

UNIVERSIDAD PANAMERICANA
FACULTAD DE INGENIERÍA

Con estudios incorporados a la
Secretaría de Educación Pública

**“Optimización del diseño opto mecánico de un
módulo de filtros de Germanio mediante elemento finito”**

C A S O P R Á C T I C O

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
MAESTRÍA EN INGENIERÍA

P R E S E N T A

Andoni Balderrama Méndez

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Roberto González Ojeda

MÉXICO, CIUDAD DE MÉXICO

2024

Resumen

El diseño de componentes opto mecánicos de bajo tamaño tiene comportamientos mecánicos que no son fáciles de predecir a ciertas condiciones de temperatura y de esfuerzo mecánico, aunado a que la elaboración de prototipos y pruebas de estos componentes son de alto costo con tiempos de entrega largos por lo que se requiere que el diseño esté previamente definido y validado antes de su fabricación para no incurrir en gastos y retrasos innecesarios.

El objetivo principal de este trabajo es determinar las dimensiones optimas de un nuevo diseño de los componentes que integran un módulo de filtros de Germanio que por medio del uso de herramientas de simulación por elemento finito se va a predecir comportamiento mecánico y térmico del módulo bajo las condiciones de operación que regularmente está sometido. Los resultados obtenidos de la simulación junto las herramientas estadísticas de análisis multivariable nos ayudarán a determinar y validar las dimensiones optimas de los componentes y de esa manera poder mandar a fabricar prototipos certeros que pasen la primera iteración de pruebas.

Dedicatoria

Esta obra va dirigida a mi esposa Nohemi que siempre hemos trabajado en equipo para sobresalir en este mundo complejo y también lo dedico nuestro hijo Damián que es nuestra prioridad y motivación para ser mejores seres humanos y sobresalir profesionalmente.

Índice de Contenido

1. Introducción.....	8
2. Antecedentes y diagnóstico de la situación	9
3. Marco Teórico	19
3.1. Análisis por elemento finito.....	19
3.2. Simulaciones Térmicas por elemento finito.....	23
3.3. Fenómeno de Radiación Térmica y consideraciones para simulaciones térmicas.....	25
3.4. Diseño de Experimentos y Regresión Multivariable	28
4. Solución propuesta e implementación.....	30
4.1. Optimización del diseño del módulo de filtros	30
4.2. Metodología	37
5. Resultados, análisis e interpretación.....	41
5.1. Simulación inicial de radiación y convección térmica en sistema abierto en Solidworks	41
5.2. Segunda simulación de radiación térmica en sistema cerrado en Solidworks.	42
5.3. Tercera simulación de conducción térmica en los componentes internos de la cámara en Simsolid.	44
5.4. Diseño de Experimentos (DOE) con Minitab.	45
5.5. Simulación termo-mecánica en Simsolid.....	46
5.6. Resultados estadísticos en Minitab	50
6. Conclusiones.....	56

Listado de Figuras

Figura 1.	Equipo de Protección Personal - empresa HON.....	9
Figura 2.	Cámara Rebellion.	10
Figura 3.	Lecturas de fugas de gas de la cámara Rebellion	11
Figura 4.	Sensor Infrarrojo de la Cámara Rebellion	12
Figura 5.	Despiece de sensor Infrarrojo de la Cámara Rebellion.	12
Figura 6.	Diseño actual del módulo de Filtros	14
Figura 7.	Ensamble del Módulo de Filtros.....	15
Figura 8.	Posición ideal de los Filtros de Germanio y sus holguras del diseño Actual del Módulo. 16	16
Figura 9.	Posición errónea de los Filtros de Germanio del diseño Actual del Módulo.	16
Figura 10.	Escape de luz a través de las ranuras.	17
Figura 11.	Proceso de Elemento Finito	20
Figura 12.	Cargas aplicadas al módulo de Filtros de Germanio.	22
Figura 13.	Condiciones del Análisis de Conducción Térmica al módulo de Filtros.....	25
Figura 14.	Comportamiento del fenómeno de radiación entre superficies.....	26
Figura 15.	Condiciones del Análisis de Radiación a la carcasa	27
Figura 16.	Diferencias de diseño digitales entre el original de la placa media y como se acoplan los filtros.....	31
Figura 17.	Área de los filtros con respecto a los orificios circulares de la placa frontal.....	32
Figura 18.	Acomodo de los Filtros en las ranuras de la placa de en medio	33
Figura 19.	Corte de sección de la vista lateral del diseño actual del Módulo.	34
Figura 20.	Corte de sección de la vista lateral del nuevo diseño del Módulo	35
Figura 21.	Explosionado del nuevo diseño del módulo de Filtros.	36
Figura 22.	Dimensiones críticas que influyen en la sujeción de los filtros	36
Figura 23.	Condiciones del Análisis de Radiación al módulo de Filtros	38
Figura 24.	Número de experimentos recomendados para cada factor	39
Figura 25.	Simulación de temperatura por Radiación Térmica hacia la carcasa	42
Figura 26.	Simulación de temperatura por Radiación Térmica en el módulo de filtros.	43
Figura 27.	Resultados de la simulación de conducción en el módulo de filtros.	44
Figura 28.	Localización del esfuerzo máximo en los módulos de filtros. Resultados de 4 simulaciones cuyo esfuerzo máximo es mayor al esfuerzo de fluencia.....	47
Figura 29.	Comportamiento y dirección del esfuerzo en el módulo de filtros.....	48

Figura 30. Micrografía de inspección de filtros de Germanio donde se encontraron grietas pronunciadas.	50
Figura 31. Pareto de efectos sobre el esfuerzo del material calculado con alfa de 0.05	51
Figura 32. Efectos sobre el esfuerzo calculado mediante DOE	52
Figura 33. Interacción entre variables	53
Figura 34. Coeficientes del valor P de Minitab.....	55
Figura 35. Tolerancia nueva del espesor de placa.....	57
Figura 36. Simulaciones similares a 10, 12, 14 y 15 (a-d) fijando el espesor de la placa intermedia en 0.635 mm	57

Listado de Tablas

Tabla 1.	Características Técnicas de la cámara Rebellion.....	11
Tabla 2.	Propiedades de los Materiales del Módulo de Filtros.....	21
Tabla 3.	Torque recomendado por el proveedor.....	22
Tabla 4.	Temperaturas a las que la cámara está sometida durante el día.	23
Tabla 5.	Variables de un análisis térmico.	24
Tabla 6.	Conductividad Térmica de los Materiales.	24
Tabla 7.	Valor de emisividad de los componentes mecánicos de la cámara	26
Tabla 8.	Porcentaje de transmisión de la luz de cada filtro.	32
Tabla 9.	Tolerancias de las piezas del módulo de filtros.....	36
Tabla 10.	Factores del DOE.....	39
Tabla 11.	Experimentos del DOE.	45
Tabla 12.	Resultados de las 16 simulaciones.....	49
Tabla 13.	Multiplicación de los coeficientes por las variables de diseño que generan mayores esfuerzos 54	
Tabla 14.	Multiplicación de los coeficientes por las variables de diseño que generan menores esfuerzos 54	
Tabla 15.	Experimentos del DOE.	56
Tabla 16.	Experimentos del DOE después de ajustar la tolerancia de la placa intermedia. ...	58

1. Introducción

Este trabajo plantea el uso herramientas de simulación por elemento finito en conjunto con análisis estadístico para evaluar el comportamiento mecánico del nuevo diseño de un módulo óptico para cámaras infrarrojas enfocándose en los problemas de ensamble del módulo. Las condiciones ambientales extremas que sufre la cámara hacen necesario encontrar cuáles son las dimensiones optimas de los componentes para resistir los efectos de dilatación y deterioro, evaluando el ensamble en una sola iteración de pruebas sin sobrepasar las limitantes de tiempo y presupuesto establecidos en el proyecto. Los objetivos específicos son encontrar cuáles son los parámetros de diseño óptimos en el que el módulo pueda resistir las temperaturas más extremas de operación y los torques aplicados y recomendados por el proveedor.

En el Capítulo 1 (Antecedentes y diagnóstico de la situación), se explica el funcionamiento de la cámara y del módulo óptico, los problemas del diseño actual, el nuevo diseño propuesto y las condiciones de temperatura y ensamble a las cuales será sometido el nuevo diseño del módulo.

El Capítulo 2 (Marco teórico) presenta una revisión de la literatura sobre soluciones de problemas de diseño usando elemento finito en conjunto con herramientas estadísticas, al igual que conceptos fundamentales del simulaciones térmicas y diseño de experimentos.

