



Diseño de un reactor para la deposición de recubrimientos de capa delgada mediante procesos PVD

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Laura Sofia Guerra Segura

Director

PhD. Jhonattan De la Roche Yepes

Programa de Ingeniería Mecánica

Departamento de Ingeniería Civil e Industrial

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Pontificia Universidad Javeriana sede Cali

Santiago de Cali, Colombia

2025

Declaración de obra original

Yo, Laura Sofia Guerra Segura, declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 535 de 2010 del Consejo Directivo de la Pontificia Universidad Javeriana. «Política de Propiedad Intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Este proyecto representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en este proyecto, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Laura Sofia Guerra

Laura Sofia Guerra Segura

21 /08/2025

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado de manera muy especial a mi mamá, Liliana Segura (Q.E.P.D).
Le agradezco enormemente todo el esfuerzo que hizo por brindarme una educación de calidad y todo el apoyo que siempre me ofreció para estudiar esta maravillosa carrera.
Siempre fue y será mi inspiración para seguir adelante y alcanzar mis sueños y metas.

Agradecimientos

Agradezco a mi hermana, mi papá y toda mi familia por el apoyo que me brindaron a lo largo del proceso. También quiero expresar mi gratitud a los profesores que formaron parte de mi educación, a la directora, Adriana Gómez, por su acompañamiento durante la carrera, al ingeniero Simón Plata por sus recomendaciones y su disposición para resolver mis dudas, y al ingeniero Bleider Arizala por sus consejos y ayuda constante. Especialmente, agradezco al profesor Jhonattan de la Roche por su dedicación y apoyo durante el desarrollo del proyecto. Finalmente, gracias a todos mis amigos que me motivaron y a todas las personas que aportaron a lo largo del camino.

Resumen

Los recubrimientos por PVD (Physical Vapor Deposition) se postulan como una alternativa ante los desafíos ambientales de la galvanoplastia (electrodeposición) tales como la contaminación de fuentes hídricas, generación de residuos tóxicos y emisiones atmosféricas, lo que demanda procesos más sostenibles.

El presente trabajo se centró en diferentes factores del diseño de un reactor Magnetron Sputtering para aplicar recubrimientos sobre machetes de acero al carbono, respondiendo a las necesidades de la industria que busca reducción de costo por pieza, lo que se traduce en un aumento de la productiva. El proceso incluyó una revisión de requerimientos mediante entrevistas con el cliente, identificación de parámetros críticos teniendo en cuenta bibliografía y conceptualización del diseño tomando como referencia diseños de la industria internacional. Adicionalmente, se realizó el modelado 3D del diseño de la cámara de vacío y el sistema de satélite de un portamuestra, así como las simulaciones de los elementos sometidos a mayores esfuerzos.

Finalmente, se realizaron planos de diferentes piezas del reactor mostrando un diseño preliminar, incluyendo especificaciones de materiales seleccionados. De manera complementaria, se especificaron recomendaciones de manufactura.

Palabras clave: Electrodeposición, PVD, recubrimientos, reactor semi-industrial.

Abstract

PVD (Physical Vapor Deposition) coatings are proposed as an alternative to the environmental challenges of electroplating (electrodeposition), such as water source contamination, toxic waste generation, and atmospheric emissions, which demand more sustainable processes.

This work focused on distinct factors in the design of a Magnetron Sputtering reactor for coating carbon steel machetes, responding to the industry's need to reduce the cost per piece, which translates into increased productivity. The process included a review of requirements through interviews with the client, identification of critical parameters considering the literature, and conceptualization of the design based on industrial reference. Additionally, a 3D model of the vacuum chamber and sample holder system was developed, as well as simulations of the elements subjected to higher stresses.

Finally, technical drawings of different parts were made, showing a preliminary design, including specifications of the selected materials. Complementary manufacturing recommendations were also specified.

Keywords: Electroplating, PVD, coatings, semi-industrial reactor.

Tabla de contenido

1.	Introducción	13
2.	Planteamiento del problema	14
3.	Justificación.....	16
4.	Objetivos	18
4.1.	Objetivo general	18
4.2.	Objetivos específicos	18
5.	Marco teórico	19
5.1.	Galvanoplastia	19
5.1.1.	Cromado	20
5.2.	Procesos PVD.....	21
5.2.1.	Magnetron Sputtering.....	22
5.2.2.	Principales parámetros del proceso PVD.	23
5.2.3.	Parámetros de deposición del recubrimiento.....	26
5.3.	Comparación entre PVD y Cromado.....	28
5.4.	Consideraciones para el diseño de reactores	29
5.4.1.	Número de bombas.....	30
5.4.2.	Tipo de gas.....	31
5.4.3.	Rotación del sustrato	31
5.4.4.	Número de Satélites.....	32
5.4.5.	Tiempo de ciclo	32
5.4.6.	Tamaño y número de cátodos	33
5.4.7.	Puertas de Acceso	33
5.4.8.	Dimensiones	34
5.5.	Simulación de elementos	34
5.5.1.	Método de Elementos Finitos (MEF).....	34
5.5.2.	Software SIMTRA RSD2013 – Simulation for Metal Transport	35

5.6.	Procesos de manufactura	35
5.6.1.	Procesos de conformado	35
5.6.2.	Procesos de maquinado	36
5.6.3.	Procesos de unión	37
5.7.	Normativas	39
	Norma ASTM A240 – Acero Inoxidable y Norma ASTM B209 – Aluminio	39
6.	Estado del arte	41
6.1.	Reactores industriales	41
6.2.	Diseño de un equipo industrial de arco pulsado para la producción de películas delgadas mediante PAPVD	43
7.	Metodología	44
7.1.	Metodología de Diseño	44
	Diseño para manufactura	45
	Diseño para ensamblaje	45
7.1.1.	Método de evaluación DFMA	46
7.2.	Requerimientos	48
7.2.1.	Traducción de requerimientos a especificaciones técnicas	49
7.3.	Búsqueda de referencias en el mercado	49
7.4.	Diseño estructural de la cámara de vacío y sus componentes principales	50
7.4.1.	Selección de material para la cámara de vacío	50
7.5.	Diseño del sistema portamuestra	51
7.6.	Simulación en SolidWorks con MEF	51
7.7.	Selección del sistema de vacío.	52
7.8.	Selección y configuración de los de cátodos.	52
7.8.1.	Simulación cátodos	52
7.9.	Levantamiento de planos, informe de costos aproximados y recomendaciones de manufactura	56
8.	Resultados y discusiones	56
8.1.	Selección de pieza a recubrir y requerimientos	56
8.2.	Diseño estructural de la cámara de vacío	59

8.2.1.	Selección de material para la cámara de vacío	59
8.2.2.	Diseño de la estructura	61
8.2.3.	Simulación MEF para espesor de pared	64
8.3.	Diseño del sistema portamuestra	67
8.3.1.	Cálculos engranajes	70
8.3.2.	Cálculo para selección del motor.....	71
8.3.3.	Cálculo de esfuerzo máximo	75
8.4.	Recomendaciones de manufactura	78
8.5.	Selección de sistema de vacío	80
8.5.1.	Cálculos de tiempo de vacío.....	81
8.6.	Configuración del sistema de cátodos	88
8.7.	Costos aproximados.....	93
9.	Conclusiones y recomendaciones.	95
10.	Bibliografía.....	98
11.	Anexos.....	104

Índice de Tablas

Tabla 5-1. Diferencias entre una capa decorativa y una capa dura[21].	20
Tabla 5-2. Clasificación de los sistemas de vacío [14].	25
Tabla 5-3. Comparación entre PVD y Cromado [36].	28
Tabla 5-4. Factores De Seguridad Recomendados Para Materiales Dúctiles. Adaptado De [75].	40
Tabla 6-6-5. Características de reactores PVD industriales.. ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 7-6. Principios y directrices generales en el diseño para manufactura y ensamble. Adaptado de[80].	46
Tabla 7-7. Tabla de alternativas y funciones.	48
Tabla 8-8. Descripción de las características.	58
Tabla 8-9. Matriz de selección del material de la cámara de vacío.	60
Tabla 8-10. Resultados Simulaciones Con Diferentes Espesores.	66
Tabla 8-11. Criterios de selección para tipo de lubricación.	81
Tabla 8-12. Características técnicas bomba mecánica Okta 500[120].	82
Tabla 8-13. Características técnicas bomba turbomolecular HiPace 300[121].	83
Tabla 8-14. Características técnicas bomba DryVac 650.	85
Tabla 8-15. Características técnicas bomba TurboVac 350.	86
Tabla 8-16. Resultados del número depositado de partículas. Distancia sustrato-catodo.	90
Tabla 8-17. Resultados del número depositado de partículas. Distancia entre cátodos.	91
Tabla 8-18. Tabla de costos aproximados.	94
Tabla 11-19. Referencias de empresas nacionales.	105

Índice de Figuras

Figura 5-1. Ilustración del proceso de electrodeposición [18].....	19
Figura 5-2. Morfología de recubrimientos electrolíticos de cromo obtenidos con soluciones de Cr ⁺⁶ . a)Imagen AFM [23]. B) imagen sem [24].....	21
Figura 5-3. Esquema PVD. adaptado de [26].	22
Figura 5-4. Diseño esquemático reactor Magnetron Sputtering [28].	23
Figura 5-5. Capacidad de medida de vacío de Manómetros. Adaptado de [33].	26
Figura 5-6. Modelo TMD de zonas para la microestructura de las capas en función de la temperatura reducida (T/T _{fus}) para diferentes presiones de ‘sputtering’[35].....	27
Figura 5-7. Principales características y parámetros de un reactor. Adaptado de [48].	30
Figura 5-8. Configuración rotativa A) Esquema. B) Engranajes Planetarios [26].	32
Figura 5-9. Ilustración de los nodos y elementos en un malla.....	35
Figura 5-10. Ilustración de a) forjado, B) Estirado, C) Doblado [64].	36
Figura 5-11. Operaciones comunes de maquinado: a) torneado; b) Taladrado; c) fresado [66].....	37
Figura 5-12. clasificación de la soldadura. adaptado de [69].	38
Figura 5-13. A) Soldadura tig (Tungsten inert gas), b) equipo utilizado para soldadura tig [70].	38
Figura 5-14. Soldadura con rodillos en frio. Adaptado de [71].	39
Figura 7-1. Pasos de la primera etapa “desarrollo del producto” [35].....	44
Figura 7-2. Programa SIMTRA, A) Vista principal, b) Ventana “Chamber Design” [85].	53
Figura 7-3. a) Ventana de configuración de cátodo planar. B) Ventana “Magnetron Geometry” C) Ventana “Target and Transport Settings”[85].	54
Figura 7-4. Ventana “Object Geometry”[85].	55
Figura 8-1. Ilustración de la cámara de vacío con puertas y bisagras.....	62
Figura 8-2. Esquina del marco con ranura de O-ring.....	63

Figura 8-3. Cámara de vacío con marco y bisagras.	63
Figura 8-4. Diseño simplificado de la cámara de vacío para la simulación. ...	64
Figura 8-5. Resultado estudio en cámara – a) 8mm, b) 20mm.	¡Error!
Marcador no definido.	
Figura 8-6. a) Satélite con machetes. B) Satélite sin machetes.	68
Figura 8-7. Ilustración de la distribución de los satélites en el plato portamuestra.	68
Figura 8-8. Diseño del sistema portamuestra.	69
Figura 8-9. ensamble cámara de vacío y sistema portamuestra.	70
Figura 8-10.	75
Figura 8-11. Diagrama de fuerzas en un diente de engrane. ...	¡Error! Marcador no definido.
Figura 8-12. Diagrama de fuerzas en un diente de engrane.	76
Figura 8-13. Esfuerzos de Von MISES en el diente – Estudio de elementos finitos.	77
Figura 8-14. Curva velocidad de bombeo vs presión Okta 500[120].	83
Figura 8-15. Curva velocidad de bombeo vs presión HiPace[121].	84
Figura 8-16. Curva velocidad de bombeo vs presión Dryvac.	86
Figura 8-17. Curva velocidad de bombeo vs presión TurboVac.	87
Figura 8-18. Distribución de partículas para a)10cm, b)20cm, c)30cm. distancia entre sustrato y cátodo.	89
Figura 8-19. distribución de partículas - 7 cátodos.	92
Figura 8-20. Distribución de partículas – 9 cátodos.	92

1. Introducción

La electrodeposición, un método tradicional usado industrialmente para aplicar recubrimientos de capas delgadas de diversos metales como el cromo en superficies metálicas para brindar protección a las piezas fabricadas. Sin embargo, este se encuentra asociado con diversos impactos ambientales, como la contaminación de fuentes hídricas, la generación de residuos tóxicos y emisiones atmosféricas [1]. Esto se debe al uso de sustancias químicas en soluciones electrolíticas, junto con procesos de decapado que involucran ácidos contaminantes, generando riesgos ambientales y de salud considerables[2], y por ende se ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles y eficientes.

Como respuesta a estos problemas, se ha explorado la implementación de tecnologías alternativas como los procesos de Deposición Física de Vapor (PVD, por sus siglas en inglés), que implican la condensación del material objetivo mediante la generación de plasma [3]. Estos procesos ofrecen ventajas notables en términos de calidad estructural y propiedades físicas y químicas superiores incluyendo, excelente adherencia y una microestructura más homogénea [4] . Los avances en la industria internacional demuestran la creciente demanda en el sector y han dado lugar a una amplia gama de posibilidades respondiendo a las diferentes necesidades de los clientes. No obstante, su implementación es limitada en el país debido a la necesidad de una alta inversión inicial y la dependencia tecnológica hacia los países desarrollados[5] .

El proyecto se centró en cuatro componentes importantes de un reactor para la deposición de recubrimientos mediante procesos PVD, usando la técnica de *Magnetron Sputtering*, dirigido a las necesidades puntuales de la empresa la cual fabrica los machetes. Los componentes abordados fueron el diseño estructural de la cámara de vacío, el diseño del portamuestra rotativo, la selección del sistema de bombeo de vacío y la configuración de cátodos. Para ello se llevó a cabo una metodología integral enfocada en la primera fase del diseño mecánico de un producto, teniendo en cuenta el DFMA (*Design for Manufacturing and Assembly*), con el objetivo de sentar bases para futuros trabajos más especializados en el desarrollo de esta tecnología a nivel nacional.

2. Planteamiento del problema

El cromado es un proceso de electrodeposición que implica sumergir una o múltiples piezas metálicas en una solución electrolítica en la cual mediante la aplicación de corriente eléctrica se depositan capas delgadas de cromo sobre la superficie de la pieza generando un acabado brillante y protección contra la corrosión. Adicional, en algunas ocasiones cuando la pieza presenta impurezas se implementa un decapado en donde se utilizan ácidos contaminantes [6].

Este proceso conlleva diversos problemas ambientales, como la contaminación de fuentes hídricas debido al riesgo de filtración de sustancias químicas, comprometiendo el suministro de agua potable y afectando a los ecosistemas acuáticos. Además, genera residuos peligrosos como lodos de decapado, que pueden resultar tóxicos si no se tratan y desechan adecuadamente [7]. De acuerdo con la Resolución No 2115 del 22 de Junio de 2007, la concentración de cromo que es una característica con reconocidos efectos adversos contra la salud humana, tiene un valor máximo aceptable de 0,05 mg/L [8]. Sin embargo, en un estudio realizado en el río Tunjuelito en Bogotá, ciudad en el país con más concentración de empresas del sector de la galvanoplastia, se encontraron concentraciones de Cr^{+6} en promedio de 0.594 mg/L, casi 12 veces más del valor permitido[9]. Las emisiones atmosféricas también son un problema, ya que se liberan vapores ácidos como el ácido clorhídrico (HCl) y el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y vapores metálicos como el cromo hexavalente (Cr^{+6}), los cuales son altamente irritantes para el ser humano con el riesgo de causar ceguera y quemaduras severas y son potencialmente carcinógenos [10]. Estas implicaciones generan en trabajadores y comunidades problemas de salud a corto, mediano y largo plazo[2]. Este proceso también genera un alto consumo de recursos naturales, como el agua y la energía, considerados recursos limitados.

Adicional a los desafíos relacionados con el ecosistema, es importante considerar la inversión en auditorías y monitoreo ambiental que se lleva a cabo por parte de las empresas, con el fin de cumplir con las regulaciones ambientales que implementan en Colombia a través del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y otras entidades gubernamentales [11]. El incumplimiento de las normativas puede tener diferentes consecuencias incluyendo multas económicas, clausura de operaciones, incluso responsabilidad penal.

Por lo anteriormente mencionado, en la actualidad se está tratando de implementar algunas técnicas alternativas a la electrodeposición para aplicar recubrimientos protectores como lo son los procesos PVD que tienen ventajas no solo respecto a los desafíos ambientales, sino que muestra una mejora significativa en propiedades mecánicas. Sin embargo, presentan algunas limitaciones en su implementación debido al costo en la inversión inicial y el desconocimiento de la técnica por parte de la industria.

Dada esta problemática, se plantean la siguiente pregunta problema: ¿Es posible desarrollar el conocimiento propio necesario para diseñar equipos PVD en Colombia como alternativa a los recubrimientos de galvanoplastia?

3. Justificación

Debido a que la industria de electrodeposición tiene impactos ambientales significativos para la naturaleza y la salud humana, se resalta la necesidad de adoptar tecnologías alternativas menos agresivas para el medio ambiente. De acuerdo con Empresite, el directorio online más grande de empresas en Colombia, existe un aproximado de 1.084 empresas en el sector de la galvanoplastia, lo que evidencia la gran escala que pueden tener los impactos ambientales de estas empresas [12]. Los procesos PVD ofrecen numerosas ventajas ambientales, como la reducción de emisiones tóxicas, ya que no liberan compuestos químicos peligrosos como el cromo hexavalente (Cr^{+6}). También generan menos residuos, facilitando su disposición y tratamiento. Además, el uso limitado de sustancias peligrosas disminuye el riesgo de contaminación del agua y mejora el cumplimiento normativo al mantener procesos más limpios.

Desde una perspectiva fisicoquímica, los procesos PVD presentan beneficios significativos tales como:

- Excelente adherencia de los recubrimientos previniendo la delaminación.
- La capacidad de ajustar diferentes parámetros, lo que permite un mejor control del grosor del recubrimiento, adecuando su rendimiento a requerimientos específicos[13].
- Microestructura mejorada con una distribución más homogénea y eficiente, lo que mejora sustancialmente las propiedades mecánicas del sustrato, elevando la dureza superficial para una mayor resistencia al desgaste y la abrasión, además fortalece su resistencia a la corrosión, extendiendo su vida útil [14].

Adicional al optar por procesos PVD mejora la reputación y posicionamiento de la industria en el mercado como una entidad consciente de los desafíos ambientales actuales. Una comparación más amplia entre las dos técnicas de recubrimiento se presenta en la sección 5-3. La implementación de un reactor PVD no solo aborda problemas actuales, sino que también abre la posibilidad de desarrollar nuevas líneas de negocio, contribuyendo a transformar el panorama industrial, enfrentando los desafíos empresariales con una perspectiva innovadora.

Es importante tener en cuenta que el panorama tecnológico en Colombia se ve obstaculizado por un desarrollo limitado de la innovación, una deficiencia que se atribuye a varios factores, como la falta de apoyo económico por parte del gobierno, la dependencia tecnológica en países del primer mundo para importar componentes y maquinaria que no se fabrican localmente. Esta situación exalta las dificultades que enfrentan las pequeñas empresas para adoptar nuevas tecnologías, lo que a su vez limita su crecimiento y

competitividad frente a empresas internacionales, aunque existen múltiples aplicaciones para los reactores PVD en la industria, actualmente su uso se limita principalmente al ámbito educativo, específicamente en laboratorios. Actualmente, en Colombia se identificaron dos empresas que ofrecen servicios de recubrimientos mediante técnicas PVD, una de ellas opera con un reactor de diseño propio[15], mientras que la otra utiliza un reactor importado[16]. Adicional, estas empresas trabajan con clientes de alto perfil que requieren productos con altas prestaciones, lo que indica el potencial de expansión de la industria en Colombia. En este contexto, se han iniciado algunas iniciativas en el país para implementar esta tecnología a nivel industrial. Sin embargo, estas iniciativas deben desarrollar su propio conocimiento o "know-how" para ser competitivas a nivel internacional, presentado desafíos adicionales en términos de diseño con respecto a los sistemas especializados y en este sentido el presente proyecto siembra una base para un posible desarrollo posterior.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Diseñar un reactor semi industrial para la deposición de capas delgadas mediante procesos de PVD en piezas metálicas con geometría complejas

4.2. Objetivos específicos

- Determinar los requerimientos que debe cumplir el diseño del reactor para la deposición de recubrimientos mediante procesos PVD teniendo en cuenta las necesidades del usuario final.
- Definir el concepto de diseño del equipo teniendo en cuenta las especificaciones, procesos de manufactura y materia prima disponible en el mercado nacional.
- Elaborar un diseño detallado que posibilite la fabricación y ensamblaje del equipo, incorporando cálculos dimensionales, de esfuerzos y cargas, con el objetivo de asegurar un rendimiento mecánico adecuado.
- Desarrollar planos e informe con costos aproximados de fabricación incluyendo recomendaciones para proceso de manufactura.

5. Marco teórico

5.1. Galvanoplastia

Se refiere al proceso de electrodeposición metálica donde se genera una reacción redox la cual utiliza una solución electrolítica que contiene iones metálicos los cuales se depositan sobre una pieza de trabajo que hace la función de cátodo donde ocurre la reducción por medio de un potencial eléctrico de una fuente externa. La oxidación del proceso ocurre en el electrodo positivo, el ánodo que funciona como la fuente de metal donde ocurre la pérdida de electrones a causa de los químicos presentes en la solución electrolítica. El proceso requiere control de parámetros como la temperatura, el pH y la composición de la solución electrolítica. En la figura 5-1 se ilustra un esquema básico del proceso de electrodeposición donde podemos observar los principales componentes involucrados en el proceso [17].

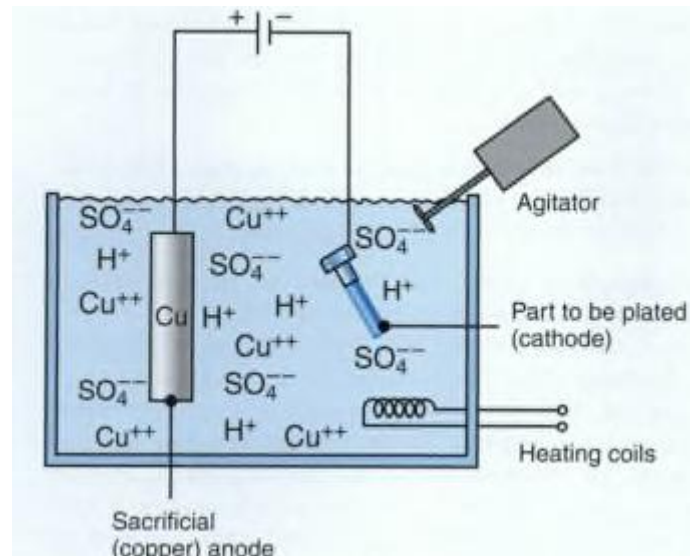


FIGURA 5-1. ILUSTRACIÓN DEL PROCESO DE ELECTRODEPOSICIÓN [18].

El incremento de la concentración de metal en la solución y su aumento de temperatura son métodos para aumentar la eficiencia en la deposición, no obstante, presentan restricciones como el límite de solubilidad de la sal metálica, costos de los metales y aumento de costos de la deposición de estos al aumentar la concentración. Por otro lado, al aumentar la temperatura se acelera la corrosión en los materiales de los equipos de construcción, de tal forma que en la práctica se implementa un movimiento de agitación para acelerar el transporte de iones metálicos al electrodo y así, la tasa de deposición [19]. En la figura 5-1 se observa un agitador en la parte superior del tanque, el cual induce el movimiento en la solución. Existen diferentes métodos de agitación y su elección depende de varios factores como, el tamaño del tanque, la geometría de las piezas, entre otros[20].

5.1.1. Cromado

Específicamente, el cromado consiste en depositar una delgada capa de cromo sobre el objeto de metal usando técnicas de galvanoplastia, proporcionando una mejora en la resistencia a la corrosión, al rayado y aumento dureza superficial. Usualmente se realizan uno o varios procesos de limpieza previa, que incluyen procesos químicos como el desengrasado y procesos mecánicos como el pulido. Según la función final de la pieza, la capa de cromado puede ser decorativa o dura, las diferencias entre estas se evidencian en diversas características, como se observa en la tabla 5-1.

Característica o parámetro	Capa decorativa	Capa dura
Temperatura de la solución	40°C - 45°C	45°C - 55°C
Densidad de corriente	$5 \frac{A}{dm^2}$	$30 \frac{A}{dm^2} - 50 \frac{A}{dm^2}$
Espesor de capa	0.1 μm - 1 μm	10 μm – 500 μm

TABLA 5-1. DIFERENCIAS ENTRE UNA CAPA DECORATIVA Y UNA CAPA DURA[21].

A diferencia del galvanizado en caliente donde se sumergen las piezas en un baño de zinc a una temperatura de 450°C, el método de cromado se realiza en temperaturas entre 40°C - 55°C. El espesor de la película de cromo se relaciona con la densidad de corriente y con la velocidad de deposición, a mayor densidad de corriente se deposita una mayor cantidad de material lo que se traduce en un espesor superior, como se puede evidenciar en la tabla [22].

El cromo depositado electrolíticamente puede presentar dos estructuras cristalinas, hexagonal compacta (hcp) y cubica centra en el cuerpo (bcc), presente cuando se trabaja con temperaturas mayores de 35°C, en comparación cuando son temperaturas menores a 35°C se genera una combinación de ambas. Normalmente los recubrimientos decorativos de bajo espesor son porosos y por otro lado los recubrimientos duros de mayor espesor son agrietados, aunque esto puede variar por múltiples factores que se alteran durante cada proceso[19]. En la figura 5-2 se observan algunas de estas imperfecciones en dos recubrimientos distintos.

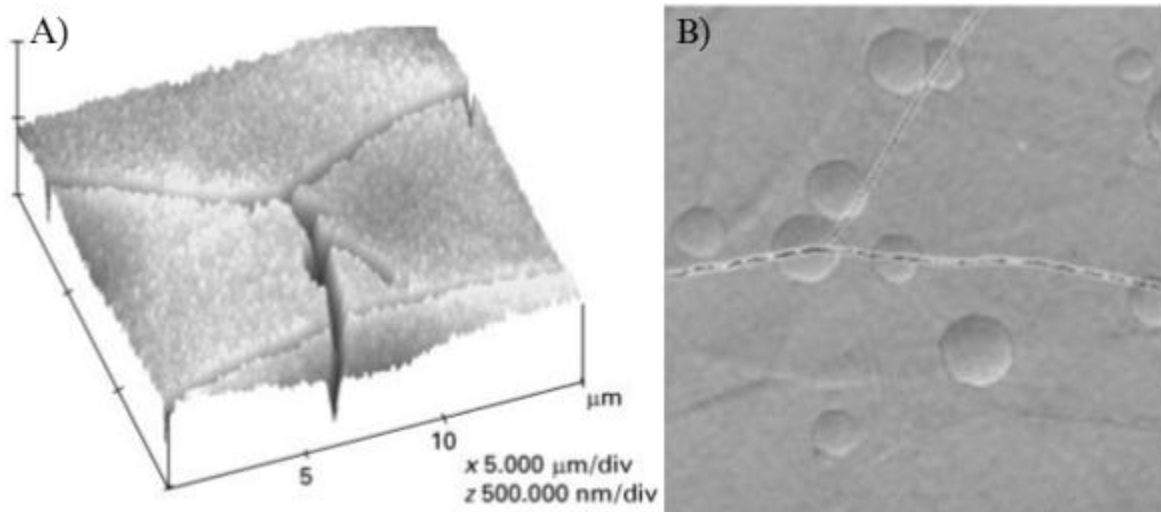


FIGURA 5-2. MORFOLOGÍA DE RECUBRIMIENTOS ELECTROLÍTICOS DE CROMO OBTENIDOS CON SOLUCIONES DE CR+6. A) IMAGEN AFM [23]. B) IMAGEN SEM [24].

El espesor del recubrimiento en la figura 5-2. A es de $0.5 \mu\text{m}$ y el espesor de la figura 5-2. B es de $5 \mu\text{m}$, en los dos casos se observa porosidad y microgrietas desde diferentes perspectivas.

Para el cromado se emplean múltiples composiciones de la solución electrolítica, variando de acuerdo con el objetivo del proceso, donde sus principales componentes son:

- Sal de metal: es la fuente de metal en el proceso de deposición, afecta la reacción electroquímica y su difusión en la solución.
- Sales conductoras y estabilizantes de pH: sulfatos o cloruros de sodio o potasio para aumentar la conductividad de la solución y regular el pH en la superficie catódica.
- Humectantes: estos cambian la tensión superficial de la solución y así mejorar la desorción de hidrógeno en el cátodo y así se evita la aparición de burbujas.

En el caso del cromado convencional, el principal componente es óxido crómico (CrO_3) y como catalizadores se utilizan iones de sulfato [25].

5.2. Procesos PVD

PVD (Physical Vapor Deposition) es una técnica de revestimiento que consiste en la transferencia y deposición de material a nivel atómico en condiciones de vacío. El proceso involucra 3 pasos principales, la evaporación del material a ser depositado mediante una

fuentes de energía, el transporte del vapor hacia la superficie del sustrato donde se da la reacción entre el gas y los átomos del metal, por último, la deposición de la capa [13].

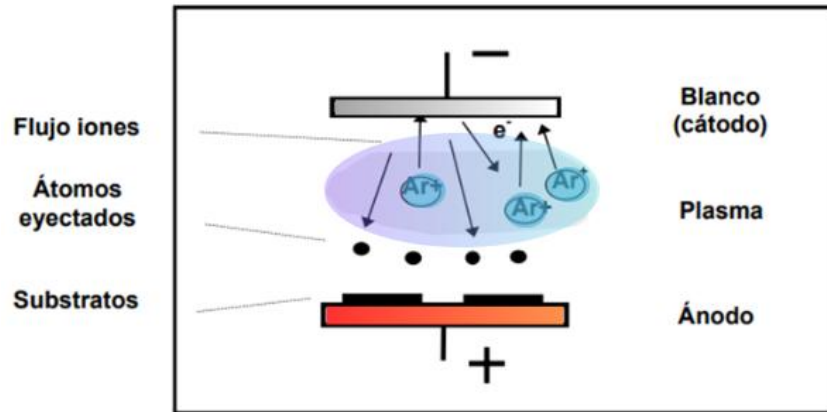


FIGURA 5-3. ESQUEMA PVD. ADAPTADO DE [26].

La mayoría de las técnicas PVD se ven beneficiadas por la generación y uso de *plasma*, el cual es un estado de la materia que consiste en moléculas ionizadas, que coexisten en un medio eléctricamente neutro. Estas partículas cargadas se generan cuando un gas se somete a procesos con alta liberación de energía como calentamiento a altas temperaturas o descargas eléctricas, generando su ruptura eléctrica. Este proceso de descarga toma lugar cuando el campo eléctrico, es suficiente para ionizar el gas, generando cargas eléctricas positivas y negativas capaces de conducir la electricidad. La combinación de estos procesos aumenta la energía de las partículas lo cual permite deposición de capas más densas y adherentes al sustrato [7].

5.2.1. Magnetron Sputtering

El Magnetron Sputtering, una técnica PVD, implica la erosión de un objeto metálico mediante la aplicación de un campo magnético y la ionización de un gas en un vacío. Aunque la presencia del campo aplicado es relativamente débil, influye directamente en la trayectoria de las partículas cargadas, incrementando la longitud del recorrido hacia el ánodo y en consecuencia aumenta el número de colisiones con los iones positivos, los cuales bombardean el objetivo, liberando átomos que se depositan en el sustrato cercano, creando un recubrimiento. De esta forma se aumenta la eficiencia de la ionización, generando una corriente de descarga mayor [27]. A continuación, en la figura 5-4 se observa un esquema general de un reactor Magnetron Sputtering.

