universidades ou consórcios regionais.

Os efeitos previstos vão além do campo acadêmico: o equipamento possibilitará a produção local de revestimentos duros para ferramentas de corte, camadas anticorrosivas, filmes ópticos, contatos elétricos e superfícies funcionais. Isso contribuirá para aumentar a durabilidade dos componentes industriais, diminuir as importações, gerar conhecimento patenteável e formar mestres e doutores na área. Adicionalmente, o uso de processos de deposição a seco, em conformidade com os princípios de sustentabilidade, diminui significativamente o consumo de fluidos de corte e a produção de resíduos, em conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Uma das limitações do estudo é o fato de ser puramente conceitual, sem a criação física ou validação experimental dos filmes depositados. Essa etapa requer um investimento extra, mas já está totalmente viabilizada pelos detalhes fornecidos.

Propõe-se, para trabalhos futuros:

- I. Construção física do reator e início da operação;
- II. Deposição e análise de filmes TiN, CrN, DLC e multicamadas;
- III. Ajuste de parâmetros para deposição reativa;
- IV. Desenvolvimento da versão híbrida PVD/PECVD

Este trabalho, além de trazer contribuições técnicas, também representou um progresso importante na minha formação acadêmica e profissional. A criação do projeto expandiu minha compreensão das tecnologias de deposição, engenharia de superfícies e metodologias de projeto, reforçando habilidades fundamentais para minha futura carreira como engenheiro. A realização deste trabalho teve um grande significado pessoal, pois fortaleceu minha habilidade de investigar, entender e sugerir soluções para problemas concretos, reafirmando meu compromisso com a pesquisa e a engenharia aplicada. Ao criar e disseminar esse conhecimento, sinto que estou proporcionando um retorno significativo à sociedade, auxiliando no fortalecimento da ciência local e na construção de um ambiente mais propício à inovação no Amazonas.

6. REFERÊNCIAS

AKHTARUZZAMAN, Md *et al.* Impact of ar flow rates on micro-structural properties of ws2 thin film by rf magnetron sputtering. *Nanomaterials*, v. 11, n. 7, 1 jul. 2021.

ARORA, Priyanka; BAO, Jiming. Diagnostic Studies of Silicon and Silicon Dioxide Etching in Fluorine and Chlorine-Containing Inductively Coupled Plasmas. *[S.l.]*: University of Houston, maio 2021.

BAPTISTA, Andresa *et al.* Sputtering physical vapour deposition (PVD) coatings: A critical review on process improvement and market trend demands. *Coatings* MDPI AG, , 2018.

BARSHILIA, Harish C. *et al.* Deposition and characterization of TiAlN/TiAlON/Si₃N₄ tandem absorbers prepared using reactive direct current magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, v. 516, n. 18, p. 6071–6078, 31 jul. 2008.

BRENNING, Nils *et al.* HiPIMS optimization by using mixed high-power and low-power pulsing. *Plasma Sources Science and Technology*, v. 30, n. 1, 1 jan. 2021.

CHAVAN, Ganesh T. *et al.* A Brief Review of Transparent Conducting Oxides (TCO): The Influence of Different Deposition Techniques on the Efficiency of Solar Cells. *Nanomaterials* MDPI, , 1 abr. 2023.

CROSS, Nigel. *Engineering Design Methods: Strategies for product design*. 5o ed. *[S.l.]*: John Wiley & Sons Ltd, 2021.

GREENE, J. E. Review Article: Tracing the recorded history of thin-film sputter deposition: From the 1800s to 2017. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, v. 35, n. 5, 1 set. 2017.

KELLY, P. J.; ARNELL, R. D. Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. *Vacuum*, v. 56, 20 set. 1999.

LI, Zhenmin *et al.* Review of thin-film resistor sensors: Exploring materials, classification, and preparation techniques. *Chemical Engineering Journal* Elsevier B.V., , 1 dez. 2023.

MACHKIH, Karima; OUBAKI, Rachid; MAKHA, Mohammed. A Review of CIGS Thin Film Semiconductor Deposition via Sputtering and Thermal Evaporation for Solar Cell Applications. *CoatingsMultidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, , 1 set. 2024.

