

DISEÑO Y MODELADO 3D DE UN REACTOR CVD PARA EL DESARROLLO DE MATERIALES SEMICONDUCTORES



<https://doi.org/10.22533/at.ed.3161225080415>

Fecha de aceptación: 14/07/2025

Ángel O. Paredes Balan

Universidad Autónoma de Campeche,
Estudiante de Mecánica Eléctrica
de la Facultad de Ingeniería,
San Francisco de Campeche, México.

Germán Escalante Notario

Universidad Autónoma de Campeche,
Posgrado de la Facultad de Ingeniería,
San Francisco de Campeche, México.
ORCID: 0000-0002-5900-4570

Mauricio I. Huchin Miss

Universidad Autónoma de Campeche,
Posgrado de la Facultad de Ingeniería,
San Francisco de Campeche, México.
ORCID: 0000-0002-5669-9098

Enrique Escalante-Notario

Instituto Politécnico Nacional,
Escuela Superior de Cómputo,
Ciudad de México, México.
ORCID: 0000-0001-9748-853X

Antonio Coyopol

Benemérita Universidad Autónoma de
Puebla,
Posgrado en Dispositivos
Semiconductores,
Puebla, México.
ORCID: 0000-0001-5498-5640

Roberto C. Canto Canul

Universidad Autónoma de Campeche
Facultad de Ingeniería
San Francisco de Campeche, México

Ana María Zunza Carenzo

Universidad Autónoma de Campeche,
Estudiante de Posgrado de la Facultad de
Ingeniería,
San Francisco de Campeche, México.

Resumen: El presente trabajo tiene como eje central el diseño tridimensional (3D) de un reactor de depósito químico en fase vapor (CVD), enfocado específicamente en la etapa de modelado y simulación computacional utilizando SolidWorks, una de las herramientas más robustas de diseño asistido por computadora (CAD) en el ámbito de la ingeniería. Este diseño se concibió con el propósito de desarrollar un sistema experimental funcional, adaptable y de bajo costo para la síntesis de materiales semiconductores, principalmente en contextos académicos o de investigación emergente. A través de SolidWorks, se generó un modelo detallado del reactor que incluyó componentes clave como la cámara de reacción, el sistema de calefacción

resistivo, las entradas de gases y el soporte para sustratos. La construcción virtual permitió realizar simulaciones de ensamblaje y análisis de interferencias mecánicas, con lo cual se logró optimizar el espacio interno del reactor, reducir pérdidas térmicas y garantizar una distribución uniforme de gases reactivos. Además, el entorno CAD facilitó la evaluación de distintas configuraciones geométricas sin incurrir en costos adicionales de fabricación, acelerando el proceso de iteración del diseño. El uso de SolidWorks permitió también generar planos técnicos y vistas explosionadas que facilitaron el proceso de manufactura y el montaje del sistema. Esta metodología de diseño previo al desarrollo físico del reactor representa una herramienta clave en la implementación de tecnologías emergentes, ya que minimiza riesgos, mejora la precisión del ensamblaje final y permite documentar rigurosamente cada componente del sistema. En este sentido, el modelado 3D no solo fungió como un medio de visualización, sino como una etapa crítica de validación técnica y funcional.

Palabras clave: Modelado 3D, SolidWorks, CAD, diseño de reactor.

DESIGN AND 3D MODELING OF A CVD REACTOR FOR THE DEVELOPMENT OF SEMICONDUCTOR MATERIALS

Abstract: This work focuses on the three-dimensional (3D) design of a chemical vapor deposition (CVD) reactor, focusing specifically on the computational modeling and simulation stage using SolidWorks, one of the most robust computer-aided design (CAD) tools in the engineering field. This design was conceived with the purpose of developing a functional, adaptable, and low-cost experimental system for the synthesis of semiconductor materials, mainly in academic or emerging research contexts. Through SolidWorks, a detailed model of the reactor was generated, including key components such as the reaction chamber, the resistive heating system, the gas inlets, and the substrate support. The virtual construction allowed assembly simulations and mechanical interference analyses, which optimized the internal space of the reactor, reduced thermal losses, and guaranteed a uniform distribution of reactive gases. Furthermore, the CAD environment facilitated the evaluation of different geometric configurations without incurring additional manufacturing costs, accelerating the design iteration process. The use of SolidWorks also enabled the generation of technical drawings and exploded views that facilitated the manufacturing process and system assembly. This design methodology prior to the physical development of the reactor represents a key tool in the implementation of emerging technologies, as it minimizes risks, improves the precision of the final assembly, and allows for the rigorous documentation of each system component. In this sense, 3D modeling not only served as a means of visualization but also as a critical stage of technical and functional validation.