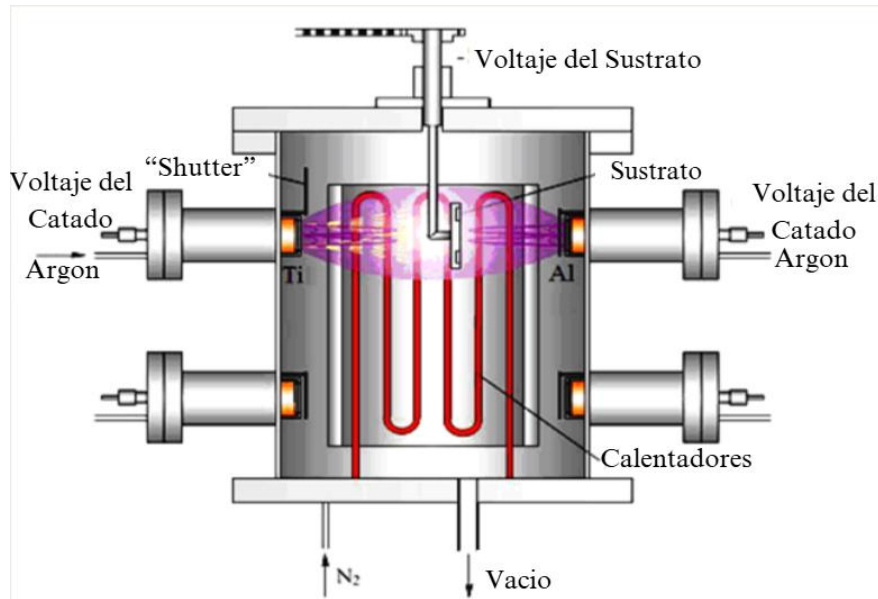


FIGURA 5-4. DISEÑO ESQUEMÁTICO REACTOR MAGNETRON SPUTTERING [28].

El Sputtering destaca por su versatilidad al trabajar con una amplia gama de materiales, pero su desventaja radica en tasas de deposición relativamente bajas. En términos de control del proceso, el Sputtering es conocido por su capacidad para proporcionar un control preciso de la composición y la estructura del recubrimiento [29], brindándole mejores propiedades.

5.2.2. Principales parámetros del proceso PVD.

Temperatura del sustrato

Es esencial mantener una temperatura uniforme en el sustrato para asegurar la consistencia en toda la superficie, controlando la velocidad de crecimiento y la estequiometría del proceso para lograr la composición química deseada, donde la incorporación adecuada de átomos en la superficie evita la formación no deseada de núcleos 2D. Adicional, gestionar las tensiones residuales es crucial para garantizar propiedades mecánicas y estabilidad óptima en el recubrimiento, siendo esenciales estas características para obtener capas delgadas de alta calidad [30].

Presión del gas

Influye directamente en la tasa de adsorción y desorción de moléculas. Teniendo en cuenta la Ley de Paschen, al disminuir la presión, el número de colisiones ionizantes se hace más reducido, lo que nos indica que la distancia entre los electrodos no es suficiente como para que se desarrolle un proceso de avalancha electrónica necesario para que se produzca la ruptura eléctrica del gas imprescindible para que se genere el plasma. En un sistema de vacío, la presión última alcanzable siempre es un equilibrio entre la tasa de desorción y la tasa de evacuación [3].

Potencia y densidad del plasma

La potencia del plasma influye significativamente en el Sputtering, porque con la variación de la potencia se altera la composición de las capas a lo largo de la deposición debido a cambios en la tasa de erosión del material objetivo y en sistemas de multicapas, la potencia constante se utiliza para regular el espesor de las capas individuales, permitiendo un control preciso [11]. Por otro lado, la densidad del plasma se refiere a la cantidad de partículas cargadas presentes en una región determinada del espacio. Una mayor densidad de plasma suele traducirse en un plasma más energético y reactivo, lo que puede mejorar la uniformidad y la adherencia de la capa depositada. Por otro lado, una densidad de plasma baja puede resultar en una deposición menos controlada y en una calidad de capa inferior [27]. Este parámetro se controla ajustando la potencia suministrada y la configuración de los magnetrones de forma que altera el campo magnético por lo tanto la oscilación de los electrones, lo cual genera nuevas ionizaciones por impacto con los átomos aumentando la densidad del plasma.

Distancia sustrato-catodo

La distancia entre el cañón de plasma y la pieza a recubrir influye directamente en las propiedades de los recubrimientos (e.g., espesor, microdureza, estructura cristalina, densidad de las micropartículas en la superficie). Cuando están en una distancia cercana hay mayor concentración en puntos determinados y en el caso de una distancia mayor, se puede observar una deposición mejor distribuida debido a las diferentes trayectorias que toman las partículas. El ajuste de la distancia es acorde a la aplicación y puede variar en el proceso cuando el sustrato se mueve para lograr una capa más uniforme [14].

Vacío

La condición de vacío en la cámara de un reactor es supremamente importante puesto que garantiza la integridad en el proceso y compromete directamente la calidad del recubrimiento. El vacío se produce cuando la presión del aire y otros gases en su interior se reduce a niveles cercanos a cero, creando un entorno con una cantidad mínima de partículas gaseosas. Dependiendo de la presión última que se alcanza, los sistemas de vacío se clasifican de acuerdo con la denominación de Tabla 5-2.

	Vacío bajo	Vacío medio	Alto vacío	Ultra-alto vacío
Presión (mbar)	$10^3 - 10^0$	$10^0 - 10^{-3}$	$10^{-3} - 10^{-7}$	$<10^{-7}$

TABLA 5-2. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE VACÍO [14].

En general, los sistemas para producir laminas delgadas se encuentran en la clasificación de ultra alto vacío para aplicaciones experimentales, y en alto vacío para sistemas industriales [31].

Para tener control de la presión de un sistema de vacío se utiliza el manómetro de vacío. Existen varios tipos de manómetros, cada uno basado en un principio físico distinto, lo que los hace más adecuados para ciertas aplicaciones específicas. Su rango de presión depende del principio de medición utilizado, así como del diseño y la estructura del dispositivo, estos factores determinan su precisión e idoneidad para diferentes niveles de vacío y condiciones de uso [32]. Los criterios principales para la selección de un manómetro de vacío son; rango de medición, precisión requerida, composición del gas.

De acuerdo con el rango de medición se clasifican de la siguiente forma:

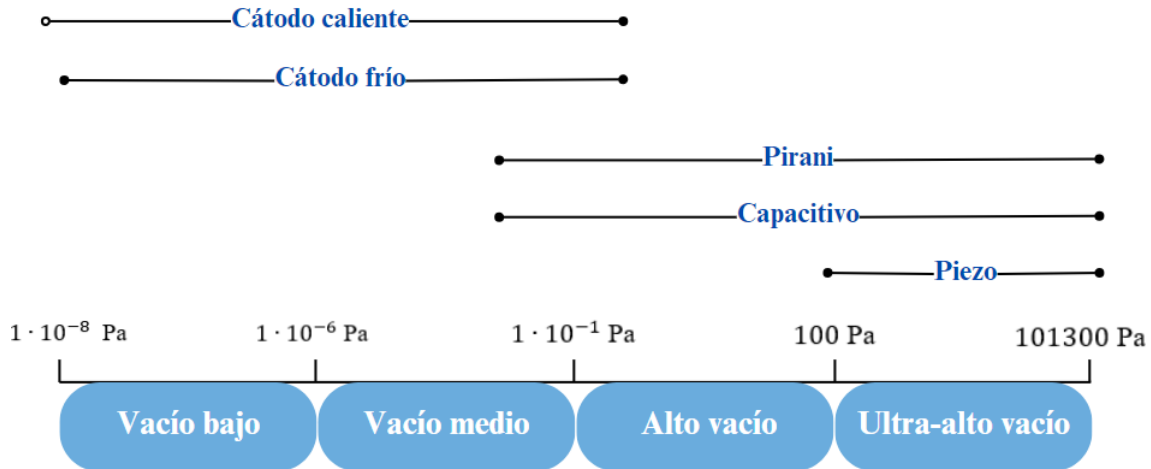


FIGURA 5-5. CAPACIDAD DE MEDIDA DE VACÍO DE MANÓMETROS. ADAPTADO DE [33].

De acuerdo con la composición del gas, hay manómetros que trabajan con gases inertes y otros con gases corrosivos. En el caso de gases inertes como el Argón (Ar), se utilizan los tipos cátodo frío, cátodo caliente y Pirani. Estos dispositivos deben ser calibrados según el tipo de gas, dado que cada uno funciona con un principio distinto el cual varía con los diferentes gases [34].

5.2.3. Parámetros de deposición del recubrimiento

El diagrama de Thornton es la representación gráfica de la influencia que ejercen la presión de la cámara y la correspondiente temperatura de recubrimiento (durante la deposición) sobre la microestructura de recubrimientos mediante procedimiento PVD asistido por plasma. Esto es importante porque permite optimizar las condiciones de deposición para obtener las propiedades deseadas del recubrimiento, tales como dureza, adherencia y resistencia a la corrosión, asegurando un rendimiento superior y una mayor durabilidad.

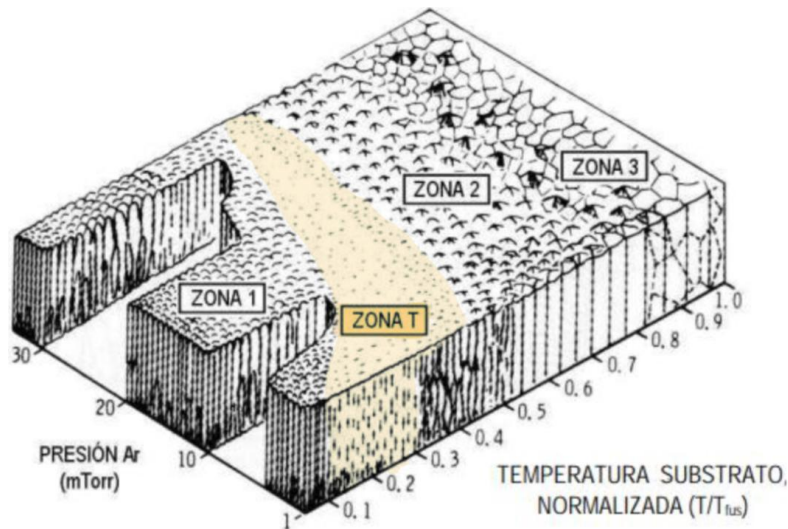


FIGURA 5-6. MODELO TMD DE ZONAS PARA LA MICROESTRUCTURA DE LAS CAPAS EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA REDUCIDA (T/T_{fus}) PARA DIFERENTES PRESIONES DE 'SPUTTERING'[35].

- Zona I ($0 < T/T_{fus} < 0.1$): En temperaturas bajas de deposición, los adatomos quedan atrapados en el punto de llegada a la superficie debido a su baja energía, resultando en una alta densidad de nucleación. La coalescencia y el crecimiento de granos están prácticamente inhibidos, dando lugar a estructuras alargadas con efecto de sombreado debido a la rugosidad de la superficie.
- Zona T ($0.1 < T/T_{fus} < 0.3$): En esta región de transición de temperatura existe cierta difusión superficial superando la rugosidad introducida por los núcleos iniciales. A medida que la capa se vuelve uniforme, la difusión superficial facilita la migración de adatomos entre granos cercanos, dando como resultado una red densa de cristales columnares con buenas propiedades mecánicas. Siendo esta la zona ideal para el crecimiento, con la menor presencia de defectos como inclusiones.
- Zona II ($0.3 < T/T_{fus} < 0.5$): En esta región, el crecimiento está determinado por la migración a lo largo de las fronteras intergranulares. Esto conduce a un crecimiento cristalino a partir de granos formados inicialmente en la superficie, con granos de mayor tamaño debido a la coalescencia entre núcleos. La estructura resultante es columnar y densa, con la superficie presentando diferentes facetas.
- Zona III ($0.5 < T/T_{fus} < 1$): En esta región, la estructura está dominada por fenómenos de difusión interna y recrystalización, provocados por la segregación de impurezas hacia la superficie de los granos. Estas impurezas detienen el crecimiento de los cristales y dan lugar a fenómenos de nucleación secundaria. La morfología de las capas evoluciona desde granos columnares (a bajas temperaturas) hasta granos 'equiaxiales' (a altas temperaturas) [2].

Teniendo en cuenta las condiciones en los procesos PVD, se busca que el recubrimiento del proyecto se encuentre principalmente en la Zona T. Esta región se considera la más adecuada para la obtención de recubrimientos densos formando una microestructura compacta con buena adherencia y teniendo la menor presencia de defectos [2].

5.3. Comparación entre PVD y Cromado

La comparación entre las dos técnicas de recubrimiento se puede realizar desde diferentes perspectivas. A continuación, en la tabla 5-3 se comparan las siguientes características de los procesos: materiales para revestimiento, propiedades del recubrimiento, consideraciones medioambientales y aplicaciones. Posteriormente, un análisis más detallado de los costos.

Característica	PVD	Cromado
Materiales para revestimiento	Puede depositar una gama más amplia de materiales, incluidos metales, aleaciones y cerámicas.	Se limita al metal y aleaciones metálicas.
Propiedades del recubrimiento	Menor espesor, con mayor dureza y resistencia a la corrosión destacable.	Pueden sufrir microfracturas, que conlleva a una corrosión con el tiempo.
Consideraciones medioambientales	No utiliza químicos peligrosos y tiene un desperdicio mínimo.	Utiliza ácidos perjudiciales para la salud y sus desechos son altamente tóxicos. Extensas licencias medioambientales.
Aplicaciones	Aplicaciones más especializadas en la industria biomédica, electrónica y automotriz.	Piezas decorativas y funcionales. Cilindros hidráulicos y algunas herramientas de corte.

TABLA 5-3. COMPARACIÓN ENTRE PVD Y CROMADO [36].

Comparación de costos:

Para realizar una comparación de costos entre las dos técnicas se deben tener en cuenta diferentes factores que influyen en su implementación y posterior manejo. La inversión inicial en equipos para PVD es más alta, los reactores industriales pueden tener un costo entre \$80.000 USD para modelos más básicos con dimensiones menores [37] y \$500.000 [38] para sistemas más avanzados, llegando a alcanzar los varios millones de dólares, dependiendo de la capacidad y tecnología. En el caso de una planta de galvanotecnia los costos de construcción inicial son inferiores, en el caso de una línea de galvanizado de baja producción incluyendo tanques de desengrase, activación, baño y enjuague se estiman costos de aproximadamente \$17.000 USD [39] sin tener en cuenta rubros como adecuación de terreno y planta PTAR para el proceso de residuos. Para el caso de una planta con alta producción y equipos de calidad con un área de 4000 m^2 el costo total de la compra de equipos es de \$327.723 USD [40]. Adicional por la cantidad de desechos que generan estas plantas una opción es tener una PTAR propia la cual para una empresa de grandes volúmenes llegaría a costar \$14.022 USD [41]. En cuanto a los costos operativos, el proceso PVD requiere consumo de energía y mantenimiento de equipos de vacío y la galvanotecnia implica uso constante de soluciones químicas y electricidad. Aunque los equipos de galvanotecnia son más económicos, los costos operativos generalmente son mayores teniendo en cuenta un mayor consumo de material para un recubrimiento de prestaciones similares, adicional los gastos de la gestión de residuos químicos y las licencias ambientales necesarias representan una diferencia con el proceso PVD [42] [26] [27] [45]. En términos generales, los fabricantes de piezas de bajo costo prefieren tecnologías de galvanotecnia, y PVD surge para piezas con requerimientos mecánicos más altos como recubrimientos anti desgaste. Y debido a que el desempeño de los recubrimientos PVD es mayor, tiene un costo operativo menor a largo plazo [46]. En una comparación específica para recubrimientos de cromo, se encuentra un costo por pieza 15% menor con procesos PVD que con galvanotecnia, teniendo en cuenta equipos, mano de obra, materia prima y manejo eficiente de los residuos [47].

5.4. Consideraciones para el diseño de reactores

Las principales características de un reactor PVD, se exponen a continuación.



FIGURA 5-7. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS Y PARÁMETROS DE UN REACTOR. ADAPTADO DE [48].

5.4.1. Número de bombas

Las bombas de vacío son utilizadas para remover aire, gas y partículas de vapor de un espacio sellado, con diferentes fines dependiendo de la aplicación. La evacuación de un sistema de vacío se ejecuta en varias etapas, con diferentes tipos de bombas debido a que no existe una sola bomba capaz de reducir la presión atmosférica hasta la presión última requerida en aplicaciones de alto vacío. Los parámetros de mayor importancia que caracterizan las bombas de vacío son: (1) Velocidad de bombeo; (2) Carga de gas; (3) Presión última; (4) Presión de salida [49].

En cuanto a su funcionamiento, las bombas de vacío se pueden clasificar en dos grupos: bombas de desplazamiento positivo (bombas mecánicas) y bombas de captura (bombas de alto vacío). Las bombas de desplazamiento positivo desplazan las moléculas del gas comprimiéndolas mediante la interacción con objetos físicos (paletas, pistones, etc.), hasta el punto donde se encuentra la válvula de descarga, en la cual cierto volumen del gas es expulsado al exterior. Algunos tipos de bombas de desplazamiento positivo utilizan aceite para mejorar el sellado al vacío y la lubricación. Por otro lado, las bombas de captura atrapan las moléculas del gas en la superficie mediante fuerzas tipo Van der Waals, con un enlace débil, o por medio de quimisorción, con un enlace fuerte. Estas bombas varían en sus capacidades y caudales según su tipo y aplicación. La selección de una bomba de vacío adecuada depende de los requisitos específicos de vacío en términos de presión última y velocidad de bombeo que determina el tiempo en el que se alcanza la presión última requerida en la aplicación en cuestión [50].

Por lo general, se emplean configuraciones de al menos dos bombas, una mecánica y otra de alto vacío, siendo muy importante el empalme y compatibilidad entre ellas. Sin embargo, en situaciones donde se requiere alcanzar un alto vacío en menor tiempo, se pueden añadir más bombas [51].

5.4.2. Tipo de gas

Existen dos tipos de procesos de los cuales depende la composición del gas que se va a emplear en el proceso:

- Procesos reactivos: Los procesos reactivos implican reacciones químicas en las que las sustancias se combinan y transforman en otras con propiedades químicas y físicas diferentes. La composición del gas depende del recubrimiento que se desee para la pieza. Se pueden utilizar gases como el Oxígeno (O_2), Nitrógeno (N_2), Hidrógeno (H_2), entre otros [52].
- Procesos no reactivos: Los procesos no reactivos son aquellos en los que no se producen reacciones químicas significativas y las sustancias involucradas conservan sus propiedades químicas originales. Se utilizan gases inertes, comúnmente el Argón (Ar) [53].

5.4.3. Rotación del sustrato

El portamuestra o sistema de sujeción del sustrato ubicado en la cámara de vacío tiene una influencia directa en la eficiencia del proceso. Para el diseño del sistema de sujeción es necesario tener en cuenta algunos factores; (1) la seguridad de sujeción de la muestra, sin ejercer tensiones mecánicas en el sustrato; (2) la rotación continua del sustrato, asegurando una deposición uniforme; (3) la direccionalidad correcta entre el sustrato y el chorro de plasma. Teniendo en cuenta lo anterior generalmente se utilizan sistemas portamuestra rotacionales [54].

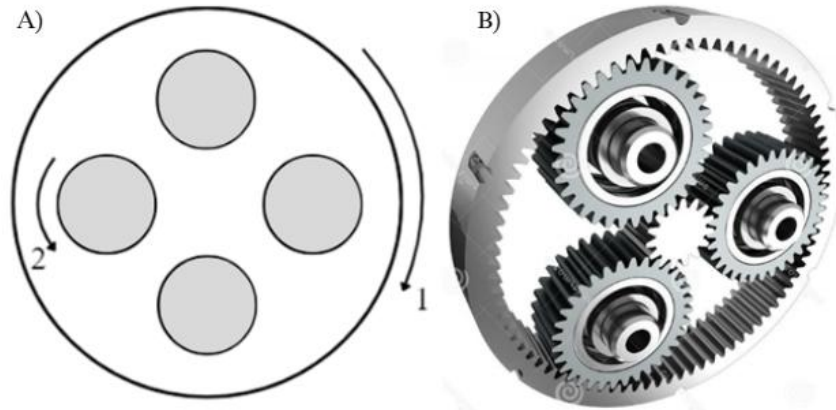


FIGURA 5-8. CONFIGURACIÓN ROTATIVA A) ESQUEMA. B) ENGRANAJES PLANETARIOS [26].

En la figura 5-8 se muestra un esquema de un sistema de doble rotación, resaltando la dirección contraria entre la rotación del plato principal y los satélites, logrando una mayor exposición de todas las superficies de una pieza con geometría compleja.

5.4.4. Número de Satélites

Un "satélite" en el portamuestra se refiere a una plataforma o soporte giratorio secundario que se monta sobre un plato principal que también gira. Este mecanismo traslación y rotación permite una distribución uniforme del recubrimiento sobre los sustratos, mejorando la uniformidad y calidad del recubrimiento aplicado. Los satélites aseguran que las muestras reciban una exposición constante y homogénea al flujo de material depositado desde la fuente de recubrimiento.

Los satélites van ubicados en el portamuestra y son los encargados de sostener directamente las piezas a recubrir, pueden tener diversos diseños de acuerdo con las necesidades específicas del cliente como tipo de pieza y tamaño del lote [55].

5.4.5. Tiempo de ciclo

El tiempo de ciclo depende en su mayoría del tamaño de la cámara y capacidad del sistema de vacío. Adicional de la duración de las diferentes etapas del proceso [31].

El proceso consta de los siguientes pasos:

1. Montaje del porta-sustrato en la cámara de vacío.
2. Activación de las bombas de vacío para disminuir la presión.

3. Limpieza catódica para incrementar la adhesión del material a depositar en la pieza.
4. Recubrimiento mediante la activación de los blancos donde se encuentra el material cátodo.
5. Desmontaje de las piezas ubicadas en el portamuestra.

En la actualidad se han logrado tasas de deposición de $0.2 \frac{\mu m}{min}$ para recubrimientos de cromo utilizando sistemas Sputtering y optimizando diferentes parámetros del proceso [56].

5.4.6. Tamaño y número de cátodos

Cuando se menciona el cátodo en los procesos PVD, se hace referencia al target (blanco) que contiene el material a depositar. Este material se transforma en partículas atómicas en estado de plasma gaseoso, las cuales son dirigidas hacia el sustrato donde se condensan y generan un recubrimiento. La amplia gama de materiales disponibles en la actualidad permite una gran flexibilidad en las características del recubrimiento [30]. El número y tipo de targets son parámetros clave para mejorar la productividad del proceso, ya que el uso de targets con mayor área brinda una mejor uniformidad en el recubrimiento. Además, teniendo en cuenta la eficiencia energética y la preocupación por el consumo, es importante considerar la reutilización de los blancos. Asimismo, la posibilidad de utilizar múltiples targets distribuidos en la cámara y/o puertas del reactor, también puede ser considerada para mejorar la eficiencia del proceso [57].

5.4.7. Puertas de Acceso

Las puertas de acceso en un reactor PVD son puntos clave de entrada al interior de la estructura, diseñadas para facilitar tareas como mantenimiento, limpieza, carga y descarga de sustratos, así como ajustes en los componentes del proceso. Los bordes de las puertas suelen estar equipados con “O-rings” que son sellos herméticos, para garantizar que el vacío se mantenga en el interior del reactor durante su operación. La cantidad y ubicación de las puertas de acceso pueden variar según el diseño del reactor y las necesidades específicas del proceso, con algunos reactores más grandes y complejos que pueden tener múltiples accesos ubicados estratégicamente para facilitar el acceso a diferentes áreas internas[58].

5.4.8. Dimensiones

Las dimensiones del reactor dependen de la robustez requerida en la aplicación y el diseño desarrollado con los múltiples componentes involucrados en el funcionamiento del equipo. En cuanto al tamaño de la cámara de vacío para aplicaciones industriales puede llegar hasta 2500mm de diámetro en configuraciones cilíndricas [59].

5.5. Simulación de elementos

La simulación de elementos es una herramienta fundamental en el diseño y análisis de sistemas, ya que permite predecir el comportamiento de estructuras y materiales bajo diversas condiciones, optimizando así el proceso de diseño y asegurando la eficiencia y seguridad de los componentes. En este proyecto, se utilizaron diferentes métodos y software de simulación para validar los elementos del diseño, facilitando una comprensión de los fenómenos físicos involucrados y proporcionando una base sólida para la toma de decisiones.

5.5.1. Método de Elementos Finitos (MEF)

El Método de Elementos Finitos (MEF) es una técnica numérica utilizada para encontrar soluciones aproximadas a problemas de ingeniería y física. El MEF divide un dominio complicado en partes más simples llamadas "elementos finitos", estos elementos se conectan entre sí en nodos, formando una malla. Al aplicar principios de conservación de la energía y equilibrio de fuerzas a nivel de elemento, se obtienen ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento del sistema completo, las cuales se resuelven numéricamente para obtener una solución aproximada. El MEF es una herramienta poderosa y versátil que ha revolucionado el análisis de estructuras y de fenómenos físicos complejos [60].

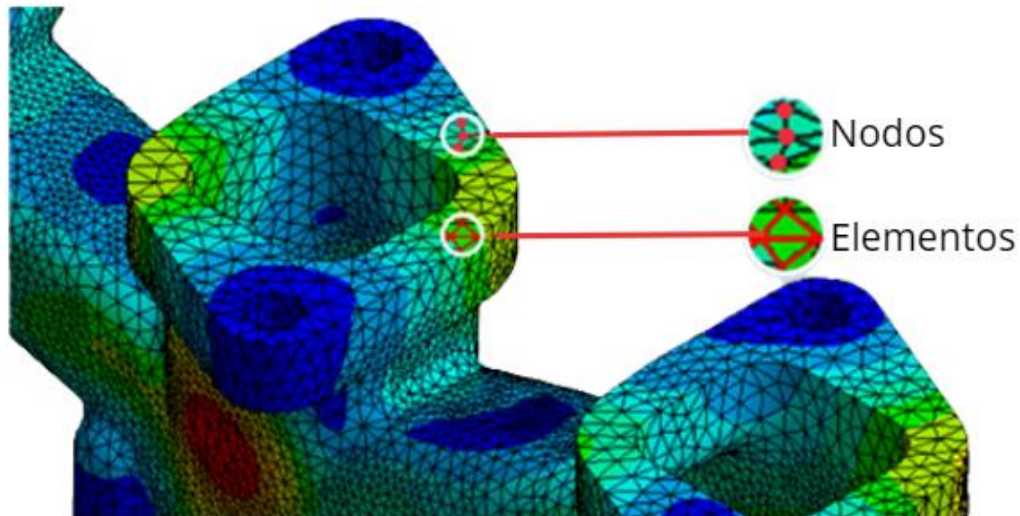


FIGURA 5-9. ILUSTRACIÓN DE LOS NODOS Y ELEMENTOS EN UN MALLA.

5.5.2. Software SIMTRA RSD2013 – Simulation for Metal Transport

SIMTRA es un software desarrollado por el grupo de investigación DRAFT (Dedicated Research on Advanced Films and Target) en la universidad de Ghent para simular el flujo de partículas de metal durante un proceso de sputtering con magnetrón, utilizando superficies predefinidas. En el programa se pueden crear representaciones geométricas de la configuración experimental, que se visualiza mediante la interfaz gráfica. El movimiento de un número de partículas, generadas con condiciones iniciales, desde una superficie objetivo, se rastrea hasta que cruzan una de las superficies definidas. Hay varias opciones disponibles para personalizar la generación y el transporte de partículas a través de la fase gaseosa, tales como: distribuciones angulares y de energía iniciales, incluir o excluir el movimiento y la difusión del gas, y varios potenciales de interacción [61].

5.6. Procesos de manufactura

La fabricación de una máquina para deposición de recubrimientos por procesos PVD requiere de diversos procesos de manufactura, seleccionados de acuerdo con las características del diseño y el material de los componentes. A continuación, se nombra por categoría los procesos que tienen relevancia para el proyecto.

5.6.1. Procesos de conformado

El conformado involucra la modificación de la geometría de la pieza sin remover material, mediante la aplicación esfuerzos que superan el límite elástico, pero permanece por debajo

del límite de fractura. Durante este proceso, el material experimenta una deformación plástica controlada, permitiendo obtener formas específicas a partir de láminas o barras. El objetivo es aprovechar la ductilidad del material para lograr la configuración geométrica deseada, teniendo en cuenta cambios en las propiedades mecánicas mediante el refinamiento de la microestructura. Dependiendo del tipo de esfuerzo aplicado, los procesos de conformado se pueden clasificar en conformado por compresión (forjado, laminado), conformado por tracción (estirado), conformado por flexión (doblado, rolado) y conformado por corte (troquelado) [62], aunque el troquelado involucra cizalladura se considera un proceso de formado por la configuración del montaje [63]. Los procesos de conformado se encargan de dar una forma general a la pieza y posteriormente otros procesos de manufactura, como el maquinado y acabado superficial se encargan de afinar la tolerancia y precisar detalles.

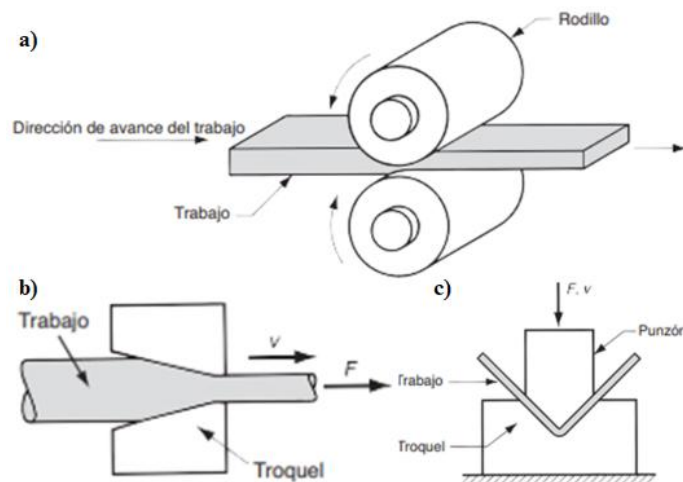


FIGURA 5-10. ILUSTRACIÓN DE A) FORJADO, B) ESTIRADO, C) DOBLADO [64].

5.6.2. Procesos de maquinado

Los procesos de maquinado se caracterizan por la remoción de material a partir de una pieza de trabajo inicial de la cual resulta el producto con las dimensiones deseadas. En este tipo de manufactura se utilizan herramientas de corte para remover el exceso de material mediante mecanismos de cizallamiento y abrasión. Los procesos principales del maquinado son el torneado, taladrado y fresado, adicional existen otros tipos de operaciones que incluyen el perfilado, el cepillado, el escariado y el aserrado, los cuales varían en el tipo de herramienta y su movimiento con la pieza. Aunque tienen desventajas como el desperdicio de material por la viruta desprendida en el proceso, los procesos de maquinado son de los más importantes en la manufactura, debido a la amplia gama de materiales de trabajo, la

variedad de formas y características geométricas, la precisión dimensional y acabados superficiales de calidad [65].

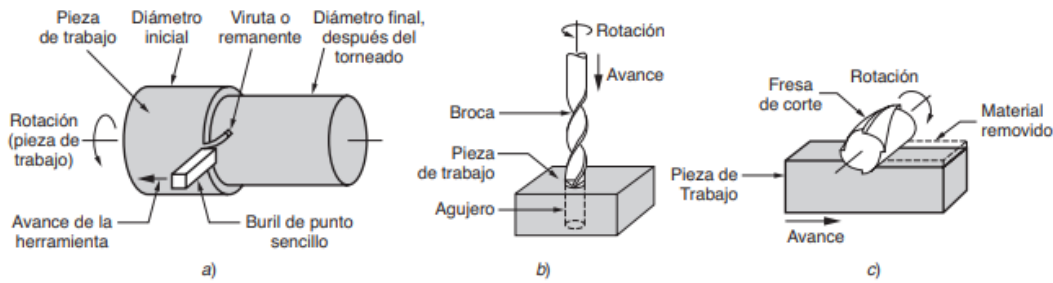


FIGURA 5-11. OPERACIONES COMUNES DE MAQUINADO: A) TORNEADO; B) TALADRADO; C) FRESADO [66].

5.6.3. Procesos de unión

De acuerdo con la Sociedad Americana de Soldadura (American Welding Society, AWS) los procesos de unión y ensamblaje se clasifican en 3 grandes categorías; Soldadura, Unión Adhesiva y fijaciones mecánicas [67]. No obstante, para el enfoque y grado de desarrollo del diseño se mencionarán solo los procesos de unión por soldadura.

Soldadura

La soldadura es un proceso donde mediante la aplicación de calor y/o presión, las superficies de las piezas se unen, en algunos casos se utiliza un material de relleno para facilitar la fusión, en la cual dos o más piezas forman una sola entidad. Es un proceso con gran importancia comercial ya que proporciona una unión soldada fuerte, de realizarle el proceso adecuado con materiales y técnicas adecuadas. No obstante, se tiene en cuenta que la soldadura no permite un desensamble adecuado por lo cual no es recomendada para productos cuya reparación o mantenimiento requieran un desmontaje. La AWS ha clasificado más de 50 tipos de soldadura que utilizan diversas formas de aporte energético para lograr la fusión del material[68], esencialmente los procesos se agrupan en dos categoría principales, a partir de las cuales se derivan subgrupos acorde a sus características como se observa en la figura 5-12.

