

**FABRICAÇÃO DE UMA EVAPORADORA DE METAIS COMO FORMA DE
AGREGAR VALOR AOS SERVIÇOS DO MICROEMPREENDEDOR
INDIVIDUAL¹**

**MANUFACTURING OF A THERMAL EVAPORATOR AS A WAY OF
ADDING VALUE TO THE INDIVIDUAL MICROENTREPRENEUR
WORK**

Recebido: 07/05/2018 – Aprovado: 29/6/2018 Publicado: 30/7/2018
Processo de Avaliação: Double Blind Review

Diego Escudeiro²

Graduado em Tecnologia em Manutenção Industrial
FATEC-Osasco
dyeggo_escudeiro@hotmail.com

Luciano Silva

Graduado em Tecnologia em Manutenção Industrial
FATEC Osasco
luciano.silva7245@gmail.com

Reginaldo Machado

Graduado em Tecnologia em Manutenção Industrial
FATEC – Osasco
regis2870@gmail.com

Willian Aurelio Nogueira

Doutor em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Professor da FATEC – Osasco
willian.nogueira@fatec.sp.gov.br

Antonio Carlos Santos de Arruda

Mestre em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Professor da FATEC – Osasco
antonio.arruda@fatec.sp.gov.br

¹ Os autores deste projeto agradecem às seguintes pessoas que contribuíram com a realização deste projeto: Professor Dr. Alexandre Ichiro Hashimoto; Professor Especialista Carlos Alberto de Freitas; Professor Especialista Fábio Noguti; Técnico de Laboratório Paulo Ferreira Rosa; Professor Dr. Ronaldo Willian Reis; Sr. Ariovaldo, da empresa RN Usinagens, pela doação de matéria prima e máquina para usinagem; Sr. Edilson, da empresa Global Moldes, pela doação de matéria prima.

² Autor para correspondência: Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo, Rua Pedro Rissato, 30, Vila dos Remédios, Osasco - SP, Brasil – CEP 06296-220.

Raphael Garcia Moreira

Doutor em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Professor da FATEC – Osasco

raphaelgarciamoreira@gmail.com

RESUMO: Existe um mercado promissor de deposição de filmes finos metálicos para aplicações de alta tecnologia no Brasil. Esse mercado não tem sido explorado pelos microempreendedores por falta de um estudo de viabilidade básico da construção de equipamentos que possam evaporar metais com qualidade e controle. Neste trabalho, foi feito um estudo de viabilidade da construção de uma evaporadora de metais que foi construída para uma primeira avaliação prática. Os resultados sugerem que com investimentos da ordem de R\$ 4.000,00 a R\$ 15.000,00, é possível fabricar evaporadoras de filmes finos com qualidade industrial. Uma atenção especial deve ser dada ao circuito de vácuo para controle da qualidade do filme depositado. O mercado pode ser facilmente explorado no desenvolvimento e fabricação de placas de energia solar, deposição de camadas metálicas em vidros instalados em automóveis, antenas de satélites e até na fabricação de joias e bijuterias.

Palavras-chave: evaporadora de metais; evaporação; filmes finos; metalurgia; microeletrônica.

ABSTRACT: *There is a promising market for the deposition of metallic thin films in terms of high technology applications in Brazil. This market has not been explored by microentrepreneurs because there is no a study which shows the basic viability to build a piece of equipment which can evaporate metals with quality and control. In this work, a viability research was carried out on the construction of a metal evaporator and, moreover, it was built for a first practical evaluation. The results suggest that with investments of the order from R\$ 4,000.00 to R\$ 15,000.00, it is possible that the microentrepreneur may manufacture industrial grade thin film evaporators. Special attention must be given to the vacuum circuit in order to control the quality of the deposited film. The market can be easily explored in terms of the development and manufacturing of solar energy plates, deposition of metal layers in automotive glass, satellite antennas and even in the manufacturing of jewelry and costume jewelry.*

Keywords: *evaporator of metals; evaporation; thin films; metallurgy; microelectronic.*

1. INTRODUÇÃO

Há abundância de oportunidades de aplicações comerciais de técnicas de deposição de filmes finos, tais como: com evaporação térmica, *sputtering*, moagem mecânica, precipitação química, síntese de plasma térmico, entre outros (KERMASHA; GOETGHEBEUR; DUMONT, 1995).