Keywords: 3D modeling, SolidWorks, CAD, reactor design.

INTRODUCCIÓN

El depósito químico en fase vapor (CVD, por sus siglas en inglés) es una técnica de fabricación de materiales ampliamente utilizada para obtener polvos, fibras, recubrimientos monolíticos y películas delgadas de calidad. Este método permite la producción de metales, elementos no metálicos como el silicio y el carbono, así como compuestos avanzados tales

como carburos, nitruros y óxidos (Khodier; Sidki, 2001; Torrison et al., 2002). Actualmente, el CVD es fundamental en la fabricación de semiconductores, celdas solares, sensores y otros dispositivos optoelectrónicos (Pierson, 1999).

Fundamentos y ventajas del CVD

El CVD consiste en una reacción química heterogénea entre precursores en fase gaseosa que reaccionan sobre un sustrato, generando un depósito sólido. Este proceso permite un control preciso de los parámetros de deposición y de las propiedades resultantes del material. Entre sus ventajas destacan (Pierson, 1999):

- Elevada capacidad de recubrimiento incluso en geometrías complejas
- Altas tasas de depósito y buena uniformidad
- Adaptabilidad a diferentes variantes del proceso y composiciones de material
- No requiere equipo de alto vacío en comparación con las técnicas PVD.

No obstante, una limitación importante del CVD es el uso de precursores con alta presión de vapor, que suelen ser tóxicos o peligrosos, así como la generación de subproductos corrosivos que deben neutralizarse adecuadamente (Pierson, 1999).

Mecanismo y secuencia del proceso CVD

Algunas operaciones del CVD son relativamente simples y podrían ser optimizadas experimentalmente cambiando las variables de depósito, para obtener un depósito satisfactorio. Primero se deberá comprender que un proceso CVD está sujeto a una complicada dinámica de fluidos. El fluido es una combinación de gases, el cual es introducido en la cámara de reacción a través de conductos y al mismo tiempo es objeto de una gran variación de temperatura, antes de hacer contacto con el sustrato donde la reacción de depósito toma lugar. La reacción es heterogénea lo que involucra un cambio de estado, en este caso del gaseoso al sólido (Dobkin; Zuraw, 2003).

La secuencia de eventos que tienen lugar durante una reacción CVD se muestra gráficamente en la **Figura 1** y puede ser resumida de la siguiente manera (Fischer, 2005; Jeong-Woon Bae et al., 1999):

1. Transporte de masas de los gases reactivos desde la entrada del reactor hacia la zona de depósito.
2. Reacciones químicas en fase gaseosa que dan lugar a nuevas especies reactivas y subproductos.
3. Transporte de masas de los primeros reactantes y productos de reacción hacia la superficie del sustrato.
4. Adsorción de las especies anteriores en la superficie del sustrato.

5. Difusión superficial de las especies adsorbidas hacia el centro de crecimiento.
6. Reacciones superficiales.
7. Desorción de subproductos.
8. Difusión y transporte de los subproductos fuera de la superficie.
9. Transporte de masas de los subproductos hacia la salida del reactor.

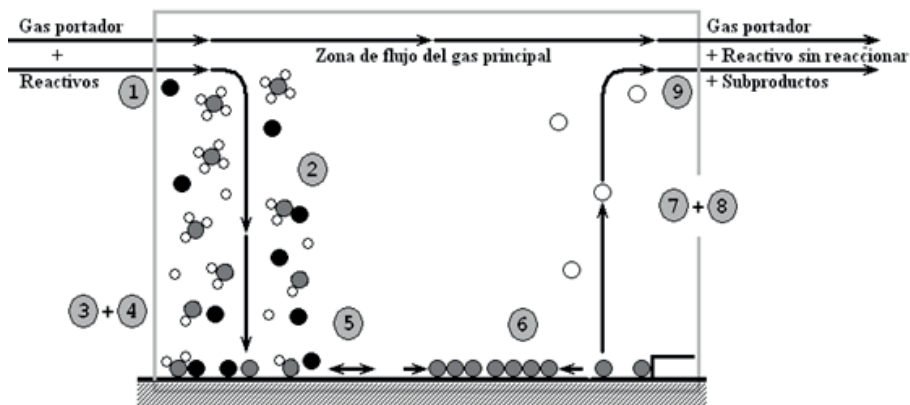


Figura 1. Esquema de eventos fundamentales durante el depósito por CVD (Binions; P., 2011).