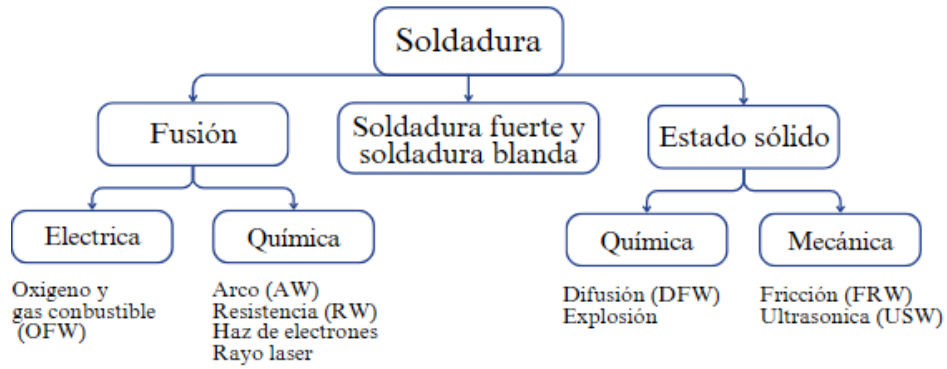


FIGURA 5-12. CLASIFICACIÓN DE LA SOLDADURA. ADAPTADO DE [69].

La *soldadura por fusión* usa calor para fundir los metales y en la mayoría de las operaciones se utiliza un metal de relleno para facilitar el proceso, proporcionando volumen y resistencia a la unión. En los casos que no se utiliza material de relleno, se denominan soldadura autógena.

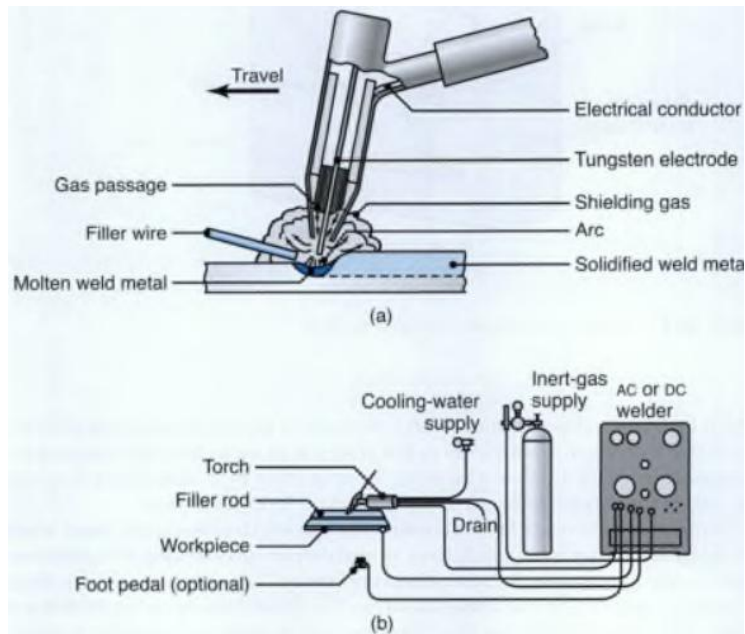


FIGURA 5-13. A) SOLDADURA TIG (TUNGSTEN INERT GAS), B) EQUIPO UTILIZADO PARA SOLDADURA TIG [70].

En la *soldadura de estado sólido* la unión de materiales proviene de la aplicación de presión o una combinación entre calor y presión. En los casos donde se utiliza calor la temperatura permanece debajo del punto de fusión del material a soldar. En estos procesos no se utiliza un material de relleno.

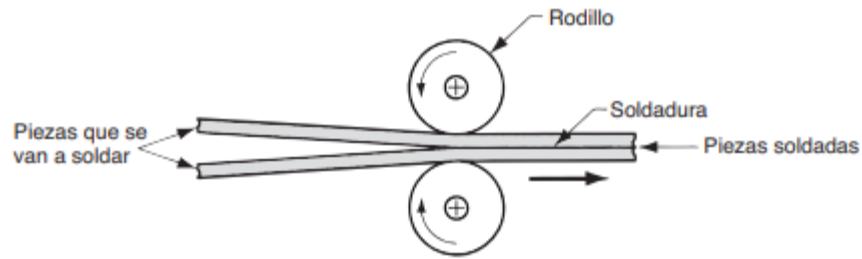


FIGURA 5-14. SOLDADURA CON RODILLOS EN FRIO. ADAPTADO DE [71].

5.7. Normativas

En el diseño de reactores para la deposición de recubrimientos mediante procesos PVD, se tienen en cuenta diferentes normas y estándares que pueden influir en el diseño. Durante la búsqueda de normas aplicables en el diseño del reactor, se identificaron diversas normas muy específicas y detalladas. Sin embargo, dado el nivel de complejidad del diseño presentado en este proyecto, la mayoría de estas normas no tienen una implicación directa en el mismo. Teniendo en cuenta las limitaciones y el alcance del proyecto, se han acotado las siguientes normas:

Norma ASTM A240 – Acero Inoxidable y Norma ASTM B209 – Aluminio

La norma ASTM A240 especifica las propiedades y requisitos del acero inoxidable utilizado en la construcción de cámaras de vacío. Esta norma asegura que el material tenga la resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión necesarias para mantener la integridad estructural bajo condiciones de vacío, evitando la contaminación del entorno de vacío [72].

La norma ASTM B209 establece los requisitos para las láminas y placas de aluminio. En el diseño de cámaras de vacío, garantiza que el aluminio utilizado tenga las propiedades mecánicas adecuadas, como la resistencia a la tensión y la capacidad de soportar el vacío sin deformarse, dependiendo de la presión última del sistema. También asegura la pureza del material, minimizando la desgasificación en el entorno de vacío [73].

ASME Boiler & Pressure Vessel Code – Section VIII Rules for Construction of Pressure Vessels

El “*ASME Boiler & Pressure Vessel Code – Section VIII Rules For Construction of Pressure Vessels*”, fue establecido en 1991 con el objetivo de proporcionar lineamientos estandarizados para la construcción de calderas a vapor y recipientes a presión, siendo

reestructurado en 2009 por diversos comités especializados. El código aclara que sus recomendaciones no sustituyen la educación ni la experiencia del ingeniero y que no constituye una aprobación directa de los diseños, adicional reconociendo que las herramientas y métodos pueden variar a medida que la tecnología progresa [74]. Para las recomendaciones de manufactura se tuvieron la sección UW-2 y en el caso de la selección de material se tuvieron en cuenta el Aluminio y Acero inoxidable mencionado en la sección ULT-23.

Norma para factor de seguridad

En el presente caso no se cuenta con una normativa específica que establezca el valor del factor de seguridad, se recurre a un criterio personal, considerando el tipo de carga, material y la confiabilidad de los datos disponibles. A continuación, se presentan las recomendaciones generales para materiales dúctiles en la tabla 5-2 propuestas en el libro “Machine Elements in Mechanical Design” considerada literatura técnica especializada.

Condición de diseño	Factor de seguridad recomendado
Estructuras sometidas a carga estática, con alta confiabilidad en datos de diseño	1.25 – 2.0
Elementos mecánicos sometidos a carga dinámica, con confiabilidad promedio en los datos	2.0 – 2.5
Estructuras o elementos con carga dinámica y ciertas incertidumbres en cargas, materiales o análisis	2.5 – 4.0
Estructuras críticas o con alta incertidumbre en materiales, cargas o entorno de trabajo	≥ 4.0

TABLA 5-4. FACTORES DE SEGURIDAD RECOMENDADOS PARA MATERIALES DÚCTILES. ADAPTADO DE [75].

El diseño de una cámara de vacío de para un reactor PVD, se considera una estructura estática, sometida a presión externa constante. Considerando que las cargas dinámicas no son intensas y las incertidumbres son bajas, se selecciona un factor de seguridad de 2.5.

6. Estado del arte

6.1. Reactores industriales

La deposición de recubrimientos de capas delgadas es una tecnología crucial en diversas industrias, incluyendo la aeroespacial, la automotriz, entre otras [41]. Los reactores utilizados para estos procesos han evolucionado significativamente, incorporando avances tecnológicos que mejoran la calidad y uniformidad de los recubrimientos, así como la eficiencia del proceso. Esta sección presenta una visión comparativa entre diferentes reactores posicionados actualmente en el mercado, destacando sus principales características técnicas y operativas.

Se describirán las siguientes características en la tabla 6-1:

- **Tamaño interno de la cámara:** Se refiere al volumen disponible dentro de la cámara de deposición, que puede variar según el tamaño y la capacidad de producción del reactor.
- **Carga máxima:** Indica el peso máximo del sistema portamuestra y los sustratos o materiales que se pueden cargar en el reactor para cada ciclo de deposición, lo que afecta directamente la eficiencia y productividad del proceso.
- **Tecnologías disponibles:** Describe las diferentes tecnologías y métodos de deposición disponibles en el reactor, que determinan la versatilidad y aplicaciones posibles del sistema.
- **Número de cátodos:** Indica la cantidad de cátodos disponibles en el reactor, lo que determina la capacidad de depositar diferentes materiales o variación en la tasa de deposición.
- **Sistema de limpieza:** conocido como “etching”, se refiere al método utilizado para limpiar los sustratos antes de la deposición, evitando la necesidad de un preproceso y asegurando la pureza de la película depositada.
- **Último vacío:** Indica la presión de vacío última alcanzada en la cámara antes de iniciar la deposición, lo que afecta directamente la calidad y pureza del recubrimiento final.




Características del sistema	CCZK – SF	KOLZER MF	Hauzer Flexicoat 1500
Tamaño interno de la cámara	1000-2000 x 1200-2200 mm	1450 x 1600 mm	1230 x 1925 mm
Carga máxima	No especifica	No especifica	3000 kg
Tecnologías disponibles	Magnetron Sputtering	PVD Sputtering, Metallizing, PECVD	Rectangular arc, CARC+ Flex, Magnetron sputtering, HIPIMS, Microwave, Plasma nitriding.
Numero de cátodos	6 máx.	No especifica	6 máx.
Sistema de limpieza	Si /Incluye	Si /Incluye	Si /Incluye
Ultimo vacío	$3.75 \times 10^{-7} Torr$	No especifica	No especifica
Imagen			

TABLA 6-1. CARACTERÍSTICAS DE REACTORES PVD INDUSTRIALES.

Cabe resaltar que cada empresa ofrece características personalizables, lo que nos indica que las especificaciones presentadas pueden variar según los requerimientos específicos del cliente. Los modelos presentados son preestablecidos como guía [76], [59], [77].

En la búsqueda de referentes, se observan las tendencias del mercado PVD en el ámbito industrial. Además, la tecnología PVD busca competir no solo mediante la mejora de las prestaciones mecánicas, sino también reduciendo el costo por pieza en comparación con otras técnicas de deposición. En este sentido, se destaca el enfoque en el aumento de la productividad, desde diferentes enfoques. Por un lado, un sistema con doble puerta permite

cargar y descargar el portamuestra de tal forma que mientras un lote está en proceso de recubrimiento, los operarios pueden hacer el cambio y una vez finalizado el proceso, solo se debe abrir la puerta que estaba en procesos y cerrar la puerta cargada con las nuevas piezas a recubrir. Adicional, la selección de bombas de vacío más potentes para llegar a una presión última en un menor tiempo. Por otro lado, considerar aumentar el número de cátodos para una deposición más rápida es otra opción considerada. La implementación de estos enfoques para el aumento de la productividad también conlleva un aumento de los costos, sin embargo, abre las posibilidades al crecimiento del negocio.

6.2. Diseño de un equipo industrial de arco pulsado para la producción de películas delgadas mediante PAPVD

Teniendo en cuenta la importancia de la producción de películas delgadas y la creciente innovación en procesos relacionados, en el trabajo se ha ideado un equipo multicátodo de tipo industrial que utiliza la técnica de evaporación por arcos eléctricos pulsados (PAPVD). El reactor se caracteriza por tener una geometría cilíndrica, un árbol portamuestra rotatorio y ocho blancos rotatorios, representa un avance significativo en la capacidad de procesamiento para la producción eficiente de recubrimientos en monocapas y multicapas.

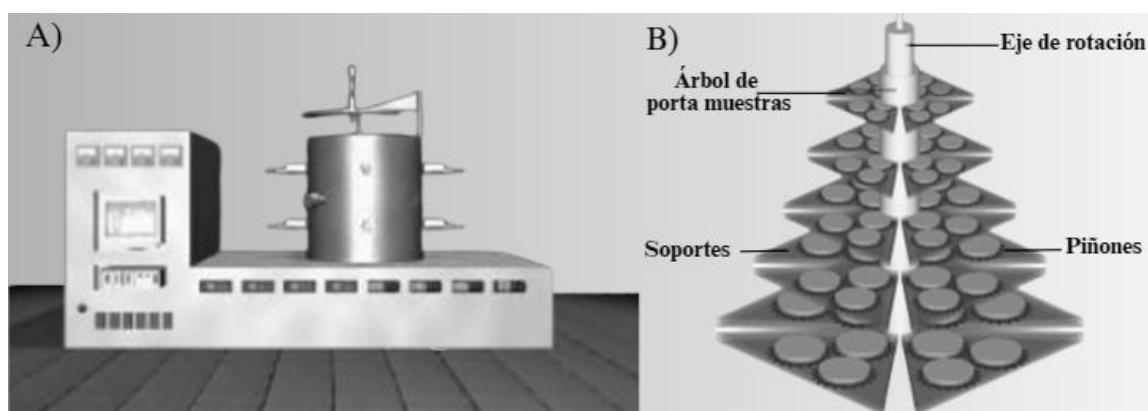


FIGURA 6-2. A) ESQUEMA DEL EQUIPO INDUSTRIAL DE ARCO PULSADO. B) SISTEMA DE ÁRBOL PORTAMUESTRA[78].

El diseño del equipo fue fruto de una investigación enfocada en optimizar la calidad del recubrimiento donde la temperatura, el flujo de gases, la presión en la cámara de vacío y la rotación de portamuestras y evaporadores fueron parámetros claves tenidos en cuenta. Adicional al reto de facilitar el procesamiento de piezas industriales, el equipo permite una investigación continua en aplicaciones relacionadas con el plasma, proporcionando

comprensión de sus características con el fin de abordar problemas críticos de corrosión y desgaste.

Los resultados de este estudio destacan la importancia de los recubrimientos de capa delgada en contextos industriales, especialmente en la reducción del desgaste en herramientas y maquinarias, así como en aplicaciones tribológicas. Adicionalmente se resalta la compleja investigación y el esfuerzo desde la ingeniería para el desarrollo de reactores industriales. Este equipo no solo representa un avance tecnológico, sino que establece bases para la mejora de características de las películas delgadas, creando nuevas perspectivas en diferentes aplicaciones industriales [78].

7. Metodología

7.1. Metodología de Diseño

A continuación, se describirá la metodología que se utilizó para el desarrollo del diseño.

En el libro “El proceso de Diseño Mecánico” de David Ullman [38] se describe las cuatro fases del ciclo de vida de un producto; (1) Desarrollo del producto, (2) Producción y entrega, (3) Uso, (4) Final de Vida, no obstante, el desarrollo del presente trabajo se enfocó en la primera etapa, la cual consta de los siguientes 5 pasos.

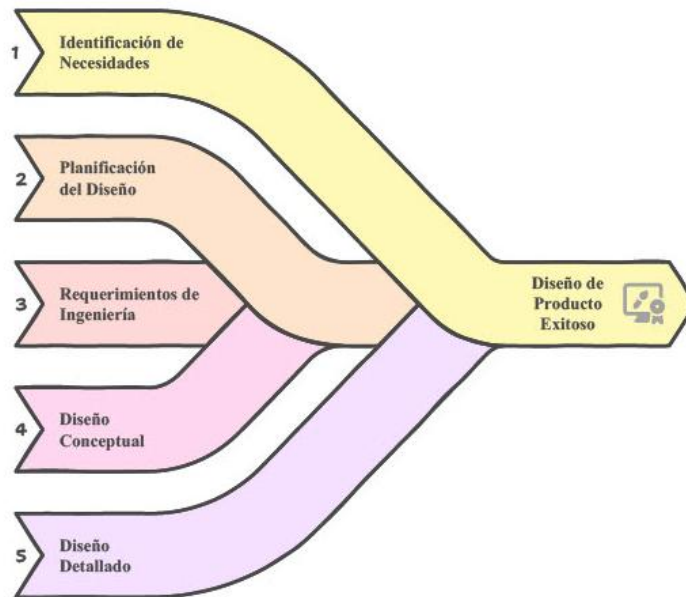


FIGURA 7-1. PASOS DE LA PRIMERA ETAPA “DESARROLLO DEL PRODUCTO” [35].

- **Identificar la necesidad:** Implica comprender a fondo el problema y la motivación para el desarrollo del producto, se busca definir claramente cuál es la necesidad del usuario o del mercado que el producto debe satisfacer.
- **Planificar el proceso de diseño:** Se establecen los objetivos y el alcance del proyecto, así como los recursos necesarios y el cronograma de trabajo. Es crucial para organizar y gestionar eficientemente el proceso de diseño.
- **Generar los requerimientos de ingeniería:** Se definen los criterios técnicos y funcionales que debe cumplir el producto. Estos requisitos son fundamentales para guiar el desarrollo del diseño y asegurar que el producto final cumpla con las expectativas.
- **Desarrollar el diseño conceptual:** En esta etapa se generan varias ideas o conceptos de diseño que podrían satisfacer los requerimientos identificados. Se evalúan y refinan estas ideas para seleccionar la mejor opción.
- **Desarrollar el diseño de detalle:** Finalmente, se detalla y especifica el diseño elegido en la etapa anterior. Se definen todos los aspectos técnicos y de fabricación necesarios para llevar el diseño a la realidad, preparándolo para la fase de prototipado y pruebas.

Adicional el diseño tendrá el siguiente enfoque:

Diseño para manufactura

Ullman define el Diseño para Manufactura (DFM), como la forma de establecer el diseño de los componentes de un producto con el enfoque de facilitar su fabricación, seleccionando el mejor proceso de manufactura para cada componente, asegurando su eficiencia y alta calidad. El objetivo es reducir costos, mejorar la calidad y evitar problemas de fabricación al diseñar componentes que sean fáciles de producir con las técnicas y herramientas disponibles [79].

Diseño para ensamblaje

El Diseño para Ensamblaje se enfoca en el diseño teniendo en cuenta la optimización del proceso de ensamblaje, asegurando que su forma y diseño faciliten el proceso. El objetivo es reducir costos y tiempo de ensamblaje al diseñar producto teniendo en cuenta las técnicas disponibles para su ensamble [79].

7.1.1. Método de evaluación DFMA

En el desarrollo del diseño se tuvieron en cuenta las directrices generales para el DFMA. En la tabla 7-1 se connotan los principios que fueron considerados para el diseño.

Directriz	Ventajas
Minimizar la cantidad de componentes.	Se reducen los costos de ensamble de componentes. El producto final es más confiable porque hay menos conexiones.
Utilizar componentes estándar disponibles comercialmente.	Se reduce el tiempo y el esfuerzo de diseño, disponibles comercialmente. Se evita el diseño de componentes con ingeniería personalizada.
Diseñar para facilitar la fabricación de piezas.	Simplifica la configuración geométrica de piezas; evita características innecesarias. Deben evitarse los requerimientos de acabado superficial innecesarios porque podría requerirse un procesamiento adicional.
Eliminar o reducir los ajustes.	Los ajustes consumen tiempo en el ensamble requeridos. Los ajustes de diseño en el producto implican más oportunidades de que surjan condiciones no ajustadas.

TABLA 7-1. PRINCIPIOS Y DIRECTRICES GENERALES EN EL DISEÑO PARA MANUFACTURA Y ENSAMBLE.
ADAPTADO DE[80].

En las ocasiones donde se presentaron conflictos entre las directrices se llegó a un punto de equilibrio donde se pudieran evidenciar los atributos de cada una. Adicional, estas directrices fueron contempladas desde las fases iniciales del proyecto con el fin de que las ventajas fueran parte del producto final.

Funciones y alternativas

De acuerdo con la metodología de diseño de Ullman evaluar las diferentes alternativas que podrían satisfacer una función del sistema hace parte del proceso de diseño en la generación del diseño conceptual en donde se busca tener una visión de las diferentes posibilidades y compararlas para así escoger la más adecuada para la aplicación. A continuación, se exponen en la tabla 7-2 el objetivo general del sistema, las funciones y las alternativas correspondientes.

Depositar recubrimientos delgados sobre las superficies de los machetes en un ambiente de vacío			
Función	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Generar vacío inicial	Bomba mecánica con lubricación en aceite	Bomba mecánica con lubricación en seco	
Mantener vacío operativo	Bomba turbomolecular	Bomba difusora	Bomba criogénica
Controlar flujo de gases	Válvulas manuales de aguja	Válvulas automáticas proporcionales	Controladores de flujo másico
Rotación de piezas	Rotación simple (eje central)	Doble rotación (planetaria)	
Medir presión	Vacuómetro Pirani	Vacuómetro Penning (Iónico)	Vacuómetro digital multi-rango
Generar plasma	Magnetron DC plano	Magnetron RF	Magnetron DC pulsado

Generación de temperatura	Resistencias eléctricas	Lamparas de calor	
Monitoreo de temperatura	Termopares en contacto directo	Sensor óptico de radiación infrarroja	
Permitir carga y descarga de muestra	Una puerta lateral con bisagra y cierre por tornillos	Una puerta superior con bisagra y cierre hermético	Dos puertas laterales con bisagra y cierre con perilla roscada
Seguridad y control del proceso	Interruptores manuales	PLC con HMI	
Resistir el diferencial de presión	Cámara cilíndrica de acero al carbono sin refuerzos	Cámara cilíndrica de aluminio sin refuerzos	Cámara cilíndrica con refuerzos

TABLA 7-2. TABLA DE ALTERNATIVAS Y FUNCIONES.

En la tabla 7-7 se presentaron las funciones principales que contribuyen con el desempeño del objetivo general, con el propósito de demostrar que se conoce el funcionamiento integral del sistema. Cabe aclarar que, aunque algunas funciones pueden descomponerse en subfunciones más específicas, se definió un nivel de detalle teniendo en cuenta el alcance del proyecto. Adicional, no todas las funciones identificadas fueron consideradas en el desarrollo del diseño final. Las alternativas consideradas en el desarrollo de diseño fueron las correspondientes a los elementos diseñados.

7.2. Requerimientos

Entender al cliente es la clave para un proyecto exitoso, por lo que la definición de los requerimientos de manera clara y específica fue de vital importancia. Su interpretación en especificaciones técnicas, que se verá a continuación, brindó la base sólida para garantizar un diseño acorde a las necesidades de la empresa.

El proyecto está ligado con la empresa Caldtech SAS, la cual busca trabajar con empresas colombianas que actualmente utilizan procesos de electrodeposición para el recubrimiento de diferentes piezas, con el fin de desarrollar diseños que trabajan con deposición PVD para

emigrar a tecnologías limpias y proporcionarle a la empresa herramientas para fortalecer su crecimiento en la industria.

El diseño del proyecto es una propuesta para una empresa líder en Colombia dedicada a la fabricación y comercialización de herramientas manuales, tanto forjadas como no forjadas, para sectores como la agricultura, jardinería, minería, industria y construcción que se destaca por la alta calidad y rendimiento de sus herramientas, llegando incluso a industrias como la industria militar. Su catálogo incluye una amplia variedad de herramientas, como hachas, machetes, herramientas de golpe, medición, poda, entre otras. Se llevaron a cabo reuniones comerciales donde se conocieron las características del proceso y se seleccionó la herramienta a recubrir.

7.2.1. Traducción de características a requerimientos técnicos

Para el desarrollo de requerimientos de ingeniería se contrastaron las características principales del reactor con los requerimientos de la empresa, asegurando cumplir sus objetivos. Teniendo en cuenta sus necesidades y las restricciones del proyecto, el diseño se centró en los siguientes componentes, considerando los factores mencionados para cada uno:

- Diseño estructural de la cámara de vacío: material, dimensiones de la estructura y puertas de acceso.
- Diseño del porta muestras rotativo: sistema de rotación continua, diseño y cantidad de satélites.
- Selección del sistema de bombeo de vacío: Número y tipo de bombas, medidores de vacío.
- Características del sistema de deposición: tipo de gas, número y tipo de cátodos.

Adicional, dos factores que están relacionados y tienen implicaciones en los componentes mencionados son la tasa de producción y el tiempo de ciclo, el diseño del portamuestra del reactor se basó en la capacidad de producción actual.

7.3. Búsqueda de referencias en el mercado

Se revisaron las características principales de los reactores en máquinas industriales que se encuentran en el mercado (como se presentó en el capítulo 6) identificando la variabilidad y versatilidad que pueden tener los diseños, brindando una visión general para el diseño específico del trabajo.

Teniendo una idea preliminar del concepto de diseño de acuerdo con los requerimientos del cliente, se realizó una búsqueda de referentes en el mercado nacional. Esto incluyó proveedores de materiales, empresas que realizan diversos procesos de manufactura y distribuidores de equipos y elementos de vacío, con el objetivo de asegurar que la conceptualización del diseño y su posterior desarrollo se llevaran a cabo en base a los recursos disponibles a nivel nacional. En el Anexo 1 se encuentra una tabla listando empresas nacionales con sus respectivos servicios.

7.4. Diseño estructural de la cámara de vacío y sus componentes principales

El diseño estructural de la cámara de vacío se basó en una geometría cilíndrica, considerada estándar en la industria. A partir de esta forma y tomando como orientaciones referentes industriales como el reactor Kolzer MF, expuesto en la tabla 6-1-1, se desarrolló el diseño de las puertas. Por otro lado, el diseño de las bisagras se realizó teniendo en cuenta el acople con el marco de las puertas y una apertura que brindara flexibilidad para el montaje y desmontaje de piezas, con el objetivo principal de mostrar su funcionabilidad y relación respecto a las puertas. Con esto en mente no se realizaron validaciones estructurales en las bisagras, debido a que no era un elemento transcendental para el objetivo del proyecto.

7.4.1. Selección de material para la cámara de vacío

Como parte del proceso de selección del material de la cámara de vacío se elaboró una matriz de evaluación, en la que se asignaron pesos a los diferentes criterios en función a su influencia en el proyecto. Se preestablecen dos materiales estándar en las aplicaciones de vacío que son Acero inoxidable 304 y aleación de Aluminio 1060 [46,47]. Los criterios seleccionados en congruencia con la aplicación fueron resistencia mecánica, densidad, maquinabilidad, soldabilidad, resistencia a la corrosión y costo. Asignar coeficientes de ponderación a cada criterio permitió una evaluación más objetiva y sistemática de las opciones de material, facilitando la toma de decisiones orientadas hacia los objetivos del proyecto [81].

7.5. Diseño del sistema portamuestra

Los principales criterios que se tuvieron en cuenta para el diseño del portamuestra fueron la rotación del sustrato y su direccionalidad con el plasma eyectado que hacen parte de las principales características del diseño de un reactor expuestas en la sección 5-4. En la búsqueda de referentes se evidencian diversos diseños de satélites, todos ajustados a la pieza a recubrir, por lo que en este caso se comenzó un proceso de diseño desde la ideación por medio de dibujos y de tal forma evaluar la acomodación de los machetes que cumpliera con la direccionalidad de las dos caras del machete hacia los cañones de plasma. Por otro lado, para cumplir con la rotación y traslación de todo el sistema en conjunto, en la literatura se evidencia el uso de engranajes planetarios para el caso y a partir de este sistema se configuraron los engranajes para el sistema [82].

7.6. Simulación en SolidWorks con MEF

Se realizaron simulaciones de Método de Elementos Finitos (MEF) utilizando el software SolidWorks 2023 para analizar los componentes críticos sometidos a mayores esfuerzos en el sistema, siguiendo el paso a paso estándar para los análisis estáticos realizados en SolidWorks [83]. Las partes a las cuales se les realizó la simulación fueron las siguientes:

- **Cámara de vacío:** El objetivo fue determinar un espesor de pared que resistiera la fuerza ejercida por el diferencial de presión, teniendo en cuenta el material seleccionado.
- **Sistema de engranajes del porta muestras:** en el sistema de engranajes se buscaba evaluar si estos componentes podían resistir el torque generado por el motor

En los dos casos se empleó una malla fina para obtener resultados precisos, ya que no implicaba un gasto computacional significativo, donde una simulación tardaba entre 1 y 2 minutos. Dentro de los parámetros de mallado, se seleccionó la malla basada en curvatura debido a que es más precisa en los casos donde se presentan geometrías curvas e irregular, adicional crea una malla más gruesa para los sólidos que pueden no ser críticos en la simulación y así reducir el tiempo de análisis.

Esta metodología permitió obtener información detallada sobre la resistencia y el comportamiento estructural de los componentes, facilitando la toma de decisiones en el diseño y la optimización del sistema.

7.7. Selección del sistema de vacío.

Para la selección de un sistema de vacío fue necesario considerar varios criterios clave para asegurar que el sistema funcione de forma eficiente y cumpla con los requisitos específicos de la aplicación. Los criterios que se tuvieron en cuenta para la selección de una configuración de bombas adecuada fueron;

- **La capacidad de bombeo**, que determina la velocidad de evacuación del volumen de gas del sistema;
- **El rango de presión operativa**, el cual debe ser adecuado para alcanzar y mantener el nivel de vacío deseado;
- **El tipo de lubricación**, que influye en la flexibilidad operativa, el tiempo de proceso y mantenimiento;
- **La compatibilidad** entre los elementos del sistema como lo son los medidores de presión [49].

7.8. Selección y configuración de los de cátodos.

Teniendo en cuenta la asociación con la empresa Caldtech, se implementó en el diseño el cañón Magnetron Sputtering de su desarrollo propio. Con este punto de partida, se trabajó en definir su ubicación y configuración en la cámara de vacío. Posteriormente, se ejecutaron múltiples simulaciones con el software SIMTRA por cada cátodo para obtener la distancia sustrato-cátodo y distancia entre cátodos más eficiente, mediante la evaluación del comportamiento de las partículas del material cátodo y la ubicación de su deposición en el sustrato.

7.8.1. Simulación cátodos

Para la simulación en el software Simtra se siguieron las guías proporcionadas por el manual [84]. En la presente sesión se describe el proceso para ejecutar la simulación:

La vista principal del programa se observa en la figura 7-2a, donde podemos observar el menú y tres ventanas.

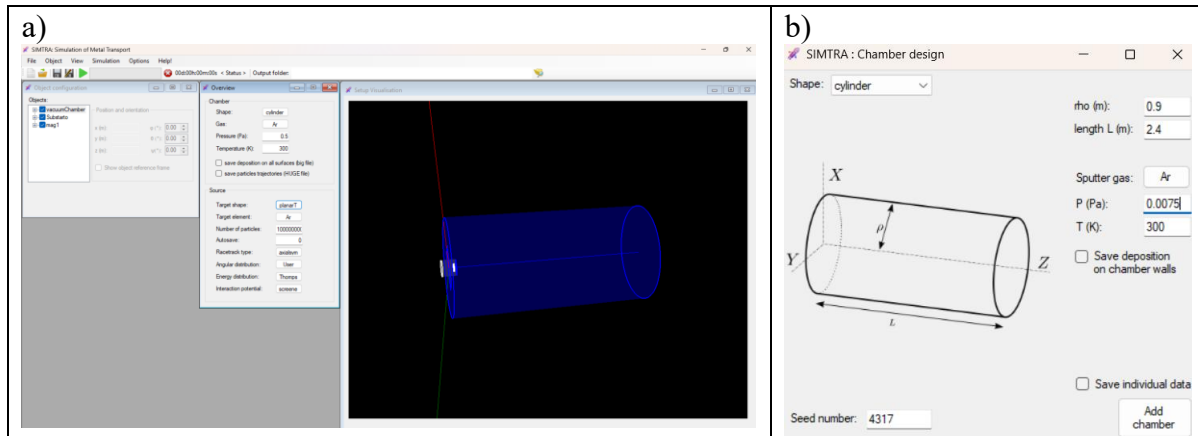


FIGURA 7-2. PROGRAMA SIMTRA, A) VISTA PRINCIPAL, B) VENTANA “CHAMBER DESIGN” [85].

Primero se configuraron los objetos, los cuales son 3:

- “Chamber” indica la cámara de vacío,
- “Magnetron” que es el cátodo donde se encuentre el blanco, y
- “Dummy object” haciendo referencia el sustrato.

Configuración Chamber

Para la configuración de la cámara en el menú principal se seleccionó en la ventana “Chamber Design” (figura 7-2b) la geometría de cilindro y sus respectivas medidas, junto con otros parámetros del proceso, gas utilizado y presión de trabajo. Una vez creada la cámara, se pudo visualizar en la ventana “Setup Visualisation”, como se observa en la figura 7-2a.

Magnetron

Para añadir el Magnetron, se utilizó la plantilla predeterminada del programa para un magnetron planar. Esta plantilla se selecciona desde el menú principal y en donde se configuraron las dimensiones del Magnetron de Caldtech SAS en la ventana “Geometry” (figura 7-3a). Posteriormente se seleccionó la ubicación y orientación para cada catodo en las diferentes distancias por medio de coordenadas en la ventana “Magnetron Geometry” (figura 7-3b).