Entre as técnicas acima mencionadas, destaca-se a evaporação térmica devido ao grande número de aplicações que atingiu ao longo dos anos, sendo uma das técnicas mais

antigas de deposição de filmes finos, também, é uma das mais amplamente empregadas (KERN, 2012).

A técnica de deposição de filmes finos possui ampla faixa de aplicação: seja em microeletrônica, isto é, na fabricação de *microchips* de alta tecnologia, no desenvolvimento e fabricação de placas de energia solar, deposição de camadas metálicas em vidros instalados em automóveis, antenas de satélites e até na fabricação de joias e bijuterias (KERN, 2012; THONGNOPKUN; JAMKRATOKE; EKGASIT, 2012).

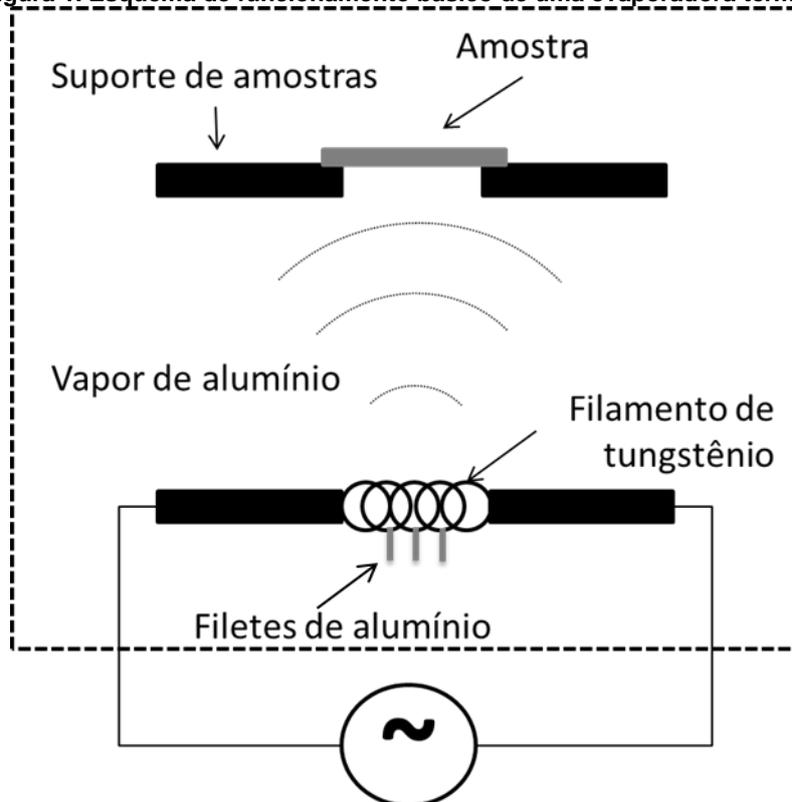
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A evaporação térmica é um processo bem conhecido do estado da arte (HEAVENS, 1952) e consiste de um filamento com ponto de fusão suficientemente maior do que o do material a ser evaporado que é posicionado em contato com o dito filamento. Quando o filamento alcança a temperatura de fusão em alto vácuo, ocorre uma rápida evaporação do material. O vapor do material evaporado se dispersa pelo vácuo, produzindo uma frente de vapor com formato parabólico que produz um gradiente de espessura ao longo do alvo (HEAVENS, 1952).

Tipicamente, o filamento consiste de tungstênio e, para uma ampla faixa de aplicações, o alumínio é o material a ser evaporado (HEAVENS, 1952; SAYER; SREENIVAS, 1990).

