

Máquina de recubrimiento de pulverización catódica PVD

PVD sputtering coating machine

Sergio Arturo **Rodriguez-Valencia**¹, Iyari Alejandro **Nava-Tellez**², Milton Carlos **Elias-Espinosa**³

Tecnológico de Monterrey, Escuela de ingeniería y Ciencias, CDMX, México

¹<https://orcid.org/0000-0001-5285-1972> | A01023237@itesm.mx

²<https://orcid.org/0000-0001-6425-9642> | A01013636@itesm.mx

³<https://orcid.org/0000-0002-1377-3569> | mielias@tec.mx

Recibido 02-12-2020, aceptado 31-03-2021.

Resumen

En este trabajo se abordará el diseño de una máquina a escala de depósitos por pulverización catódica (PVD) para uso estudiantil. Esto a partir de la generación y focalización de plasma de manera controlada en un sistema de vacío con el apoyo de un sistema de alto voltaje. Por medio de este diseño se consiguió realizar un depósito de aluminio visible sobre sustratos de vidrio durante una ronda sencilla de pruebas. Este tipo de sistema puede abrir las puertas a proyectos futuros en tecnología de materiales, así como la investigación en áreas como la óptica o la tribología a nivel universitario.

Palabras clave: Depósito de material, PVD, plasma, tecnología de materiales.

Abstract

This work will address the design of a small-scale machine for sputtering tanks (PVD) for student use. This from the generation and focusing of plasma in a controlled way in a vacuum system with the support of a high voltage system. Through this design it was possible to make a visible aluminum deposit on glass substrates during a simple round of tests. This type of system can open the doors to future projects in materials technology, as well as research in areas such as optics or tribology at the university level.

Index terms: Material deposition, PVD, plasma, materials technology.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente el estudio relacionado con tecnología de materiales ha sido revolucionado con la implementación del recubrimiento de objetos con metales o cerámicos que, además de dar un nuevo aspecto a los materiales, también modifican notablemente sus propiedades superficiales. Estas modificaciones tienen aplicaciones tanto estéticas como de funcionalidad en ramas como la mecánica, la óptica, la medicina y la electrónica [1], [2]. Es por esto por lo que algunos de los métodos de recubrimiento como la Deposición por Vaporización Física (PVD) son capaces de abrir las puertas al recubrimiento con materiales como el grafeno que durante los últimos años ha demostrado tener propiedades eléctricas superiores al cobre, así como capacidades autolubrificantes pero cuyos procesos de aplicación siguen en etapa de investigación [3]. No obstante, a pesar de tratarse de un proceso conocido de manera industrial, no es común encontrarlos para procesos a baja escala y su poca disponibilidad lo convierte en un proceso de costos elevados.

Se le conoce como PVD al proceso que consta en pulverizar o vaporizar elementos metálicos o cerámicos para después depositarlos sobre otro material en la forma de una delgada película que mantiene las propiedades del elemento depositado. Estos procesos están divididos en dos categorías: vaporización térmica y pulverización por transferencia de momento. Los procesos de PVD basados en la pulverización por transferencia de momento son métodos que bombardean una superficie sólida con partículas energéticas, como iones acelerados, de manera que la colisión erosiona la superficie del sólido desprendiendo pequeñas partículas de este en forma de un polvo fino dentro de una cámara de vacío [4]. Por medio de este método, las partículas liberadas del objetivo se impregnan en las superficies expuestas en el interior del área de trabajo. Existen distintos métodos de pulverización por transferencia de momento, pero el más simple es la deposición por pulverización catódica de corriente directa. Este último consta de la ionización de algún gas dentro de un sistema de baja presión con la ayuda de dos electrodos. Sobre el ánodo de estos electrodos se encuentra el sustrato mientras que en el cátodo se encuentra el objetivo de manera que la dirección del plasma generado irá directamente hacia el material a depositar. Para mantener la pureza de los depósitos generalmente son utilizados gases inertes. Sin embargo, el uso de oxígeno y nitrógeno es también utilizado en este proceso debido a que su reacción es capaz de generar depósitos de óxidos y nitruros que dan características diferentes al material depositado [4].

Debido a que este proceso utiliza la energía de colisión de los iones para pulverizar, se recomienda utilizar gases pesados para aumentar su energía cinética. No obstante, debido a la complejidad para encontrar el Kriptón y el Xenón, así como los riesgos cancerígenos que se ha demostrado tiene el Radón [5], el gas más común para realizar este proceso es el Argón. Este tipo de procesos en ocasiones se apoya del uso de un imán por debajo del objetivo con el fin de aumentar la velocidad de colisión, así como atraer el plasma al objetivo cuando este no es directamente el cátodo, aunque no es completamente necesario [2], [4].