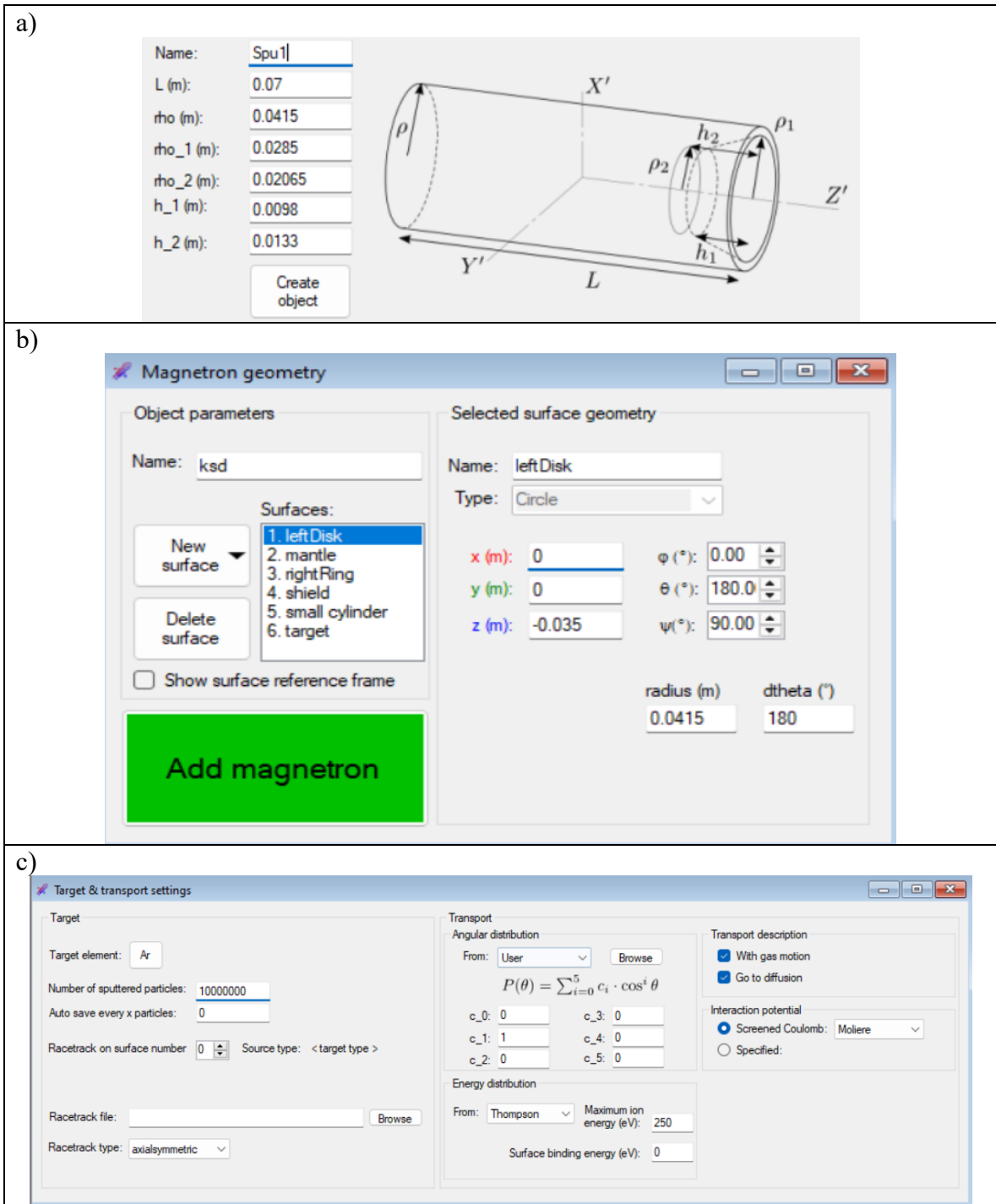


FIGURA 7-3. A) VENTANA DE CONFIGURACIÓN DE CÁTODO PLANAR. B) VENTANA “MAGNETRON GEOMETRY” C) VENTANA “TARGET AND TRANSPORT SETTINGS”[85].

Posteriormente, se configuro la pestaña “Target and Transport Settings”, realizando los siguientes pasos; (1) Seleccionar el elemento asignado para el gas; (2) El número de

partículas que serán simuladas;(3)Seleccionar el numero de la superficie que corresponda al blanco; (4)Seleccionar el archivo que contiene los datos de “racetrack” ; (5) Seleccionar el tipo de “racetrack”; (5)Seleccionar la distribución angular; (6) Seleccionar la distribución de energía inicial; (7) Seleccionar las descripciones de transporte; y (8) Seleccionar el tipo de interacción potencial.

Una vez se hayan configurado las dos ventanas anteriores se añade el Magnetron configurado y se podrá observar en la ventana de visualización.

Dummy Object

Para el “Dummy Object” o substrato en la ventana “Object Geometry” (figura 7-4) se escogió una superficie de acuerdo con la forma geométrica de una sección rectangular y se asignaron las dimensiones de acuerdo con la altura del que corresponde a tres machetes. Por último, se ejecutó la simulación.

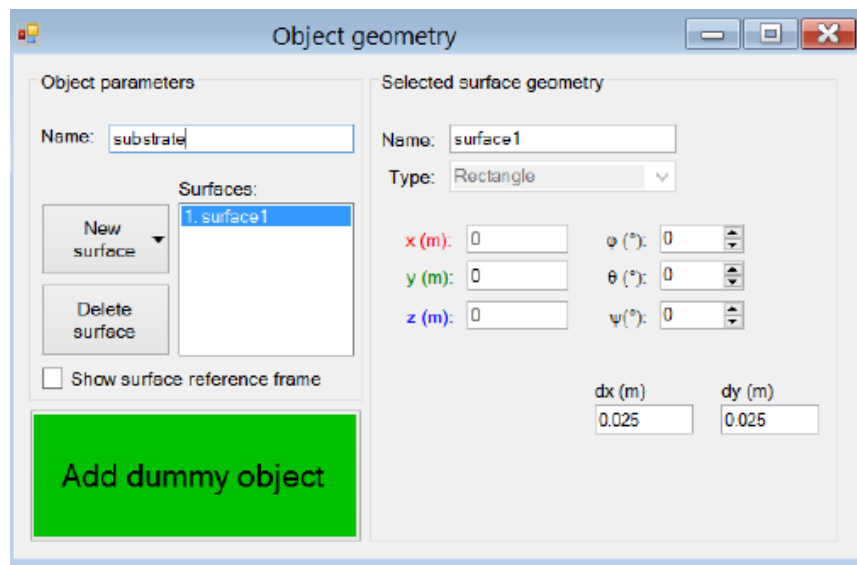


FIGURA 7-4. VENTANA “OBJECT GEOMETRY”[85].

El programa SIMTRA genera diversos archivos de resultados derivados de la simulación, incluyendo datos de redeposición en el target, registro de errores, información general de la simulación (como fecha y tiempo), histogramas de ángulos iniciales, energía de las partículas, tiempo entre emisiones y depósitos, números de colisiones, entre otros. No obstante, para el análisis de las distancias solo se tuvo en cuenta los resultados del número

de partículas depositados en la superficie del sustrato, y analizar como cambian de respecto la distancia.

7.9. Levantamiento de planos, informe de costos aproximados y recomendaciones de manufactura.

De acuerdo con el diseño realizado, se elaboraron los respectivos planos de las piezas más relevantes bajo norma ISO 128 [86] teniendo en cuenta las indicaciones para líneas y vistas. Adicionalmente, se detallaron dimensiones, materiales y lista de piezas. Se proporciono una tabla de costos aproximados, incluyendo los diferentes rubros del proyecto. Por último, se especificaron recomendaciones para la manufactura de los componentes principales de acuerdo con la disponibilidad de procesos a nivel nacional.

8. Resultados y discusiones

8.1. Selección de pieza a recubrir y requerimientos

Junto con la empresa se seleccionó el machete que se puede observar en la figura 8-1, como producto foco para el diseño. Estos machetes son troquelados en una sola pieza de acero al

carbono, extendiendo la cacha hasta el final del mango para permitir golpes firmes y reducir la vibración. El acero recibe un tratamiento térmico de temple y revenido para aumentar la dureza y flexibilidad. Adicionalmente, pasan por un proceso de cromado, con el fin de tener una capa protectora contra la corrosión y tener un acabado plateado[87].



FIGURA 8-1. HOJA DE MACHETE ACERO AL CARBONO.

Teniendo en cuenta el producto seleccionado y las expectativas de la empresa, se resaltan las siguientes características requeridas:

- Propiedades mecánicas.
- Propiedades químicas.
- Acabado.
- Tasa de producción.
- Espesor del recubrimiento.

La descripción de las características se encuentra en la tabla 8-1.

Características	Descripción
Propiedades mecánicas	Debido a que el machete es una herramienta utilizada para tareas repetitivas y exigentes, se espera que mantenga su calidad a lo largo del tiempo, siendo resistente al desgaste.
Propiedades químicas	El machete suele utilizarse en entornos exteriores, lo que lo expone a la humedad. Por ello, es crucial que tenga una buena resistencia a la corrosión para evitar la oxidación y el deterioro.

Acabado	El machete presenta un color grisáceo plata y tiene un acabado tipo espejo.
Tasa de producción	La producción actual es aproximadamente de 1200 unidades al día.
Espesor del recubrimiento	Un espesor para herramientas de trabajo que pasan por un proceso de cromado duro puede estar entre 20 μm – 100 μm [88]-[89], no obstante, en procesos PVD para herramientas de trabajo se utiliza un espesor entre 1 μm - 8 μm [90], teniendo en cuenta propiedades mecánicas y químicas similares.

TABLA 8-1. DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS.

Teniendo en cuenta las características deseadas se presentan los siguientes requerimientos de ingeniería, de acuerdo con el alcance del proyecto.

- El diámetro interno de la cámara de vacío no debe superar los 2.5m.
- La altura de la cámara de vacío no debe superar los 3.5m.
- La cámara de vacío debe resistir el diferencial de presión ejercido por la presión atmosférica equivalente a 105.325 Pa.
- La distancia entre el sustrato y el cátodo no debe exceder 40cm.
- La apertura de las puertas debe tener un ángulo de apertura mayor a 135° para permitir la carga y descarga de las muestras.
- El material de la cámara de vacío debe resistir temperaturas sin deformación alguna de hasta 500 °C.
- El sistema de vacío debe alcanzar los $9.9 * 10^{-4} Pa$.
- El sistema de vacío debe ser capaz de alcanzar $9.9 * 10^{-4} Pa$ en menos de 20 minutos.
- El sistema de vacío debe contar con al menos 2 bombas para las dos etapas de vacío.
- El factor de seguridad de la cámara de vacío debe ser igual o mayor a 2.5.
- El portamuestra deber tener con 2 rotaciones.
- La capacidad del portamuestra debe ser mayor a 200 machetes.
- La tasa de producción diaria debe ser mayor a 1200 unidades.
- El tiempo total de proceso no debe exceder las 3 horas y 20 minutos.
- La diferencia en el espesor no debe ser mayor al 15%.

Es importante resaltar que no todos los requerimientos se evidencian completamente en los resultados del presente trabajo debido que dependen de aspectos que no están en el alcance del proyecto. Las propiedades mecánicas de un sustrato, como la dureza de una herramienta de trabajo y las propiedades químicas, como la resistencia a la corrosión, dependen de los materiales [91]. Teniendo en cuenta que en el diseño presentado no se abarcan todas las características influyentes en estas propiedades no se asegura el cumplimiento estricto de estas. En el caso del diseño portamuestra, se buscó un diseño que permitiera superar la tasa de producción actual. Por lo que se consideró la tasa de deposición de recubrimientos de cromo utilizando Sputtering que se menciona en la sección 5.4.5.

8.2. Diseño estructural de la cámara de vacío

8.2.1. Selección de material para la cámara de vacío

Primero se llevó a cabo la selección del material para el diseño de la cámara de vacío utilizando una matriz de selección. Esta herramienta permitió asignar un valor a cada criterio según su relevancia para la aplicación específica.

Criterios para la matriz de selección

El criterio más importante es el límite elástico, dado que la cámara debe resistir el diferencial de presión en sus paredes. Este factor influye directamente en la durabilidad y el desempeño del reactor, asegurando que el material pueda soportar esfuerzos sin deformaciones permanentes, lo cual es esencial para preservar la integridad y eficiencia del sistema a lo largo del tiempo.

Posteriormente, se consideraron los criterios de maquinabilidad y soldabilidad, que determinan la facilidad mecanizado y soldadura de los materiales. Estos aspectos son fundamentales para la fabricación eficiente y precisa de la cámara de vacío, porque inciden en los costos de producción, el tiempo de ensamblaje y la calidad de las uniones y acabados, haciendo al sistema menos propenso a fallas estructurales. También se evaluó la resistencia a la corrosión porque está directamente ligado a la limpieza y pureza, lo cual es de vital importancia en un sistema de vacío para recubrimientos.

Adicional, se tuvo en cuenta la densidad debido a su relación con el peso total del sistema. Un material con menor densidad puede reducir significativamente el peso de la cámara de

vacío, lo cual es beneficioso para su manejo, instalación y soporte estructural. No obstante, dado que el reactor es una máquina de calibre industrial, se debe tener en cuenta que las estructuras pueden tener un peso considerable. Por último, aunque el costo es un factor significativo en la toma de decisiones, en este caso no se le asignó una mayor relevancia debido a que el alcance del presente proyecto se limita a la presentación de costos aproximados.

No se consideró la disponibilidad como criterio de selección debido a que se evidenció una amplia oferta en el mercado nacional, garantizando un suministro. Finalmente se asignaron los valores de importancia de 0 a 3, siendo 3 más relevante y 0 nada relevante. Los criterios evaluados son: límite elástico, maquinabilidad, soldabilidad, resistencia a la corrosión, densidad y costo, respectivamente. La tabla 8-2 presenta estos resultados.

Criterios	Importancia	Calificación		Valor ponderado		Justificación	
		Acero inoxidable 304	Aluminio 1060	Acero inoxidable 304	Aluminio 1060	Acero inoxidable 304	Aluminio 1060
Límite elástico	3	5	1	15	3	206 Mpa	28 Mpa
Maquinabilidad	2.5	2	5	5	12.5	Buena [92]	Excelente [92]
Soldabilidad	2.5	5	3	12.5	7.5	Excelente [93]	Buena, pero difícil implementación [93], [94]
Resistencia a la corrosión	2	5	4	10	8	Excelente a largo plazo [95]	Excelente a corto plazo [95]
Densidad	1.5	2	4	3	6	$8000 \frac{kg}{m^3}$	$2700 \frac{kg}{m^3}$
Costo	0.5	1	3	0.5	1.5	Los costos del material es más alto para el acero [96].	
Total				46	38.5		

TABLA 8-2. MATRIZ DE SELECCIÓN DEL MATERIAL DE LA CÁMARA DE VACÍO.

La calificación de 1 a 5 para los dos materiales en la Tabla 8-1 se proporcionó de acuerdo con valores y calificativos para los diferentes criterios, justificados en las últimas dos columnas de la tabla.

Después de analizar la tabla de selección, se concluyó que el Acero Inoxidable 304 es el material más adecuado para la cámara de vacío. Este material obtuvo una puntuación ponderada total de 46, superando al Aluminio 1060 con 38.5. El Acero Inoxidable 304 se destaca por su alto límite elástico, excelente soldabilidad y buena maquinabilidad, lo cual es crucial para asegurar la integridad y eficiencia del sistema a lo largo del tiempo. Aunque el Aluminio 1060 tiene una menor densidad y mejor maquinabilidad, su valor considerablemente más bajo en límite elástico y las limitaciones en la soldadura lo hacen menos adecuado para la aplicación.

8.2.2. Diseño de la estructural

Para el diseño de la cámara de vacío (figura 8-2), se optó por una geometría cilíndrica debido a que en esta configuración las distribuciones de esfuerzos son más uniformes en la superficie, evitando tensiones localizadas en los cambios de sección. Adicional, se decidió implementar una configuración con dos puertas ya que, de este modo mientras una de las puertas está cerrada y se lleva a cabo el proceso de vacío y recubrimiento, la otra puerta permanecerá abierta, permitiendo a los operarios desmontar y montar piezas. Esto con el propósito de que, al finalizar un ciclo, solo sea necesario abrir una puerta, cerrar la otra y reiniciar el proceso, aumentando la eficiencia operativa y reduciendo los tiempos de inactividad.

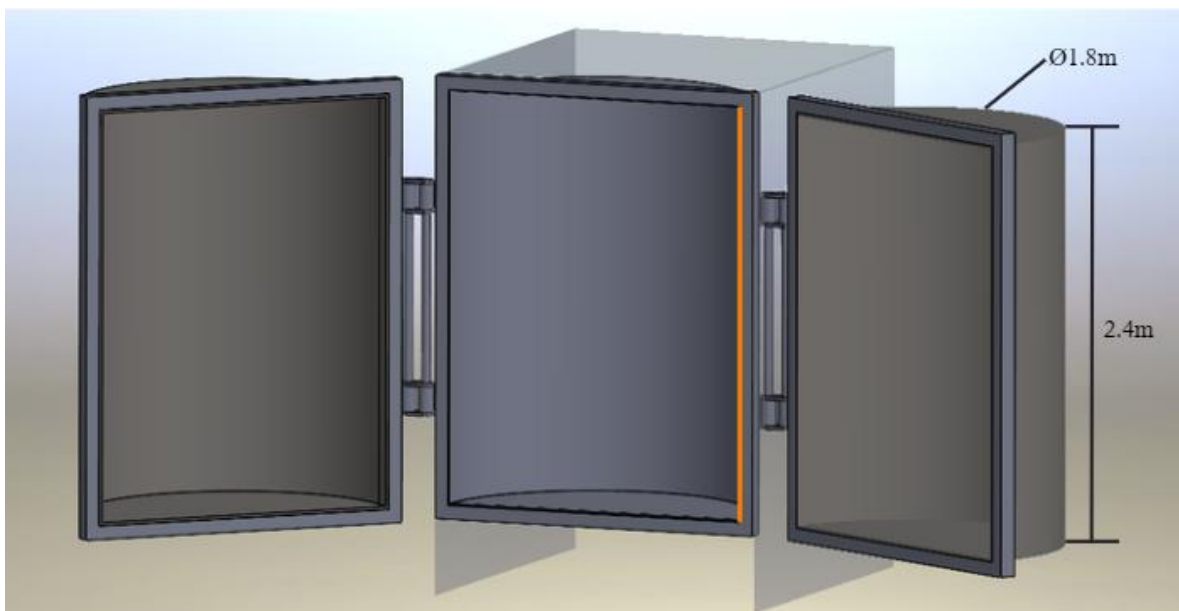


FIGURA 8-2. ILUSTRACIÓN DE LA CÁMARA DE VACÍO CON PUERTAS Y BISAGRAS.

Para la selección de las medidas de la cámara se tuvo en mente posibles configuraciones del portamuestra, distancia substrato-cátodo, demás elementos del proceso y finalmente se optó por una medida flexible de 1.8m de diámetro y 2.4m de alto. El sistema de bisagra se ilustra como un mecanismo doble acción con dos pivotes, tomando como referencia modelos comerciales [51] [52] [99]. Se eligió esta configuración porque tiene una apertura amplia de 180° [100] proporcionando el espacio necesario para que los operarios carguen y descarguen los portamuestra durante el proceso de recubrimiento. Es importante destacar que el diseño de las bisagras se realizó de forma ilustrativa para representar su funcionamiento, sin abordar detalles específicos o validaciones.

Puertas de acceso

Las puertas se diseñaron con una configuración sencilla siguiendo una geometría semicilíndrica, facilitando su manufactura y ensamblaje. El sistema consta con 3 elementos básicos de Acero Inoxidable 304, la pared, la tapa y el marco. En el caso de la pared es un lamina que pasa por un proceso de manufactura para obtener la curvatura deseada. La tapa también es una lámina, pero en este caso con forma de semicírculo. Los planos de estas piezas se encuentran en el Anexo 3. Para el marco se tuvo en cuenta el diseño del O-ring, debido a que la lámina del marco debe tener un espesor mínimo para poder realizar la ranura. De acuerdo con la aplicación de alto vacío, se utiliza un sello personalizado con sección de 5.33mm, en donde la profundidad de la ranura corresponde a 3.5mm y con el fin de tener una tolerancia adecuada que permita la manufactura de la ranura del O-ring se utiliza una lámina de 10mm de espesor.

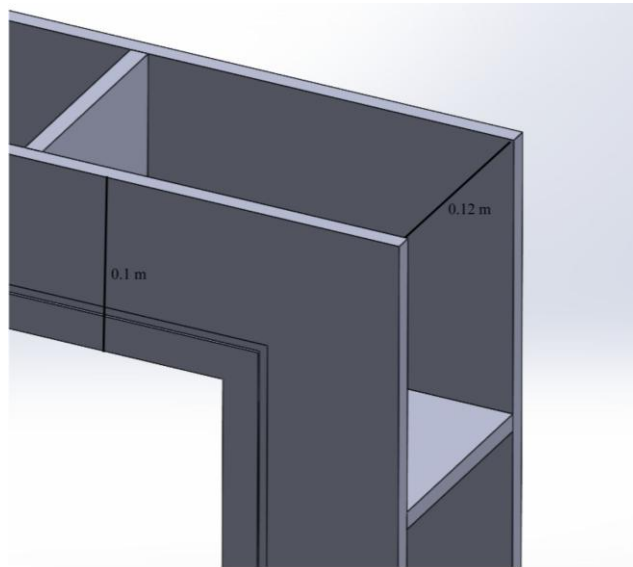


FIGURA 8-1. ESQUINA DEL MARCO CON RANURA DE O-RING.

Teniendo en cuenta la manufactura y la materia prima disponible, se optó por implementar un diseño el marco evidenciado en referencias[97] [98], el cual en lugar de un marco solido se utilizan dos laminas y soportes entre ellas, para este caso se implementaron láminas de 10mm de espesor como se observa en la figura 8-3, generando de esta forma un ahorro de material. En la figura 8-4 se muestra el diseño del marco implementado en la cámara de vacío.



FIGURA 8-2. CÁMARA DE VACÍO CON MARCO Y BISAGRAS.

8.2.3. Simulación MEF para espesor de pared

Una vez definido el diseño de la cámara, un factor importante a determinar fue el espesor de la pared de acero inoxidable 304, cuyas propiedades establecidas en el programa SolidWorks se encuentran en el Anexo 4, y de tal forma asegurar que pudiera resistir las fuerzas ejercidas por el diferencial positivo de presión, correspondiente a un valor cercano a la presión atmosférica de 101,324 Pa. Para ello, se simplificó el diseño de la cámara, de modo que la simulación requiriera menos tiempo de análisis. Esto se observa en la figura 8-3.

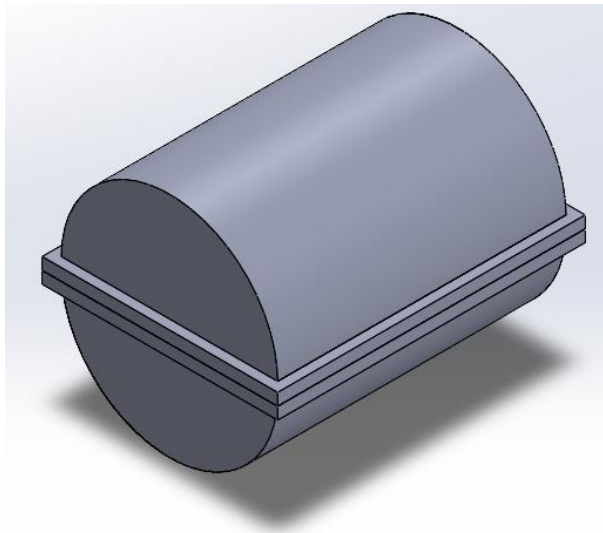


FIGURA 8-3. DISEÑO SIMPLIFICADO DE LA CÁMARA DE VACÍO PARA LA SIMULACIÓN.

Como parte de las condiciones de frontera, se utilizó la simetría de componentes que permite que el programa asuma una contraparte de la estructura simulando el diseño simplificado de la figura 8-23, con el objetivo de reducir el tiempo de análisis. Adicional, se implementó la sujeción de geometría en las caras del marco y finalmente, como carga externa, para simular el efecto de la presión atmosférica, se añadió un efecto de presión en las caras de la cámara de vacío representado con las flechas rojas que se pueden observar en la figura 8-4. Se realizaron 8 estudios con la cámara teniendo el mismo espesor en la pared y en la parte superior. Por otra parte, el tamaño global del elemento en la malla fue de 44.778 mm, teniendo en cuenta la configuración basada en curvatura. En el Anexo 5 se encuentran los datos de mallado que brinda el programa. A continuación, se muestra en la figura 8-4 la imagen de los resultados en la cámara de 2 estudios. Las imágenes de todos los resultados se encuentran en el Anexo 2.

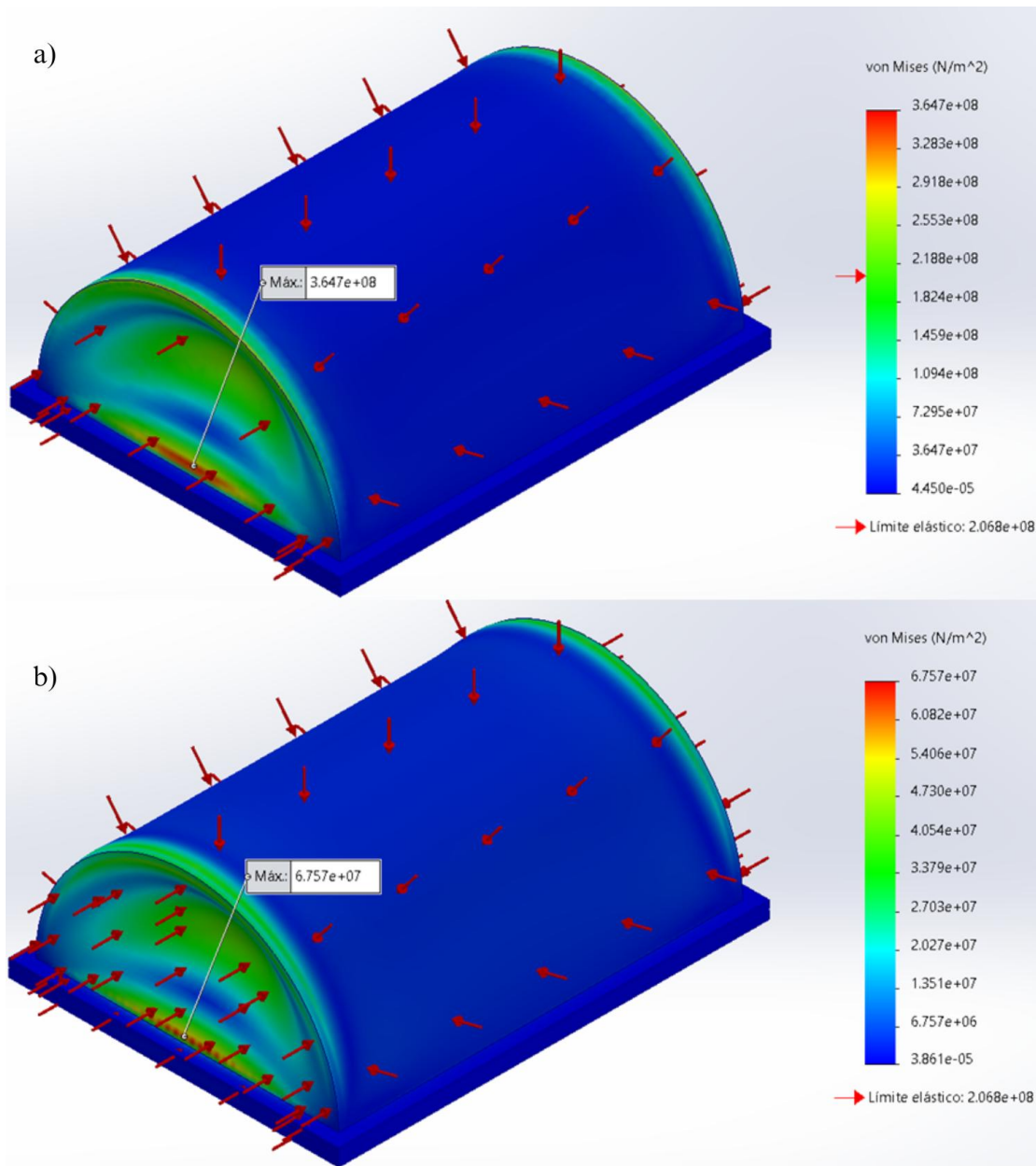


FIGURA 8-4. RESULTADO ESTUDIO EN CÁMARA – A) 8MM, B) 20MM.

En estas imágenes podemos observar que el punto donde se concentran los mayores esfuerzos es en el cambio de sección entre el marco y la parte superior generando un punto de discontinuidad geométrica que concentra tensiones, lo cual coincide con lo evidenciado en otros trabajos con cámaras de vacío donde los mayores esfuerzos en una cámara de vacío se acumulan en la parte superior y en los bordes [103]. A continuación, en la tabla 8-3 se muestran el valor del espesor estudiado, el esfuerzo máximo y su respectivo factor de seguridad.

Espesor pared y tapa (mm)	Valor tensión máxima (Pa)	Factor de seguridad
6	6.524×10^8	0.317
8	3.647×10^8	0.567
10	2.327×10^8	0.888
12	1.654×10^8	1.250
14	1.268×10^8	1.631
16	9.828×10^7	2.104
18	7.942×10^7	2.604
20	6.757×10^7	3.061

TABLA 8-3. RESULTADOS SIMULACIONES CON DIFERENTES ESPESORES.

Se puede observar que, a medida que el espesor de pared y tapa aumenta, la tensión máxima de Von Mises disminuye, lo cual se traduce en un incremento del factor de seguridad. Para espesores de 0.006m, 0.008m y 0.01m marcados en rojo, la tensión máxima supera el límite elástico del acero, resultando en factores de seguridad inferiores a 1, lo cual es inaceptable para un diseño. En espesores de 0.012m y 0.014m resaltados en naranja, la tensión máxima es menor que el límite elástico, pero con valores cercanos por lo que no se garantizaría un desempeño adecuado a largo plazo. A partir de 0.016m el factor de seguridad supera un valor de 2, no obstante, los criterios para operación con presiones externas y lineamientos generales de diseño recomiendan un factor más seguro. Por lo que finalmente se utiliza un valor de 0.018m que brinda un factor de seguridad de 2.6 el cual también cumple con recomendaciones internacionales para cámaras de vacío, las cuales sugieran que el espesor de pared sea al menos una centésima parte del diámetro nominal de la cámara[104].

8.3. Diseño del sistema portamuestra

Para el diseño del portamuestras, se consideró fundamental permitir dos movimientos, ya que de esta forma la pieza tiene mayor exposición a los targets facilitando el recubrimiento en todas sus caras. Con este objetivo, se implementó un sistema de engranaje planetario que ejerce dos movimientos de rotación y traslación. Adicional, se tuvo en cuenta la limitación de tamaño, considerando el diámetro de la cámara de 1.8m, se determinó que el plato portamuestras no debería exceder los 1.4m, dejando así espacio suficiente para los cañones. Se evaluaron simultáneamente dos características: el diseño de los portamuestras y su distribución en el plato principal.

Con base en la búsqueda de referentes, de los cuales se presentan imágenes en el Anexo 4, se identificó que cada portamuestra es diseñado de manera específica según la geometría de la pieza a recubrir. En este caso, el diseño de los satélites se desarrolló considerando la forma alargada de los machetes. Aunque se inició con una propuesta de satélites circulares, como se muestra en el dibujo del Anexo 4, durante la generación de conceptos de diseño se evidenció que esta geometría podría no ser la más eficiente, por que presentaba desuniformidad en la orientación de los machetes incrementando sombras en los recubrimientos. Finalmente, se optó por partir de geometrías rectangulares, como se observa en la figura 8-5. La geometría rectangular ofrece varias ventajas; en primer lugar, en un proceso de manufactura mediante corte láser, las formas rectangulares permiten ahorrar tiempo ya que pueden acomodarse mejor en una lámina, optimizando así el uso del material. Este enfoque no solo mejora la eficiencia del proceso de manufactura, sino que también garantiza una exposición más uniforme de los machetes durante el proceso de recubrimiento, minimizando las sombras y mejorando la calidad del recubrimiento en todas las superficies de las piezas.