Selección de precursores

La elección de los reactivos adecuados es esencial para garantizar una reacción eficiente, limpia y segura. Los principales criterios incluyen: alta volatilidad a baja temperatura, alta pureza, estabilidad química y una cinética favorable sin generar subproductos indeseados (Pierson, 1999).

DISEÑO Y MODELADO 3D DE REACTOR CVD MEDIANTE SOLIDWORKS

El desarrollo y validación de sistemas CVD puede optimizarse significativamente mediante el modelado tridimensional utilizando herramientas CAD. En este contexto, SolidWorks representa una plataforma poderosa que permite simular y visualizar en detalle el diseño del reactor antes de su fabricación física. El modelo 3D incluye la cámara de reacción, entradas de gases, sistema de calefacción, soporte del sustrato y salidas de subproductos. Mediante este entorno virtual, se pueden realizar simulaciones de ensamblaje, análisis de interferencias, estudios de flujo y distribución térmica. Estas funcionalidades no solo reducen errores de diseño, sino que también aceleran el ciclo de desarrollo, disminuyen costos y facilitan la documentación técnica del sistema (Todd; Allen; Alting, 1994; Zeid, 2010).

El modelado 3D es particularmente valioso para la educación en ingeniería y para laboratorios con recursos limitados, al permitir la visualización realista y la mejora iterativa del diseño sin necesidad de prototipos físicos. Esta metodología, además, puede ser extendida a otras tecnologías de síntesis de materiales.

Diseño de la base inferior del reactor CVD

El diseño de la base inferior inició a partir de un croquis circular, extruido para representar el volumen principal (ver **Figura 2a**). Esta operación proporcionó un cuerpo sólido de revolución, que define el contorno exterior del soporte inferior del reactor. Posteriormente, como se muestra en la **Figura 2b**, se añadieron extrusiones concéntricas adicionales con diámetros diferenciados, generando niveles escalonados que cumplen funciones tanto estructurales como funcionales.

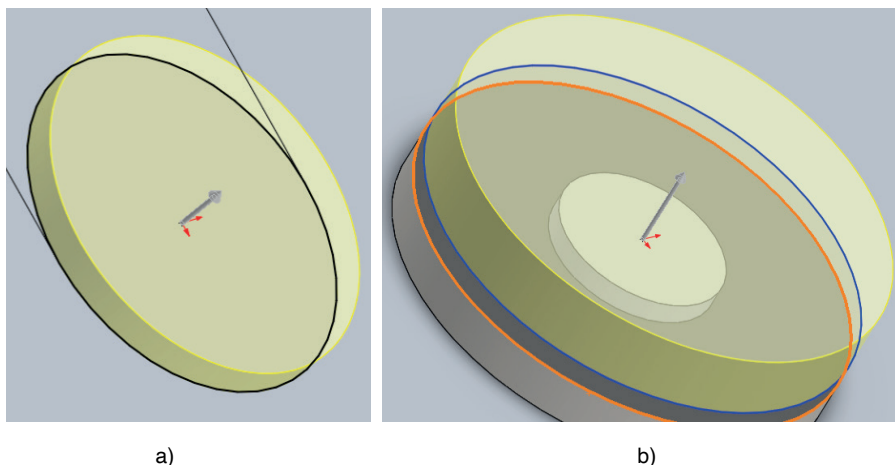


Figura 2. Base del reactor CVD, a) soporte inferior, b) soporte de sujeción.

Estas plataformas circulares sirven como referencia para el montaje de componentes internos, como la resistencia calefactora y los elementos de sujeción. Además, la presencia de cavidades interiores garantiza la accesibilidad a las zonas donde se alojarán sensores o tornillería de fijación. Las diferencias en el espesor y la altura de cada segmento fueron modeladas para representar los detalles mecánicos de la base real del reactor, mejorando la precisión en el ensamblaje posterior y facilitando la integración con las secciones superior e intermedia.