Empleando todos los conceptos anteriores en este proyecto; se generó una máquina de PVD a partir de la generación y focalización de plasma de manera controlada en un sistema de vacío con el apoyo de un sistema de alto voltaje. Por medio de este diseño se consiguió realizar un depósito de aluminio visible sobre sustratos de vidrio durante una ronda sencilla de pruebas.

II. METODOLOGÍA Y DESARROLLO

Dentro del desarrollo de este trabajo se abordó el proceso de pulverización por transferencia de momento. Es necesario comprender que para que este el sistema funcione, se necesita de tres elementos que garanticen la generación y focalización del plasma en un ambiente controlado, estos son: vacío de por lo menos 750 micrones, alto voltaje y un campo magnético que guíe al plasma hacia el objetivo a pulverizar [4], [6]. El proceso para la realización de este trabajo se observa en la Fig. 1.

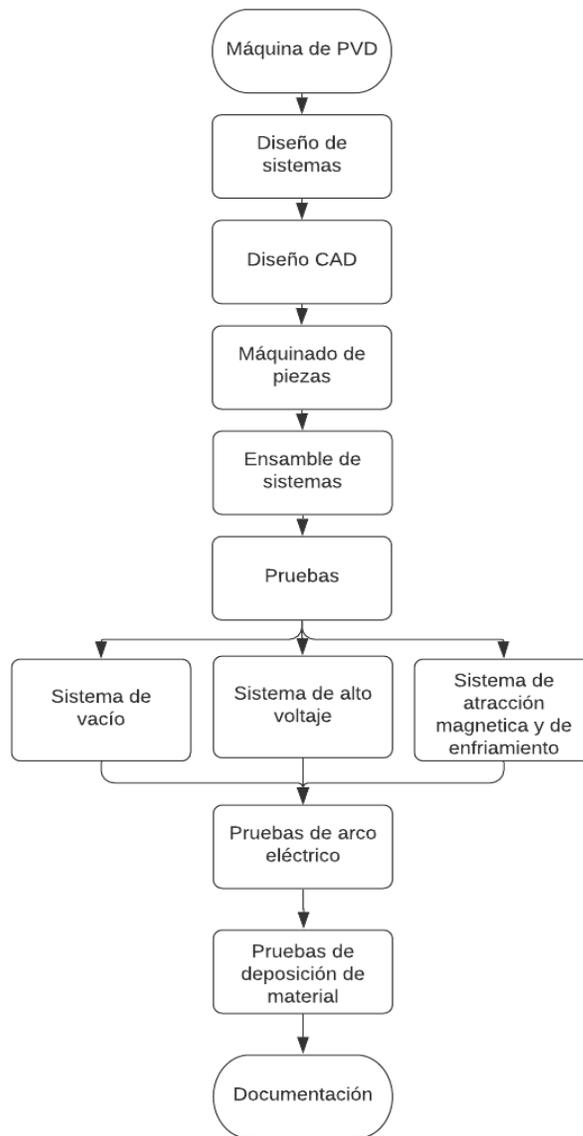


Fig. 1. Diagrama de flujo de la metodología realizada.

A continuación, se abordarán con más detalle los pasos realizados que fueron mencionados en el diagrama de la Fig. 1.

A. *Diseño CAD y maquinado de piezas*

Una vez definidos los elementos requeridos se diseñaron los modelos de tipo CAD de las piezas de este ensamble para posteriormente ser maquinados en un CMV. Para esto fue necesario considerar las dimensiones de una campana de vacío, así como el área de operación del centro de maquinado a utilizar. En total se diseñaron 4 piezas cuyos modelos serían utilizados para su maquinado correspondiente. Estas piezas mostradas en la Fig.2 son la base del ensamble, el sistema de electroimán con enfriamiento (3 piezas) y los coples que serían utilizados

4

para el ensamble de la base sobre perfiles octagonales. Se debe aclarar que las piezas fueron diseñadas para ser maquinadas con procesos de impresión 3D, fresado y torneado. Las piezas se diseñaron para ser maquinadas con impresión 3D, estas fueron realizadas considerando una tolerancia de 1 mm y una geometría que requiriera la menor cantidad de material de soporte posible mientras que las otras piezas fueron realizadas de manera que su maquinado fuera hecho con el menor número de herramientas y cambios de eje, así como el uso de cortadores y tornillos comerciales. Posteriormente con fines expositivos se realizó una modelación de las piezas que no sería maquinadas para poder apreciar las dimensiones requeridas por todo el sistema ensamblado. Las piezas que son sólo con fines expositivos cuentan con las dimensiones originales de sus piezas son: electrodo, imán de neodimio, electroimán, perfiles octagonales, objetivo y campana de vacío. En la Fig. 3 se observa el ensamble de los elementos, así como las vistas normales y en explosión de los dos ensambles (base y sistema de electroimán con enfriamiento).