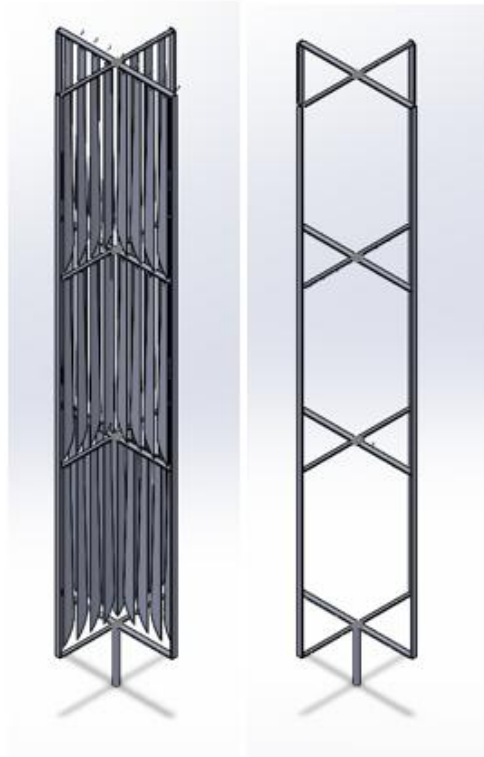


FIGURA 8-5. A) SATÉLITE CON MACHETES. B) SATÉLITE SIN MACHETES.

Para los satélites se consideró el tamaño de un machete y se determinó una altura de sección adecuada. Para el ancho del satélite, se evaluó que la distancia entre machetes no fuera menor a 10mm. En esta fase, se analizó la distribución de los satélites y la cantidad de machetes por nivel, se modificaron con diferentes configuraciones para lograr un diseño que se acomodara a las limitaciones, como se puede observar en la **figura 8-6, con dimensiones en milímetros.**

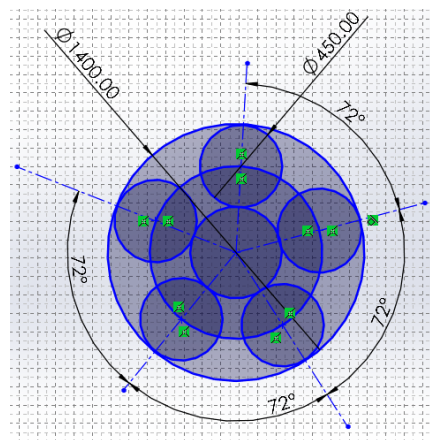


FIGURA 8-6. ILUSTRACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS SATÉLITES EN EL PLATO PORTAMUESTRA.

Con esto en mente, se llegó a un diseño de satélite con capacidad para 48 machetes el cual se puede apreciar en la figura 8-5. Teniendo la mediada del ancho del portamuestra se realizó una distribución uniforme en el plato la cual incluye 5 portamuestras como se muestra en la figura 8-6, lo que permite recubrir un total de 240 machetes por proceso. Adicional, se optó por añadir un plato superior a la estructura con el fin de evitar pandeo al momento del funcionamiento. En la figura 8-7 se ve el diseño ilustrado del portamuestra con los 5 satélites cargados a su capacidad máxima de machetes.



FIGURA 8-7. DISEÑO DEL SISTEMA PORTAMUESTRA.

A continuación, en la figura 8-8 se observa la configuración de la cámara de vacío y el sistema portamuestra.

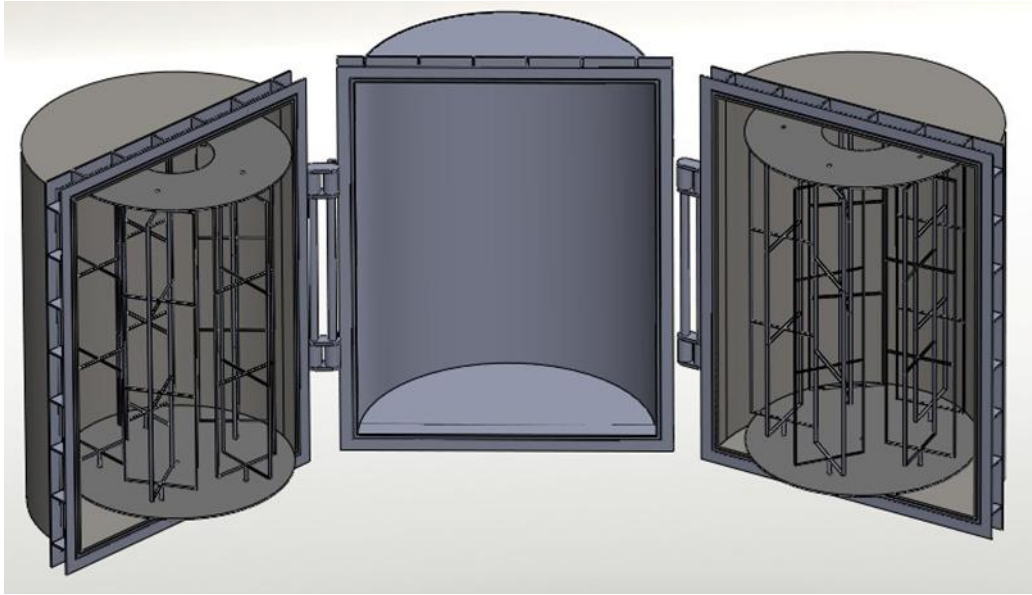


FIGURA 8-8. ENSAMBLE CÁMARA DE VACÍO Y SISTEMA PORTAMUESTRA.

El ensamble representa la base para la futura integración de los diversos sistemas que hacen parte del funcionamiento integral de un reactor PVD.

8.3.1. Cálculos engranajes

Una vez con la distribución en los satélites se realizó los cálculos de los engranajes. A partir de la figura 8-6 se obtuvo un dato de partida que es el diámetro primitivo de lo que sería el sol y los planetas, en el esquema planetario. Se determinó como dato inicial el módulo, $m = 4$, teniendo como referencias módulos para engranajes de estas dimensiones ubicados en referencias comerciales [105].

Teniendo el módulo $m = 4$, el diámetro primitivo del sol $d_{ps} = 500mm$ y el diámetro primitivo de los planetas $d_{pp} = 450mm$, se calculó el número de dientes N para cada engrane con la siguiente fórmula, teniendo en cuenta que el diámetro debe estar en milímetros.

$$N = \frac{d}{m}$$

Para el sol:

$$N_s = \frac{d_{ps}}{m}$$

$$N_s = \frac{500mm}{4mm} = 125$$

Para los planetas:

$$N_p = \frac{d_{pp}}{m}$$

$$N_p = \frac{440mm}{4mm} = 110$$

Teniendo los números de dientes, se procedió a calcular la velocidad de rotación de los satélites con la siguiente formula:

$$n_s N_s n_p N_p$$

Donde:

n_s : Velocidad del engrane conductor

N_s : Numero de dientes del engrane conductor

n_p : Velocidad del engrane conducido

N_p : Numero de dientes del engrane conducido

Es importante aclarar que la velocidad del sol es la velocidad el plato principal. Para el caso se tomata una velocidad $N_s = 4rpm$, utilizada en procesos similares [106] .

$$N_p = \frac{n_s N_s}{n_p}$$

$$n_p = \frac{4rpm * 125}{110} = 4.545rpm$$

8.3.2.Cálculo para selección del motor

Para seleccionar el motor, calculamos primero el torque requerido, para el cual se utiliza la siguiente formula:

$$\sum \tau = I * \alpha$$

$$\tau_s - \tau_{friccion} = I * \alpha \quad (5)$$

$$\tau_s = I * \alpha + \tau_{friccion}$$

Donde:

τ_s : Torque suministrado

$\tau_{friccion}$: Torque de fricción

I : Momento de inercia

α : Aceleración angular

El momento de inercia se toma de la ventana propiedades físicas que brinda SolidWorks, en este caso usamos el I_{xx} ya que el eje principal de movimiento esta alineado con el eje x definido.

$$I = 4122739931280.0712 \text{ gr} * \text{mm}^2$$

Para que sea acorde a las unidades utilizadas en el cálculo debemos convertirlo $\text{kg} * \text{m}^2$, para lo que usaremos factores de conversión de la siguiente forma:

$$I = 4122739931280.0712 \frac{\text{gr} * \text{mm}^2 * 0.001 \text{kg}}{1 \text{gr}} * \frac{0.000001 \text{m}^2}{1 \text{mm}^2}$$

Obteniendo:

$$I = 4122.749 \text{ kg} * \text{m}^2$$

Para la aceleración α utilizamos la ecuación de velocidad:

$$\omega_f = \omega_0 + \alpha * t$$

Donde:

ω_f : Velocidad final

ω_0 : Velocidad inicial

α : Aceleración

t: Tiempo

Despejando α se tiene:

$$\alpha = \frac{\omega_f - \omega_0}{t}$$

Y teniendo en cuenta que la velocidad inicial (ω_0) es 0, resulta en:

$$\alpha = \frac{\omega_f}{t}$$

La velocidad final que se busca es de 4.545rpm

$$4.545 \frac{rpm * 2\pi}{60} = 0.476 \frac{rad}{s}$$

Se estima que el tiempo que se demora el motor para alcanzar la velocidad de trabajo es de 3 s, por lo que:

$$\alpha = \frac{\omega_f}{t} = \frac{0.476 \frac{rad}{s}}{3s} = 0.159 \frac{rad}{s^2}$$

Ahora para el $\tau_{friccion}$ se sabe que:

$$\tau_{friccion} = F_{friccion} * r_{engrane} \quad (1)$$

Donde:

$F_{friccion}$: Fuerza de fricción

$r_{engrane}$: Radio del engrane

La fuerza de fricción está definida por:

$$F_{friccion} = F_{normal} * \mu_s$$

Donde:

F_{normal} : Fuerza normal

μ_s : Coeficiente de fricción

Reemplazando en la ecuación (1), se obtiene:

$$\tau_{friccion} = F_{normal} * \mu_s * r_{engrane}$$

La fuerza normal está definida por:

$$F_{normal} = \frac{F_t}{\cos\theta} \quad (2)$$

Reemplazando $F_t = \frac{\tau_s}{r_{engrane}}$ en (2):

$$F_{normal} = \frac{\tau_s}{r_{engrane} * \cos\theta} \quad (3)$$

Y reemplazando (3) en la fórmula para el $\tau_{friccion}$, queda:

$$\tau_{friccion} = \frac{\tau_s}{\cos\theta} * \mu_s$$

Reemplazando lo anterior en (5), se obtiene:

$$\tau_s - \frac{\tau_s}{\cos\theta} * \mu_s = I * \alpha$$

Despejando τ_s :

$$\tau_s * \cos\theta - \tau_s * \mu_s = I * \alpha * \cos\theta$$

Finalmente se obtiene:

$$\tau_s = \frac{I * \alpha * \cos\theta}{\cos\theta - \mu_s}$$

Un coeficiente de fricción estimado para engranes de diente recto con lubricación sólida es de $\mu_s = 0.04$. [117]

Reemplazando todos los valores, se calculó τ_s :

$$\tau_s = \frac{4122.749kg * m * 0.159 \frac{rad}{s^2} * \cos 20^\circ}{\cos 20^\circ - 0.04}$$

$$\tau_s = 684.66Nm$$

Con esto en mente, para la selección del motor una de las características más importantes es la potencia, por lo que el valor anterior en Nm lo convertimos a hp por medio de la siguiente expresión, donde el torque es τ_s y la velocidad angular N_s en rad/s .

Potencia = Torque x Velocidad Angular

$$Potencia(W) = 684.66Nm * 0.476 \frac{rad}{s} = 325.899W$$

Y para convertir el valor de W a hp se utilizó el siguiente factor de conversión:

$$325.899 \frac{W * 1hp}{745.7W} = 0.437hp$$

Para asegurar una operación eficiente y prolongar la vida útil, un motor eléctrico no debería operar a más del 70% de su potencia nominal. Por lo tanto, el motor debería tener una potencia mínima de 0.624 hp. Por lo que se selecciona como referencia para la simulación en el engranaje el motor trifásico WEG 00118ET3EM143TCW 1HP 3/60 HZ[107]. A continuación, en la figura 8-9 se muestra un diagrama 2D que ilustra la configuración del motor con los engranajes del sistema.

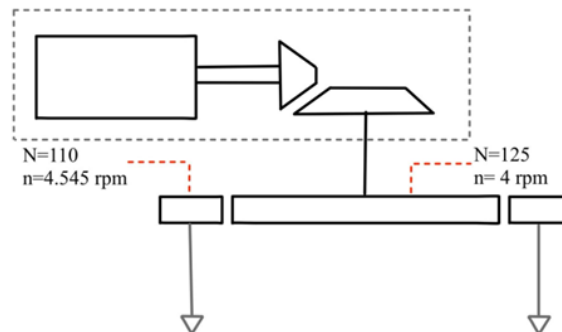


FIGURA 8-9. CONFIGURACIÓN DEL MOTOR - DIAGRAMA 2D

Dentro del rectángulo con línea gris punteada se encuentra los engranajes cónicos que dan el cambio de dirección y el motor que cuenta con el sistema de reducción necesario. Cabe aclarar que el sistema de reducción no es objeto de diseño en el presente proyecto. Adicional, las flechas grises indican las salidas del sistema que representan el eje central de los satélite portamuestra.

8.3.3.Cálculo de esfuerzo máximo

Cuando el esfuerzo máximo de flexión en un diente del engranaje es igual o superior al límite elástico del material, se produce una falla por flexión, por lo que se considera que un engranaje ha fallado cuando uno o más dientes presentan esta falla.

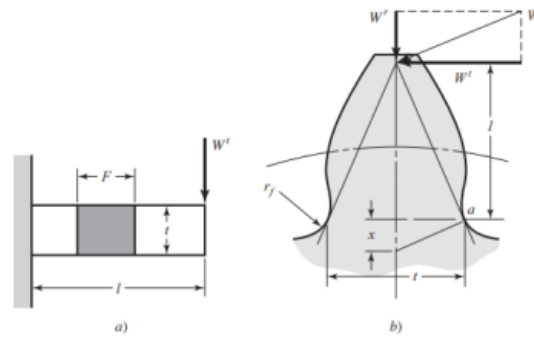


FIGURA 8-10. DIAGRAMA DE FUERZAS EN UN DIENTE DE ENGRANE.

En el lado derecho, podemos observar cómo se distribuyen las fuerzas en un diente de engranaje, así como los parámetros que influyen en la resistencia del diente. En el lado izquierdo, se presenta un esquema de viga en voladizo que representa el diente del engranaje sometido a una fuerza tangencial W_t . Se asume que los mayores esfuerzos en un diente se presentan en el punto a de la figura 8-9 b). A partir de este diagrama, se deriva la fórmula de Lewis, utilizada para calcular el esfuerzo de flexión en los dientes del engranaje, expuesta a continuación:

$$\sigma = \frac{W_t}{F * m * Y}$$

Donde:

W_t = Fuerza tangencial.

F = Ancho del diente.

m = Modulo.

Y = Factor de forma de Lewis.

El cálculo de la fuerza tangencial se realizó con la siguiente fórmula.

$$W_t = \frac{\tau_{sr}}{\tau_s}$$

Para el torque de salida posterior a la reducción se utilizó la siguiente fórmula:

$$\tau_{sr} = \tau_m * r$$

Donde τ_m es el torque del motor y r es la relación de reducción que en el caso es 300. Se calcula el τ_m de la siguiente forma:

$$\tau_m = \frac{1 \frac{hp * 745.7W}{1hp}}{1800 \frac{rpm * 2\pi}{60}} = 3.956Nm$$

Por lo tanto:

$$\tau_{sr} = 3.956Nm * 300 = 1186.8Nm$$

Obteniendo la fuerza tangencial:

$$W_t = \frac{1186.8Nm}{0.25m} = 4747.2N$$

El factor de forma de Lewis para un engrane con 125 dientes es 0.793. Reemplazando los valores en la formula se obtuvo un esfuerzo de flexión:

$$\sigma = \frac{4747.2N}{6mm * 4 * 0.793} = 4.361 * 10^2 Mpa$$

Posteriormente, se llevó a cabo el proceso estándar de simulaciones en SolidWorks mediante el método de elementos finitos para calcular el esfuerzo máximo. Esto permitió comparar los resultados con los obtenidos mediante la ecuación de Lewis y observar la distribución de los esfuerzos en el diente. Se asigno el valor de la fuerza tangencial en uno de los dientes.

Obteniendo los siguientes resultados:

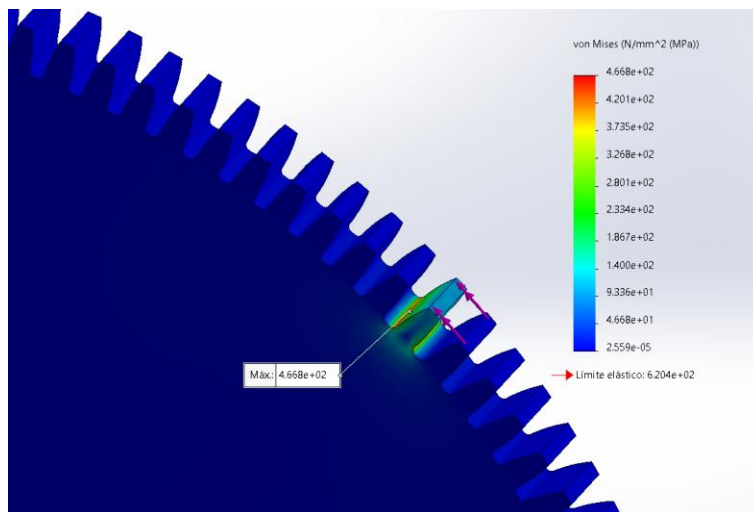


FIGURA 8-11. ESFUERZOS DE VON MISES EN EL DIENTE – ESTUDIO DE ELEMENTOS FINITOS.

Se puede observar que el esfuerzo máximo de Von Mises en la simulación de SolidWorks es de $4.668 * 10^2 MPa$ y el calculado previamente con la ecuación de Lewis fue de $4.361 * 10^2 MPa$, confirmando así la validez del cálculo. También se resalta la ubicación del esfuerzo máximo, coincidiendo con el punto *a* que se muestra en la figura 8 -9 b). Adicional, el esfuerzo máximo presentado en el diente es considerablemente inferior a la resistencia del Acero Inoxidable 304.

8.4. Recomendaciones de manufactura

Las recomendaciones de manufactura se realizaron teniendo en cuenta el alcance del proyecto, acotándose a los elementos diseñados.

Cámara de vacío

1. El proceso inicia con el corte de tres láminas iniciales de acero inoxidable AISI 304 de 18mm de espesor determinado en el análisis estructural, para la fabricación de las 2 puertas y la parte trasera de la cámara que permanece fija. Las dimensiones de las láminas son 2500mm x 2827mm. Se recomienda el proceso de corte por chorro agua debido a que es ideal para cortes precisos en materiales gruesos y no general alteraciones térmicas en el material, adicional es ideal añadir partículas abrasivas al liquido de flujo para facilitar el corte. El granate es el abrasivo más adecuado para este caso, principalmente por que genera un mejor desgaste en el sistema de boquillas a comparación de otros abrasivos más duros como el óxido de aluminio, aunque resulta en una velocidad de corte menor. Adicional, tiene buena disponibilidad en el mercado y es compatible para trabajo con acero. Se recomienda un tamaño de grano entre 80-100 mesh, que se considera estándar en estas operaciones resultando en una superficie menos áspera [108].
2. Posterior al corte para obtener la longitud necesaria, se debe realizar un rolado, con el fin de proporcionar la curvatura necesaria a las láminas. En este proceso se ajusta la distancia entre los 3 rodillos para darle la curvatura específica. La lamina pasa en repetidas ocasiones por los rodillos ya que la curvatura deseada se logra gradualmente[109].
3. Luego del rolado, se procede con la soldadura de los bordes longitudinales para conformar el cuerpo cilíndrico. Se recomienda la soldadura por arco con gas y electrodo de tungsteno (TIG) o también conocida por las siglas GTAW, la cual es compatible con el acero inoxidable y de las más utilizadas en ambientes de vacío[110]. Aunque la soldadura MIG también es utilizada por la facilidad y menor costo, es menos confiable y limpia, por lo cual se descarta debido a que la calidad es

una característica de vital importancia en sistemas de vacío[111]. Adicionalmente, se hacen las siguientes recomendaciones: realizar una sola pasada de soldadura para evitar volúmenes atrapados[112], la soldadura debe realizarla del lado interno de la cámara donde se realiza el vacío, puntos de soldadura en la parte externa con intervalos de tal forma que se cubra menos del 50% del diámetro, el cordón de soldadura debe de estar libre de óxidos, residuos y “azulado” en el caso del acero adyacente a la soldadura[110].

4. Se continua con la realización de los orificios necesarios, los cuales se ejecutan por medio del perforado con diferentes variaciones. Dado que los procesos de corte por láser o plasma requieren sistemas avanzados para mantener una distancia constante con la superficie curva, se optó por el método de perforado. Se emplean diferentes herramientas en función del diámetro del orificio: en el caso de las perforaciones con diámetros más pequeños incluyendo los puertos de entradas del gas, paso de cables, orificios para la fijación de bisagras se utiliza broca convencional ya que estos no superan los 40mm. Las demás perforaciones como los accesos de las bombas y ventanas de observación como suelen tener diámetros mayores a 40mm se utiliza una herramienta trepanadora. Adicionalmente, se recomienda una distribución radial de los diferentes orificios trabajando con coordenadas rectangulares (X, Y) de tal forma que “X” representa el perímetro del cilindro (horizontal) y “Y” representa la altura (vertical)[113].
5. Teniendo todos los accesos en la superficie, se ensamblan los componentes desmontables como las puertas, bisagras, bridas, válvulas, demás conexiones y elementos de sellado (se aclara que en el presente trabajo no se tiene en cuenta el diseño de estos elementos). Para la manipulación de los elementos en el ensamble se recomienda el uso de guantes de nitrilo para evitar el traspaso de grasa a los componentes limpios expuestos al vacío [110]. Después se verifica la alineación y funcionalidad mecánica del sistema.
6. Por último, se realizan los tratamientos superficiales, primero un pulido mecánico en el cual se recomienda un acabado con una rugosidad superficial no mayor a 1.6 μm , no obstante, si se busca reducir en gran parte la desgasificación, sería ideal una rugosidad que no exceda los 0.8 μm [110]. Posteriormente, se recomienda un realizar un pasivado químico en la superficie con el objetivo de limpiar la superficie de elementos que puedan afectar el vacío, adicional reforzar la capa pasiva que pudo haber sido comprometida en los procesos previos de manufactura y así no comprometer las propiedades anticorrosivas del acero inoxidable[68].

Portamuestra

1. El proceso inicia con el corte de las láminas de acero inoxidable AISI 304 de 5mm de grosor en las dimensiones especificadas. En este caso se recomienda un corte laser por la alta precisión del orden de $\pm 0.08\text{mm}$ facilitando el ensamblaje y en espesor reducidos (5mm) el láser CNC alcanza una velocidad elevada de trabajo aumentando la productividad.
2. Posteriormente se realiza la soldadura para unir todas las láminas y conformar el cuerpo del portamuestra. Se emplean las mismas recomendaciones que en el caso de la cámara de vacío.
3. Finalmente se recomiendan aplicar los mismos tratamientos superficiales definidos para la cámara de vacío, pulido mecánico y pasivado químico, incorporando además un granallado ligero previo con el fin de incluir tensiones compresivas en la superficie, mejorando la resistencia a la fatiga y eliminar diversos contaminantes[114]. Finalmente, toma más importancia el pasivado químico en este caso para regenerar la película de óxido protectora del acero inoxidable, que pudo haber sido comprometida anteriormente, garantizando si resistencia a la corrosión.

8.5. Selección de sistema de vacío

En el diseño de un sistema de vacío, la selección del tipo de lubricación para las bombas es crucial. Esta decisión afecta la eficiencia, el mantenimiento, la pureza del vacío y la vida útil del equipo. Existen dos principales tipos de lubricación: lubricación con aceite y lubricación en seco. A continuación, en la tabla 8-4 se presentan los criterios para seleccionar el tipo de lubricación adecuado [115]-[116].

Criterios	Lubricación con aceite	Lubricación en seco
Contaminación	Pueden contaminar el sistema de vacío debido a los vapores de aceite, afectando la pureza del vacío y por ende la calidad de los recubrimientos.	Eliminan el riesgo de contaminación por aceite, manteniendo la integridad del vacío.
Mantenimiento y costo de operación	Requieren cambios de aceite regulares y mantenimiento para las trampas de nitrógeno líquido.	Aunque pueden tener un costo inicial más alto, los costos de mantenimiento son menores.

Durabilidad y vida útil	El aceite proporciona una capa protectora que puede aumentar la durabilidad y vida útil.	Pueden tener una vida útil menor en aplicación donde se manejan gases corrosivos.
--------------------------------	--	---

TABLA 8-4. CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA TIPO DE LUBRICACIÓN.

La descripción de los criterios para cada tipo de lubricación se presenta de forma general. Es importante tener en cuenta que, dependiendo de la gama y calidad de la bomba, estos criterios pueden variar. Existen bombas con lubricación en aceite que trabajan con trampas de Nitrógeno de alta calidad lo cual reduce significativamente las posibilidades de contaminación. A su vez hay bombas de lubricación en seco de alta gama que con diseños de alta calidad que reducen vibraciones, ruidos [117].

Teniendo en cuenta lo anterior, la selección de la bomba depende de los requisitos específicos de la aplicación. Además, es necesario tener en cuenta los rangos de presión de trabajo de las bombas, para alcanzar un vacío de $9.9 * 10^{-4} Pa$ es necesario realizar el proceso en dos etapas: vacío primario y alto vacío. De manera estándar, para la primera etapa se utilizan bombas mecánicas, y para la segunda etapa se emplea una bomba de alto vacío, que puede ser turbo molecular o difusora [118], se opta por una bomba turbo molecular de lubricación en seco, no solo por los criterios mencionados anteriormente, sino también porque la bomba difusora con lubricación en aceite requiere una configuración vertical, lo cual limita su implementación [119].

8.5.1. Cálculos de tiempo de vacío

Para el cálculo de tiempo de vacío se utiliza la siguiente formula:

$$t = \frac{V}{S} \ln \frac{P_1}{P_2}$$

Un dato que se mantiene constante es el volumen. Debido a que la cámara es cilíndrica el volumen es el siguiente

$$V = \pi * r^2 * h$$

$$V = \pi * 0.9m^2 * 2.4m$$

$$V \approx 6.1m^3$$

Pfeiffer y Leybold son dos marcas reconocidas mundialmente por sus equipos de vacío de alta calidad, ambas tienen presencia en Colombia mediante distribuidores oficiales. Se tuvieron en cuenta dos sistemas de bombas de vacío para el análisis, cada uno de una marca, de esta forma asegurando compatibilidad entre ellas:

Sistema 1 (Pfeiffer Vacuum):

- Primera etapa (Vacío primario): Okta 500
- Segunda etapa (Alto vacío): HiPace 300

Okta 500

La Okta es una bomba mecánica de desplazamiento con lubricación en seco de alta calidad y rendimiento diseñada para aplicaciones industriales, se caracteriza por su durabilidad garantizando un funcionamiento confiable y un mantenimiento mínimo.


Okta 500			
	Dato técnico	Unidad	Valor
	Velocidad de bombeo nominal		m ³ /h
Presión última		Pa	<1.31 x 10 ⁻²

TABLA 8-5. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS BOMBA MECÁNICA OKTA 500[120].

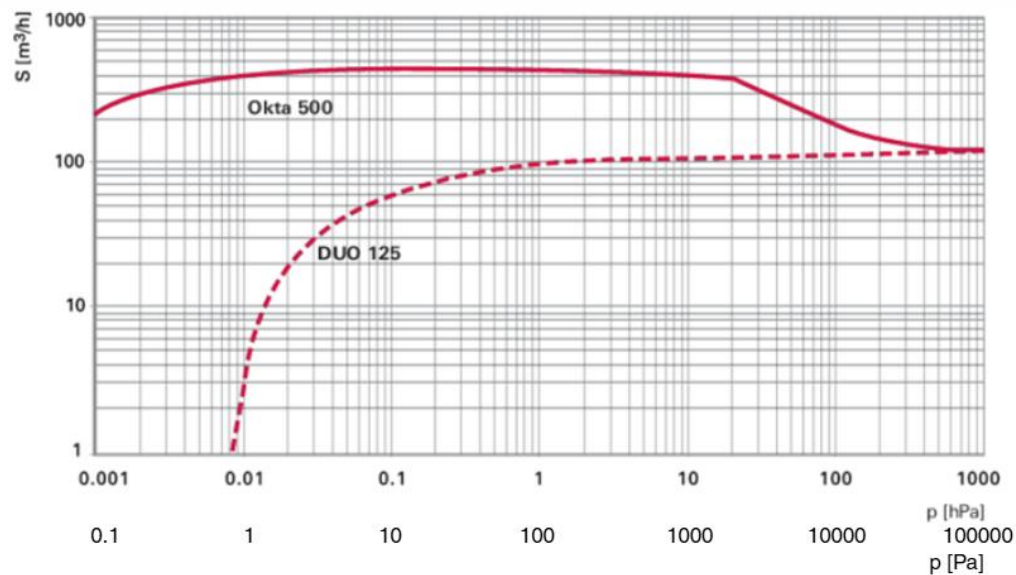


FIGURA 8-12. CURVA VELOCIDAD DE BOMBEO VS PRESIÓN OKTA 500[120].

En la gráfica de la curva de velocidad de bombeo vs presión encontrada en la ficha técnica de la bomba Okta también se ilustra la curva para la bomba D 125, donde podemos evidenciar la diferencia en el alcance del área efectiva de trabajo de las bombas. La bomba Okta 500 trabaja de manera efectiva hasta una presión última de 1×10^{-2} Pa como se menciona en la ficha técnica, mientras que la Duo 125 trabaja en óptima condición hasta una presión de 10 Pa. Esto se puede ver con la forma de la curva, cuando tiene una forma plana significa un funcionamiento estable donde trabaja con su velocidad de bombeo nominal, por otro lado, cuando la curva presenta un descenso significa que la bomba trabaja de forma ineficiente en ese rango de presiones y por lo tanto no es la opción más adecuada.

HiPace 300

La HiPace 300 de Pfeiffer es una bomba turbomolecular de vacío con un alto rendimiento para una amplia gama de aplicaciones en investigaciones e industria. Ideal para llegar a un alto vacío en tiempos reducidos. Destaca principalmente por su avanzada tecnología de rodamientos híbridos que garantiza un funcionamiento suave y larga vida útil. Adicional un diseño robusto y alta fiabilidad. A continuación, se muestran los datos técnicos de la bomba y la curva de Velocidad de bombeo vs Presión.


HiPace 300			
	Dato técnico	Unidad	Valor
	Velocidad de bombeo nominal	m ³ /h	918
	Presión última	Pa	<9.9 x 10 ⁻⁸

TABLA 8-6. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS BOMBA TURBOMOLECULAR HIPACE 300[121].

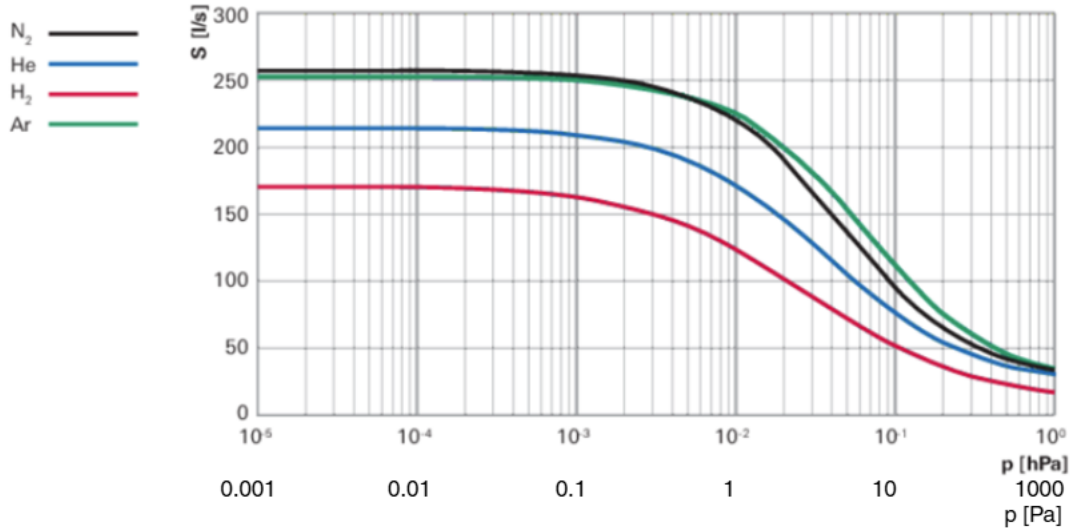


FIGURA 8-13. CURVA VELOCIDAD DE BOMBEO VS PRESIÓN HiPACE[121].