En el Capítulo 3 (Solución propuesta e implementación) se indica paso a paso el procedimiento a seguir de las simulaciones térmicas y estructurales y en base a los resultados obtenidos se observa la aplicación de herramientas estadísticas.

El Capítulo 4 (Resultados, análisis e interpretación) presenta los resultados de las simulaciones en conjunto con los de las herramientas estadísticas y el Capítulo 6 (Conclusiones) indica si el diseño nuevo cumple con las condiciones de temperatura y ensamble planteadas.

2. Antecedentes y diagnóstico de la situación

La empresa HON produce una variedad de productos de consumo, servicios de ingeniería y sistemas aeroespaciales para una amplia variedad de clientes que van desde particulares hasta empresas multinacionales, por lo cual existen diversas unidades de negocio, una de ellas dedicada al diseño, producción y ventas equipo de protección personal (Fig. 1) para trabajadores que se desempeñan actividades de alto riesgo en industrias como la petroquímica, construcción y minería.

Figura 1. Equipo de Protección Personal - empresa HON.



Seguridad eléctrica

Proteja a su fuerza laboral contra peligros eléctricos. Explore marcas como Salisbury y Electrigrard.



Protección contra caídas

Seguridad de vanguardia para trabajos en altura. Equipo de protección contra caídas, desde conectores de anclaje hasta rescate y dispositivos de descenso, y todo lo demás.



Gas y detección de llamas

Seguridad que siempre está al pendiente. Diversos productos y soluciones de detección de gases diseñados para proteger a sus trabajadores y su planta.



Protección para manos

Seguridad que siempre está a la mano. Reduzca el riesgo de lesiones en manos y brazos con guantes de seguridad industrial de alto rendimiento y mangas resistentes a cortes.



Protección para cabeza, ojos y cara

Desarrollados a través de una extensa investigación de clientes, nuestros protectores faciales y pantallas proporcionan mayor seguridad, visibilidad y comodidad para un uso más prolongado.



Protección auditiva

Elija entre una línea completa de productos y accesorios de protección auditiva industrial, diseñados para la seguridad auditiva militar y en el lugar de trabajo.



Protección respiratoria

Las soluciones de protección respiratoria de Honeywell garantizan el cumplimiento, la durabilidad, la comodidad y una productividad laboral mejorada. Diseñado para cualquier entorno.

Nota. Adaptado de la página de internet de la compañía Honeywell (<https://sps.honeywell.com/mx/es/products/safety>).

En la industria petroquímica existen diferentes tipos de riesgos cuando se trabaja en Zonas ATEX (atmósferas explosivas). El riesgo de accidentes obliga al uso de detectores y equipos de respiración asistida, por lo cual la detección temprana de fugas es imperativa para

resguardar la seguridad del personal en el área. La mayor parte de los productos petroquímicos se fabrican a partir de un número relativamente pequeño de hidrocarburos, entre ellos el metano, el etano, propano, butano y los aromáticos como el benceno, tolueno y xileno; que durante su transporte en tuberías pueden generar fugas y considerando que suelen ser inodoros, incoloros e insípidos, su falta de detección y posterior acumulación del gas junto con otro medio reactivo del ambiente, generarán explosiones (Jespen, 2016).

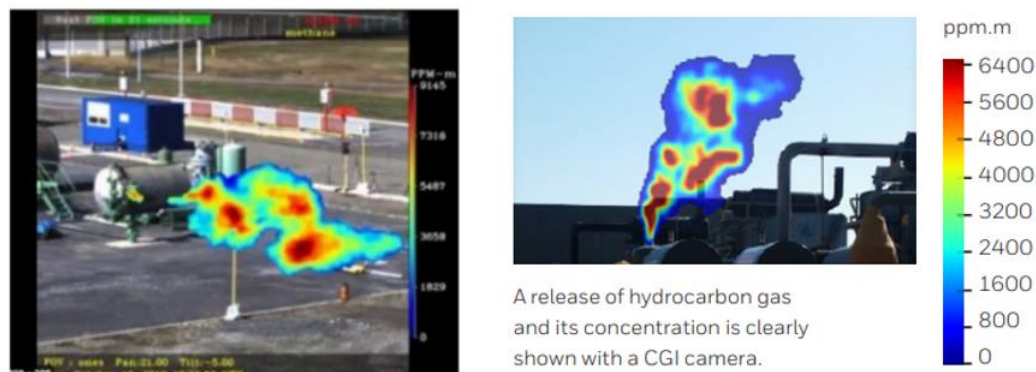
Para la detección oportuna y en tiempo de riesgos, HON ofrece una cámara detectora de gases llamada Rebellion (Fig. 2) que utiliza tecnología avanzada de imágenes hiperespectrales para capturar tanto el espectro infrarrojo como el video visible y monitorear, cuantificar y mostrar fugas de gases explosivos, tóxicos o dañinos en tiempo real, funcionando las 24 horas del día, los 7 días de la semana y bajo condiciones climáticas extremas, brindando imágenes precisas de nubes de gas, especiación y concentración de gas (Fig. 3), enviando la información a los centros de monitoreo y seguridad (Tabla 1).

Figura 2. Cámara Rebellion.



Nota. Adaptado de Rebellion Gas Cloud Imaging (GCI) Mini Camera Operation Manual (p. 12) , Version 2022

Figura 3. Lecturas de fugas de gas de la cámara Rebellion



Nota. Adaptado de Rebellion Gas Cloud Imaging (GCI) Mini Camera Operation Manual (p. 32), Version 2022

Tabla 1. Características Técnicas de la cámara Rebellion.

Technical Specifications	
Sensor Type	Snapshot Hyperspectral Infrared Imaging
Target Gas (up to 7 analytics monitored simultaneously)	1,1 - Difluoroethane, 1,2 - Dichloroethane, Acetic Acid, Ammonia, Benzene Boron TriFluoride, Butadiene, Ethane, Ethane/Ethylene/Propane Mix, Ethanol, Ethylene, Ethylene/Propane Mix, Gasoline, HVN, Hydrogen Chloride, Hydrogen Sulfide, Iso-Butane, Iso-Butylene, Iso-Pentane, Jet Fuel, LCN, LPG, Methane, Methanol, m-Xylene, Naptha, N-Butane, N-Pentane, Propane, Proylene, p-Xylene, R22, Sulfure Dioxide, Toluene, Vinyl Chloride
Alert/Alarm	Fully automatic alarm with live visual display, audible alert, email, and/or text message
Range of Detection (optical)	Lowest Detectable Level (LDL) to FSD (100%) (LDL varies depending on target gas)
Detector Range (area of coverage)	Long Range: up to 1,700 m [5,577 ft] Wide Field: up to 660 m [2,165 ft]
Speed of Response	Less than 1 second (scan path and number of stops dependent)
Position Control	Pan +/-180° (360° ful
False Alarm Rate	≤ 1%
Operating Temperature	-40°C to +50°C [-40°F to +131°F]
Operating Humidity	0-99% (non condensing)
Power Supply and Consumption	Camera: 24 VDC, 10A (peak), 7A (continuous) Pan/Tilt: 48 VDC, 12A (peak), 6.4A (continuous), 0.5A (idle) Analyzer: 120/240 VAC (< 600 W)
Size	133 cm x 36.8 cm x 36.6 cm [44.5 in x 14.5 in x 14.4 in]
Weight	Camera: 51.7 kg [70 lbs] PT Weights: 20.4 kg [45 lbs] Junction box: 5.9 kg [13 lbs] Pan/Tilt: 39.9 kg [88 lbs] Pole: 15.9 kg [35 lbs] Total: 113.8 kg [251 lbs]

Nota. Adaptado de la página de internet de la compañía Honeywell (<https://pmt.honeywell.com/us/en/gas-cloud-imaging>).

La operación de la cámara se sustenta en un sensor infrarrojo integrado, tal como se muestra en la Figura 4. Este sensor está compuesto por un módulo con filtros de germanio y otro módulo conformado por lentes de silicio, además de incluir un sensor óptico y una tarjeta PCB (Placa de Circuito Impreso). Todos estos componentes están estructuralmente soportados por placas y cilindros elaborados en aluminio 1100-O, detallados en la Figura 5.