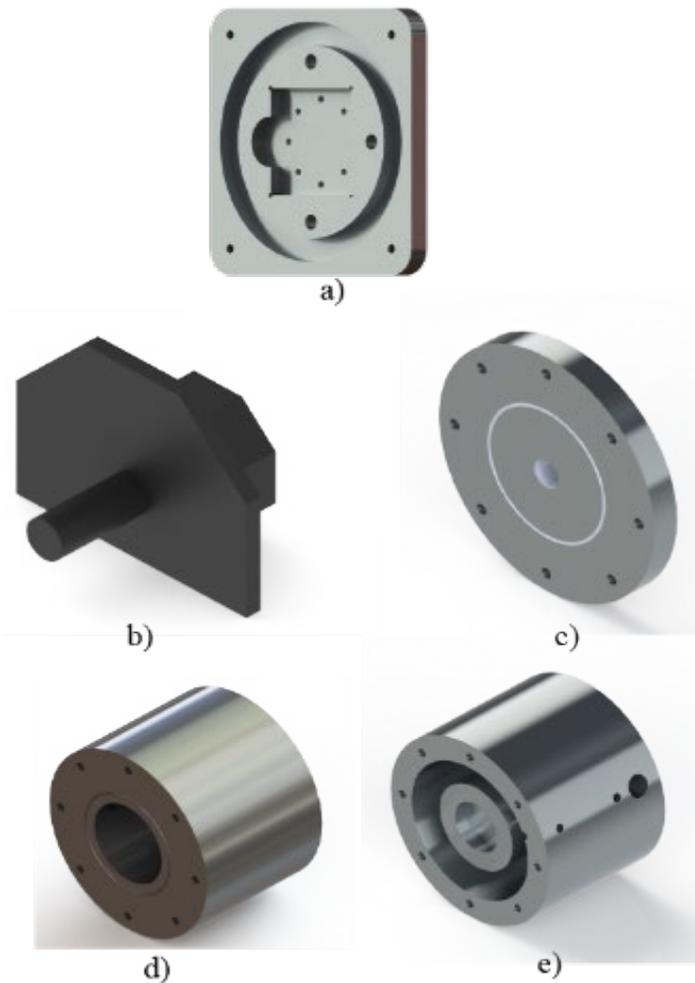


Fig. 2. Diseño de piezas a maquinar. a) Base principal. b) Cople de base a perfiles octagonales. c) Base de sistema de enfriamiento. d) Vista posterior del sistema de enfriamiento/magnético. e) Vista frontal del sistema de enfriamiento/magnético.

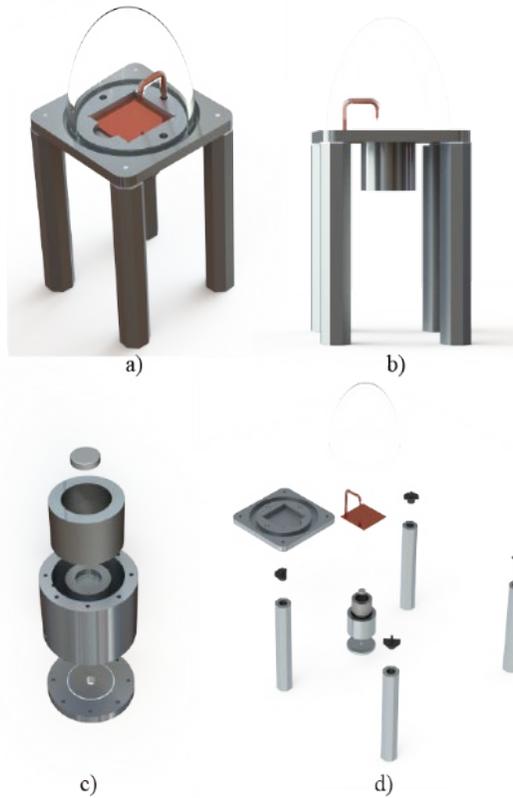


Fig. 3. Ensamble del sistema. a) Vista isométrica del prototipo. b) Vista frontal del prototipo.
c) Ensamble de sistema magnético. d) Explosión de ensamble del prototipo.

Para el proceso de maquinado se usaron tres métodos diferentes: fresado en centro de maquinado vertical, Torno e impresión 3D. La impresión 3D fue realizada utilizando PLA a una densidad del 20% manteniendo una geometría de impresión intercalada como se muestra en la Fig. 4.