Cálculo de tiempo de vacío para sistema 1

Para la primera etapa de vacío que realiza la bomba mecánica Okta 500, la presión inicial P_1 es la presión atmosférica y la presión final P_2 es la presión última.

$$t_1 = \frac{V}{S} \ln \frac{P_1}{P_2}$$

$$t_1 = \frac{6.1m}{670 \frac{m^3}{h}} \ln \frac{101.325Pa}{7.5 * 10^{-1}Pa}$$

$$t_1 \approx 0.107h \approx 6.453min$$

Para la segunda etapa de vacío que realiza la bomba turbomolecular HiPace, la presión inicial P_1 es la presión última de la primera etapa y la presión final P_2 es la presión última deseada en el proceso.

$$t_2 = \frac{V}{S} \ln \frac{P_1}{P_2}$$

$$t_2 = \frac{6.1m}{918 \frac{m^3}{h}} \ln \frac{7.5 * 10^{-1}Pa}{9.9 * 10^{-4}Pa}$$

$$t_2 \approx 0.044h \approx 2.64 min$$

$$t_{total} = t_1 + t_2 = 6.453min + 2.64 min = 9.093 min$$

Sistema 2 (Leybold):

- Primera etapa (Vacío primario): DryVac 650
- Segunda etapa (Alto vacío): TurvoVac 950

DryVac 650

DryVac 650 es una bomba de vacío de tornillo de compresión en seco, cuenta con características y funciones inteligentes, ofreciendo una conectividad sencilla, control por medio de red, eficiencia energética superior comparado a modelos similares y reducción de costos debido a una necesidad de mantenimiento mínima. Adicional, la seguridad de un ambiente limpio por lo que los sistemas de recubrimientos se encuentran dentro de las aplicaciones principales de la bomba.

A continuación, se presenta la tabla con las características de interés para el cálculo y la figura con la curva Velocidad de bombeo vs Presión.


DRIVAC 650			
	Dato técnico	Unidad	Valor
	Velocidad de bombeo nominal	m ³ /h	650
	Presión última	Pa	$< 5.3 \times 10^{-3}$

TABLA 8-7. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS BOMBA DRYVAC 650.

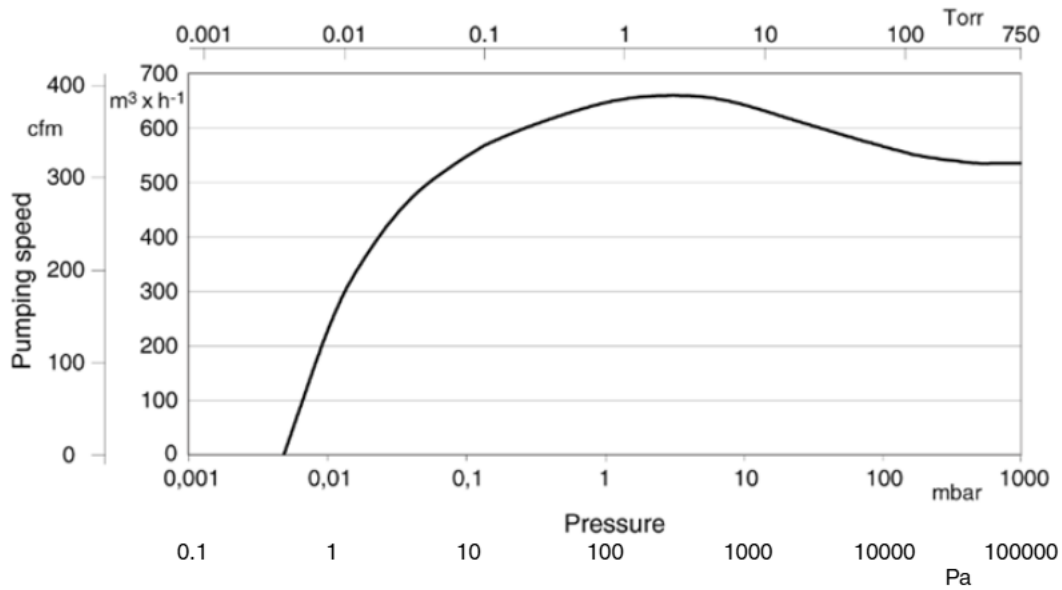


FIGURA 8-14. CURVA VELOCIDAD DE BOMBEO VS PRESIÓN DRYVAC.

TurboVac950

TurboVac 950 es una bomba turbomolecular con lubricación en seco una baja vibración. La línea TurboVac tiene un alto desempeño con velocidades de bombeo un 60% por encima de productos de referencia. Cumple con los requerimientos para las aplicaciones de recubrimientos ofreciendo un sistema de alto vacío con mínima contaminación teniendo así recubrimientos de alta calidad.


TurboVac 950			
	Dato técnico	Unidad	Valor
	Velocidad de bombeo nominal	m ³ /h	1160
	Presión ultima	Pa	< 5.3 x 10 ⁻⁸

TABLA 8-8. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS BOMBA TURBOVAC 350.

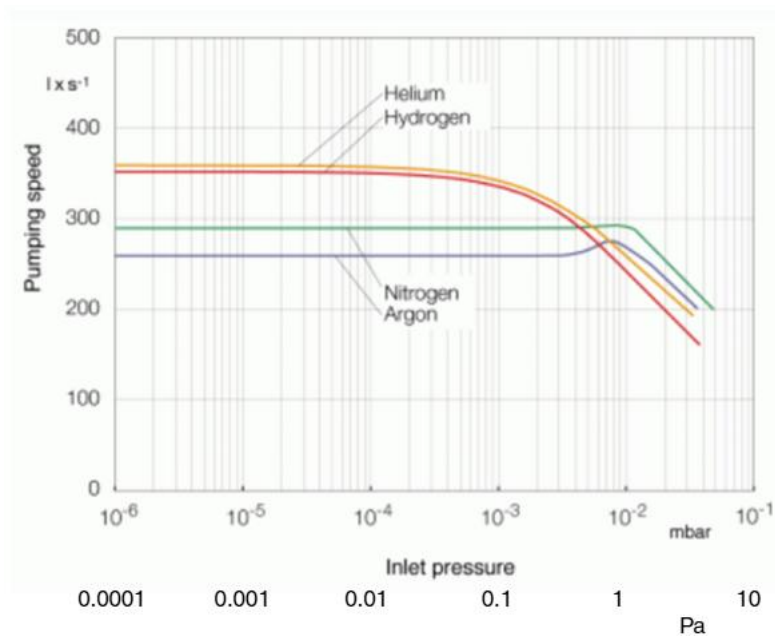


FIGURA 8-15. CURVA VELOCIDAD DE BOMBEO VS PRESIÓN TURBOVAC.

Cálculo de tiempo de vacío para sistema 2

Para la primera etapa de vacío que realiza la bomba mecánica DryVac 650, la presión inicial P_1 es la presión atmosférica y la presión final P_2 es la presión última.

$$t_1 = \frac{V}{S} \ln \frac{P_1}{P_2}$$

$$t_1 = \frac{6.1m}{605 \frac{m^3}{h}} \ln \frac{101.325Pa}{7.5 * 10^{-1}Pa}$$

$$t_1 \approx 0.123h \approx 7.392min$$

Para la segunda etapa de vacío que realiza la bomba turbomolecular TurboVac 950, la presión inicial P_1 es la presión última de la primera etapa y la presión final P_2 es la presión última deseada en el proceso.

$$t_2 = \frac{V}{S} \ln \frac{P_1}{P_2}$$

$$t_2 = \frac{6.1m}{1160 \frac{m^3}{h}} \ln \frac{7.5 * 10^{-1} Pa}{9.9 * 10^{-4} Pa}$$

$$t_2 \approx 0.034h \approx 2.094min$$

$$t_{total} = 7.392min + 2.094min = 9.486min$$

El tiempo total de evacuación del sistema Pfeiffer es de 9.093min mientras que el tiempo del sistema Leybold es de 9.486min no obstante la diferencia en los precios es considerable, teniendo el sistema Pfeiffer un costo aproximado de \$157.000.000 [122] mientras que el sistema Leybold tiene un costo aproximado de \$80.000.000 [123], por lo cual se sugiere el uso del sistema Leybold.

8.6. Configuración del sistema de cátodos

Para la definir del sistema de cátodos se evaluaron dos características; la distancia sustrato – cátodo y la distancia entre cátodos. Para la ejecución de las simulaciones se siguieron los pasos establecidos en el manual del programa, especificados en la sección 7.8.1. Durante el proceso de configuración se definieron las entradas de acuerdo con la aplicación, seleccionando el argón como gas de trabajo, dado que se trata de un proceso no reactivo. Para la temperatura interna se estableció una temperatura ambiente de 27° C. El elemento del blanco fue cromo (Cr) y se definieron 100 millones de partículas simuladas, conforme a las recomendaciones de usuarios previos experimentados en el software. En los parámetros de transporte se incluyeron tanto el movimiento del gas como la difusión. Finalmente, otros datos de entrada como la distribución angular y la distribución de energía se configuraron con valores predeterminados estipulados en el manual del programa

En este primer análisis, se evaluó únicamente la distancia entre el sustrato y el cátodo, manteniendo constante la distancia entre los cátodos, siendo esta de 20 cm. En la figura 8-16 se presentan los resultados obtenidos mediante mapas de calor y gráficos que representan la línea horizontal central de la superficie. Para facilitar una comparación entre las gráficas, se ajustó el rango estableciendo un valor máximo igual para todos los casos, fijándolo en 1×10^4 . Adicional, teniendo en cuenta las dimensiones internas de la cámara de vacío, el espacio máximo disponible para la distancia entre sustrato y catado es 30cm, considerando que el cuerpo del canon Sputtering ocupa 10cm dentro de la cámara. Por lo tanto, 30cm es la distancia máxima evaluada.

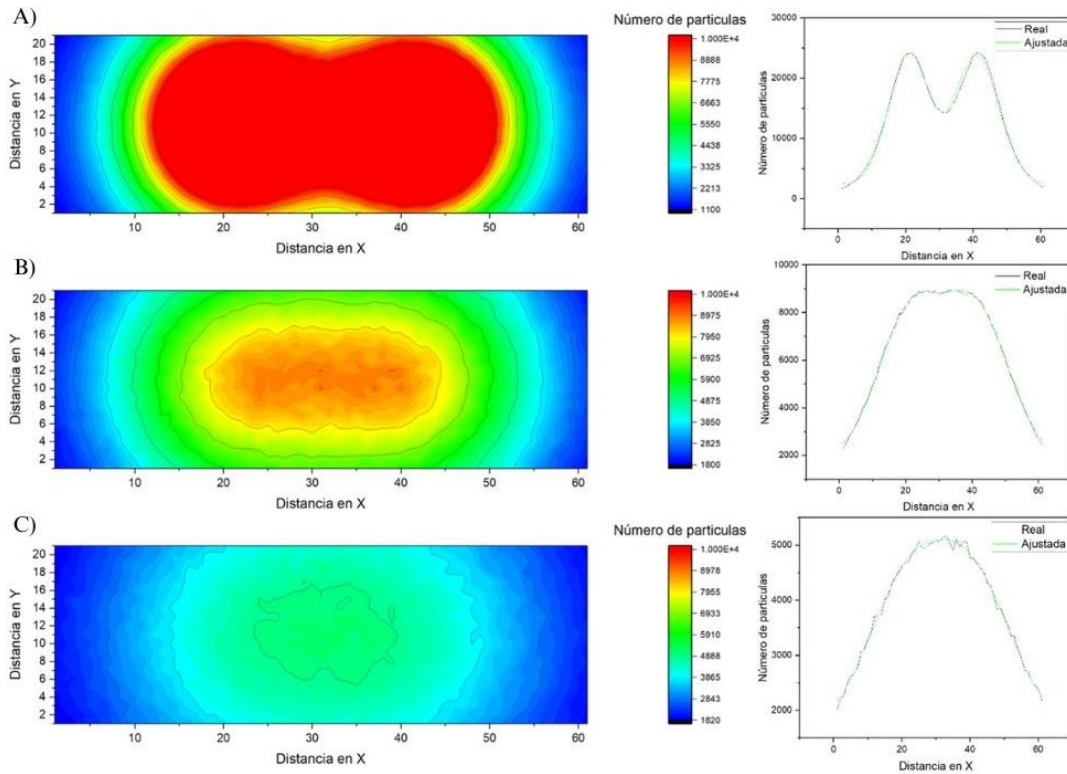


FIGURA 8-16. DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS PARA A)10CM, B)20CM, C)30CM. DISTANCIA ENTRE SUSTRATO Y CÁTODO.

Para una distancia de 10cm (figura 8-16a) se evidencian dos zonas de alta concentración de partículas, correspondientes a la ubicación de los dos cátodos. Esta proximidad resulta en una deposición muy localizada, lo cual genera una distribución no uniforme a lo largo de la superficie. En la gráfica se observa claramente dos picos correspondientes a el cambio del número de partículas depositadas.

En el caso de la distancia de 20 cm (figura 8-16b) las zonas de alta concentración de partículas están más extendidas y ligeramente conectadas entre sí. Las partículas se distribuyen de manera más uniforme a lo largo del eje horizontal, debido a que tienen más espacio para dispersarse, lo que resulta en una mejor uniformidad en la distribución.

Finalmente, para una distancia de 30 cm (figura 8-16c) la gráfica muestra una única zona alargada de concentración de partículas, sin picos altos claramente definidos. A esta distancia, la distribución de partículas es significativamente más uniforme a lo largo del área y menos localizada alrededor de los cátodos, ideal para aplicaciones que requieren una cobertura homogénea sobre el sustrato.

A continuación, en la tabla 8-9 se muestra el número de partículas máximo y mínimo para cada distancia, que fueron depositadas en cada elemento.

Distancia sustrato -cátodo	10 cm	20 cm	30 cm
Número de partículas máximo	24370	8951	5168
Número de partículas mínimo	1633	2276	2020
Diferencia	93.299%	74.573%	39.087%

TABLA 8-9. RESULTADOS DEL NÚMERO DEPOSITADO DE PARTÍCULAS. DISTANCIA SUSTRATO-CATADO.

Para las distancias sustrato-cátodo de 10cm y 20cm la diferencia entre el número de partículas máximo y mínimo es 93% y 74% respectivamente, lo cual no es recomendado por que se vería reflejado en una diferencia considerable en el espesor a lo largo del machete y afectaría directamente sus propiedades. A medida que incrementa la distancia entre el cátodo y el sustrato se mejora la uniformidad, evidenciando así lo mencionado en diferentes estudios que analizan los recubrimientos depositados con Sputtering[124], [125], [126]. Por lo tanto, se selecciona la distancia sustrato-catado de 30cm por tener la menor diferencia en partículas depositadas con un 39.087%.

Posteriormente, se analizó la distribución de cátodos. En la figura 8-17 se observan los resultados utilizando 3 cátodos para la distancia correspondiente a un solo machete y de esta forma tener una idea previa de una distancia adecuada. Buscando reducir la diferencia en la distribución de partículas de 39.087% se estudiaron dos distancias de separación mayores, 25cm y 27cm.

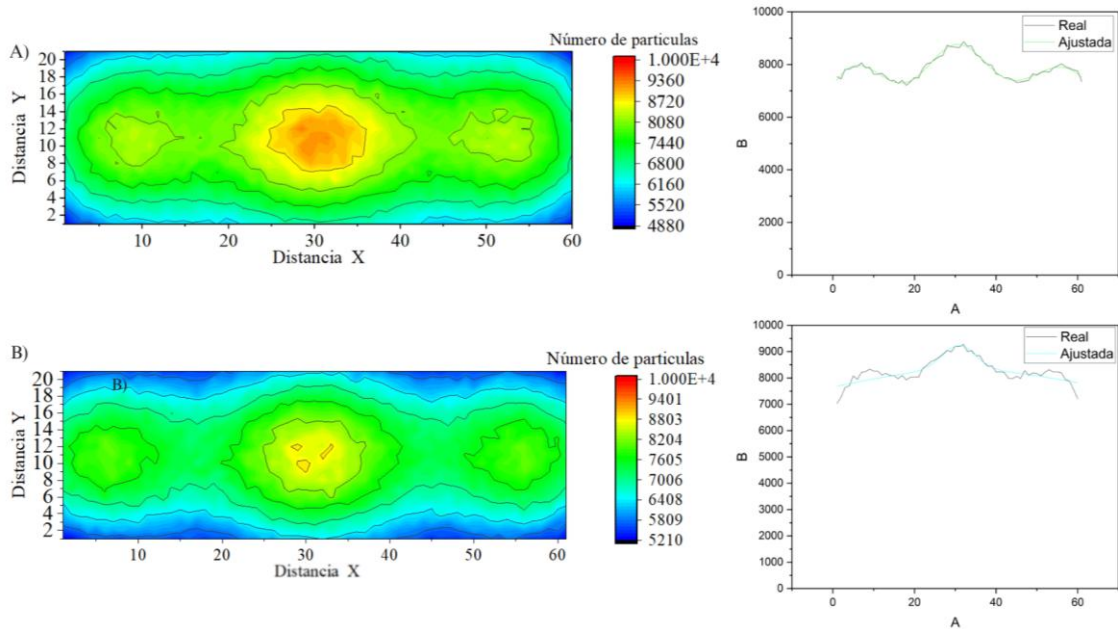


FIGURA 8-17. DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS. DISTANCIA ENTRE CÁTODOS. A) 25 CM Y B) 27 CM.

Se pueden observar similitudes en la distribución de partículas en los dos resultados; notando 3 focos que corresponden a los cátodos, pero sin una clara separación de color entre ellos lo que indica una mejor distribución. El mayor y menor número de partículas depositadas y su porcentaje de diferencia se muestran en la tabla 8-10.

Distancia entre cátodos	25 cm	27 cm
Numero de partículas máximo	9278	8868
Numero de partículas mínimo	6996	7204
Diferencia	24.596%	18.764%

TABLA 8-10. RESULTADOS DEL NÚMERO DEPOSITADO DE PARTÍCULAS. DISTANCIA ENTRE CÁTODOS.

El porcentaje de diferencia para 25cm de separación es de 24.597% y para 27cm es de 18.764%, implicando una mejora significativa. Teniendo en cuenta que con 27cm de separación presenta una distribución aceptable se realizó la prueba en la superficie de 180cm de longitud que representa los 3 machetes, cuyos resultados se muestran a continuación en la figura 8-18.

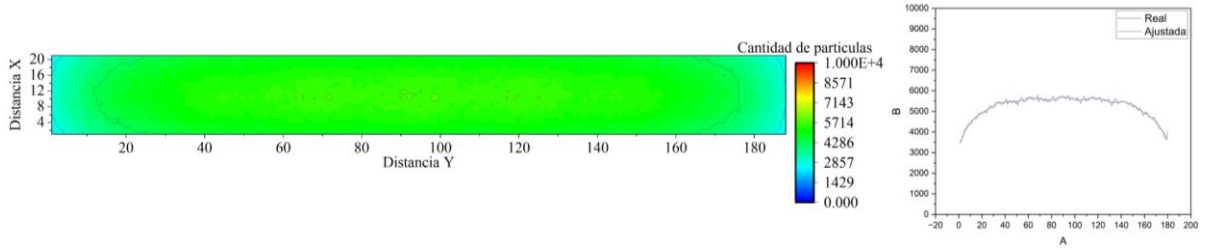


FIGURA 8-18. DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS - 7 CÁTODOS.

Para esta configuración la mayor cantidad de partículas fue de 5878 y la menor cantidad de 4735 teniendo una diferencia del 19.445%. Se puede observar claramente uniformidad en gran parte de la superficie, donde no se denotan la posición de los cátodos, lo cual significa que la distribución es más uniforme. No obstante, una característica importante que se presentó en todas las gráficas de los resultados es el decaimiento de la curva en los dos extremos, esto significa una disminución en el espesor en las zonas externa. Para mejorar la diferencia en la deposición se añadió un catado en cada extremo manteniendo uniforme la distancia. Los resultados con 9 catados y 27cm de separación entre ellos se muestran a continuación en la figura 8-19.

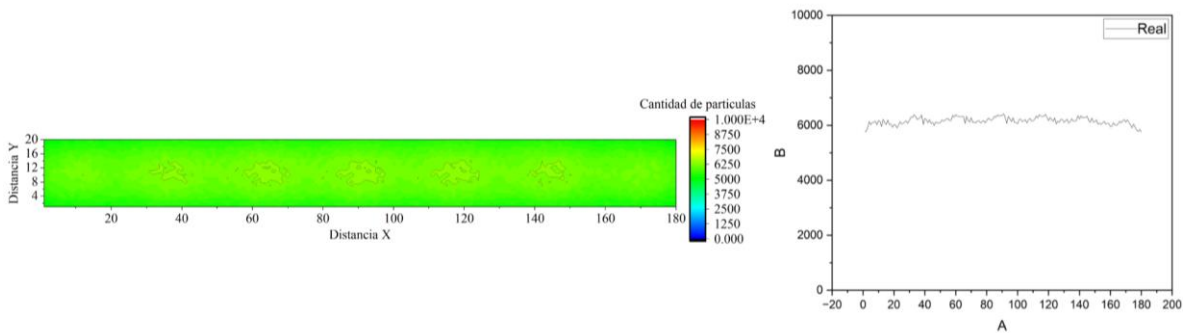


FIGURA 8-19. DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS – 9 CÁTODOS.

Se puede evidenciar la uniformidad a lo largo de toda la superficie, de extremo a extremo se mantiene el color verde. Adicional, la curva muestra un comportamiento constante, se evidencia levemente zonas con mayor deposición, pero sin una variación significativa. En esta configuración la mayor cantidad de partículas fue de 6413 y la menor cantidad de 5756 teniendo una diferencia del 10.245%, reduciendo la variación del espesor en casi un 50%. Finalmente se selecciona esta configuración para el sistema, donde los cañones de plasma se ubicarían en la parte trasera de la cámara.

8.7. Costos aproximados

A continuación, se muestran los costos aproximados relacionados con los elementos considerados en el desarrollo del proyecto.

Elemento	Descripción	Costo por unidad	Cantidad	Total
Materiales				
Satélite Portamuestra				
Horizontal	Lamina - Acero 304	\$4.759,2	20	\$95.184
Horizontal 2	Lamina - Acero 304	\$2.824	40	\$112.460
Vertical	Lamina - Acero 304	\$14.479,8	20	\$289.596
Plato Base	Acero 304	\$1.748.005	1	\$1.748.005
Plato superior	Acero 304	\$1.048.803	1	\$1.048.803
Cámara de vacío				
Base	Lamina - Acero 304	\$2.098.446	2	\$4.196.892
Marco	Lamina - Acero 304	\$2.306.506	3	\$6.919.518
Pared	Lamina - Acero 304	\$5.528.416	2	\$11.056.832
Equipos				
DryVac 650	Bomba mecánica	\$31.105.000	1	\$31.105.000
TurboVac950	Bomba turbomolecular	\$49.560.000	1	\$49.560.000
Pirani TTR91RN	Vacuómetro - Alto vacío	\$2.065.000	1	\$2.065.000
Motor WEG	Motor 1hp 1800rpm	\$1.379.000	1	\$1.379.000
Cañón Sputtering	PATRIARCH ® Caldtech	\$31.486.800	9	\$283.381.000
Manufactura				

Soldadura	Marco	\$70.000	49.56	\$3.469.200
Soldadura	Cámara	\$120.000	16.96	\$2.035.752
Soldadura	Portamuestra	\$50.000	22.5	\$1.125.000
Corte chorro de agua	Cámara	\$200.000	29.88	\$5.976.000
Corte laser	Marco	\$75.000	98.64	\$7.398.000
Corte laser	Portamuestra	\$75.000	95.5	\$7.162.500
Rolado	Cámara	\$250.000	8.49	\$2.122.500

TABLA 8-11. TABLA DE COSTOS APROXIMADOS.

La obtención de costos aproximados para manufactura presento múltiples problemas, como falta de respuesta por las empresas, no obstante, se lograron obtener aproximaciones a partir de datos proporcionados por empresas[127], [128] en productos de medidas similares, como en el caso del acero 304 requerido. Por otro lado, en el caso de las equipos de vacío los precios se encontraron en las respectivas páginas web de las empresas [129], [130]. Los elementos más costosos son los equipos, específicamente los cañones Sputtering y las bombas de vacío de alta gama, debido a su tecnología de alta precisión y fabricación especializada. Cabe resaltar que el costo total de esta tabla no es el costo final de un reactor Sputtering; hay diversos elementos y sistemas que no se tuvieron en cuenta en este proyecto. En contraste, un reactor comercial de la marca HVAC con medidas similares, que incluye la cámara de vacío, dos puertas, el sistema de control PLC y que está fabricado en acero inoxidable tiene un costo de aproximadamente \$274.992.487. No obstante, este valor no contempla los cañones, que son los elementos más costosos, el equipo de vacío, ni los gastos de envío e impuestos que pueden ascender a \$80.000.000.

9. Conclusiones y recomendaciones.

Teniendo en cuenta el trabajo realizado en el presente proyecto se obtuvieron las siguientes conclusiones de acuerdo con los objetivos específicos planteados:

1. Se determinaron los requerimientos técnicos necesarios para el funcionamiento del reactor, partiendo de las características del producto y teniendo en cuenta el estado del arte. A continuación, se presenta una tabla de verificación que muestra los requerimientos planteados y que sección se puede evidenciar su desarrollo.

Requerimiento	Cumplimiento	Sección
El diámetro interno de la cámara de vacío no debe superar los 2.5m.	Cumplido. El diámetro interno de la cámara es de 1.8 m.	8.2.2
La altura de la cámara de vacío no debe superar los 3.5m.	Cumplido. La altura de la cámara es de 2.5 m.	8.2.2
La cámara de vacío debe resistir el diferencial de presión ejercido por la presión atmosférica equivalente a 105.325 Pa.	Cumplido. La cámara de vacío resiste el diferencial de presión.	8.2.3
La distancia entre el sustrato y el cátodo no debe exceder 40cm.	Cumplido. La distancia entre el sustrato y el catado son 30 cm.	8.3
La apertura de las puertas debe tener un ángulo de apertura mayor a 135° para permitir la carga y descarga de las muestras.	Cumplido. Teniendo en cuenta la bisagra doble acción, la apertura de las puertas tiene un ángulo de 180°	8.2
El material de la cámara de vacío debe resistir temperaturas sin deformación alguna de hasta 500 °C.	Cumplido. El Acero Inoxidable 304 resiste temperaturas de 500°C sin deformación.	8.2.1

El sistema de vacío debe alcanzar los $9.9 * 10^{-4} Pa$.	Cumplido. El sistema de vacío alcanza los $9.9 * 10^{-4} Pa$.	8.5
El sistema de vacío debe ser capaz de alcanzar $9.9 * 10^{-4} Pa$ en menos de 20 minutos.	Cumplido. El sistema de vacío alcanza los $9.9 * 10^{-4} Pa$ en 9 minutos.	8.5.1
El sistema de vacío debe contar con al menos 2 bombas para las dos etapas de vacío.	Cumplido. El sistema de vacío cuenta con dos bombas, una para cada etapa.	8.5
El factor de seguridad de la cámara de vacío debe ser igual o mayor a 2.5.	Cumplido. El factor de seguridad de la cámara es de 2.6.	8.2.3
El portamuestra deber tener con 2 rotaciones.	Cumplido. El portamuestra cuenta con dos rotaciones.	8.3
La capacidad del portamuestra debe ser mayor a 200 machetes.	Cumplido. La capacidad del portamuestra es de 240 machetes.	8.3
La tasa de producción diaria debe ser mayor a 1200 unidades. El tiempo total de proceso no debe exceder las 3 horas y 20 minutos.	Parcialmente No se puede asegurar el cumplimiento de este requerimiento ya que el tiempo total del proceso depende de diversos factores no tenidos en cuenta.	
La diferencia en el espesor no debe ser mayor al 15%.	Cumplido. La diferencia del espesor de del 10.2%	8.6

Con base en la verificación presentada, se concluye que el diseño satisfizo en su mayoría los requerimientos técnicos establecidos para el reactor PVD. Se destaca la resistencia estructural con un factor de seguridad de 2.6 y tiempo de alcance de

vacío en 9 minutos. Adicional, con el sistema de cátodos seleccionado la diferencia en el espesor a lo largo de la superficie es de 10.2%, estando en el rango deseado. En este proyecto no se alcanza el detalle para definir un tiempo total de proceso por lo cual no se asegura el cumplimiento de este requerimiento. Se concluye que el diseño cumple los parámetros estructurales y funcionales definidos, brindando una base sólida para proyectos posteriores relacionados con el diseño del reactor.

2. El concepto final se basó en una cámara cilíndrica de acero inoxidable 304, que fue el material seleccionado mediante una matriz comparativa, considerando resistencia mecánica y resistencia a la corrosión, entre otros criterios. El diseño integra doble puerta con apertura de 180° permitiendo la manejabilidad requerida. Adicional, un sistema de vacío de dos etapas compuesto por una bomba mecánica DryVac 650 y una bomba turbo molecular TurboVac 950, brindando un tiempo total de evacuación de 9.48 minutos para el sistema, cumpliendo los requerimientos y mostrando la viabilidad con componentes disponibles en el mercado nacional.
3. El diseño detallado se basó en el análisis estructural mediante el MEF en SolidWorks, donde se evaluaron 8 espesores de pared diferentes entre 6mm y 20mm. De acuerdo con los resultados a partir de 18mm se garantiza resistencia frente a la diferencia de presión, siendo este el espesor seleccionado con un factor de seguridad de 2.6. El portamuestra fue diseñado con un diámetro de 1.4m y un sistema planetario de doble rotación, con satélites rectangulares reduciendo las sombras en el recubrimiento. Las simulaciones de la trayectoria de partículas con el software SIMTRA confirmaron que una distancia sustrato-cátodo de 3° cm y una disposición de 9 cátodos reducen la variación del espesor a 10.245%, logrando una deposición más uniforme.
4. Se elaboraron planos de la cámara de vacío y el sistema portamuestra, junto con una estimación de costos. Aunque en la estimación de costos se presentan varios inconvenientes como falta de comunicación con los proveedores y demoras en la cotización a nivel nacional se logró una estimación a partir de aproximaciones y datos previos. El costo total del diseño desarrollado se estimó en \$387.743.724 COP incluyendo cámara de vacío (materiales y manufactura), equipos de vacío, cañones Sputtering y cátodos de Cr. En comparación, un reactor comercial con dimensiones similares pero que no incluye sistema de cátodos ni sistema de vacío, supera \$274.992.487 COP sin tener en cuenta envío desde China y costos adicionales. Adicional, los procesos de manufactura recomendados son técnicas que se trabajan localmente, asegurando su posible desarrollo.

Finalmente, aunque el presente trabajo constituye un diseño preliminar que no profundiza en aspectos técnicos específicos, este proyecto presenta una propuesta valiosa que actúa como base conceptual y metodológica necesarias para el desarrollo de equipos PVD a nivel nacional. Adicional, tiene valor como fuente de conocimiento inicial (“know-how”), para futuros desarrollos vinculados a la empresa Caldtech SAS. Teniendo en cuenta el alcance de los resultados, se recomienda en trabajos futuros abarcar el diseño en detalle de los elementos y sistemas que no se tuvieron en cuenta en el desarrollo del presente proyecto, como el sistema automatizado de control y monitoreo, de presión y temperatura. En conclusión, el trabajo abre una posibilidad de impulsar la investigación y desarrollo de tecnología PVD en Colombia, promoviendo la independencia tecnológica y fortaleciendo la capacidad de innovación de la industria nacional hacia procesos más sostenibles.

10. Bibliografía.

- [1] ProPlate, «How do safety and environmental concerns in electroplating processes shift when focusing on critical applications?», Navigating the Complex Intersection of Safety and Environmental Stewardship in Electroplating for Critical Applications. [En línea]. Disponible en: <https://www.proplate.com/how-do-safety-and-environmental-concerns-in-electroplating-processes-shift-when-focusing-on-critical-applications/>
- [2] M. Tomkiewicz, «Environmental Aspects of Electrodeposition», en *Modern Electroplating*, 1.^a ed., M. Schlesinger y M. Paunovic, Eds., Wiley, 2010, pp. 555-571. doi: 10.1002/9780470602638.ch26.