Figura 4. Sensor Infrarrojo de la Cámara Rebellion

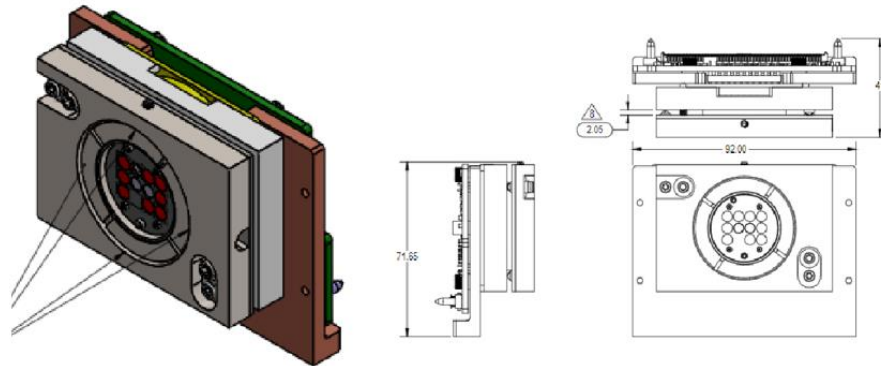
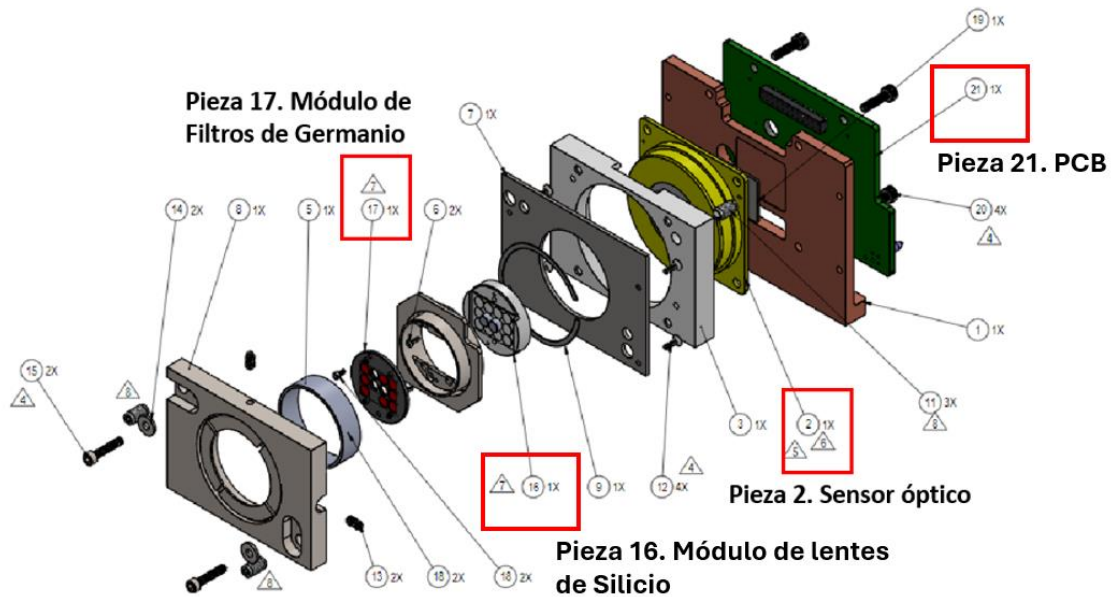


Figura 5. Despiece de sensor Infrarrojo de la Cámara Rebellion.



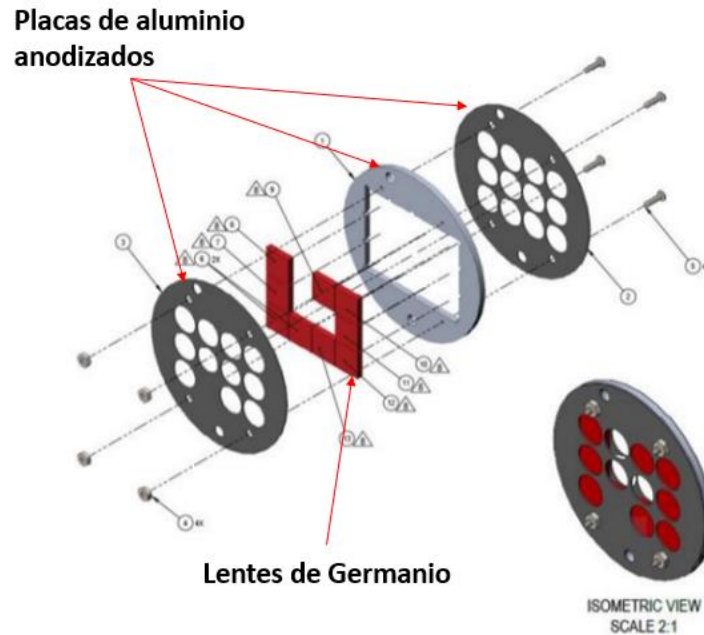
Los dos módulos mencionados desempeñan roles cruciales al recibir y filtrar las ondas electromagnéticas procedentes de la luz mezclada con gas a través de diversos canales con diferentes longitudes de onda. Estas ondas son convertidas por el sensor óptico en información espectral y espacial que posteriormente es transmitida a la PCB. Esta placa procesa los datos recibidos para analizarlos y proporcionar al usuario información detallada sobre el tipo y cantidad del gas presente en el ambiente examinado.

Existen múltiples tipos de luz, cada una caracterizada por su frecuencia y longitud de onda específicas. En este contexto, el módulo de filtros está equipado con nueve placas cuadradas de germanio diseñadas para absorber y transmitir longitudes de onda entre 8 y 14 μm . Este rango se especializa en filtrar exclusivamente la luz infrarroja térmica hacia el sensor óptico. Es relevante destacar que la luz infrarroja se utiliza eficazmente para la detección de gases puesto que diferentes gases absorben este tipo de luz en diversas formas.

Los filtros están meticulosamente ensamblados y alojados entre tres placas de aluminio tratadas con anodizado negro como se muestra en la figura 6. Cada material empleado posee un valor específico denominado emisividad, que indica la capacidad del mismo para emitir energía infrarroja. Dicho valor varía entre 0 y 1, siendo los materiales anodizados negros caracterizados por tener un valor máximo (1), lo cual les confiere propiedades ideales como cuerpos negros; es decir, no transmiten ni absorben luz infrarroja. Esta propiedad es crucial pues permite que la luz infrarroja sea dirigida directamente hacia las lentes elaboradas con Germanio sin interferencias.

Este diseño sofisticado y calculado permite el empleo eficaz del dispositivo en aplicaciones críticas donde precisión y fiabilidad son indispensables.

Figura 6. Diseño actual del módulo de Filtros



El proceso actual de ensamblaje del módulo de filtros de germanio se ilustra en la Figura 7. Dicho procedimiento inicia con el posicionamiento de la placa trasera del módulo sobre una superficie plana. A continuación, se aplica adhesivo a la cara de contacto tanto de los filtros como de la placa trasera. Utilizando pinzas, cada filtro es colocado manualmente sobre la placa, asegurándose que alineen correctamente para cubrir todos los orificios presentes en dicha placa. Posteriormente, se procede a instalar las placas media y superior. Finaliza el proceso con la inserción y ajuste manual de tornillos usando un desatornillador y pinzas para ensamblar firmemente todos los componentes.

Figura 7. Ensamble del Módulo de Filtros.



El actual diseño presenta las siguientes problemáticas:

- Ensamble muy complejo y de larga duración debido a que el tamaño de los lentes de Germanio es de tamaño muy pequeño (5 x 5 x 1 mm) y se tienen que poner manualmente en una posición específica, por lo que al ponerlos a mano genera errores debido a que la mano del operador empieza a temblarle y no los pone adecuadamente en la posición deseada, por lo cual se producen en problemas en la filtración de la luz a través de los lentes.
- La posición ideal de los Filtros de germanio después del atornillado tiene lograr que el centro del área cuadrada este al centro del orificio circular de la placa delantera, sin embargo esto no llega a suceder debido a que cada uno Filtros presenta holguras en su alrededor (Fig.8) provocando mucha movilidad de los filtros y logrando que el área de algunos filtros no lleguen a cubrir el perímetro del orificios (Fig.9), por lo que la luz no entra en su totalidad dejando escapar altas cantidades de luz que no son aprovechadas por el sensor óptico y provocan errores de medición en la cámara (Fig. 10).

Figura 8. Posición ideal de los Filtros de Germanio y sus holguras del diseño Actual del Módulo.