Insersión de orificios funcionales

Se agregaron cortes concéntricos en el cuerpo de la base del reactor para alojar componentes críticos como soportes de resistencias y sensores térmicos. Estas perforaciones fueron modeladas estratégicamente para garantizar la compatibilidad dimensional con los elementos de montaje y para asegurar una correcta disipación térmica durante la operación. Como se muestra en la Figura 3a, cada orificio fue diseñado utilizando herramientas de extrusión combinadas con la función de roscado helicoidal de SolidWorks, generando superficies roscadas que permiten el acoplamiento directo de elementos de fijación. Este enfoque facilita el ensamblaje y desmontaje de resistencias térmicas (ver Figura 3b) y sensores térmicos (termopares), sin requerir adhesivos ni sujeciones externas.

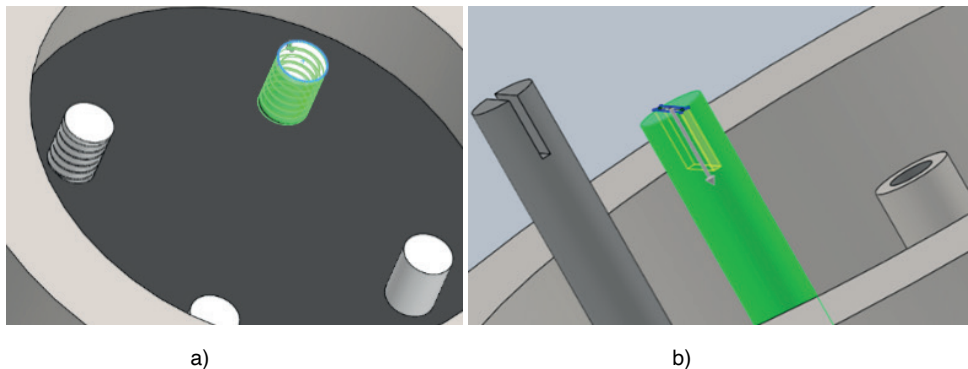


Figura 3. Base del reactor, a) orificios funcionales, b) soporte de resistencia.

En la **Figura 4** se muestra la colocación simétrica de orificios mediante el uso de matrices circulares (en color amarillo). Esta estrategia de distribución permite una fijación equilibrada de todos los elementos que componen el anillo de sujeción de la base del reactor. La simetría en la ubicación de los tornillos es clave para asegurar una compresión uniforme sobre la cámara intermedia (vidrio de cuarzo), evitando tensiones mecánicas irregulares que podrían comprometer la integridad del sistema durante el calentamiento o enfriamiento. Además, se observan componentes internos como tubos guía y bases hexagonales (para termopares), los cuales fueron modelados con precisión a partir de dimensiones estandarizadas. Estos elementos fueron insertados como piezas individuales en el ensamblaje, asegurando su correcta ubicación mediante relaciones de coincidencia y alineación axial.

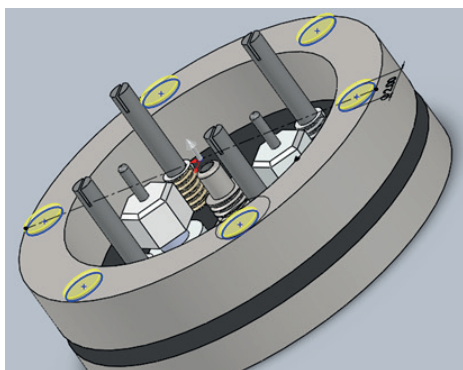


Figura 4. Distribución simétrica de orificios mediante matriz circular para fijación estructural uniforme.

La base del reactor completamente ensamblada, integrando todos los componentes descritos anteriormente, se muestra en la **Figura 5**. Se aprecia claramente la disposición de tornillos sujetadores externos, sellos, sensores y conexiones estructurales. Este ensamblaje representa la validación final del diseño en el entorno CAD, donde se comprueba que

no existen interferencias geométricas y que todos los elementos encajan con tolerancias funcionales. El modelo permite anticipar el comportamiento del sistema real, facilitando la generación de planos técnicos, listas de materiales y procedimientos de ensamblaje para la fabricación en taller.

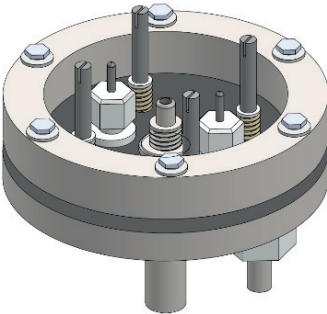


Figura 5. Ensamblaje total de la base del reactor CVD.