- [3] J. Albella «Mecanismo de nucleación y crecimiento de capas», en *Láminas delgadas y recubrimientos: preparación, propiedades y aplicaciones*, Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2003.
- [4] S. G. Walton y J. E. Greene, «Plasmas in Deposition Processes», en *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings*, Elsevier, 2010, pp. 32-92. doi: 10.1016/B978-0-8155-2031-3.00002-8.
- [5] R. Vega, «Emprendimiento e innovación en Colombia ¿Que nos esta haciendo falta?», Universidad de Los Andes. [En línea]. Disponible en: <https://studylib.es/doc/4642012/emprendimiento-e-innovaci%C3%B3n-en-colombia--%C2%BFqu%C3%A9-nos>
- [6] W. D. Bancroft, «The chemistry of electroplating», *J. Frankl. Inst.*, vol. 160, n.º 2, pp. 139-146, ago. 1905, doi: 10.1016/S0016-0032(05)90057-4.
- [7] EPA, «Electroplating Effluent Guidelines», Effluent Guidelines. [En línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov/>
- [8] Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo, *Resolución 2115 de 2007*. 2007, p. 37.
- [9] J. Camacho, «Diagnóstico sobre los niveles de cromo hexavalente (cr+6) en el tramo iv del río Tunjuelito.», Universidad Nacional Abierta y Distancia, Bogotá.
- [10] S. Rajoria, M. Vashishtha, y V. K. Sangal, «Treatment of electroplating industry wastewater: a review on the various techniques», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, n.º 48, pp. 72196-72246, oct. 2022, doi: 10.1007/s11356-022-18643-y.
- [11] Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo, «Resolución 631 de 2015 -». Accedido: 22 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-631-de-2015/>
- [12] Empresite, «Sector Galvanoplastia en Colombia. Listado de empresas de Sector Galvanoplastia en Colombia», Empresite Colombia - Buscador de Empresas y Negocios de Colombia. Accedido: 15 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://empresite.economistaamerica.co/Actividad/SECTOR-GALVANOPLASTIA/>
- [13] Neway, «Physical Vapor Deposition (PVD): Explore the Process, Benefits and Applications». [En línea]. Disponible en: <https://www.newayprecision.com/knowledge-hub/physical-vapor-deposition-pvd-explore-the-process-benefits-and-applications>
- [14] J. C. Díaz-Guillén *et al.*, «Improved Mechanical Properties, Wear and Corrosion Resistance of 316L Steel by Homogeneous Chromium Nitride Layer Synthesis Using Plasma Nitriding», *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 29, n.º 2, pp. 877-889, feb. 2020, doi: 10.1007/s11665-020-04653-9.
- [15] Sudosilo, «Revestimientos PVD – Sudosilo S.A.» Accedido: 17 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://sudosilo.com/portfolio/revestimientos-pvd/>
- [16] Voestalpine, «Recubrimiento PVD - voestalpine HPM Colombia S.A.» Accedido: 17 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.voestalpine.com/highperformancemetals/colombia/es/servicios/recubrimiento-pvd/>
- [17] M. Herrero, «Preparación de recubrimientos mediante deposición química en fase líquida», en *Láminas delgadas y recubrimientos: preparación, propiedades y aplicaciones*, CSIC, pp. 291-308.
- [18] S. Kalpakjian, S. R. Schmid, «Surface treatments, coatings and cleaning», en *MANUFACTURING Engineering and Technology*, Siete., Pearson Education, 2014.
- [19] O. J. García, «OBTENCION Y CARACTERIZACION ELECTROQUIMICA Y ESTRUCTURAL DE RECUBRIMIENTOS DE CROMO DECORATIVO A PARTIR DE SOLUCIONES DE CROMO TRIVALENTE», Universidad Nacional de Colombia, 2010.
- [20] J. Abys, «Palladium Electroplating», en *Modern Electroplating*, 1.ª ed., Wiley, 2010, pp. 327-368. doi: 10.1002/9780470602638.ch12.
- [21] JB Engineering, «Cromado duro – JB engineering». Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://blog.jbonet.es/2020/09/25/cromado-duro/>
- [22] A. Brenner, Ed., «Electrodeposition of Alloys», en *Electrodeposition of Alloys*, Academic Press, 1963, p. ii. doi: 10.1016/B978-1-4831-9808-8.50001-0.
- [23] N. Martyak, B. BOSS, y W. Plyet, «Microcracks in chromium electrodeposits», *Journal of Materials Science*, vol. 32.
- [24] C. Fontanesi, R. Giovanardi, M. Cannio, y E. Soragni, «Chromium electrodeposition from Cr(VI) low concentration solutions», *J. Appl. Electrochem.*, vol. 38, n.º 4, pp. 425-436, abr. 2008, doi: 10.1007/s10800-007-9455-5.

- [25] E. Julve, «Perspectiva general del cromado industrial: Características físicas del recubrimiento y tipos de cromado», *Química E Ind.*, p. 9.
- [26] J. María. Albella Martín, O. Sánchez, y I. Jiménez, *Láminas delgadas y recubrimientos: preparación, propiedades y aplicaciones*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2003.
- [27] J. María. Albella Martín, «Deposición mediante pulverización catódica», en *Laminas delgadas y recubrimientos: preparacion, propiedades y aplicaciones*, CSIC, pp. 147-168.
- [28] L. H. Moreno, J. C. Ciacedo, F. Martinez, G. Bejarano, T. S. Battaille, y P. Prieto, «Wear evaluation of WC inserts coated with TiN/TiAlN multilayers», *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 32, n.º 2, pp. 114-118, jun. 2010, doi: 10.1590/S1678-58782010000200003.
- [29] A. Baptista, F. J. G. Silva, J. Porteiro, J. L. Míguez, G. Pinto, y L. Fernandes, «On the Physical Vapour Deposition (PVD): Evolution of Magnetron Sputtering Processes for Industrial Applications», *Procedia Manuf.*, vol. 17, pp. 746-757, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.10.125.
- [30] J. María. Albella Martín, «Evaporación térmica y otras técnicas de evaporación», en *Laminas delgadas y recubrimientos: preparacion, propiedades y aplicaciones*, CSIC, pp. 147-168.
- [31] P. A. Redhead, J. P. Hobson, y E. V. Kornelsen, *The physical basis of ultrahigh vacuum*. en American Vacuum Society classics. New York: American Institute of Physics, 1993.
- [32] J. Segovia, «Tecnología de vacío», en *Laminas delgadas y recubrimientos: preparacion, propiedades y aplicaciones*, CSIC, p. 48.
- [33] Pfeiffer, «Measuring devices for analog and digital total pressure». Accedido: 22 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/global/en/products/vacuum-gauges>
- [34] Pfeiffer, «Vacuum Gauges | Pfeiffer Global», Vacuum Gauges | Pfeiffer Global. Accedido: 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/global/en/products/analytical-instrumentation/vacuum-gauges/>
- [35] M. Pichel, N. Candela, R. Barea, G. Conejero, y M. Carsí, «Recubrimientos de TiN depositados mediante ACPVD sobre aleaciones de magnesio AM60», *Bol. Soc. Esp. Cerámica Vidr.*, vol. 52, n.º 3, pp. 118-126, jun. 2013, doi: 10.3989/cyv.152013.
- [36] SIMVACO, «PVD Chrome Coating vs Chrome Plating: Why Vacuum Coating Is the Future», SIMVACO. Accedido: 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://simvaco.com/blogs/pvd-technique/pvd-chrome-coating-vs-chrome-plating-why-vacuum-coating-is-the-future>
- [37] «Equipo De Revestimiento Al Vacío, Metalización Uv, Abs, Pp, Pc, Pe - Buy Plastic Vacuum Coating Equipment plastic Pvd Coating Equipment plastic Vacuum Plating Machine Product on Alibaba.com», www.alibaba.com. Accedido: 19 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.alibaba.com/product-detail/ABS-PP-PC-PE-Plastic-UV_60786539717.html
- [38] «Estaño Tic Crn... Ticn Película Delgada Pvd Máquina De Revestimiento De Plasma Equipos De Revestimiento Deposición Al Vacío De La Máquina (hvac) - Buy Thin Film Pvd Coating Machine plasma Coating Machine vacuum Deposition Machine Product on Alibaba.com». Accedido: 19 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.alibaba.com/product-detail/TiN-TiC-CrN-TiCN-Thin-Film_1773301245.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.4a6c13a05tsz9z
- [39] V. M. Latorre Hernandez, «DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA PILOTO DE GALVANIZADO POR ELECTRODEPOSICIÓN EN SUSTRATOS METÁLICOS EN LA EMPRESA HRS S.A.S.», Universidad de Pamplona, Pamplona, 2020.
- [40] J. Rodríguez Palomino y J. M. Rodríguez Curo, «Estudio de Factibilidad para la Instalación de la Nueva Unidad de Producción de Galvanizado en Caliente de la Empresa Metales Ingeniería y Construcción S.A.C. (MIMCO)», UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA, Peru, 2014.
- [41] A. B. Coyoy Nimatuj, «DISEÑO Y MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES ÁCIDAS DE UNA PLANTA DE GALVANIZADO», Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2013.
- [42] Fortune Business insights, «Physical Vapor Deposition [PVD] Market Size & Growth, 2032». Accedido: 3 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.fortunebusinessinsights.com/physical-vapour-deposition-pvd-market-102364>
- [43] Adria, «máquina de PVD», Tianniu. Accedido: 3 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://tncoating.com/es/blog/maquina-de-pvd/>
- [44] G. Sánchez, «Guía de Buenas Prácticas para el Sector Galvanotécnica», Accedido: 3 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en:

- https://www.academia.edu/36760854/Gu%C3%ADa_de_Buenas_Pr%C3%A1cticas_para_el_Sector_Galvanot%C3%A9cnico
- [45] Finmodelslab, «Cómo optimizar los costos de recubrimiento de polvo: desglose de gastos». Accedido: 3 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://finmodelslab.com/es/blogs/operating-costs/powder-coating-operating-costs>
- [46] R. Bandinelli, V. Fani, y B. Bindi, «Electroplating and PVD Finishing Technologies in the Fashion Industry: Perspectives and Scenarios», *Sustainability*, vol. 13, p. 11, 2011, doi: <https://doi.org/10.3390/su13084453>.
- [47] Vergason Technology, Inc *et al.*, «PVD Chromium Coatings Replacing Decorative Chromium Electroplated Coatings on Plastics», presentado en Society of Vacuum Coaters Annual Technical Conference, feb. 2016, pp. 403-410. doi: 10.14332/svc15.proc.1971.
- [48] A. Baptista, F. Silva, J. Porteiro, J. Míguez, y G. Pinto, «Sputtering Physical Vapour Deposition (PVD) Coatings: A Critical Review on Process Improvement and Market Trend Demands», *Coatings*, vol. 8, n.º 11, p. 402, nov. 2018, doi: 10.3390/coatings8110402.
- [49] M. Hablani, «Technology of Vacuum Pumps—An Overview», en *Handbook of Vacuum Science and Technology*, Elsevier, 1998, pp. 59-83. doi: 10.1016/B978-012352065-4/50051-1.
- [50] M. Volk, *Pump Characteristics and applications*. Taylor and Francis Group, 2014.
- [51] W. Burgmann y K. Göhler, «Modern Vacuum Pumps for the Vacuum Degassing of Steel in Small and Large Vacuum-Degassing Units», *Metallurgist*, vol. 57, n.º 5-6, pp. 516-525, sep. 2013, doi: 10.1007/s11015-013-9762-5.
- [52] J. Alami, S. Bolz, y K. Sarakinos, «High power pulsed magnetron sputtering: Fundamentals and applications», *J. Alloys Compd.*, vol. 483, n.º 1-2, pp. 530-534, ago. 2009, doi: 10.1016/j.jallcom.2008.08.104.
- [53] I. Desmond, «Argon (Ar) – part of a series on gases used during the physical vapour deposition (PVD) process – an innovative method for improving the performance of stainless steel», John Desmond Limited. [En línea]. Disponible en: <https://www.johndesmond.com/blog/metals/argon-ar-part-of-a-series-on-gases-used-during-the-physical-vapour-deposition-pvd-process-an-innovative-method-for-improving-the-performance-of-stainless-steel/>
- [54] B. Rother, G. Ebersbach, y H. M. Gabriel, «Substrate-rotation systems and productivity of industrial PVD processes», *Surf. Coat. Technol.*, vol. 116-119, pp. 694-698, sep. 1999, doi: 10.1016/S0257-8972(99)00120-6.
- [55] I. Mrkvica, T. Szotkowski, A. Slaninkova, y T. Jurga, «High-Efficiency of PVD Coating Process by Applying an Additional Rotation», *Coatings*, vol. 12, n.º 6, p. 834, jun. 2022, doi: 10.3390/coatings12060834.
- [56] Z. Yang, N. Zhang, H. Li, B. Chen, y B. Yang, «Comparison to Micro Wear Mechanism of PVD Chromium Coatings and Electroplated Hard Chromium», *Materials*, vol. 16, n.º 7, p. 2695, mar. 2023, doi: 10.3390/ma16072695.
- [57] T. Weirather, C. Czettl, P. Polcik, M. Kathrein, y C. Mitterer, «Industrial-scale sputter deposition of Cr_{1-x}Al_xN coatings with 0.21 ≤ x ≤ 0.74 from segmented targets», *Surf. Coat. Technol.*, vol. 232, pp. 303-310, oct. 2013, doi: 10.1016/j.surfcoat.2013.05.022.
- [58] Y. Zhang, S. Lv, X. Han, y J. Gong, «FEA and Optimization of a Door Used in Large Vacuum Chamber», *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 887, n.º 1, p. 012027, jul. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/887/1/012027.
- [59] Kolzer, «High automation for large volumes». [En línea]. Disponible en: <https://www.kolzer.com/>
- [60] D. Ferrari, «METODO DEL ELEMENTO FINITO Y AutoFEM», UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO.
- [61] DRAFT, «Software», Universiteit Gent. Accedido: 25 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ugent.be/we/solidstatesciences/draft/en/services/software>
- [62] M. Groover, «Procesos de deformacion volumetrica en el trabajo de metales», en *FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA*, McGraw-Hill Higher Education, 2007.
- [63] S. Kalpakjian, R. Schmid, «Sheet metal Forming Processes and Equipment», en *MANUFACTURING Engineering and Technology*, Siete., Pearson Education, 2014.
- [64] M. Groover, *FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA*. McGraw-Hill Higher Education, 2007.
- [65] M. Groover, «TEORIA DEL MAQUINADO DE METALES», en *FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA*, McGraw-Hill Higher Education, 2007.

- [66] M. Groover, «INTRODUCCION Y PANORAMA DE LA MANUFACTURA», en *FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA*, McGraw-Hill Higher Education, 2007.
- [67] AWS, «Structural Welding Code - Steel», American Welding Society, Miami, 2020.
- [68] AWS, «Standard Welding Terms and Definitions», American Welding Society, Miami, 2020.
- [69] «Joining Processes and Equipment», en *MANUFACTURING Engineering and Technology*, Siete., Pearson Education, 2014.
- [70] S. Kalpakjian, R. Schmid, «Fusion Welding Processes», en *MANUFACTURING Engineering and Technology*, Siete., Pearson Education, 2014.
- [71] M. Groover, «Procesos de Soldadura», en *FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA*, McGraw-Hill Higher Education, 2007.
- [72] ASTM, *ASTM A240 – Acero Inoxidable*.
- [73] ASTM, *Norma ASTM B209 – Aluminio*.
- [74] *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII*, 8, 2015.
- [75] R. Mott, E. Vavrek, y W. Jyhwen, *MACHINE ELEMENTS IN MECHANICAL DESIGN*, 5.^a ed. Pearson Education, 2013.
- [76] Hauzer, «Flexicoat 1500», Hauzer Techno Coating. Accedido: 17 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.hauzertechnocoating.com/en/products/batch-coating-systems/flexicoat1500/>
- [77] Cícel Vacuum Machine, «CCZK-SF Magnetron Sputterinr coating machien». [En línea]. Disponible en: <https://www.wzcck.com/en/product/product395.html>
- [78] GLORIA PATRICIA ESTRADA, MAURICIO ARROYAVE, y ALFONSO DEVIA, «DISEÑO DE UN EQUIPO INDUSTRIAL DE ARCO PULSADO PARA LA PRODUCCIÓN DE PELICULAS DELGADAS MEDIANTE PAPVD», *Scientia et technica*, vol. 2, n.º 25, 2004.
- [79] D. G. Ullman, *The mechanical design process*, 4th ed. en McGraw-Hill series in mechanical engineering. Boston: McGraw-Hill Higher Education, 2010.
- [80] «Ingeniería de Manufactura», en *FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA*, McGraw-Hill Higher Education, 2007.
- [81] «Matriz De Criterios De Evaluación - MAESTROS». Accedido: 17 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://tumaestros.co/matriz-de-criterios-de-evaluacion-por-areas/>
- [82] A. Academy, «Juego de engranajes planetarios».
- [83] Intelligy, «Los 5 pasos a seguir para un estudio estático en Simulation». [En línea]. Disponible en: <https://blogs.solidworks.com/solidworkslatamyesp/solidworks-blog/simulacion/estudio-estatico-simulation/>
- [84] DRAFT, «SIMTRA - User Manual». Ghent University.
- [85] DRAFT, *SIMTRA*.
- [86] «Principios generales de representación.pdf».
- [87] «Herragro - Tienda Virtual». Accedido: 20 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.herragro.com/shop/>
- [88] P. N. Vinh, N. D. Thien, y C. Le Chi, «Study the Effect of Chrome Coating Thickness to Fatigue Strength of the Axle-Shaped Machine Parts», en *2018 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD)*, Ho Chi Minh City: IEEE, nov. 2018, pp. 221-226. doi: 10.1109/GTSD.2018.8595550.
- [89] D. M. Galimov, D. V. Ardashev, y A. A. Dyakonov, «Morphology and Properties of Solid Chrome Plating, Obtained by the Galvano-Mechanical Method», *Solid State Phenom.*, vol. 299, pp. 872-878, ene. 2020, doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.872.
- [90] D. Kazlauskas, V. Jancauskas, y S. Tučkutė, «Research on Tribological Characteristics of Hard Metal WC-Co Tools with TiAlN and CrN PVD Coatings for Processing Solid Oak Wood», *Coatings*, vol. 10, n.º 7, p. 632, jun. 2020, doi: 10.3390/coatings10070632.
- [91] W. I. Thomas, G. Rowley, y G. Doveston, «An Investigation of the Influence of the Core Material Properties on the Compression and Properties of Dry-Coated Tablets», *Drug Dev. Ind. Pharm.*, vol. 24, n.º 10, pp. 973-978, ene. 1998, doi: 10.3109/03639049809097277.
- [92] Machining Doctor, «Maquinabilidad de los Materiales - Doctor de Mecanizado.» Accedido: 19 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.machiningdoctor.com/es/machinability/>
- [93] J. Ayala, «Estudio de la formación de porosidad», Universidad Autónoma Leon, México, 2014.
- [94] Tecnologías en soldadura, «¿Por qué es difícil soldar en Aluminio?» Accedido: 21 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://tecnologiasensoldadura.com.mx/por-que-es-dificil-soldar-aluminio/>

- [95] HDCMFG, «Aluminio vs. acero inoxidable: ¿cuál es la diferencia y cuál es mejor?» Accedido: 12 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://hdcmf.com/es/recursos/blog/aluminio-vs-acero-inoxidable/>
- [96] dmccol, «Aluminio vs. Acero Inoxidable: ¿Cuál es la opción más económica?», Chatarrerías Bogota. Accedido: 12 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://chatarreriasenbogota.com/que-es-mas-barato-el-aluminio-o-el-acero-inoxidable/>
- [97] CICEL COMPANY, *PVD vacuum metallizing machine for car lamp/auto light*, (10 de diciembre de 2020). Accedido: 3 de febrero de 2025. [En línea Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=MhGENk5xptk>
- [98] «vacuum metalizing equipment, vacuum metallization equipment, Innovative Custom PVD Machine». Accedido: 3 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.royal-source.com/sale-11352854-high-vacuum-thin-film-coating-machine-ncvm-plastic-vacuum-metallizer-indium-pvd-coating-equipment.html>
- [99] Máquina de recubrimiento PVD - Hongfeng VAC, *Loading New Pieces For Metallizing In A Vacuum Coating Plant*, (25 de julio de 2017). Accedido: 3 de febrero de 2025. [En línea Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=FKIHdaB2WJQ>
- [100] Windowo, «Bisagras Doble Acción Justor DA 180 - Mejor Precio». Accedido: 3 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.windowo.es/bisagras-doble-accion-justor-da-180>
- [101] CICEL Vacuum technology, «CCZK-PL Auto lamp silicone protective film coating machine-Products». Accedido: 31 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.wzcczk.com/en/product/product392.html>
- [102] CICEL COMPANY, *PVD coating technology applying on SS furniture items.*, (13 de mayo de 2023). Accedido: 31 de julio de 2025. [En línea Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=yByeHgjpVq0>
- [103] J. Browning, Ö. Karaoğlu, Ö. Bayer, M. B. Turgay, y V. Acocella, «Stress fields around magma chambers influenced by elastic thermo-mechanical deformation: implications for forecasting chamber failure», *Bull. Volcanol.*, vol. 83, n.º 7, p. 48, jul. 2021, doi: 10.1007/s00445-021-01471-2.
- [104] C. Hauviller, «Design rules for vacuum chambers», CERN, Geneva, Suiza.
- [105] Martin, «ENGRANES». [En línea]. Disponible en: <https://es.martinsprocket.com/>
- [106] M. Zhang *et al.*, «Oxygen-driven shell-like microstructure: a pathway to high-performance PVD Cr coatings for metal protection», *Npj Mater. Degrad.*, vol. 9, n.º 1, p. 51, may 2025, doi: 10.1038/s41529-025-00591-w.
- [107] «Motor WEG 00118ET3EM143TCW 1HP 1800 RPM 3/60hz». Accedido: 22 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://energiacontrolada.com/tienda/content/products/207-Motor-WEG-00118ET3EM143TCW-1HP-1800-RPM-3-60hz.php>
- [108] M. Hashish, «Abrasive WaterJet Machining», vol. 17, n.º 3273, p. 75, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/ma17133273>.
- [109] S. Karamanos, «Chapter 2 - Line pipe manufacturing», en *Structural Mechanics and Design of Metal Pipes*, S. Karamanos, Ed., Elsevier, 2023, pp. 43-58. doi: 10.1016/B978-0-323-88663-5.00007-4.
- [110] D. Garton, *Vacuum Technology and Vacuum Design Handbook for Accelerator Technicians*. 2011.
- [111] Y. Li y X. Liu, «Vacuum Science and Technology for Particle Accelerators», 2019.
- [112] Meyer Tool, «Vacuum Chamber Design: Weld Joint Design», Meyer Tool & Mfg. Accedido: 7 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mtm-inc.com/vacuum-chamber-design-weld-joint-design.html>
- [113] S. Kalpakjian, S. Schmid, «Machining Processes: Turning and Hole Making», en *MANUFACTURING Engineering and Technology*, Siete., Pearson Education, 2014.
- [114] Weerg, «¿Qué es el Granallado? Beneficios y Ventajas para los Metales». Accedido: 23 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.weerg.com/es/guias/que-es-el-granallado-y-para-que-sirve>
- [115] M. H. Hablanian, «The emerging technologies of oil-free vacuum pumps», *J. Vac. Sci. Technol. Vac. Surf. Films*, vol. 6, n.º 3, pp. 1177-1182, may 1988, doi: 10.1116/1.575672.
- [116] P. Duval, «Selection criteria for oil-free vacuum pumps», *J. Vac. Sci. Technol. Vac. Surf. Films*, vol. 7, n.º 3, pp. 2369-2372, may 1989, doi: 10.1116/1.575901.
- [117] Pfeiffer, «HiScroll: Dry Scroll Vacuum Pumps | Pfeiffer Global», HiScroll: Dry Scroll Vacuum Pumps | Pfeiffer Global. Accedido: 22 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/global/en/products/vacuum-pumps/scroll/hiscroll/>

- [118] M. H. Hablanian, «Throughput-type pumps and ultrahigh vacuum», *J. Vac. Sci. Technol. Vac. Surf. Films*, vol. 12, n.º 4, pp. 897-903, jul. 1994, doi: 10.1116/1.579066.
- [119] J. F. O'Hanlon, *A User's Guide to Vacuum Technology*, 1.ª ed. Wiley, 2003. doi: 10.1002/0471467162.
- [120] Pfeiffer, «Okta 250, roots vacuum pump, 230/400 V, 50 Hz | 265/460 V, 60 Hz», pvcp. Accedido: 11 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.pfeiffer-vacuum.com/global/en/shop/products/PP_W21_000_F
- [121] Pfeiffer, «HiPace® 300», pvcp. Accedido: 11 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/global/en/shop/products/696086bb-b069-4952-a0b8-9e07f44effe1>
- [122] «Okta 500», pvcp. Accedido: 1 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.shop.buschgroup.com/global/en/products/413592a4-81b1-4cd8-8bd8-f0ad1cf7e8dc>
- [123] «Leybold Leybold», Leybold. Accedido: 1 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.leybold.com/es>
- [124] B. Wang *et al.*, «Simulation and Optimization of Film Thickness Uniformity in Physical Vapor Deposition», *Coatings*, vol. 8, n.º 9, p. 325, sep. 2018, doi: 10.3390/coatings8090325.
- [125] T. Ortiz, C. Conde, T. Khan, «Thickness uniformity and optical/structural evaluation of RF sputtered ZnO thin films for solar cell and other device applications | Applied Physics A». Accedido: 5 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00339-017-0909-2>
- [126] D. Golosov, S. Melnikov, S. Zavadski, V. Kolos, y J. Okojie, «The Increase in Thickness Uniformity of Films Obtained by Magnetron Sputtering with Rotating Substrate», *PLASMA Phys. Technol.*, vol. 3, n.º 3, pp. 100-104, feb. 2016, doi: 10.14311/ppt.2016.3.100.
- [127] «Coldeaceros S.A». Accedido: 21 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://coldeaceros.com/>
- [128] «Inicio», Aceroscol - Aceros en Cali. Accedido: 21 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.aceroscol.com/>
- [129] Pfeiffer, «Pfeiffer Vacuum+Fab Solutions | Wegweisende Vakuumtechnologie | Pfeiffer Deutschland», Pfeiffer Vacuum+Fab Solutions | Wegweisende Vakuumtechnologie | Pfeiffer Deutschland. Accedido: 21 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/de/>
- [130] Leybold, «DRYVAC – Trockenlaufende Schraubenpumpen Leybold», Leybold. Accedido: 21 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.leybold.com/de-de/products/vacuum-pumps/industrial-dry-vacuum-pumps/dryvac>
- [131] Indiamart, «Automatic Pvd Ion Coating Plant», indiamart.com. Accedido: 24 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.indiamart.com/proddetail/automatic-pvd-ion-coating-plant-20433912573.html>
- [132] «Máquina De Chapado En Oro Ubu,Máquina De Recubrimiento Al Vacío,Máquina De Galvanoplastia Para Joyería,Tipo De Producto De Metal - Buy Pvd Coating Machine vacuum Coating Machine For Glass metal Electroplating Machinery vacuum Coating Equipment For Glass And Metal pvd Coating Machine For Metal gold Plating Machine electroplating Machine For Jewelry hardware Coating Machine Product on Alibaba.com», spanish.alibaba.com. Accedido: 24 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/UBU-Gold-Plating-Machine-Hardware-Vacuum-1971536690.html>
- [133] «Muebles De Metal De Plástico,Material De Nitruro De Titanio Sin Contacto,Equipo De Revestimiento De Pvd - Buy Pvd Vacuum Professional Stainless Steel Plate Titanium Nitride Coating Equipment,Faucet And Watch Pvd Coating Machine Titanium Nitride Coating Equipment Vacuum Metallizing Machine,Pvd Ion-arc Coating System Plastic Stainless Steel Rose Gold Color Pvd Vacuum Coating Machine Product on Alibaba.com», www.alibaba.com. Accedido: 24 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/Plastic-Metal-Furniture-Tableware-Stainless-Steel-1600870420244.html>

11. Anexos

Anexo 1. Empresas nacionales

A continuación, se presenta la tabla 11-1 donde se muestran diferentes empresas situadas en Colombia que tienen los servicios de manufactura requeridos y materiales propuestos en el presente trabajo. Se presentan el nombre de la empresa y los servicios y productos que ofrecen relaciones con el diseño.

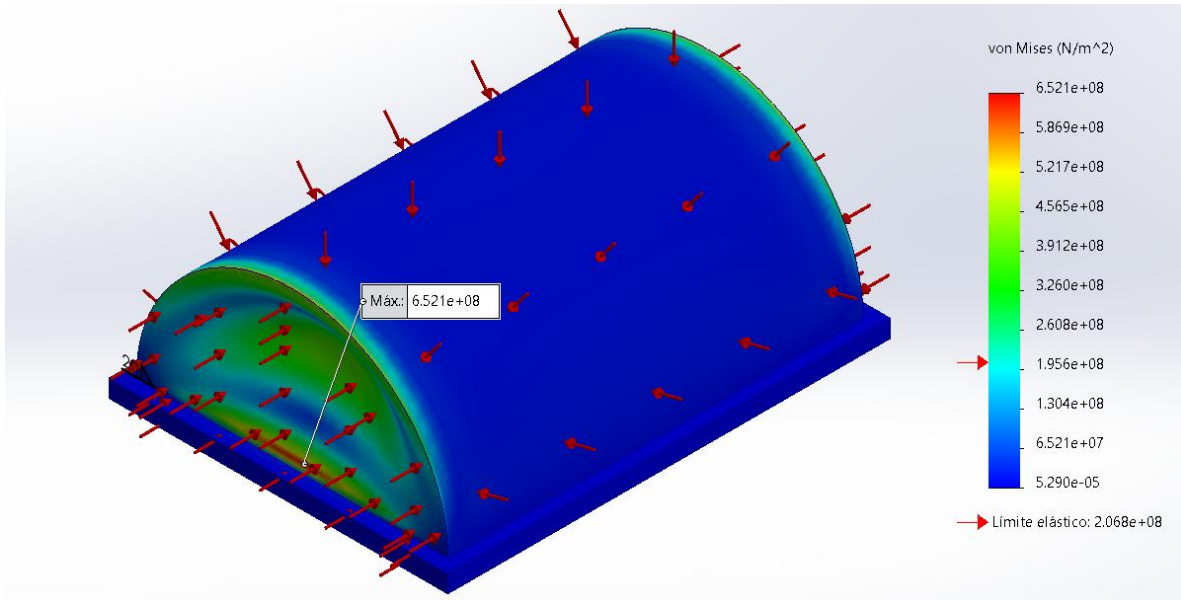
Nombre empresa	Descripción
Coldeaceros S.A.	Aceros Inoxidables, Corte con Plasma, Corte con Laser, Rolado de Lamina, Perforado, Soldadura, Abombado.
AcerosCol	Aceros Inoxidables, Aluminios, Rolado, Corte con Plasma, Soldadura
FerroIndustrial	Aceros Inoxidables, Aluminios
HydroBas	Corte Laser, Corte por chorro de agua
Inmec	Corte por chorro de agua, Mecanizado CNC, Corte Laser, Fabricación de estructuras Metálicas
Inmetal	Tratamientos térmicos, Corte CNC
WaterJet Colombia	Corte por chorro de agua

TABLA 11-1. REFERENCIAS DE EMPRESAS NACIONALES.

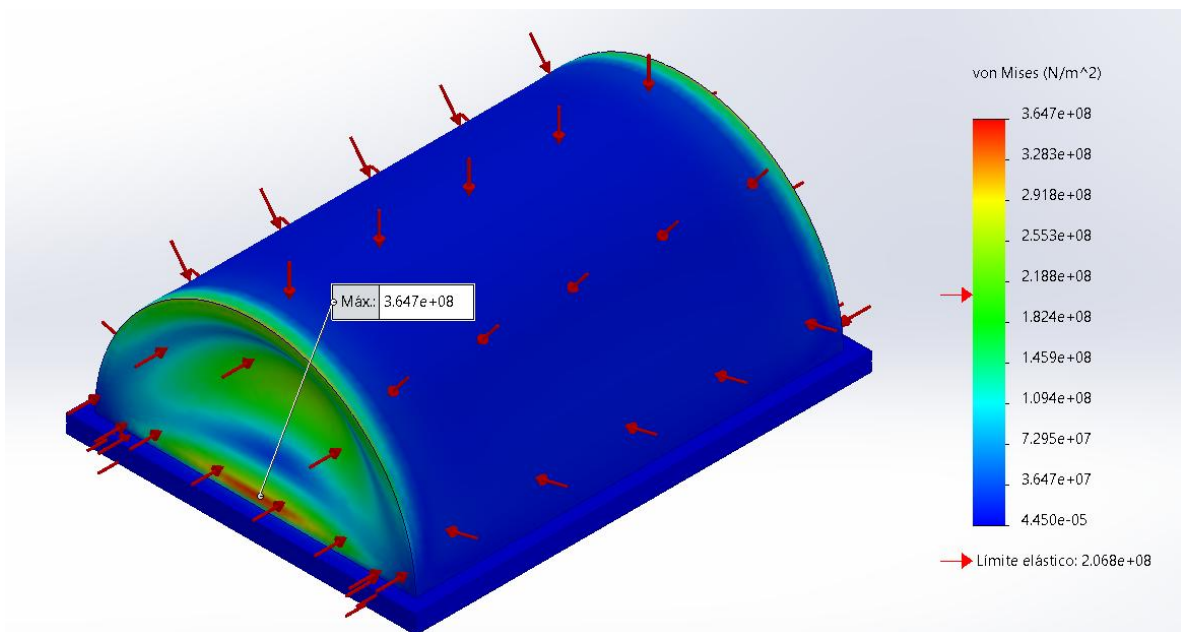
Anexo 2. Resultados simulaciones espesor de pared.

En el anexo 2, se presentan las imágenes de los resultados para el estudio de esfuerzos en los diferentes espesores mencionados en la tabla 8-3.