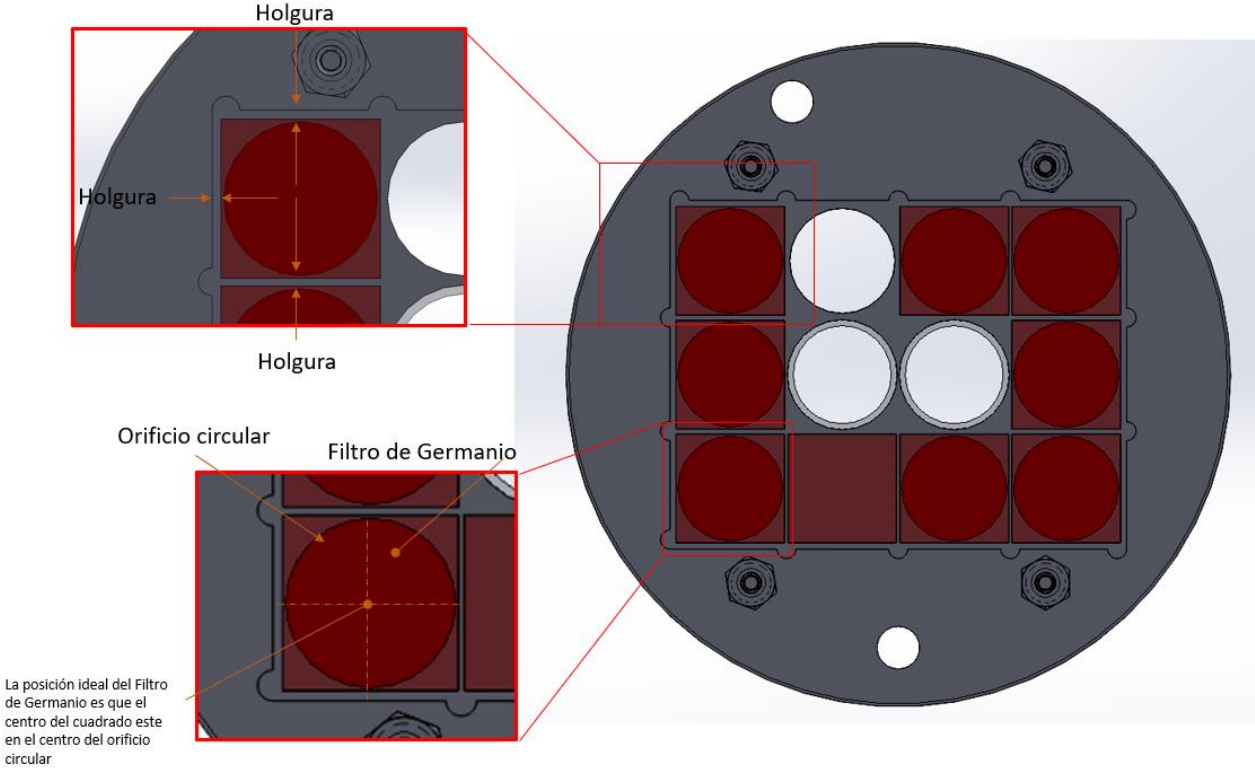


Figura 9. Posición errónea de los Filtros de Germanio del diseño Actual del Módulo.

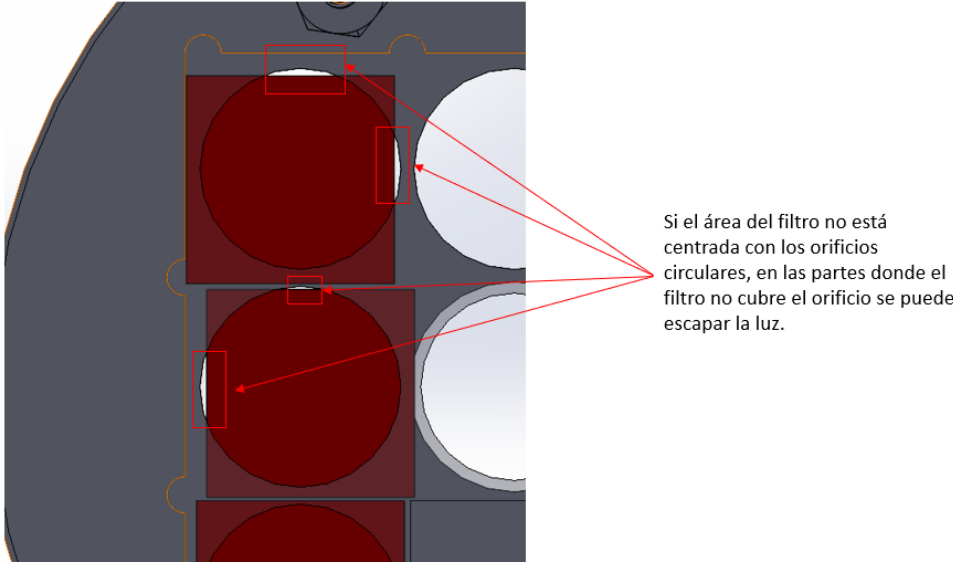
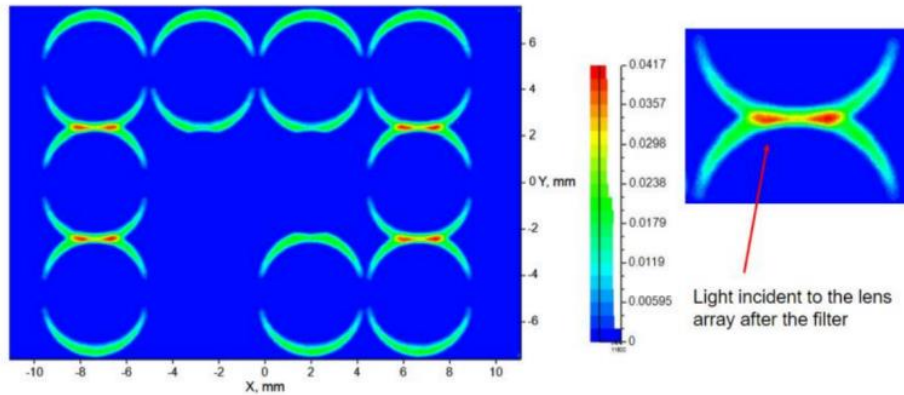


Figura 10. Escape de luz a través de las ranuras.



Estas deficiencias representan pérdidas por \$1,500,000.00 USD anuales debido a que las cámaras llegan a fallar con el tiempo por este mal ensamble y hay reclamos por parte del cliente de que la cámara no está detectando las fugas de gas por las malas mediciones, por lo que se tiene que hacer la inversión en viajes a las instalaciones del cliente, revisión del funcionamiento de la cámara, llevar la cámara a la planta de manufactura, cambiar los módulos por unos nuevos y regresar la cámara con el cliente.

La solución a las problemáticas presentadas deriva en modificar la forma geométrica de las placas de aluminio y los filtros para poder ensamblar el módulo con facilidad y aprovechar al máximo la absorción de luz de los filtros y encontrar las dimensiones óptimas que deberían tener las placas y los filtros para que pueda resistir las condiciones de ensamble del módulo y las condiciones de operación de la cámara.

Modificar el diseño opto-mecánico del módulo representa un desafío considerable debido a la multitud de variables relacionadas con las dimensiones geométricas de cada componente. Este proceso requiere la fabricación de prototipos del nuevo diseño, adaptados a las nuevas

especificaciones dimensionales, y su posterior sometimiento a rigurosas pruebas físicas para validar tanto su fiabilidad como su funcionamiento. En caso de fallos durante estas pruebas, es necesario realizar rediseños adicionales y repetir las evaluaciones físicas. Esta serie iterativa de rediseño y prueba puede resultar extremadamente costosa, implicando gastos significativos en la manufactura de piezas prototipo, renta de equipos de laboratorio y tiempo dedicado por parte del personal ingenieril.

Para mitigar estos costos elevados, se propone utilizar software especializado en análisis por elementos finitos junto con métodos estadísticos avanzados. Estas herramientas permitirán identificar cuáles dimensiones geométricas influyen más significativamente en el comportamiento termo-mecánico del nuevo diseño. El objetivo es determinar los valores óptimos para dichas dimensiones que garanticen la fiabilidad del producto final.

3. Marco Teórico

La simulación numérica de los problemas asociados con el diseño de diversos productos mediante el método de elementos finitos (FEM) puede contribuir al proceso de diseño de un nuevo módulo de filtros al reducir el número de pruebas necesarias. Aunque el modelado de procesos mediante simulación FEM ya se utiliza en una amplia variedad de diseños en la industria (Song et al, 2022), es necesario realizar varias iteraciones de simulación, lo que resulta en un consumo significativo de tiempo y recursos económicos debido al costo de las licencias. Por lo tanto, es importante optimizar estas simulaciones mediante el uso de herramientas estadísticas.