A Figura 1 mostra um esquema de funcionamento básico da evaporadora térmica:

Figura 1. Esquema de funcionamento básico de uma evaporadora térmica:



Fonte: Elaborado pelos Autores.

A espessura do filme depositado é inversamente proporcional à distância entre o filamento e a amostra. Por outro lado, quanto mais distante a amostra do filamento, menor será o gradiente de espessura observado na amostra, uma vez que a parábola da frente do vapor de metal tende a ficar plano com a distância (HEAVENS, 1952; SAYER; SREENIVAS, 1990).

O metal tende a ser depositado com baixa rugosidade em alto vácuo (da ordem de 1×10^{-10} m), ou seja, para pressões da ordem de 1×10^{-6} mmHg, já em pressões maiores, a literatura reporta a provável oxidação do vapor e formação de óxidos no processo de deposição (SAYER, M.; SREENIVAS, K., 1990).

3. JUSTIFICATIVA

O Brasil apresenta grandes oportunidades para exploração da energia solar (TIMILSINA; KURDGELASHVILI; NARBEL, 2012) na área de joalheria de luxo e bijuterias (GASPERINI; REICHEL, 2010), microeletrônica (AMANN; CANTWELL, 2012), entre outros.

Deve ser realizada a massa crítica de projetistas de dispositivos microeletrônicos no Brasil, com capacidades para desenvolver microchips ou placas de energia solar que hoje precisam terceirizar parte da fabricação dos protótipos em centros de pesquisa e desenvolvimento europeus como forma de atender a demanda (SWART et al., 2012). Esses projetistas podem ser atendidos por equipamentos nacionais. Isso representa uma oportunidade aos microempreendedores de alta tecnologia.

4. OBJETIVOS DO PROJETO

O objetivo geral deste trabalho consiste em verificar a viabilidade de fabricação de uma evaporadora térmica de metais de baixo custo, apropriada para os recursos disponíveis no município de Osasco, no Estado de São Paulo, visando a fabricação em escala por microempreendedores individuais de alta tecnologia. Os objetivos específicos são:

- fabricar uma estrutura móvel para suportar o sistema de evaporação térmica, uma vez que microempreendedores possuem a necessidade de equipamentos fáceis de transportar;
- fabricar a campânula em aço inoxidável, visando limitar a contaminação para o filme a ser depositado;
- fabricar o suporte do filamento para temperaturas de até 2500 °C;
- fabricar o sistema de vácuo e sistema elétrico de controle;
- realizar um levantamento de custos como estimativa da viabilidade de fabricação a partir das condições de um microempreendedor.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. LEVANTAMENTO DOS PRINCIPAIS MATERIAIS PARA FABRICAÇÃO DE UM FORNO E RESPECTIVOS PREÇOS

Como metodologia de planejamento, foram inicialmente pesquisados fornecedores de materiais da região de Osasco, contudo, alguns materiais foram adquiridos de outras regiões, conforme a

Tabela 1:

Tabela 1. Lista de materiais e preços para fabricação do forno conforme especificações:

NOME	MODELO	PREÇO
Tubo retangular	Aço carbono (50 x 30mm)7 barras de 6 mts	R\$ 385,00
Chapa galvanizada	Aço carbono(1500 x 1000mm)	R\$ 45,00
Chapa acrílica	1000 x 300 x 4mm	R\$ 35,00
Câmpanula	Aço inox (300 x 500mm)	R\$ 500,00
Disco de inox	Aço inox (300 mm)	R\$ 100,00
Parafusos	Inox m5x70mm (4 unid)	R\$ 10,00
Manta de silicone	400x400x3mm	R\$ 45,00
Chapa Perfurada	Esp.1.2 Furo 6.35	R\$ 60,00
Bomba de vácuo	Duplo estágio DVP 3A, 6 CFM 170L /M	R\$ 500,00
Mangueira	Flexível 500 x mm x 1/2"	R\$ 40,00
Manômetro	Dupla escala 0-30 inhg	R\$ 20,00
Flange elétrico	Flange com seis pinos para ligação	R\$ 860,00
Transformador	Tensão entrada 220V, saída 10V	R\$ 560,00
Variac	Variador de tensão de (0 á 220V / 50 A)	R\$ 400,00
Componentes elétricos	Painel,disjuntores,contatores, fusíveis,cabos,botão etc.	R\$ 250,00
Outros	Veniz e tinta	R\$ 40,00
Total		R\$ 3.850,00