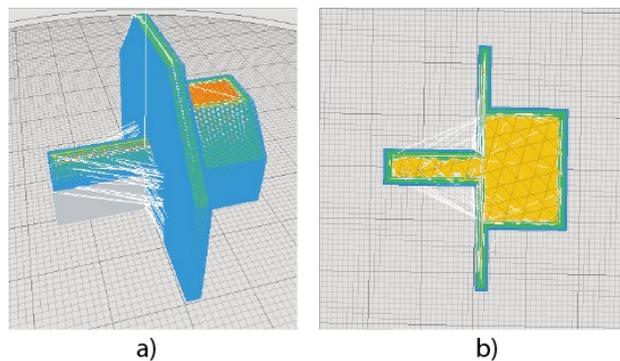


Fig. 4. a) Simulación de impresión 3D. b) Sección transversal de impresión.

Para las tres piezas a maquinar restantes, se maquinaron bajo los procesos de fresado y torneado sin darles ningún acabado y cuyas piezas finales se aprecian en la Fig. 5. Una vez maquinadas las piezas se ensamblaron según el CAD. En este punto se decidió diseñar e imprimir la pieza de la Fig. 6 con el fin de añadir estabilidad a la base.

6



Fig. 5. Piezas de aluminio maquinadas. a) Base principal. b) Base de sistema de enfriamiento. c) Sistema magnético.



Fig. 6. Pieza lateral.

Para el empaque de la campana de vacío se utilizó silicón de alta temperatura y se moldeó a la forma de la campana para tener el sello más ajustado a la pieza. Este ensamble se puede ver en la Fig. 7.

7

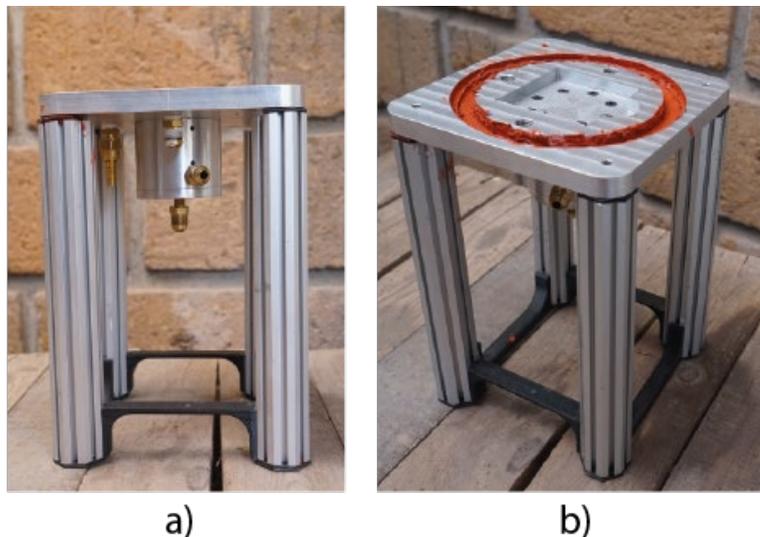


Fig. 7. Ensamble a) Vista lateral. b) Vista isométrica.

En total fueron requeridos los siguientes materiales y equipos:

a. Materiales

- Aluminio
- Placa de 20×20×2.54 cm
- 4x Perfil tipo bosch octagonales de 30 cm
- Barra redonda de aluminio de 3" de diámetro x 2.5" de largo
- Canal en C de ¼"× ¼"× 4"
- Barra redonda de cobre de ¼" de diámetro × 1" de largo
- Bomba de vacío de 75 micrones
- Bomba de refrigerante
- Campana de vacío de cristal
- MOT
- Variac 0-120 Volts AC a 5 Amps
- Fuente conmutada de 12 Volts DC a 8.5 Amps
- 2 x ventilador de 12 Volts
- Rectificador de alto voltaje
- Capacitor de alto voltaje
- Vacuómetro
- Impresiones 3D
- Silicón de alta temperatura
- Conexiones NTP para gas
- Mangueras de baja presión
- Tornillos con tuercas de varias medidas
- Sustratos de cristal
- Núcleo de acero 1026
- Cable magneto calibre 22

b. Equipo

- Centro de maquinado vertical
- Torno
- Impresora 3D (FDM)

B. Sistema de vacío

Como fue revisado en secciones anteriores será necesario mantener un vacío dentro del espacio de trabajo para garantizar la generación de plasma. El vacío requerido para generar el arco de plasma debe de ser de entre 90 y 750 micrones [4], [6]. Sin embargo. Debido al fenómeno de descarga de arco es posible mantener la ionización con una menor presión algunos minutos después de que se genere el plasma debido al aumento en la temperatura del ánodo [7]. Para garantizar estas presiones, este sistema utiliza una bomba de vacío de 75 micrones conectadas a la base de aluminio a través de mangueras de alta/baja presión. como se muestra en la Fig. 8.

∞



Fig. 8. Sistema de vacío conectado.