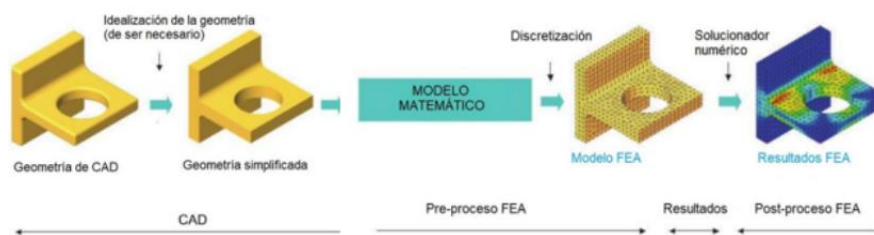
3.1. Análisis por elemento finito

Los métodos numéricos proporcionan una herramienta general para analizar geometrías arbitrarias y condiciones de carga. Entre los métodos numéricos, el análisis de elementos finitos (FEA) se ha utilizado ampliamente con éxito; sin embargo, este tipo de análisis requiere la generación de un gran conjunto de datos para obtener resultados razonablemente precisos y consume tiempo de ingeniería y recursos informáticos. FEA es una buena opción para el análisis del comportamiento mecánico, ya que ayuda a eliminar la necesidad de experimentos que requieren mucho tiempo para optimizar los parámetros de diseño (Ferre et al 2022).

El análisis de simulación se inicia con la subdivisión del modelo geométrico CAD de una pieza o ensamblaje en fragmentos denominados elementos, utilizando una malla. La dimensión y distribución de estos elementos son factores cruciales para el procesamiento preciso de los datos, proporcionando así resultados exactos sobre desplazamientos, deformaciones, distribución de esfuerzos, perfiles térmicos y otros parámetros pertinentes. El modelo matemático al igual que la

geometría es dividido en elementos finitos mediante un proceso de discretización que se manifiesta visualmente como la malla de la geometría. Sin embargo, las cargas, y las sujeciones se discretizan también y, después de que el modelo es mallado, las cargas y las sujeciones malladas son aplicadas a los nodos en la malla de elemento finito (figura 11) para que posteriormente el solucionador numérico resuelva la ecuación matricial de análisis estructural en el que se calcula, a través de los valores de la cargas y sujeciones aplicadas a los nodos, y la rigidez del material, se pueda obtener el desplazamiento nodal y de ahí la los esfuerzos (Dechaumphai et al 2019). En el presente trabajo, se tiene como objetivo determinar la distribución de esfuerzos en los filtros de germanio ocasionados por la fuerza de retención resultante del apriete de los tornillos utilizados para unir las placas de aluminio a dichos filtros. Esta simulación, que incluye una carga estructural derivada del apriete de los tornillos, se resolverá mediante la ecuación 1. (Gadala, 2020).

Figura 11. Proceso de Elemento Finito



$$[K]\{x\} = \{F\} \quad (1)$$

Donde $[K]$ es la constante de rigidez de los elementos del sistema (Tabla 2), $\{x\}$ es el vector de desplazamiento de cada nodo y $\{F\}$ es el vector de cargas aplicadas al sistema que en este

estudio es el torque de apriete T torque aplicado en los tornillos (Tabla 3) y a su vez la restricción de movimiento de la placa trasera debido a que esta no se mueve durante el ensamble. La Figura 12 ilustra el método de aplicación de cargas estructurales durante el ensamblaje del módulo de filtros. En este proceso, se aplica un torque de 0.0193 N*m a cada uno de los cuatro tornillos para fijar las placas de aluminio con los filtros de Germanio. Adicionalmente, se establece una restricción total de movimiento en la superficie posterior del módulo, que es la zona donde reposa sobre una superficie plana y lo sostiene durante su ensamble.

Tabla 2. Propiedades de los Materiales del Módulo de Filtros.

Componente	Material	Propiedad	Valor	Unidad
Filtros	Germanio de Grado óptico	Módulo de Elasticidad	1.03e11	Pa
		Relación de Poisson	2.8	-
		Densidad	5.322e3	kg/m ³
		Esfuerzo Ultimo de Tracción	1.42e8	Pa
		Esfuerzo de Fluencia	3.10e8	Pa
		Coefficiente de Expansión Térmica	5.72e-6	1/°C
		Placas delanteras y traseras	Aluminio 6061-T6	Módulo de Elasticidad
Relación de Poisson	3.3			-
Densidad	2.78e3			kg/m ³
Esfuerzo Ultimo de Tracción	4.69e8			Pa
Esfuerzo de Fluencia	3.24e8			Pa
Coefficiente de Expansión Térmica	1.21e2			1/°C
Placa de en medio	Acero Inoxidable 316			Módulo de Elasticidad
		Relación de Poisson	2.7	-
		Densidad	8e3	kg/m ³
		Esfuerzo Ultimo de Tracción	5.8e8	Pa
		Esfuerzo de Fluencia	2.9e8	Pa

Componente	Material	Propiedad	Valor	Unidad
		Coefficiente de Expansión Térmica	1.63e1	1/°C

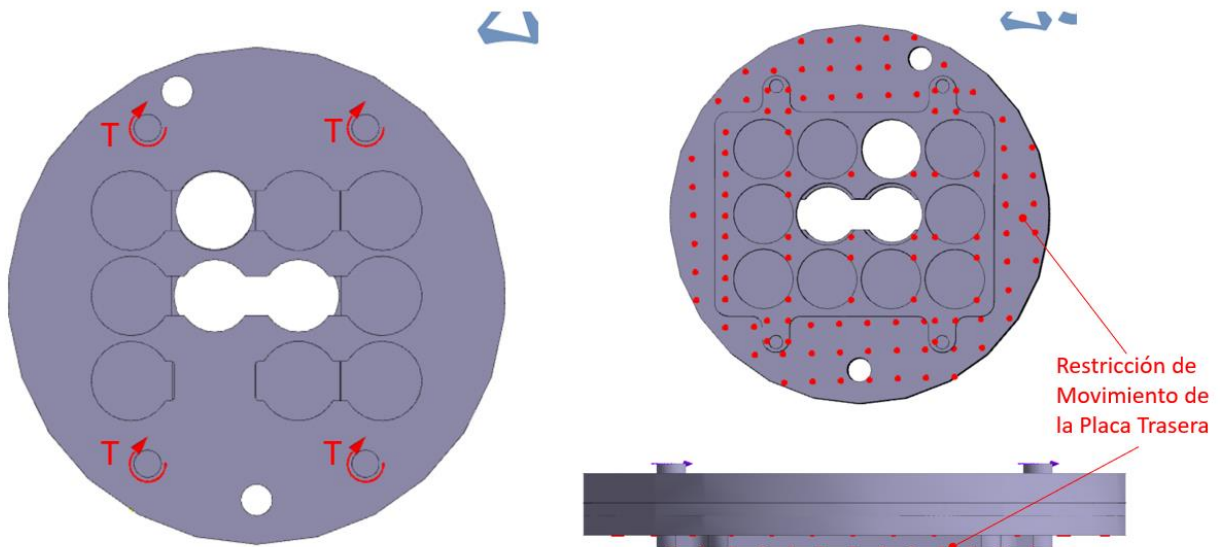
Nota. Adaptado de la biblioteca de materiales del software de elemento finito SIMSOLID.

Tabla 3. Torque recomendado por el proveedor.

Díámetro del Tornillo	Torque para Tornillo tipo T (N*m)	Torque para Tornillo tipo 0.5T (N*m)
M1	0.0193	0.00965

Nota. Adaptado del catálogo de tornillos del proveedor.

Figura 12. Cargas aplicadas al módulo de Filtros de Germanio.



3.2. Simulaciones Térmicas por elemento finito

El nuevo diseño de los módulos está sometido a cargas térmicas por las condiciones ambientales a las que es sometida la cámara (Tabla 4) que, aunado a las cargas estructurales descritas anteriormente, pueden causar daños en los módulos de los filtros, por lo que se tiene que realizar un análisis térmico y adoptar un enfoque basado en un análisis térmico mediante FEA. Los modelos numéricos empleados en simulaciones térmicas presentan una complejidad menor en comparación con las simulaciones mecánicas, debido a las características físicas de los fenómenos estudiados. Por ejemplo, la malla utilizada dispone de un único grado de libertad por nodo (temperatura), lo cual resulta en una cantidad significativamente menor de ecuaciones a resolver en comparación con una malla para estudios mecánicos; aquí cada nodo puede tener tres o seis grados de libertad dependiendo del número de elementos (Lawrence, 2022).

Debido a las particularidades numéricas inherentes a las mallas de elementos finitos, los análisis térmicos realizados bajo esta metodología se aplican generalmente para representar la conducción en la unión de medios sólidos y tanto la convección como la radiación son consideradas condiciones de frontera impuestas por las condiciones ambientales existentes, por lo tanto los análisis térmicos utilizan las variables de la Tabla 5 y son procesadas a través de la Ecuación 2.