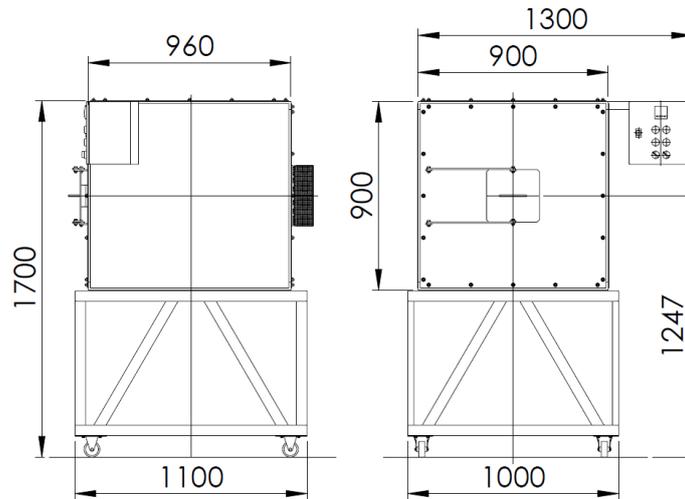
Fonte: Elaborado pelos Autores.

O projeto partiu de um investimento estimado de R\$ 3.850,00, um valor compatível com a capacidade de investimento de microempreendedores de São Paulo (SOUZA; ROMEIRO, 2017).

5.2. PROJETO GERAL

O projeto da evaporadora foi realizado com uma licença acadêmica do SolidWorks. A Figura 2 mostra as principais dimensões, materiais e suas posições no projeto, conforme seguem:

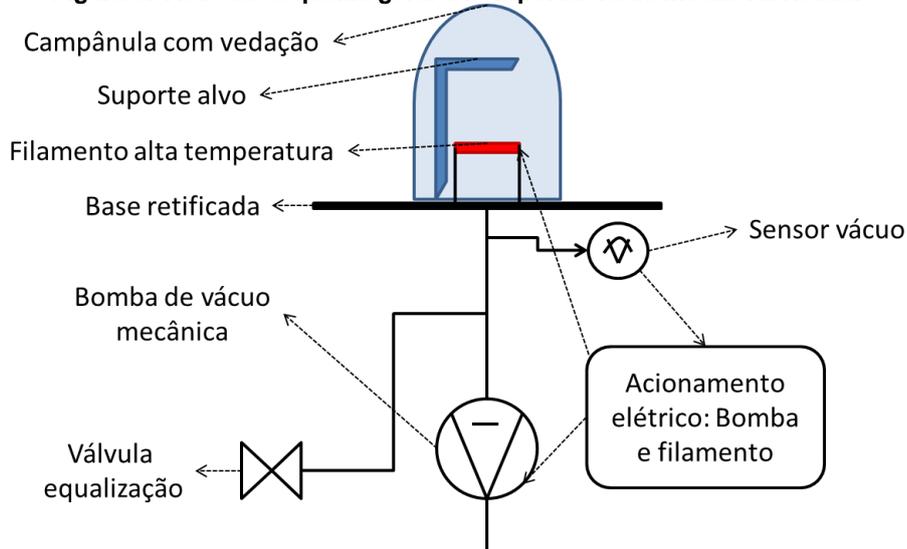
Figura 2 – Vista do projeto 2D da evaporadora. Medidas em milímetros:



Fonte: Acervo pessoal.