Esta presión es medida a través de un vacuómetro ubicado en una terminal directamente debajo de campana para garantizar una medición directa del área de trabajo. Finalmente, la campana de vacío se encuentra colocada sobre la ranura de esta misma base. Se decidió utilizar una campana de vidrio borosilicatado debido a que este material es capaz de soportar altas temperaturas sin comprometer su integridad estructural. Es necesario mantener la campana llena con algún gas inerte (Argón) con el fin de garantizar la pureza de los materiales al momento de hacer los depósitos. Este gas ingresa a la cámara por medio de una conexión tipo “T” ubicada en la manguera que conecta a la bomba de vacío con la campana.

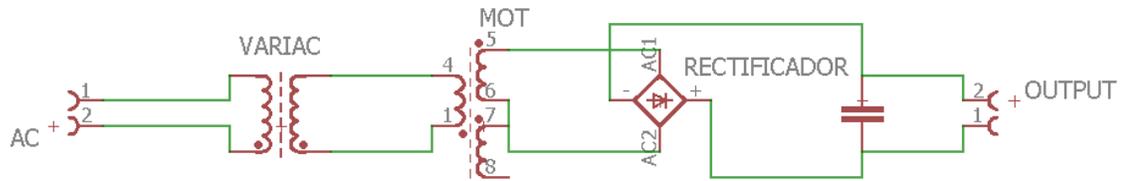
C. Sistema de alto voltaje

Conociendo la ley de Paschen [4], [6], [7] se sabe que el voltaje de ruptura en la generación de plasma a través de la ionización de gases va a ser equivalente a la presión y a la distancia entre los electrodos. Además, considerando la teoría de la descarga del cátodo y descarga de arco se sabe que el voltaje requerido para ionizar un gas en un espacio cerrado será variable con el paso del tiempo mientras este proceso se haga de manera constante. De manera similar esta resistencia en el vacío va a cambiar si el gas dentro de la cámara también lo hace. No obstante, se conoce que el rango de ionización de los gases se encuentra entre 500 y 3000 volts [7]. Considerando lo anterior se seleccionó un sistema de alto voltaje variable en lugar de conectar uno fijo de manera que se tenga un mejor control sobre el voltaje introducido y así también adaptarlo a otros procesos o gases de ser necesario.

Para lograr este circuito de voltaje variable se utiliza un variac de 0 a 120 volts AC conectado en serie a un MOT con una relación de bobinas de entre 1:18 aproximadamente. Teniendo esta conexión es posible tener un rango de operación de entre 0 y 2200 Volts AC los cuales son convertidos a DC con la ayuda de un puente

rectificador de alto voltaje. De este puente salen el cátodo y ánodo que son conectados dentro de la cámara de vacío no sin antes ser filtrados contra picos de voltaje usando un capacitor de alto voltaje conectado en paralelo a las terminales de salida del puente rectificador. Este circuito se puede observar en la Fig. 9.

9



a)



b)

Fig. 9. a) Circuito de alto voltaje. b) Circuito de alto voltaje ensamblado.

Para fines prácticos de deposición por medio de este método se debe colocar al ánodo sobre el sustrato y al cátodo debajo del objetivo. Cabe mencionar que el ánodo del sistema se encuentra suspendido con la ayuda de una base de aluminio aislada con silicón de alto voltaje en el centro de la cámara con una punta de cobre que funciona como electrodo mientras que el cátodo es toda la base de aluminio.

D. Sistema de atracción magnética y de enfriamiento

Existen dos maneras de dirigir un plasma sobre un objetivo específico. El primero es usando a este tanto como objetivo como cátodo obligando al plasma a bombardear con electrones a este material. En el caso de que el objetivo no sea el cátodo en el proceso de ionización entonces se debe colocar a este sobre un campo magnético con el fin de atraer los electrones a la superficie de este objetivo y así erosionarlo. Este último caso será aquel en el cual el objetivo se trate de algún material cerámico con alta resistencia eléctrica. Para este proyecto se decidió implementar la segunda manera debido a que esto abre las puertas a utilizar materiales no conductivos como objetivos. La forma de este sistema se diseñó de manera que en el centro se encuentra un imán permanente de neodimio envuelto por un electroimán polarizado de manera inversa al sentido del imán permanente. Esta geometría nos va a ofrecer una forma de campo toroidal la cual presenta una mayor área de atracción, así como un ligero aumento en la velocidad de colisión del plasma contra el objetivo.

Para mantener la forma toroidal del campo es necesario igualar a la fuerza de atracción del electroimán con la fuerza magnética del imán permanente; el cual se conoce es de 55 Teslas. Usando las leyes de Ampere se calculó el número de vueltas necesarias para obtener esta cifra considerando un núcleo de hierro 1026 de 34

mm y .22 y un amperio de corriente. Es así como el número de vueltas resultó en 240. Una vez embobinado el núcleo mostrado en la Fig. 10 se desarrolló su sistema de enfriamiento.

10



Fig. 10. Electroimán.