Tabla 4. Temperaturas a las que la cámara está sometida durante el día.

00:00 a 04:00	04:00 a 09:00	09:00 a 13:00	13:00 a 17:00	17:00 a 00:00
-20 °C	10 °C	30 °C	50 °C	20 °C

Tabla 5. Variables de un análisis térmico.

Variables análisis Térmico	Unidades en SI	Unidades en Sistema Inglés
Temperatura	K	F
Flujo de calor	W/m ²	Btu/hr*ft ²
Calor	W	Btu/hr
Conductividad Térmica	W/m*k	Btu/hr*ft*F

$$[K(T)]\{T\} = \{Q(T)\} \quad (2)$$

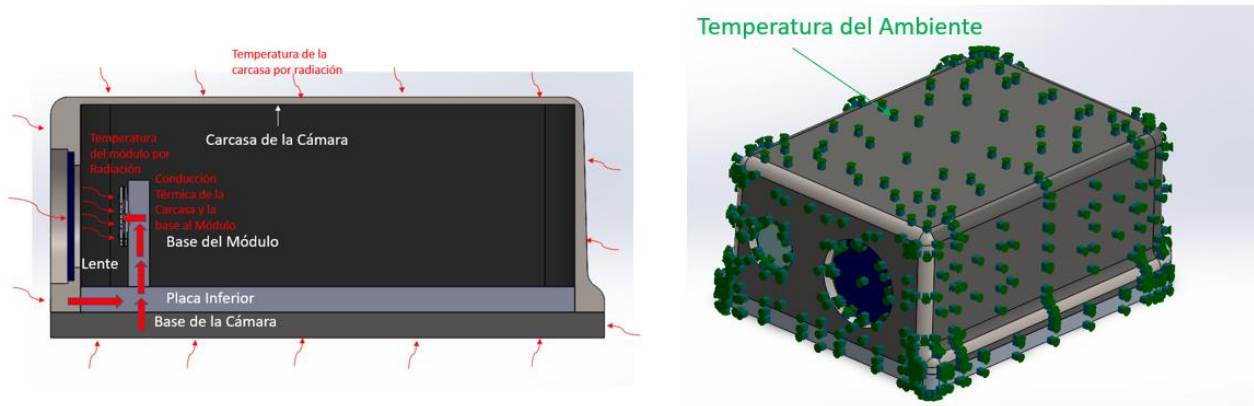
Donde $[K(T)]$ es la constante de rigidez del material en función de la temperatura que es la conductividad térmica (Tabla 6), $\{T\}$ es la Temperatura aplicada al sistema que en este caso es la temperatura del ambiente a la cámara y $\{Q(T)\}$ es la transferencia de calor entre los componentes del sistema (Figura 13).

Tabla 6. Conductividad Térmica de los Materiales.

Componente	Material	Conductividad Térmica (W/m*k)
Filtros	Germanio de grado óptico	58.61
Placa delantera y trasera del Módulo y base de la cámara	Aluminio 6061- T6	166.9
Placa Media del Módulo y Carcasa Exterior	Acero Inoxidable 316	14.6
Placa Inferior y Base del Módulo	Acero Aleado	50
Lente	Vidrio	0.749

Nota. Adaptado de la biblioteca de materiales del software de elemento finito Solidworks.

Figura 13. Condiciones del Análisis de Conducción Térmica al módulo de Filtros

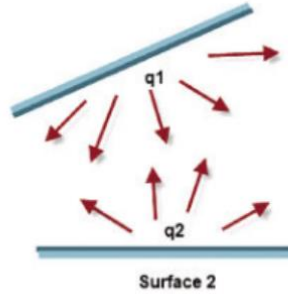


3.3. Fenómeno de Radiación Térmica y consideraciones para simulaciones térmicas

Otra consideración para el estudio es la radiación producida por el sol hacia la cámara. Cualquier superficie que tenga una temperatura superior a cero grados absoluto, teóricamente emite energía térmica por radiación. En este caso el mecanismo de transporte es por ondas electromagnéticas o fotones que emanan de la superficie. Este mecanismo no necesita un medio para pasar, por lo que la radiación puede ocurrir en el vacío. Además de emitir radiación, una superficie típica también absorberá radiación de superficies o fuentes adyacentes ya que la emisividad y la absorptividad son propiedades de la superficie. Las temperaturas relativas de cada superficie, la capacidad de absorción, la emisividad y los ángulos en los que los fotones se desplazan entre ellos determinarán si una superficie individual se está enfriando o calentando (Petela, 2010) como se muestra en la figura 14. En los análisis de elemento finito, la ecuación que describe el fenómeno de radiación depende de un término de temperatura de cuarto orden, lo cual significa que cualquier análisis de transferencia de calor que incluya los efectos de la radiación se convierte en

una solución no lineal y con condiciones transitorias (Kurowski, 2022), como se muestran en la ecuación 3.

Figura 14. Comportamiento del fenómeno de radiación entre superficies



$$q = \epsilon\sigma(T_{\text{superficie}}^4) \quad (3)$$

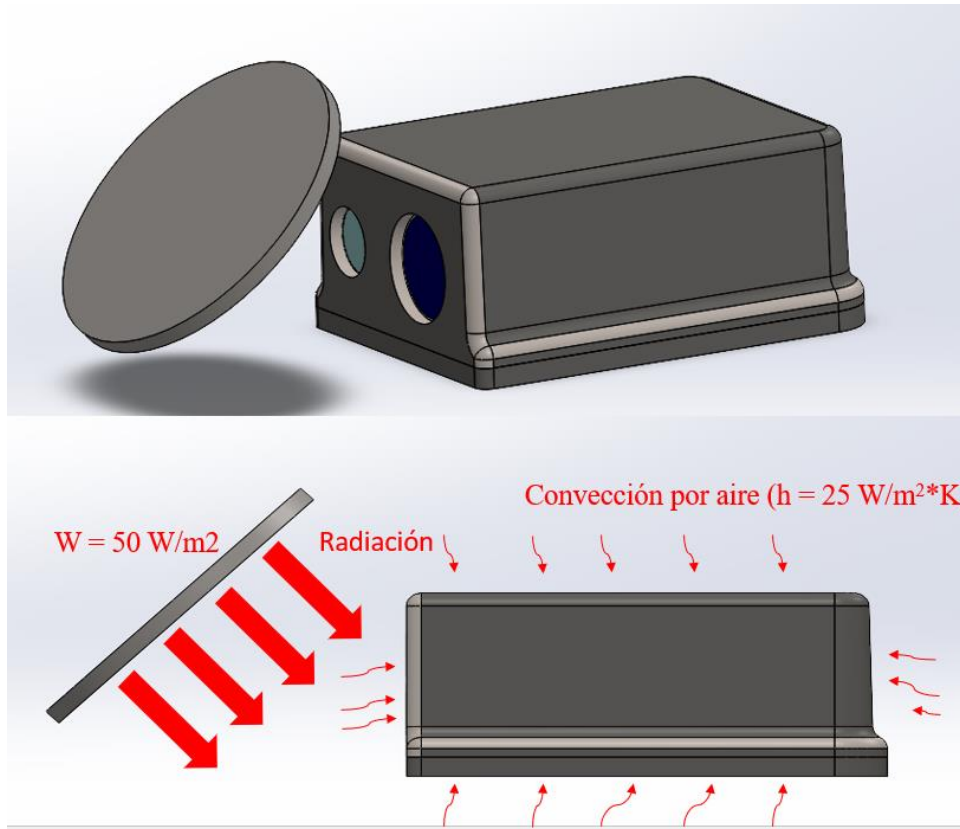
Donde ϵ es la emisividad de los materiales (Tabla 7), σ la Constante de Stefan-Boltzmann y T la temperatura de la superficies de la cámara que reciben la radiación del sol, por lo que para este estudio el sol es representado como una placa circular que emite un flujo de calor de 50 W/m^2 y el aire en el ambiente presenta transferencia de calor por convección con un coeficiente de enfriamiento a $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Figura 15)

Tabla 7. Valor de emisividad de los componentes mecánicos de la cámara

Componente	Material	Emisividad
Fuente de Radiación (Sol)	Aluminio	0.95
Lente Izquierdo	Vidrio	0.9
Lente Derecho	Germanio	0.55
Carcasa	Acero Inoxidable	0.85

Nota. Adaptado de la biblioteca de materiales del software de elemento finito Solidworks.