A potência aplicada sobre o filamento foi de aproximadamente 800 W e confeccionadas em tungstênio. A bomba de vácuo foi conectada à campânula por meio de uma válvula de precisão visando prover controle no momento da equalização da pressão interna com o ambiente. Na Figura 3, é apresentado um esquema geral de montagem e fabricação da evaporadora de metais:

Figura 3. Visão do esquema geral da evaporadora de metais fabricada:



FONTE: Autor.

5.3. ETAPAS DE FABRICAÇÃO

Nas figuras que seguem são mostradas as etapas de fabricação da evaporadora. Deve ser observado que todas as etapas são compatíveis com equipamentos de fácil acesso, podendo ser este projeto realizado por oficinas vinculadas a micro e pequenas empresas. A Figura 4 apresenta o processo de soldagem da estrutura externa:

Figura 4. Soldagem das estruturas externas do forno usando processo MIG/MAG:



Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 5 mostra o delicado processo de ajustes da estrutura para acomodação dos componentes constituintes do sistema (conforme listados na tabela 1)

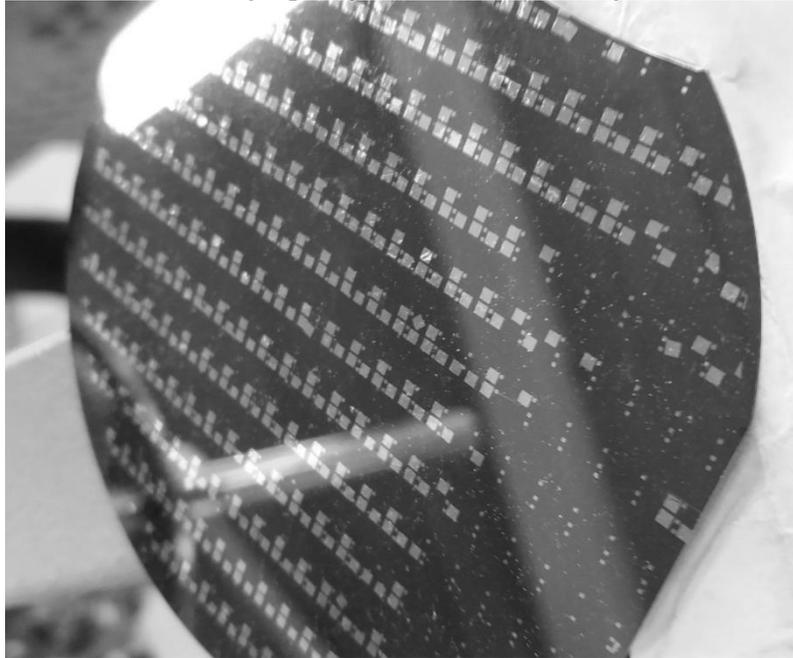
Figura 5. Detalhes dos processos de ajustes estruturais empregando ferramentas acessíveis ao microempreendedor:



Fonte: Acervo pessoal.

Foi elaborado um controle elétrico apropriado para ligar e desligar o sistema de vácuo e aplicação de potência ao filamento. O ajuste de potência do filamento foi feito por meio de um regulador de tensão tipo VARIAC de 0 a 250 Vac, com corrente máxima de saída de 50 A. Para testes, foi depositado um filme fino sobre uma lâmina de silício proveniente de refugo de processos de microeletrônica conforme Figura 6, a qual mostra uma lâmina que receberá a deposição de filme fino:

Figura 6. Lâmina de silício empregada para testes durante os processos de deposição:



Fonte: Acervo pessoal.

6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A fabricação de uma evaporadora de metais visando prestação de serviços de desenvolvimento de novos materiais e processos para a indústria metalúrgica, cerâmica, de polímeros e de eletrônica foi concluída com sucesso conforme Figura 7:

Figura 7. Vista do forno totalmente concluído e operacional:



Fonte: Acervo pessoal.