Cámara de reacción

La cámara de reacción del reactor fue construida como un cilindro hueco extruido a partir de un croquis circular, como se muestra en la **Figura 6a**. En esta etapa inicial del modelado se definieron las dimensiones base (diámetro y altura) directamente en el croquis, lo que permitió establecer parámetros geométricos fundamentales para el volumen del reactor. Esta forma cilíndrica fue elegida por su capacidad de distribución térmica uniforme y su compatibilidad estructural con los sistemas de fijación superior e inferior.

Una vez definida la geometría, se aplicó un material translúcido a través del administrador de apariencias de SolidWorks (ver **Figura 6b**), simulando el uso de vidrio de cuarzo. Esta simulación es especialmente útil en entornos de laboratorio, donde es necesario observar visualmente el comportamiento interno durante los procesos de calentamiento, transporte de gases o generación de productos.

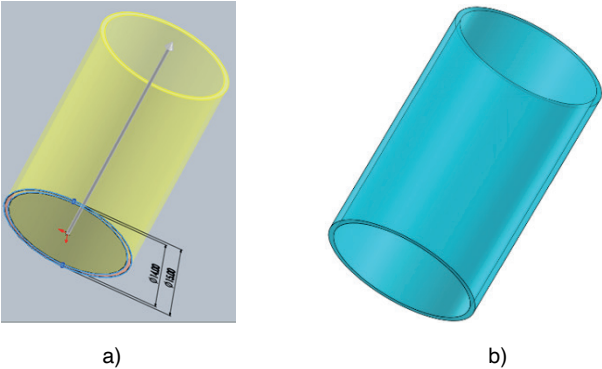


Figura 6. Modelado CAD de la cámara de reacción, a) extrusión cilíndrica, b) simulación visual de material tipo cuarzo.

La cámara fue diseñada para ensamblarse por compresión entre la base inferior y la tapa superior, utilizando tolerancias ajustadas para asegurar un cierre hermético sin necesidad de adhesivos o empaques complejos. El grosor de la pared fue definido de acuerdo con criterios térmicos y mecánicos, asegurando resistencia frente a gradientes de temperatura sin comprometer la transparencia ni la integridad estructural del cilindro. Este diseño modular también permite reemplazar la cámara en caso de fractura o contaminación, lo cual es especialmente importante en estudios experimentales repetitivos o reactivos agresivos.

Tapa superior del reactor

La tapa superior del reactor fue modelada con el objetivo de asegurar de forma eficiente la cámara intermedia, garantizando un sellado mecánico uniforme durante las condiciones de operación. Como se muestra en la **Figura 7a**, el diseño integra una estructura de anillo con múltiples tornillos de compresión dispuestos de forma simétrica mediante una matriz circular. Esta distribución uniforme permite aplicar presión homogénea sobre el cilindro de cuarzo, evitando deformaciones o puntos de fuga.

En el diseño también se incluyó un sistema de soporte interno para sostener el sustrato, representado como un porta-muestra sujeto mediante dos brazos de fijación. Esta configuración, se muestra en la **Figura 7b**, proporciona una exposición perpendicular del sustrato con respecto al flujo de gases reactivos. La orientación perpendicular puede favorecer una distribución más uniforme del depósito sobre la superficie activa, además de facilitar su visualización a través del tubo de cuarzo.

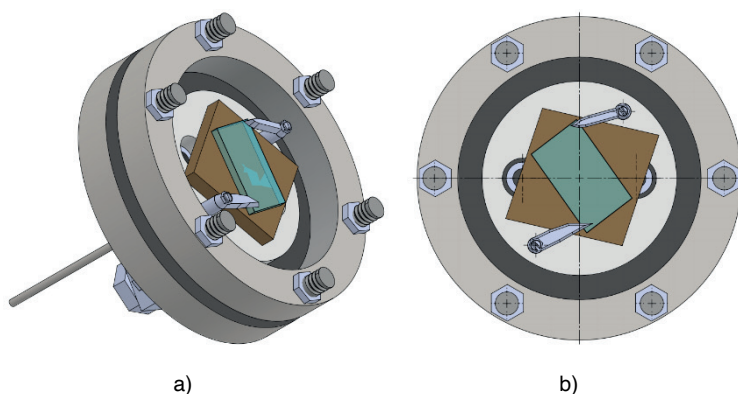


Figura 7. Ensamble superior del reactor, a) vista isométrica con sistema de fijación del porta-sustrato, b) vista superior con elementos de sujeción.