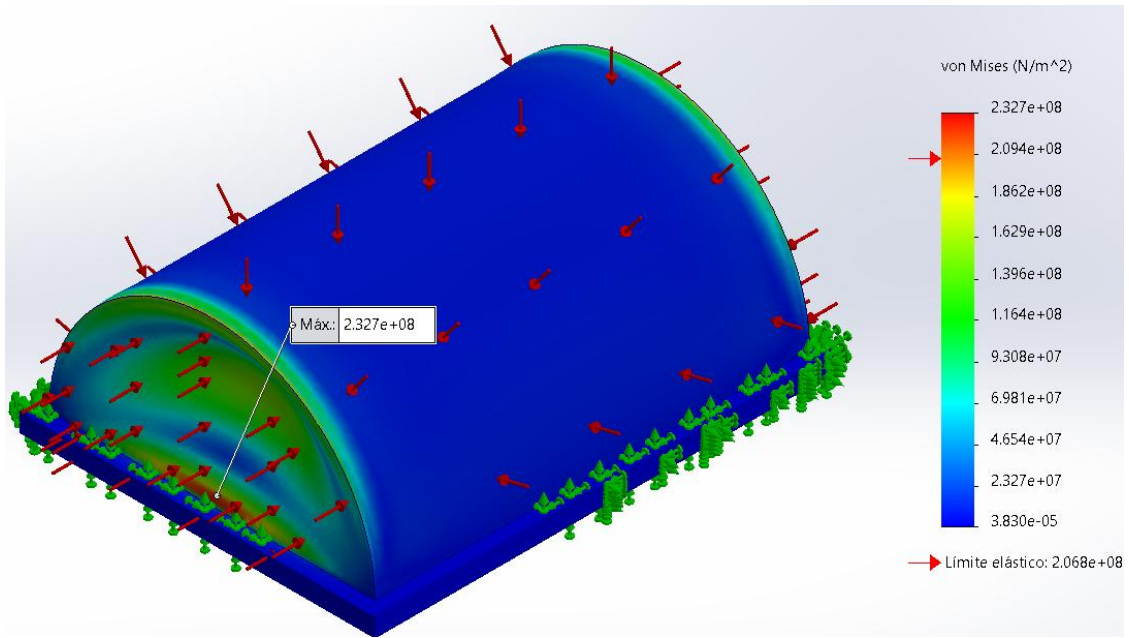
6mm



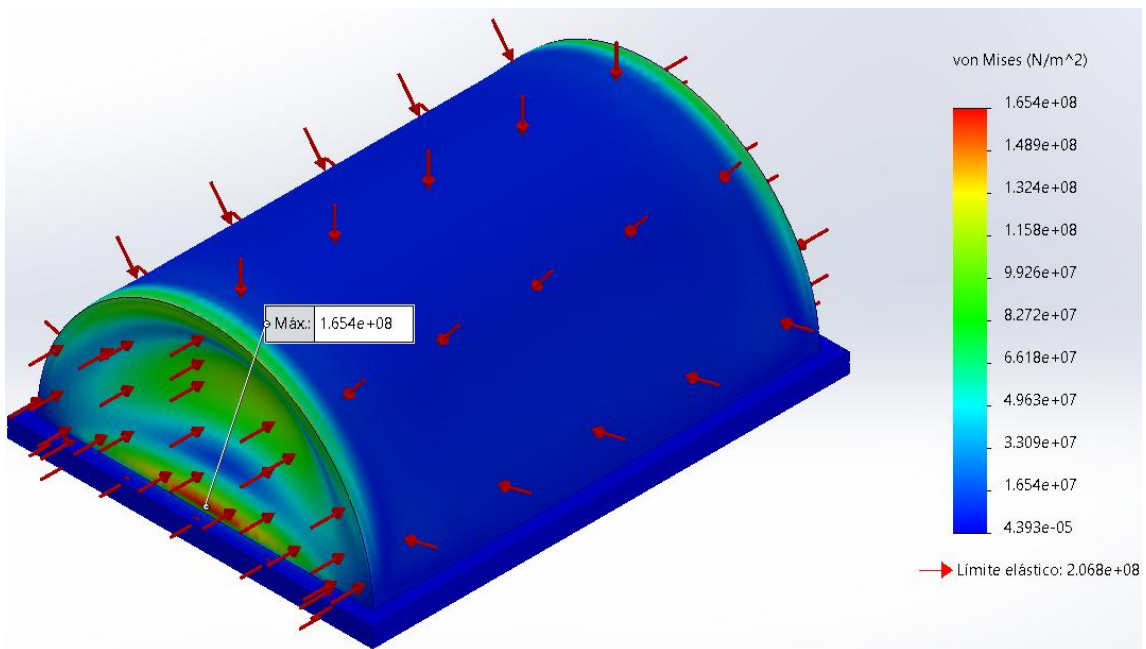
8mm



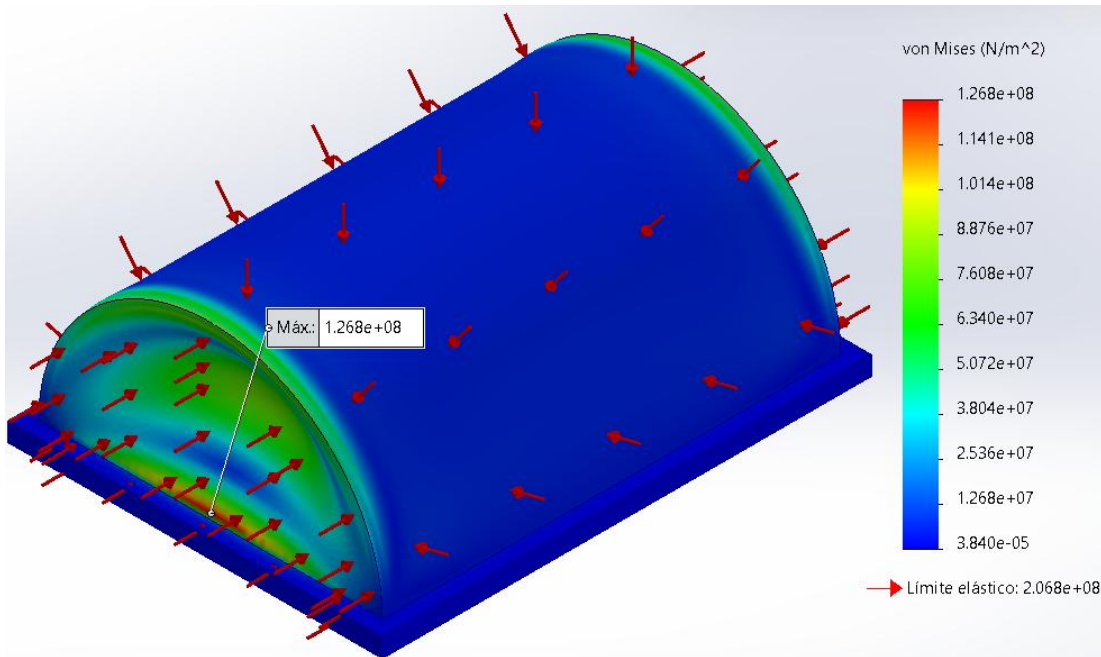
10mm



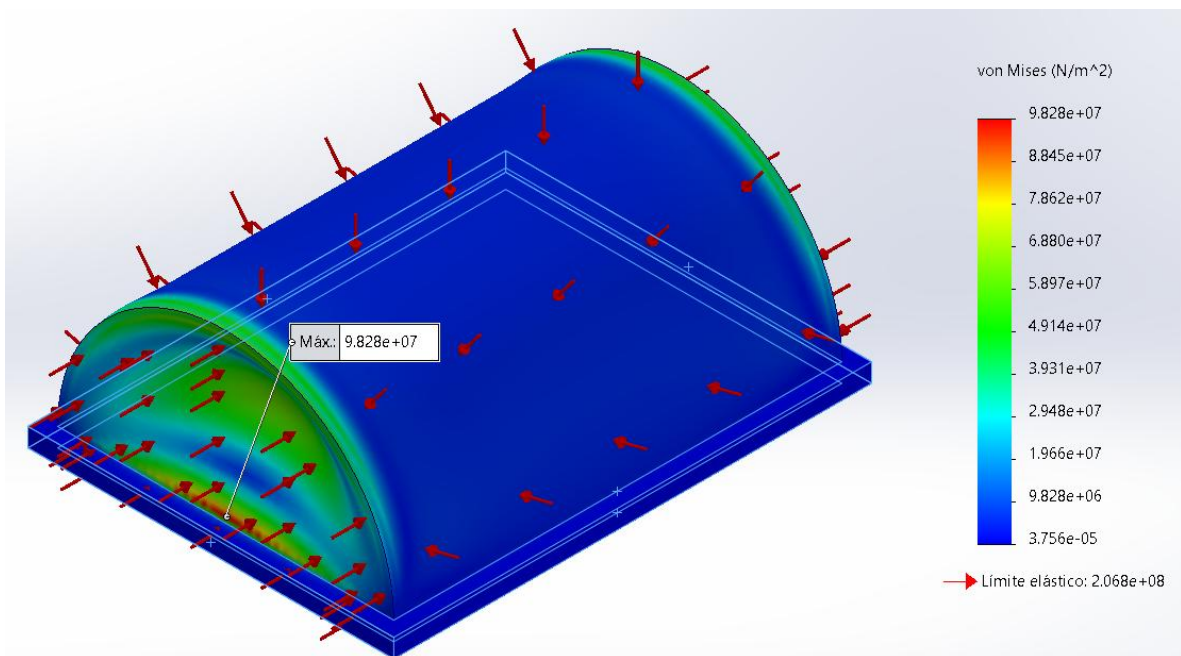
12 mm



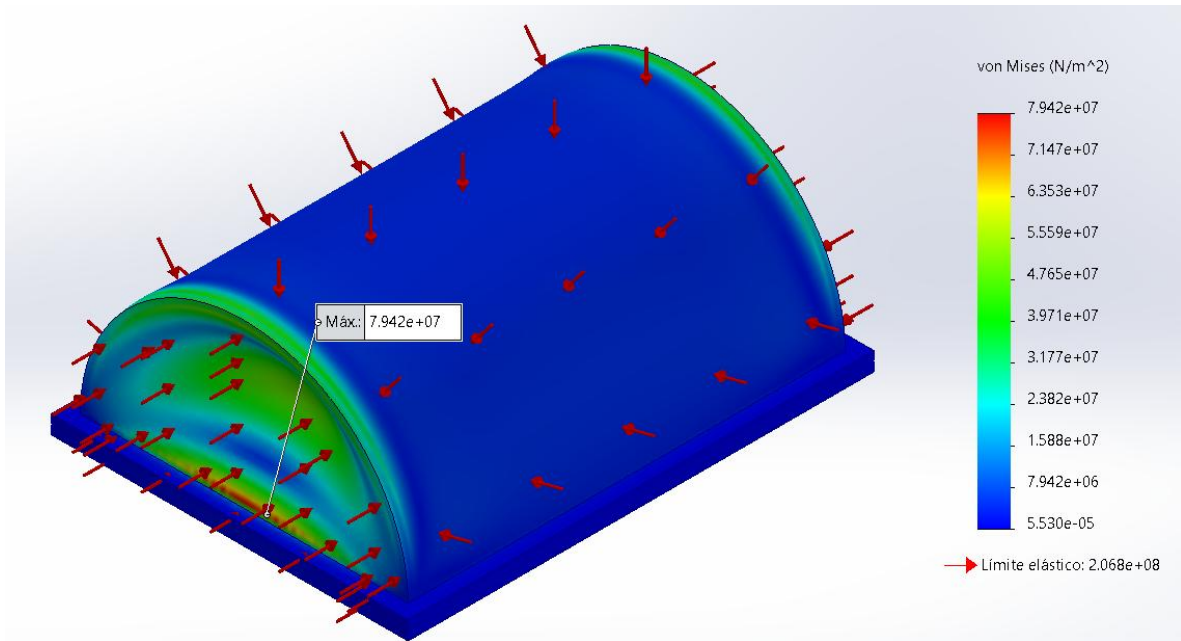
14 mm



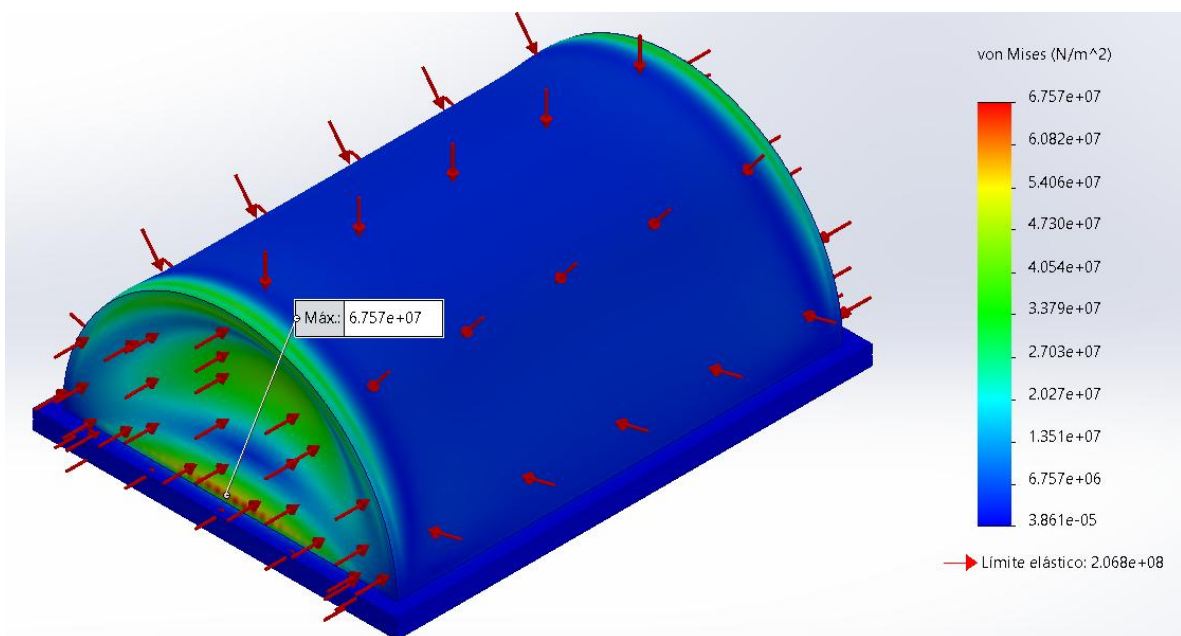
16 mm



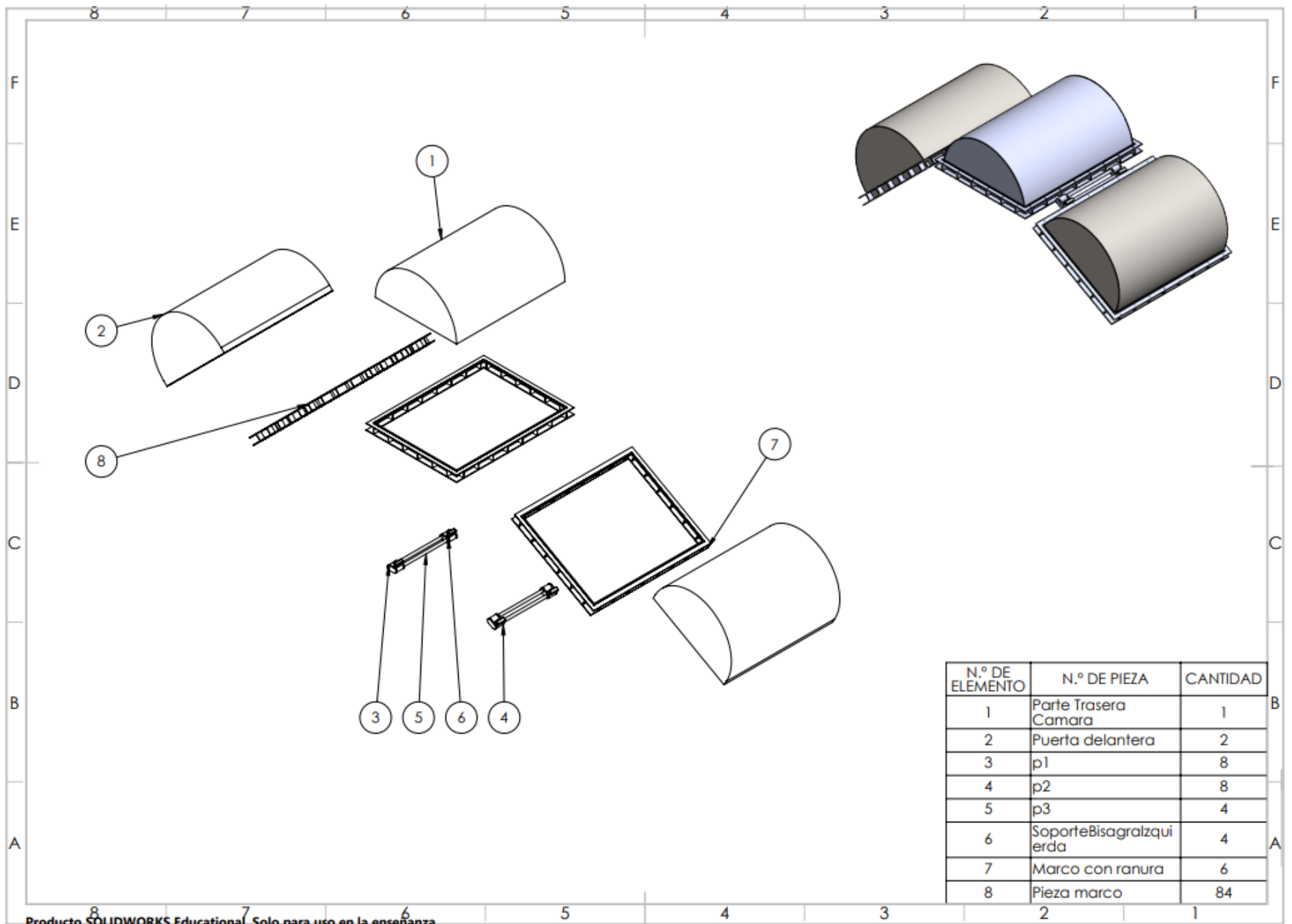
18 mm



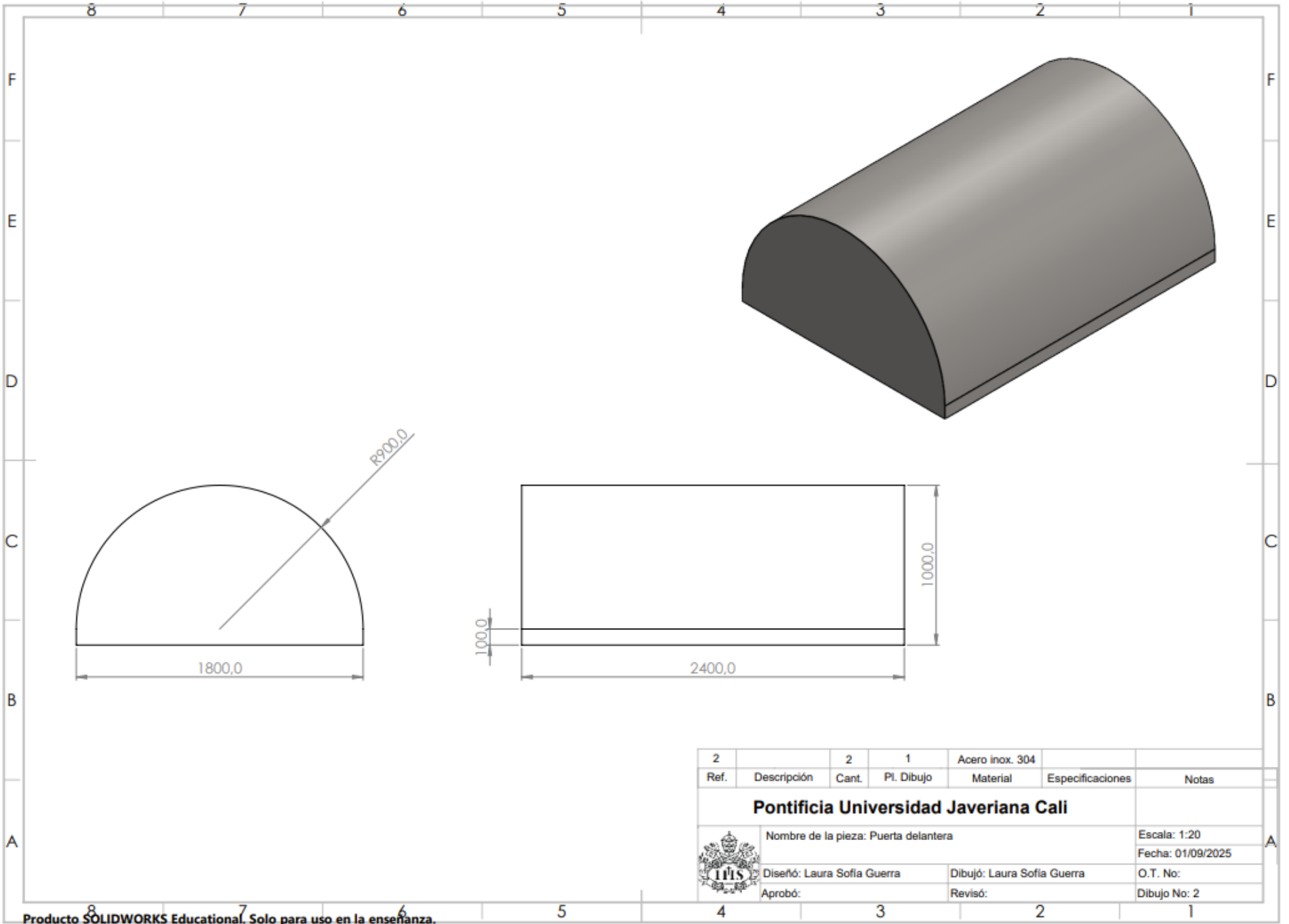
20mm



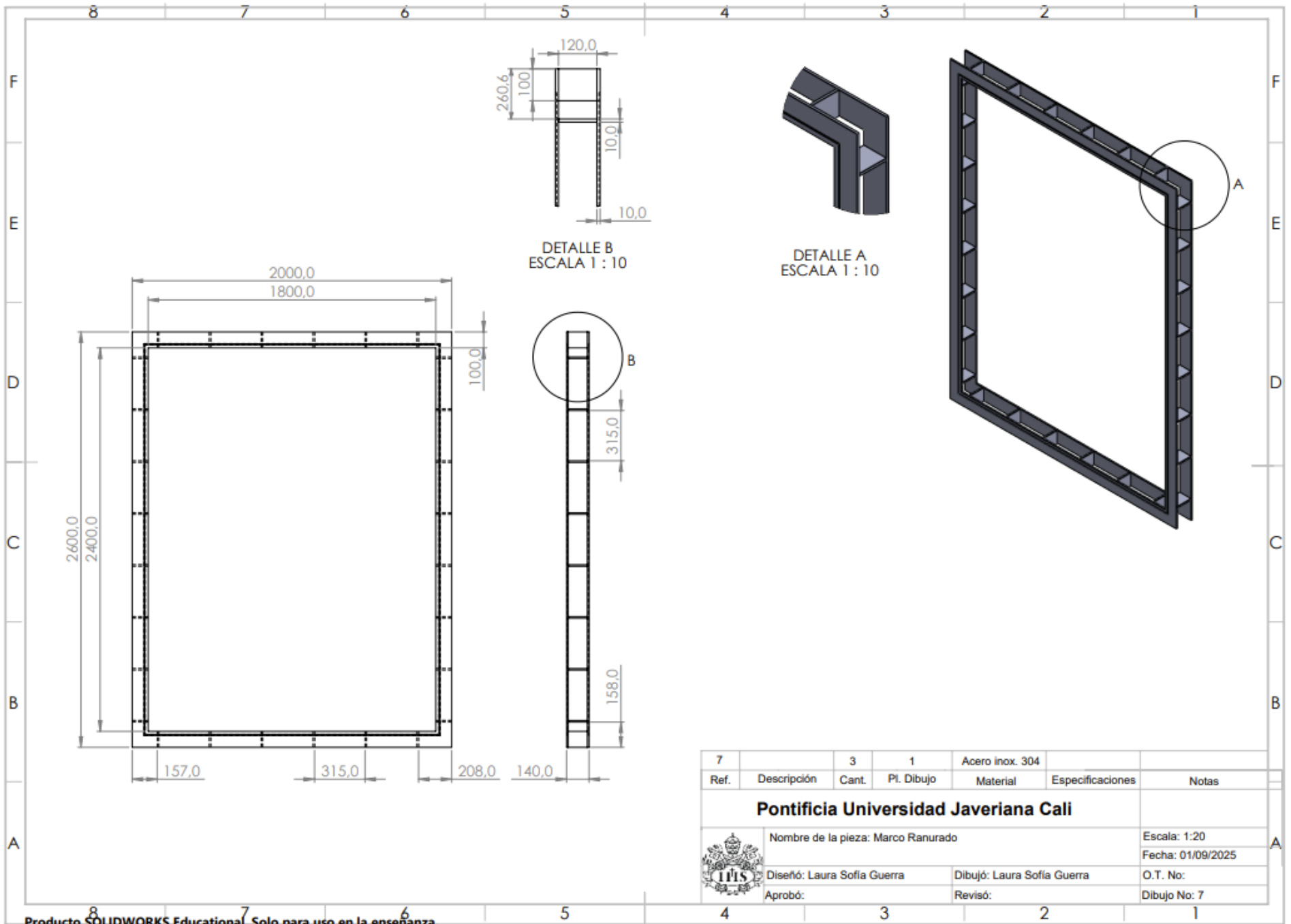
Anexo 3. Planos.



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Parte Trasera Camara	1
2	Puerta delantera	2
3	p1	8
4	p2	8
5	p3	4
6	SoporteBisagraIzquierda	4
7	Marco con ranura	6
8	Pieza marco	84



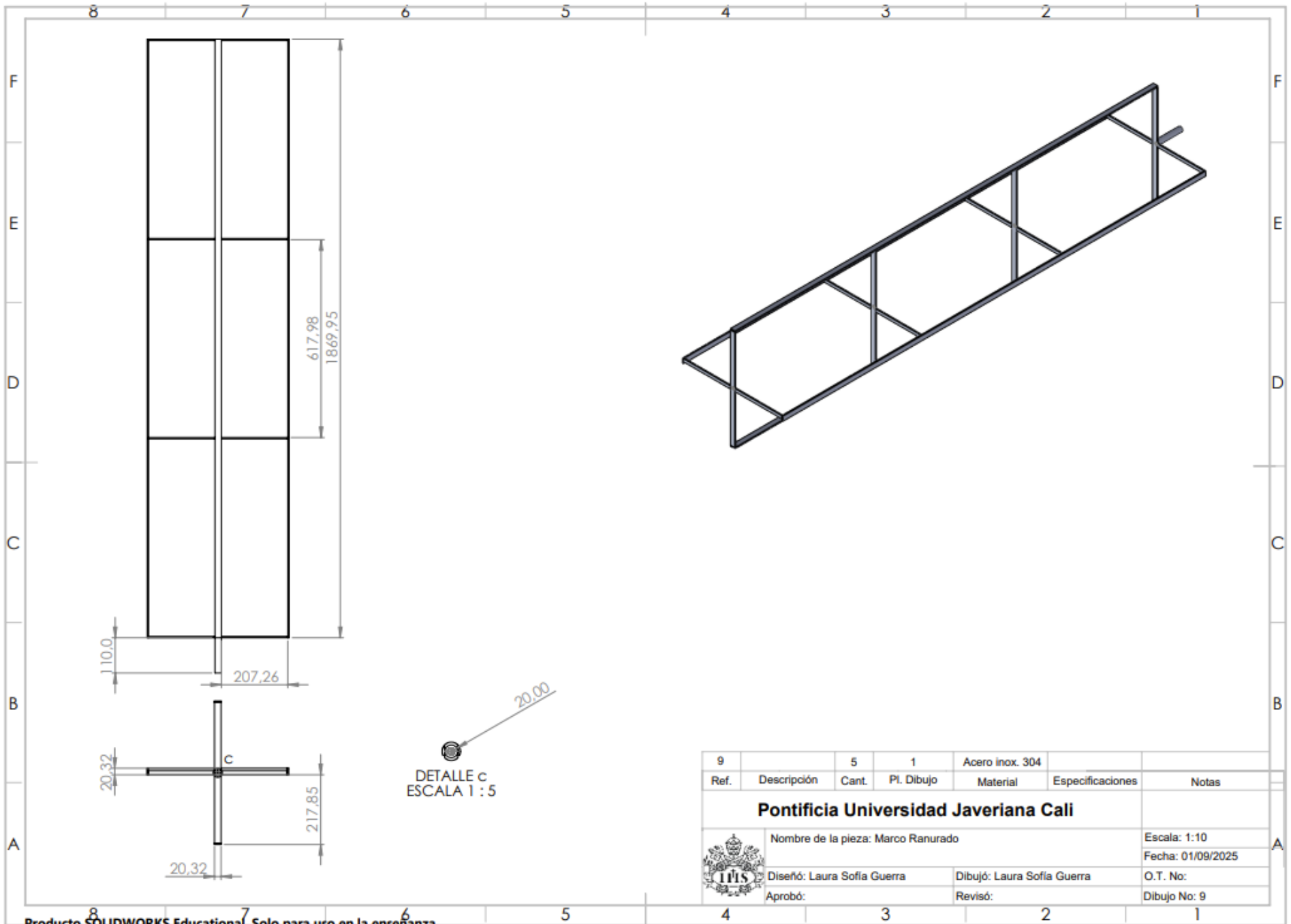
2		2	1	Acero inox. 304		
Ref.	Descripción	Cant.	Pl. Dibujo	Material	Especificaciones	Notas
Pontificia Universidad Javeriana Cali						
Nombre de la pieza: Puerta delantera					Escala: 1:20	
					Fecha: 01/09/2025	
Diseñó: Laura Sofía Guerra				Dibujó: Laura Sofía Guerra		O.T. No:
Aprobó:				Revisó:		Dibujo No: 2



DETALLE B
ESCALA 1 : 10

DETALLE A
ESCALA 1 : 10

7		3	1	Acero inox. 304		
Ref.	Descripción	Cant.	Pl. Dibujo	Material	Especificaciones	Notas
Pontificia Universidad Javeriana Cali						
Nombre de la pieza: Marco Ranurado					Escala: 1:20	
Diseño: Laura Sofia Guerra					Fecha: 01/09/2025	
Aprobó:					O.T. No:	
Revisó:					Dibujo No: 7	



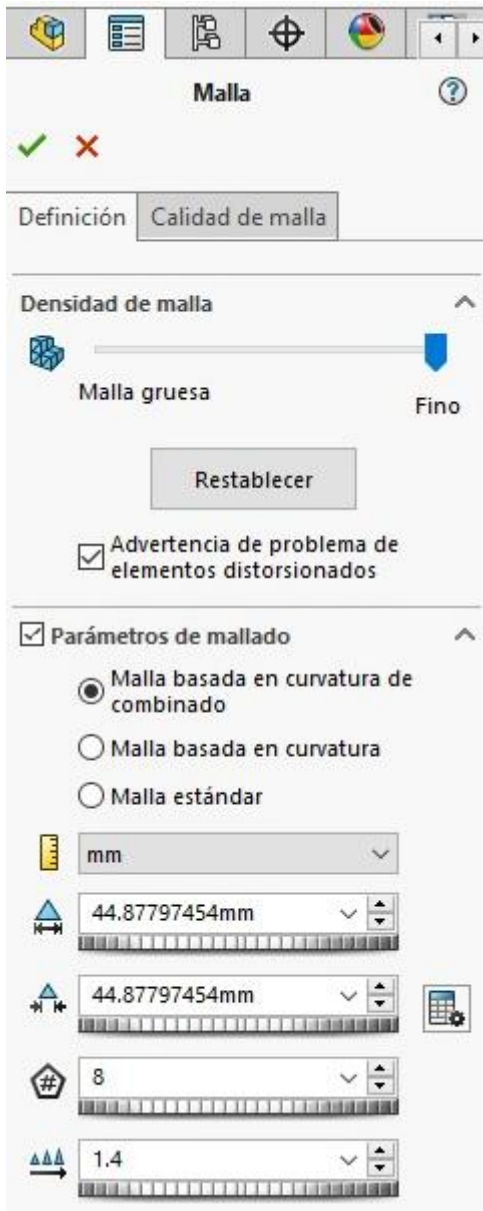
Anexo 4.

Tabla de Propiedades Acero Inoxidable 304 - SolidWorks

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	1.9e+11	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.29	N/D
Módulo cortante	7.5e+10	N/m ²
Densidad de masa	8000	kg/m ³
Límite de tracción	517017000	N/m ²
Límite de compresión		N/m ²
Límite elástico	206807000	N/m ²
Coefficiente de expansión térmica	1.8e-05	/K
Conductividad térmica	16	W/(m·K)
Calor específico	500	J/(kg·K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

Anexo 5.

Parámetros de mallado



Anexo 6.

Referencias portamuestra

a)	b)
----	----



c)



d)



a)[131], b)[132], c)[131] d)[133]

Dibujo idea inicial