Para esto se debe considerar un sistema de enfriamiento que garantice la integridad magnética del imán permanente debido a que su temperatura de operación no debe rebasar los 150°C. Este sistema se puede observar en los CAD de la Fig. 2 en la base de la pieza donde se ensambla el sistema de atracción magnética. Para esto se estará utilizando un sistema de enfriamiento de tipo cascada el cual inunda al núcleo de la pieza desde su base con líquido y lo fuga por la cara lateral de este manteniendo un flujo constante con la ayuda de una bomba de agua de 12 V. Además de esto se cuenta con 2 ventiladores de 12 volts ubicados de manera paralela al sistema con el fin de mantener un flujo constante de aire externamente. Todo este sistema es alimentado por una fuente conmutada de 12 Volts y en su totalidad requiere de 8.2 amperios para funcionar. Este sistema conectado se puede apreciar en la Fig. 11.



Fig. 11. Sistema de atracción magnética y enfriamiento.

E. Pruebas

Para comenzar las pruebas de funcionamiento, primero se corroboró que el sistema de vacío funcionara de manera correcta. Para esto, la cámara fue cerrada, la bomba de vacío fue encendida y se midió que el vacío dentro del espacio se estuviera generando. Se consideró a esta prueba como finalizada una vez que la presión interna se encontrará por debajo de los 750 micrones como mínimo. De manera expositiva también se introdujo un pequeño globo de aire a la cámara con el fin de visualizar el cambio de presión dentro de esta. Esta prueba fue considerada exitosa a la marca del primer minuto durante el cual alcanzó una presión de 619 micrones como se muestra en la Fig.12.

11

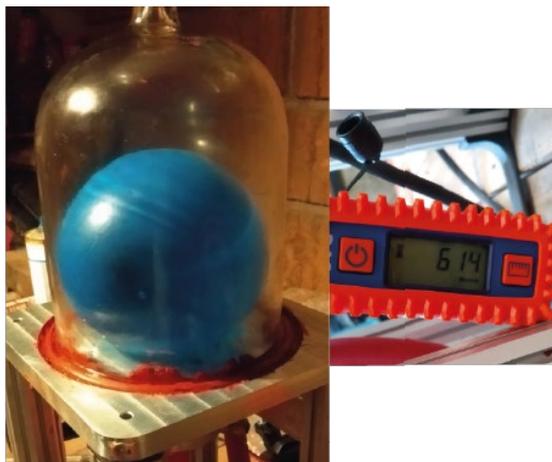


Fig. 12. Pruebas de vacío.

Posteriormente se realizó la primera prueba de los sistemas en conjunto para comprobar la generación de plasma con los equipos antes mencionados. El objetivo de esta prueba es la de generar un arco de luz en un ambiente contaminado para documentar tanto la presión como el voltaje a la cual se generó y después utilizar estos mismos valores para realizar las pruebas de erosión y depósito. Durante esta prueba se consiguió generar un arco eléctrico a una presión de 500 micrones y 550 Volts como se muestra en Fig.13.



Fig. 13. Plasma generado en pruebas de ionización.

III. RESULTADOS

Se colocó una lámina de 1/8" de aluminio encima del cátodo. Por encima del área del electroimán y se cubrió con hojas de cristal que descansan sobre la ranura de la base que funge como cátodo. Se realizaron rondas de prueba de 1, 10 y 20 min cambiando las hojas de cristal con tal de ver el crecimiento del depósito en cada caso. Mientras las pruebas avanzaban fue más notorio cómo las láminas de cristal comenzaban a tener un cambio en su transparencia imprimiendo la forma de la base con una ligera película blanca como se muestra en Fig. 14. Considerando factores como la tonalidad del depósito, el desgaste sobre el objetivo y el hecho de que únicamente fueron manchadas las caras de las láminas que se encontraban directamente arriba del objetivo, se concluyó que la película generada sobre las láminas de cristal es de aluminio.

12

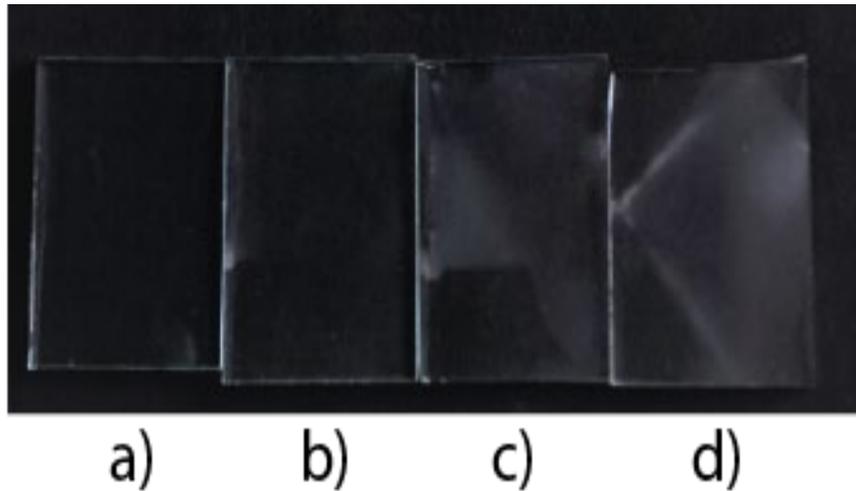


Fig. 14. Depósitos de aluminio sobre láminas de cristal a) lámina vacía. b) operación a 1 min. c) operación a 10 min. d) operación a 20 min.