Adicionalmente, se incorporaron alojamientos roscados para sensores de temperatura o puertos de solda de gases, ampliando así la funcionalidad del sistema más allá de un montaje básico. El uso de geometrías modulares y componentes ensamblables

permite modificar esta sección según las condiciones experimentales deseadas, lo cual resulta crucial para un reactor de propósito académico o de desarrollo. El diseño CAD asegura que todos los elementos se ajusten con precisión, maximizando la estabilidad y minimizando interferencias mecánicas internas.

Diseño de la resistencia calefactora

El alambre calefactor fue modelado como una espiral tridimensional con sección circular, utilizando la herramienta de barrido (sweep) en SolidWorks. Para su definición geométrica, se especificaron parámetros precisos como el número de espiras, altura total y paso entre giros, permitiendo generar una estructura de calentamiento coherente con aplicaciones de tipo resistivo. Como se muestra en la **Figura 8**, los extremos de la hélice se conectan de manera continua a dos brazos laterales mediante la herramienta recubrir (loft), lo cual permite una transición suave entre el eje helicoidal y los conductores lineales. Esta geometría asegura un contacto mecánico y eléctrico óptimo con los postes de alimentación.

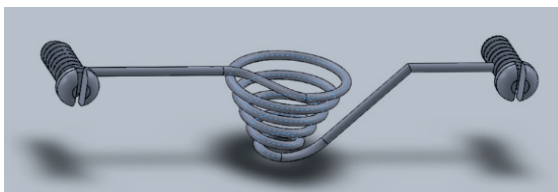


Figura 8. Modelado de la resistencia calefactora.

En los postes de sujeción se incorporaron ranuras y roscas con el propósito de alojar las terminales de la resistencia calefactora. Mediante la aplicación de tornillos de presión, se asegura el contacto mecánico y eléctrico del alambre con los puntos de alimentación. Esta configuración permite la fijación directa del elemento calefactor al sistema, ya sea mediante tuercas o conectores metálicos. La simulación de este mecanismo de anclaje es crucial no solo desde el punto de vista estructural, sino también para garantizar la continuidad del circuito eléctrico bajo condiciones térmicas exigentes.

DISEÑO INTEGRAL Y ENSAMBLAJE VIRTUAL DEL REACTOR CVD

El modelo 3D del reactor CVD, una vez ensamblado en su totalidad como se observa en las **Figuras 9a** y **9b**, integra cada uno de los componentes previamente diseñados: base inferior, cámara de reacción, tapa superior, resistencia calefactora, soportes y conectores. Esta representación tridimensional detallada permitió generar una documentación técnica completa, que incluye cortes seccionales, listas de materiales y planos de ensamblaje para su fabricación en taller.

La **Figura 9a** muestra una vista isométrica donde se aprecia claramente la disposición interna de las resistencias, los sensores y la estructura de soporte del sustrato (parte superior), lo cual facilita la comprensión del funcionamiento interno del reactor. Esta

vista es especialmente útil para análisis de interferencias y estudios de flujo o distribución térmica en simulaciones posteriores.

Por su parte, la **Figura 9b** presenta el reactor completamente ensamblado con la cámara cerrada, ofreciendo una visión externa del sistema en condiciones operativas. Este modelo final no solo verifica la compatibilidad geométrica entre componentes, sino que también representa un recurso clave para validar aspectos funcionales antes de la manufactura física, como el sellado por compresión, la accesibilidad para mantenimiento o la disposición de los puertos de entrada y salida de gases.