Figura 15. Condiciones del Análisis de Radiación a la carcasa



Hay poca información referente a simulaciones térmicas que involucren la transferencia de calor por radiación a dispositivos opto mecánicos y en su mayoría se habla de la radiación térmica en procesos de manufactura o edificios (Zhang et al, 2020) que ayuda en el entendimiento de la simulación del fenómeno de radiación solar sobre diversas geometrías y calcular las temperaturas resultantes para emplearlas como variables de entrada en simulaciones mediante elementos finitos, permitiendo analizar el comportamiento termo-mecánico de las geometrías (Gedney et al, 2022) y, subsecuentemente, identificar fallas por fatiga mecánica bajo cargas cíclicas (Kumar Sundaram et al, 2022).

3.4. Diseño de Experimentos y Regresión Multivariable

Debido al número de variables involucrados en el nuevo diseño, se tienen que realizar diversas simulaciones, por lo que para reducir el número de éstas se procede a realizar un diseño de experimentos (DOE) que es una serie de ejecuciones, o pruebas, en las que se realizan cambios en las variables de entrada y observan las respuestas. En la industria, el DOE se usa para investigar de manera sistemática las variables del proceso o del producto que influyen en la calidad del mismo. Posteriormente, estos estudios pueden orientar los esfuerzos de mejora continua hacia aspectos como la capacidad de fabricación, la confiabilidad, la calidad y el rendimiento en campo del producto (Montgomery. 2020).

Para llevar a cabo un DOE en un software estadístico, es fundamental identificar los factores que puedan generar variabilidad en la respuesta obtenida que se desea estudiar y cada factor tiene niveles que representan los grados específicos que serán considerados durante el experimento. Es importante señalar que, en el análisis matemático de modelos de diseño experimental, los niveles de los factores cuantitativos suelen ser seleccionados como límites numéricos superiores o inferiores para simplificar el número de experimentos a realizar.

El modelo matemático propuesto debe identificar la relación entre la variable de respuesta y los factores principales identificados. Es crucial que el modelo seleccionado se ajuste a la realidad con la mayor precisión posible. En este contexto, la respuesta Y de la ecuación 4 está representada por una combinación lineal de términos que corresponden a los principales factores planificados $\sum_{i=1}^k \alpha_i$, junto con un término residual ε atribuible a factores no previstos (Tamhane, 2012).

$$Y = \sum_{i=1}^k \alpha_i + \varepsilon \quad (4)$$

Los modelos de regresión multivariable son empleados para determinar la relación entre una variable dependiente Y (es decir, un resultado de interés) y múltiples variables independientes $\beta_p X_p$ y saber que variable tiene mayor impacto en la respuesta deseada del estudio como se ilustra en la ecuación 5 (Fabila, 2020).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon \quad (5)$$

Los escasos artículos que examinan la metodología de elementos finitos en combinación con el diseño de experimentos no ofrecen una propuesta aplicable al diseño de módulos de lentes de tamaño reducido. No obstante, se puede adherir a la metodología el crear una matriz de variables, ejecutar simulaciones y analizar los resultados a través del Diseño de Experimentos (DOE) y el Análisis de Varianza ANOVA (Hamilton et al, 2023). Esto permite optimizar el diseño mecánico del producto al identificar los parámetros óptimos (Alaneme et al, 2022)

4. Solución propuesta e implementación

4.1. Optimización del diseño del módulo de filtros

El aspecto más relevante de la propuesta consiste en aumentar el tamaño de los filtros de germanio en el ensamble y añadir cajas que se ajusten al tamaño de cada filtro en la placa (figura 15). De esta manera, la holgura entre las caras laterales del filtro y las paredes de la placa intermedia se reduce hasta en un 84%, al cambiar la holgura de 0.253 mm a 0.038 mm (figura 16). Esto elimina los errores durante el ensamble, evitando que las placas de germanio queden descentradas respecto al orificio circular de la placa frontal, como se mostró en la figura 9 del capítulo 1. De esta forma, al ensamblar los filtros, estos siempre coincidirán con el haz de luz que entra desde el exterior (figura 17), y de esa manera se eliminan las fugas de luz que provocan errores de medición en el monitoreo de gases de la cámara, como se mostró en la figura 10 del capítulo 1

Figura 16. Diferencias de diseño digitales entre el original de la placa media y como se acoplan los filtros.

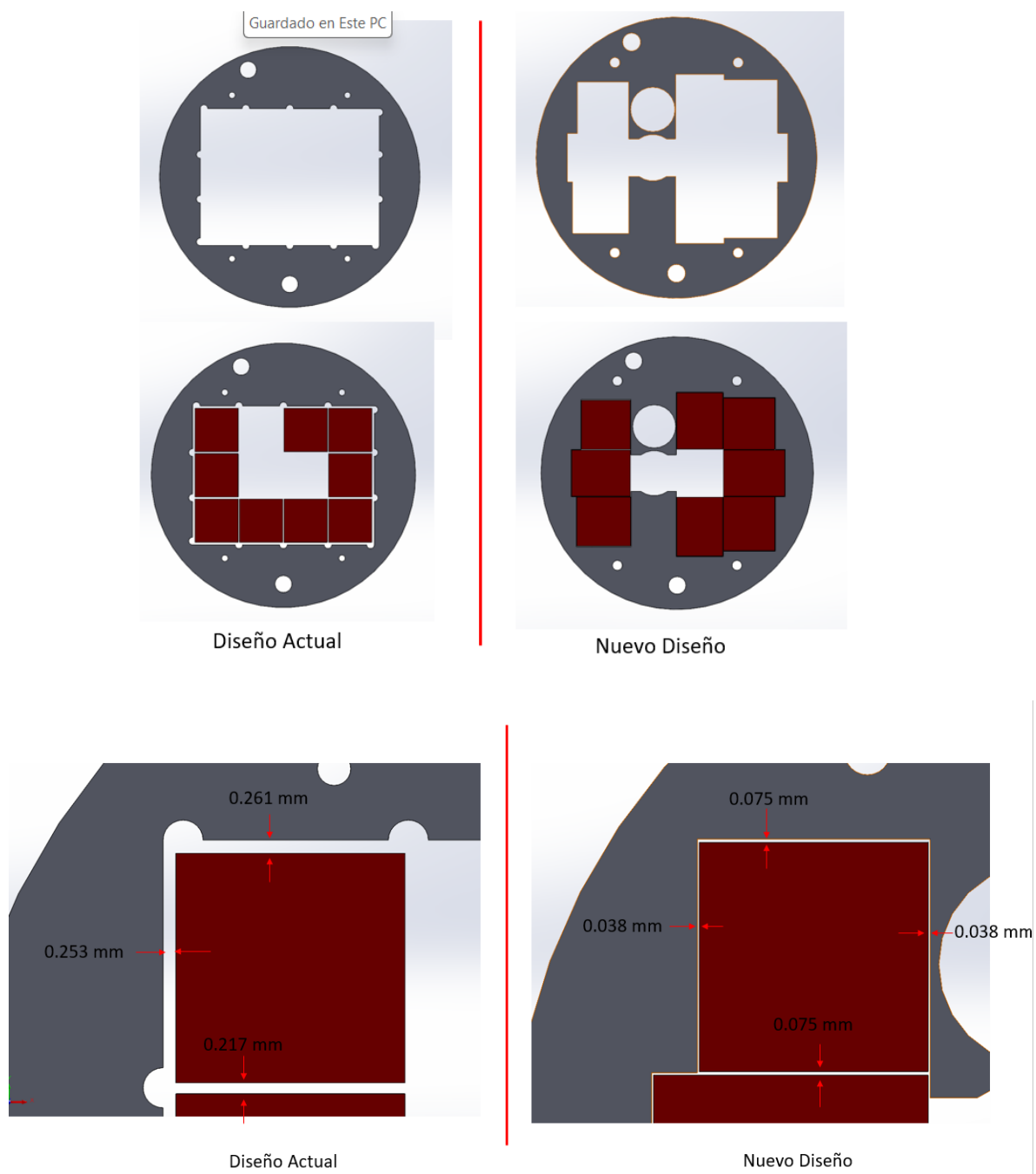
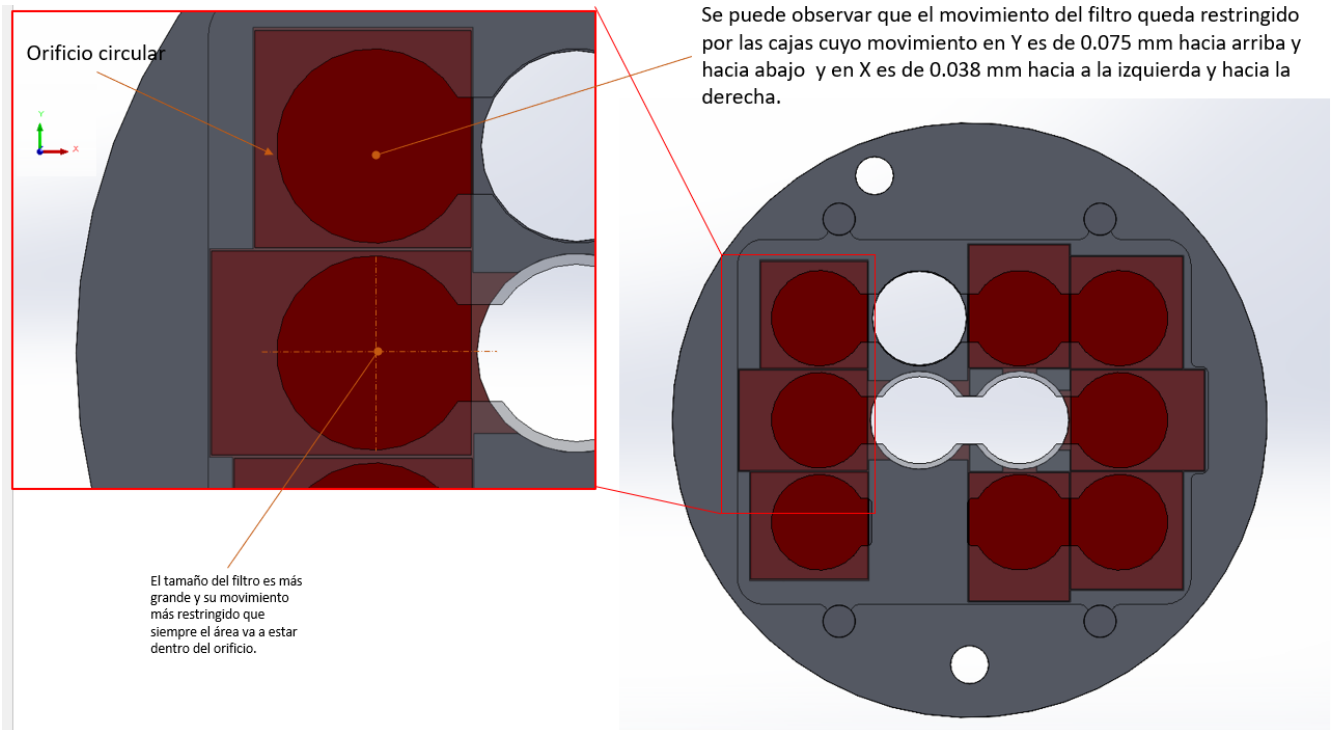