Este proceso aún debe ser perfeccionado por lo que las pruebas de depósito se seguirán repitiendo; probando distintas láminas de materiales como objetivos, tiempos más extensos de funcionamiento y regiones de descarga en el plasma. Además, una vez encontrados los valores de trabajo óptimos, se empezarán a realizar depósitos sobre un ambiente completamente lleno de argón con el fin de no comprometer la pureza de esta película de material y comenzar a medir su grosor. Para esto se tiene propuesto utilizar un método de medición eléctrico. Este método parte de la idea de que la resistencia eléctrica de un material depende directamente del coeficiente de resistividad del elemento por el que se compone, de su longitud y de su área transversal. Utilizando un arreglo de resistencias en una configuración de puente de Wheatstone, es posible determinar la resistencia eléctrica del depósito generado sobre las láminas de cristal por más pequeña que esta pueda llegar a ser. Una vez conocida esta resistencia, el material depositado y sus dimensiones se podrá determinar su área transversal y así caracterizar al sistema con base a su tiempo de operación y al material depositado. En estos momentos existen distintas áreas de oportunidad que serán abordadas en futuros proyectos. Entre estos se encuentran: la implementación de un sistema de control que automatice al proceso y permita al usuario elegir el grosor que desea depositar, diseñar un sistema de atracción magnética que utilice únicamente electroimanes para evitar el desgaste sobre tiempo en el imán permanente y modificar la base del sistema para utilizar un cilindro de pírex en lugar de una campana de vacío con el fin de tener una mejor distribución de mangueras y alejar a las terminales de voltaje una de la otra para evitar cortocircuitos. Este sistema fue capaz de generar plasma en un ambiente contaminado y de erosionar con este una superficie metálica de aluminio; generando así un depósito visible sobre sustratos de cristal. El perfeccionamiento de esta máquina puede elevar el nivel de las investigaciones a nivel universitario debido a su fácil implementación y las múltiples aplicaciones que se le pueden dar a los depósitos por PVD.

IV. DISCUSIÓN

Al realizar procesos de PVD existen dos ramas que lo involucran, la deposición por erosión catódica y por evaporación térmica. Ambas son realizadas bajo un diferente principio físico y tienen diferentes resultados. En la Tabla 1 [7], se encuentra una comparación que muestra los diferentes parámetros técnicos en cada uno de estos métodos.

TABLA 1
COMPARACIÓN ENTRE MÉTODOS DE PVD

Parámetro del proceso	Erosión catódica	Evaporación térmica
Vacío	Bajo	Alto
Partículas atomizadas	Dispersas	Direccionadas
Adhesión	Alta	Baja
Uniformidad del depósito	Alto	Baja
Tamaño del grano	Pequeño	Grande
Velocidad del depósito	Lento	Alto

Con esto se puede saber que los métodos de erosión catódica generan depósitos más densos y no son dependiente del tipo de objetivo utilizado por lo que se pueden usar objetivos metálicos o cerámicos sin importar su temperatura de evaporación. De igual manera la adhesión de estos depósitos es mayor por lo que las propiedades superficiales brindadas a los sustratos son diferentes a aquellas conseguidas con el método de evaporación. Una vez analizadas las ventajas y desventajas de ambos métodos debemos también se debe de realizar una comparación con las máquinas de PVD existentes en el mercado. Para este trabajo vamos a comparar a la máquina realizada en este documento contra aquellas tanto creadas con fines industriales, así como aquellas más pequeñas creadas con fines educativos o para su uso en laboratorios. Para esto vamos a usar a las máquinas de *Kolzer* [8], *Safematic* [9] y aquella realizada por el colectivo de investigación *The Thought Emporium* [10]. Esta comparación se encuentra en la Tabla 2.