MAHAJAN, A. M. *et al.* Growth of SiO₂ films by TEOS-PECVD system for microelectronics applications. *Surface and Coatings Technology*, v. 183, n. 2–3, p. 295–300, 24 maio 2004.

MATTOX, D. M. .. Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing : film formation, adhesion, surface preparation and contamination control. 1o ed. [S.l.]: Noyes Publications, 1998.

MOREIRA, Denilson; MANZATTO, Ângelo. As potencialidades que favorecem ao desenvolvimento sustentável na Amazônia. *Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento*, v. 12, p. 751–777, dez. 2023.

OLIVEIRA, Leônidas; JÚNIOR, Wanderley; MARIBONDO, Juscelino. Concepção do sistema de alimentação de um lançador de granadas de 40mm. 2009.

PAHL, G.; BEITZ, W. Engineering Design: A Systematic Approach. 3o ed. [S.l.]: Springer-Verlag, 2007.

PATEL, Jessica *et al.* A Review of Transparent Conducting Films (TCFs): Prospective ITO and AZO Deposition Methods and Applications. *NanomaterialsMultidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, , 1 dez. 2024.

PEREIRA, Saulo Milani. LPCVD e PECVD: estudos de deposições e aspectos críticos das técnicas. [S.l.]: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS, jan. 2009.

RAMANUJA, N. *et al.* Synthesis and characterization of low pressure chemically vapor deposited titanium nitride films using TiCl₄ and NH₃. *Materials Letters*, v. 57, p. 261–269, dez. 2002.

RAMANUJAM, Jeyakumar *et al.* Flexible CIGS, CdTe and a-Si:H based thin film solar cells: A review. *Progress in Materials ScienceElsevier Ltd*, , 1 maio 2020.

SACCOMAN, João. Análise do processo de deposição de filmes de Nb₂O₅ por Sputtering Reativo. Bauru: Universidade Estadual Paulista, 2023.

SELVAKUMAR, N.; BARSHILIA, Harish C. Review of physical vapor deposited (PVD) spectrally selective coatings for mid- and high-temperature solar thermal applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, mar. 2012.

SHAHIDI, Sheila; MOAZZENCHI, Bahareh; GHORANNEVISS, Mahmood. A review-application of physical vapor deposition (PVD) and related methods in the textile industry. *EPJ Applied Physics*, v. 71, n. 3, 1 set. 2015.

ŚLIWA, Agata *et al.* Prediction of the properties of PVD/CVD coatings with the use of FEM analysis. *Applied Surface Science*, v. 388, p. 281–287, 1 dez. 2016.

STEGMANN, Lis F. *et al.* Brazilian public funding for biodiversity research in the Amazon. *Perspectives in Ecology and Conservation*, v. 22, n. 1, p. 1–7, 1 jan. 2024.

TRAIANO, Denner. CONSTRUÇÃO DE UM REATOR A PLASMA PARA DEPOSIÇÃO DE FILMES FINOS COM A TÉCNICA DE MAGNETRON SPUTTERING. GUARAPUAVA: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

TURCHI, Lenita; MORAIS, José. POLÍTICAS DE APOIO À INOVAÇÃO TECNOLÓGICA NO BRASIL: AVANÇOS RECENTES, LIMITAÇÕES E PROPOSTAS DE AÇÕES. 2017.

ULLMAN, David G. *The Mechanical Design Process*. 4o ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2008.

ULRICH, Karl T.; EPPINGER, Steven D.; YANG, Maria C. *Product design and development*. 7o ed. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2020.

VETTER, J. 60years of DLC coatings: Historical highlights and technical review of cathodic arc processes to synthesize various DLC types, and their evolution for industrial applications. *Surface and Coatings Technology*, v. 257, p. 213–240, 25 out. 2014.

WEI, Q. Emerging approaches to the surface modification of textiles. *In: Surface Modification of Textiles*. [S.l.]: Elsevier Inc., 2009. p. 318–323.

ZIMONE, Frank. 66 th Annual Technical Conference Proceedings. *In: ZIMONE, F. (org.). Society of Vacuum Coaters*, 11 maio 2023. Disponível em: <www.svc.org>