Um primeiro teste foi realizado visando evaporar o alumínio. Esse teste teve a finalidade de caracterizar os principais parâmetros do evaporador de metais, tais como: rampa de aquecimento, resfriamento, características de operacionalidade, eficiência da energética visando segurança dos operadores e demais aspectos técnicos, de acordo com a Figura 8:

Figura 8. Disposição do suporte e filamento com massas de alumínio preparadas para evaporação:



Fonte: Acervo pessoal.

Para caracterizar o processo de aquecimento do filamento, esse recebeu 20% da potência nominal em pressão atmosférica para verificação e constatação da operacionalidade do sistema, conforme Figura 9:

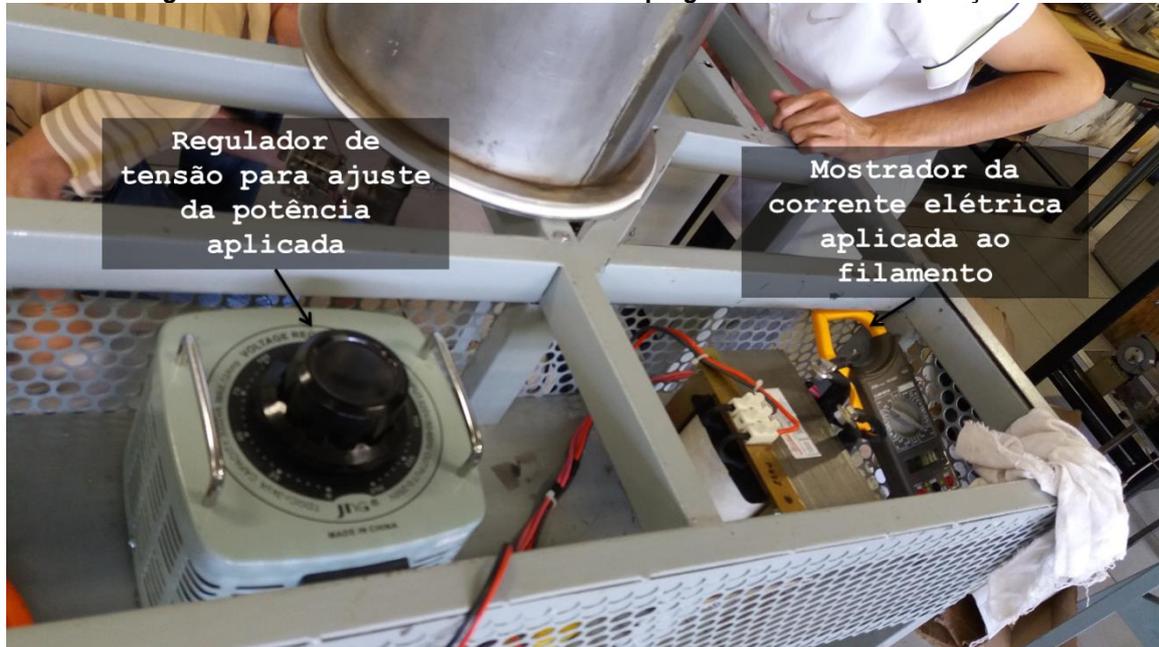
Figura 9. Indicação visual do aquecimento do filamento de tungstênio:



Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 10, são mostrados o regulador de tensão e medidor de corrente elétrica:

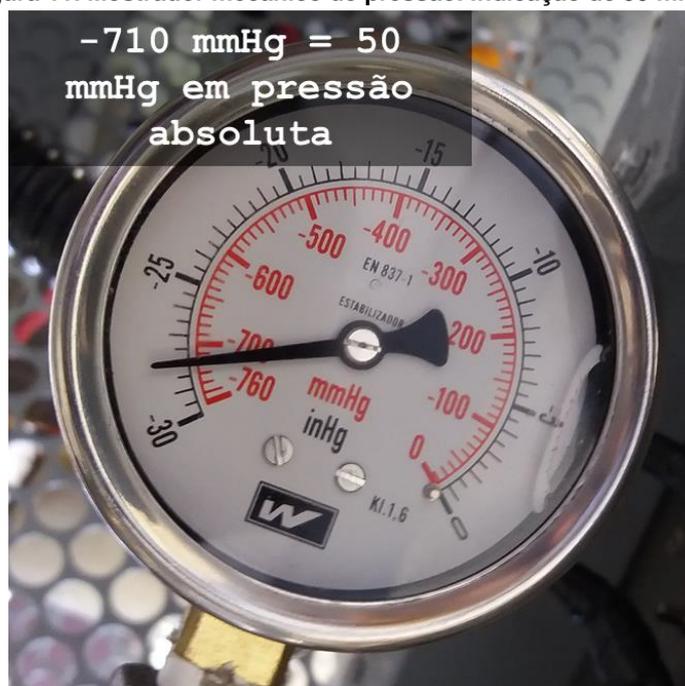
Figura 10. Controle de tensão e corrente empregado durante as evaporações:



Fonte: Acervo pessoal.

A pressão típica para garantir um vácuo suficiente para deposição de filmes finos de alta qualidade é da ordem $1,0 \times 10^{-6}$ mmHg (HEAVENS, 1952). Por outro lado, com a bomba de vácuo empregada, especificada para aplicações de manutenção em ar-condicionado, foi possível obter uma pressão da ordem de 50 mmHg (a pressão atmosférica é de 760 mmHg), conforme Figura 11:

Figura 11. Mostrador mecânico de pressão. Indicação de 50 mmHg:



Fonte: Acervo pessoal.

Foi projetado um sistema de suporte para alvos do tipo lâmina de silício e um mecanismo para ajuste da altura entre filamento e alvo, de acordo com o que foi mostrado na Figura 12. Esse ajuste na altura permite o controle da espessura do filme a ser depositado (observar comentários sobre a Figura 1).

Figura 12. Sistema de suporte de lâminas/alvo e ajuste de altura dos alvos em relação ao filamento:

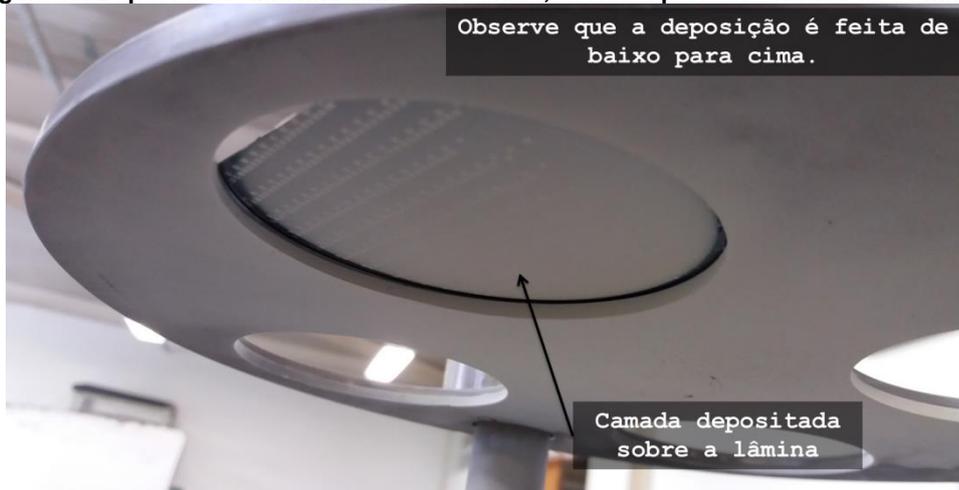


Fonte: Acervo pessoal.