TABLA 2
COMPARACIÓN ENTRE MÁQUINAS

	Este trabajo	The Thought Emporium	Safematic CCU-010 HV	Kolzer MK63"
Dimensiones	d.140*150mm	d120*140 mm	570*360*350 mm	d1600*1450 mm
Portátil	Sí	Sí	Sí	No
Objetivos	Metales y cerámicos	Metales y cerámicos	Metales y cerámicos	Metales y cerámicos
Corriente permitida	2A	2A	10-100 mA	10-100 mA
Vacío	400 micrones	100 micrones	0.015 micrones	1 micron
Interfaz gráfica	No	No	Sí	Sí

Como se puede observar, la máquina de PVD desarrollada en este documento es similar a aquella desarrollada por el grupo de *The Thought Emporium* debido a que ambas se diseñaron considerando el uso de

materiales abiertos al público, así como su uso para aplicaciones básicas de recubrimientos. En comparación con máquinas destinadas a la industria como es el caso de la *Kolzer*, se puede apreciar que la principal diferencia se presenta en las dimensiones debido a que la *Kolzer* se utiliza para el recubrimiento de piezas grandes y al mayoreo. Debido a las dimensiones de esta máquina, esta suele estar fija en algún espacio dentro del cuarto en el que se tiene resguardada a diferencia de los otros ejemplos en los cuales la máquina puede ser montada y desmontada sin ninguna complicación para ahorrar espacio. Finalmente, si comparamos al sistema desarrollado en este trabajo contra una de la empresa *Safematic* la principal diferencia se verá reflejada en el sistema de vacío, así como en su interfaz gráfico debido a que este tipo de máquina está destinada para su uso dentro de laboratorios y suelen presentar menores tolerancias para realizar trabajos más específicos.

V. CONCLUSIONES

Se espera que en un futuro este diseño sea mejorado y presente una mayor eficiencia para explorar nuevos métodos de focalización de partículas erosionadas, así como el depósito de aleaciones utilizando mezclas de gases a la par que una mezcla de objetivos dentro de una misma cámara. A pesar de tener las distintas áreas de oportunidad antes mencionadas, este prototipo logró demostrar que es posible generar tecnología enfocada al recubrimiento de materiales a pequeña escala que también es fácil de replicar. Después de analizar los resultados, se puede concluir que este sistema fue capaz de generar depósitos de aluminio de tipo PVD sobre sustratos de aluminio. La acumulación de material depositado es dependiente del tiempo por lo que se propone a futuro modelar una caracterización en términos de este con el fin de determinar el grosor de la película de material creada y posteriormente un sistema de control automático para la generación de películas de grosores específicos. Este sistema aún se encuentra con variaciones entre pruebas. Estas variaciones se deben a que no se encuentra en condiciones perfectas todo el tiempo y factores como la presión o la temperatura de los electrodos hacen el proceso pueda variar. Por esta razón se considera que este trabajo tiene un avance en pruebas experimentales de concepto y se tiene considerado también realizar su validación en condiciones de laboratorio.

REFERENCIAS

- [1] L. A. Pothan, S. Thomas, "Polarity parameters and dynamic mechanical behavior of chemically modified banana fiber reinforced polyester composites," *Composites Science and Technology*, vol. 63, no. 9, pp. 1231-1240, Jul. 2003.
- [2] K. Hans, "Optical coatings deposited by ion and plasma PVD processes," *Surface and Coatings Technology*, vol. 112, no. 1-3, pp. 250-256, 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(98\)00764-6](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(98)00764-6)
- [3] K. Bouzakis, "Physical Vapor Deposition (PVD)", In Chatti S., Tolio T. (eds) *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2018, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_6489-5
- [4] A. Iqbal, N. Sakiba, D. M. Nuruzzamana, "Graphene-based nanocomposites and their fabrication, mechanical properties and applications", *Materialia*, vol. 12, 100815, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100815>
- [5] K. Wasa, *Handbook of sputter deposition technology*, New Jersey, EEUU, Noyes Publications, 1992.
- [6] K. Heon, K. Sang, "Indoor Radon and Lung Cancer: Estimation of Attributable Risk, Disease Burden, and Effects of Mitigation" *Yonsei Medical Journal*, Nov; vol. 59, no. 9, pp. 1123-1130, 2018, doi: <https://doi.org/10.3349/ymj.2018.59.9.1123>
- [7] A. Baptista, "On the Physical Vapour Deposition (PVD): Evolution of Magnetron Sputtering Process for Industrial Applications", *Procedia Manufacturing*, Vol. 17, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.125>
- [8] Kolzer. *Machines*. Kolzer. <https://kolzer.com/es/maquinas> (accessed Dec 10, 2020).
- [9] Safematic GmbH. "CCU-010 LV Low Vacuum". Kolzer. <https://www.safematic.ch/ccu-010-lv-sputter-coater-vacuum-coating-system-switzerland.php> (accessed Dec 10, 2020).
- [10] The Thought Emporium. "Vacuum Sputtering With A Homemade Magnetron". Hackaday. <https://hackaday.com/2019/07/23/vacuum-sputtering-with-a-homemade-magnetron/> (accessed Dec 10, 2020).