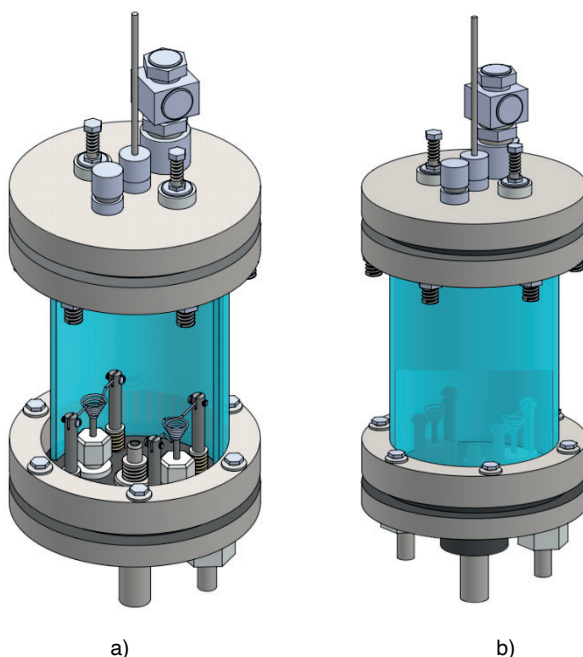


Figura 9. Ensamble final del reactor CVD: a) vista isométrica con componentes internos visibles, b) vista externa del sistema totalmente ensamblado.

El modelado del reactor completo mediante SolidWorks constituye una herramienta crítica en la fase de prototipado digital, permitiendo iterar y optimizar el diseño de forma precisa y eficiente, minimizando errores de fabricación y asegurando la funcionalidad del sistema desde la primera etapa.

CONCLUSIONES

El modelado tridimensional del reactor CVD permitió validar el diseño completo antes de su fabricación, garantizando la compatibilidad entre componentes y optimizando el uso de recursos. La simulación detallada en entorno CAD facilitó la detección de interferencias, el ajuste de tolerancias y la generación de planos técnicos listos para manufactura. Este enfoque redujo significativamente los tiempos de desarrollo y los costos asociados a errores

de diseño, al tiempo que mejoró la precisión del ensamblaje. Además, la modularidad del sistema permite adaptarlo a distintas configuraciones experimentales según las necesidades de síntesis de materiales. En el contexto educativo y de investigación, el modelo constituye una herramienta pedagógica útil para comprender conceptos de diseño mecánico y ensamblaje funcional. Su integración en entornos universitarios promueve la formación técnica con base en tecnologías modernas y el fortalecimiento de capacidades en ingeniería aplicada a procesos de depósito químico en fase vapor.

RECOMENDACIONES

El modelo desarrollado puede ser adaptado para nuevas condiciones de operación, tales como mayores exigencias térmicas o variaciones de presión, mediante ajustes en geometría, materiales o aislamiento. Se recomienda integrar sensores adicionales y sistemas de control para mejorar el monitoreo del proceso y la estabilidad operativa. Asimismo, se sugiere considerar configuraciones multipuerto que permitan el manejo de flujos independientes o reactivos duales, ampliando las capacidades del sistema. Finalmente, se aconseja validar el diseño mediante la construcción de un prototipo físico, lo que permitirá ajustar parámetros críticos antes de su implementación definitiva.

REFERENCIAS

BINIONS, Russell; P., Ivan. Novel Chemical Vapour Deposition Routes to Nanocomposite Thin Films. *In: Advances in Nanocomposites - Synthesis, Characterization and Industrial Applications. [S.l.]: InTech, 2011.*

DOBKIN, Daniel M.; ZURAW, Michael K. Principles of Chemical Vapor Deposition. Dordrecht: Springer Netherlands, 2003.

FISCHER, Roland A. Precursor Chemistry of Advanced Materials: CVD, ALD and Nanoparticles. *[S.l.]: Springer, 2005.*

JEONG-WOON BAE, Jeong-Woon Bae *et al.* Tin Oxide Films Deposited by Ozone-Assisted Thermal Chemical Vapor Deposition. *Japanese Journal of Applied Physics*, v. 38, n. 5R, p. 2917, 1 maio 1999.

KHODIER, S. A.; SIDKI, H. M. The effect of the deposition method on the optical properties of SiO₂ thin films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, v. 12, n. 2, p. 107–109, fev. 2001.

PIERSON, Hugh O. Handbook of Chemical Vapor Deposition (CVD): Principles, technology, and applications. Noyes Publications ed. Norwich, New York: Noyes Publications, 1999.

TODD, Robert H.; ALLEN, Dell K.; ALTING, Leo. Manufacturing Processes Reference Guide. *[S.l.]: Industrial Press Inc, 1994.*

TORRISON, L. *et al.* Morphological and optical properties of Si nanostructures imbedded in SiO₂ and Si₃N₄ films grown by single source chemical vapor deposition. *Journal of Applied Physics*, v. 92, n. 12, p. 7475–7480, 15 dez. 2002.

ZEID, Ibrahim. Mastering CAD/CAM. Boston: McGraw-Hill Education, 2010.