Como resultado final, após o processo de evaporação foi observada a presença de uma fina camada fosca e de cor branca sobre a lâmina enquanto que o alumínio foi consumido. A literatura reporta que em pressões elevadas, acima de 1×10^{-2} mmHg, o alumínio é depositado na forma de Al_2O_3 (alumina), ou seja, devido a alta quantidade de oxigênio, o alumínio é oxidado durante a trajetória que percorre entre o filamento e o alvo (SAYER; SREENIVAS, 1990), conforme a

Figura 13:

Figura 13. Depósito de uma fina camada de óxido, devido a pressão elevada de 50 mmHg:



Fonte: Acervo pessoal.

O metal foi evaporado, contudo, melhoras no sistema de vácuo devem ser efetuados para viabilizar completamente o sistema de deposição de metais, visando obter filmes metálicos sobre o alvo.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma evaporadora de metais visando serviços de desenvolvimento de novos materiais e processos para a indústria metalúrgica, cerâmica, de polímeros e de microeletrônica foi concluída e testada. Como teste inicial, o alumínio foi evaporado e depositado na forma de Al_2O_3 (alumina).

O projeto se mostrou bastante competitivo e eficiente em termos de custo e operacionalidade. Por outro lado, melhorias no circuito de vácuo devem ser elaboradas, por exemplo, com a instalação de uma bomba de vácuo tipo difusora para obter pressões da ordem de 1×10^{-2} mmHg ou menor.

O mercado relacionado ao desenvolvimento de materiais e processos tecnológicos das áreas de metalurgia, cerâmica, de polímeros e microeletrônica pode ser fortemente

impulsionado no Brasil se esse tipo de serviço atingir uma massa crítica mínima, isto é, um número mínimo de empresas que possam oferecê-lo a um preço de mercado acessível a todos os interessados.

Como perspectivas futuras são sugeridas para o presente trabalho as seguintes atividades:

- instalação de uma bomba difusora no circuito de vácuo, permitindo obter vácuo da ordem de 1×10^{-2} mmHg ou menor;
- teste com outros tipos de metais, além do alumínio;
- instalar visor na campânula;
- caracterizar e desenvolver uma equação que relacione altura entre filamento e alvo como forma de previsão da espessura do filme fino depositado;
- caracterização dos filmes finos depositados;

REFERÊNCIAS

AMANN, Edmund; CANTWELL, John (Ed.). **Innovative firms in emerging market countries**. Oxford University Press, 2012.

GASPERINI, Chaline; REICHEL, Valesca Persch. Mercado de luxo: estratégias para internacionalização de empresas joalheiras do Brasil. **Internext**, v. 4, n. 2, p. 83-100, 2010.

HEAVENS, O. S. The Contamination in Evaporated Films by the Material of the Source. *Proceedings of the Physical Society*. **Section B**, v. 65, n. 10, p. 788, 1952.

KERMASHA, S.; GOETGHEBEUR, M.; DUMONT, J. Determination of phenolic compound profiles in maple products by high-performance liquid chromatography. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 43, n. 3, p. 708-716, 1995.

SAYER, M.; SREENIVAS, K. Ceramic thin films: fabrication and applications. **Science**, v. 247, n. 4946, p. 1056-1060, 1990.

SOUZA, Paulo Augusto Ramalho de; ROMEIRO, Maria do Carmo. As instituições de microcrédito no Brasil: uma perspectiva sobre o fluxo de fundos no setor. **Revista Contemporânea de Contabilidade**, v. 14, n. 33, p. 88-100, 2017.

KERN, Werner. **Thin film processes II**. Academic press, 2012.

SWART, Jacobus W. et al. **Education and jobs on ic design through the ic-brazil initiative**. In: European Workshop on Microelectronics Education. 2012. p. 81-84.

THONGNOPKUN, Pimthong; JAMKRATOKE, Matinee; EKGASIT, Sanong. Thermal behavior of nano-silver clay in the application of handmade jewelry. **Materials Science and Engineering: A**, v. 556, p. 849-854, 2012.

TIMILSINA, Govinda R.; KURDGELASHVILI, Lado; NARBEL, Patrick A. Solar energy: Markets, economics and policies. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 16, n. 1, p. 449-465, 2012.