Figura 17. Área de los filtros con respecto a los orificios circulares de la placa frontal.

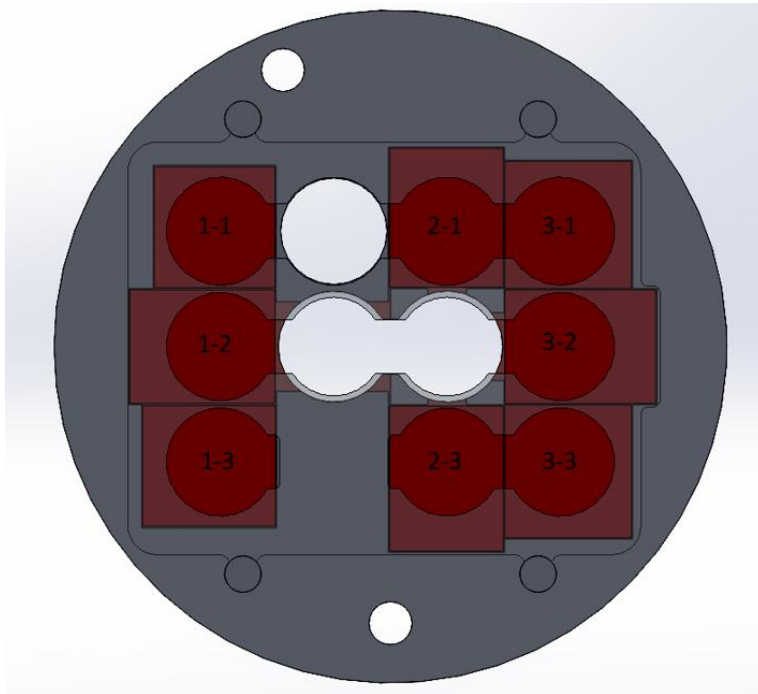


Cada filtro transmite la luz en diferentes porcentajes (tabla 8), por lo tanto, cada uno tiene dimensiones específicas y cada caja se acopla a su correspondiente filtro, facilitando la colocación de estos últimos, restringiendo el movimiento y evitando la colocación errónea de las piezas (figura 18).

Tabla 8. Porcentaje de transmisión de la luz de cada filtro.

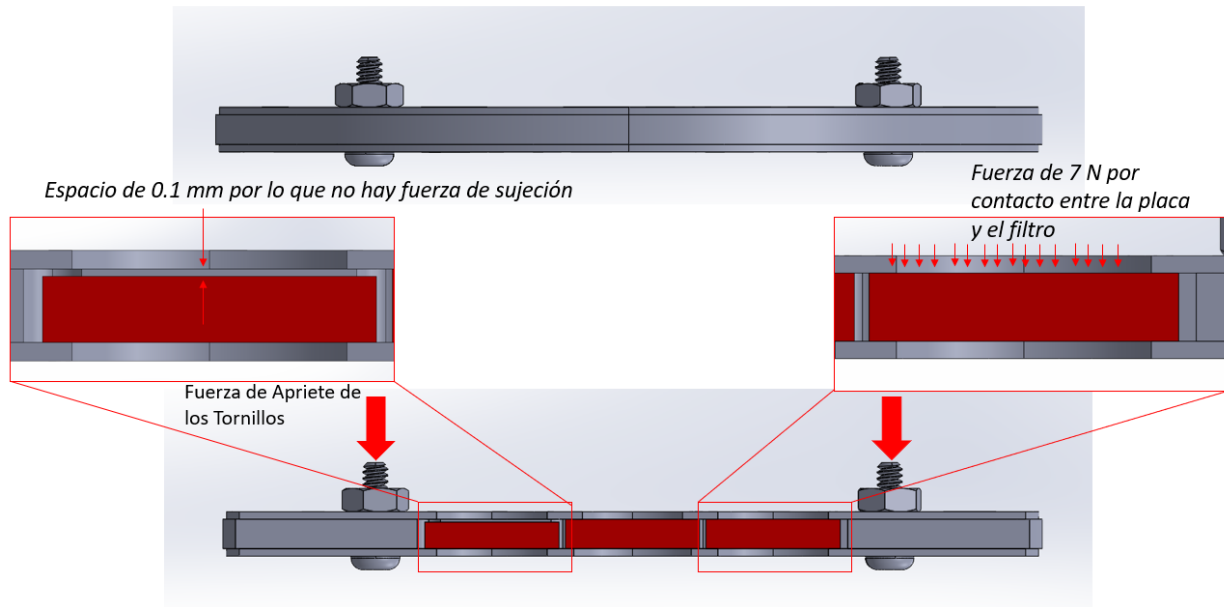
Filtro	% de Transmisión
1-1	80
1-2	60
1-3	75
2-1	55
2-3	90
3-1	85
3-2	95
3-3	65

Figura 18. Acomodo de los Filtros en las ranuras de la placa de en medio



Otro aspecto relevante es que, en el diseño actual, debido al apriete de los tornillos, se puede crear una fuerza de sujeción de 7 N desde la placa frontal hacia el filtro de germanio, siempre y cuando ambas piezas estén en contacto. Sin embargo, si el espesor del filtro es menor y no llega a hacer contacto con la placa frontal, esta fuerza de sujeción deja de existir, lo que provoca que no se ejerza ninguna fuerza (figura 19). Esto puede hacer que el filtro no esté sujeto y pueda moverse durante su manipulación al ensamblarlo en la cámara y cuando la cámara esté en movimiento, lo que podría resultar en que el filtro ya no esté centrado en el orificio circular de la placa frontal.

Figura 19. Corte de sección de la vista lateral del diseño actual del Módulo.



Para resolver el problema descrito en el párrafo anterior, el espesor de los filtros siempre será mayor que el espesor de la placa intermedia. Esto garantizará que los filtros de germanio estén siempre en contacto con la placa frontal, de modo que, al apretar los tornillos, se genere una fuerza de sujeción sobre todos los filtros, asegurando que no tengan movimiento después del ensamblaje del módulo (figura 20).

Figura 20. Corte de sección de la vista lateral del nuevo diseño del Módulo

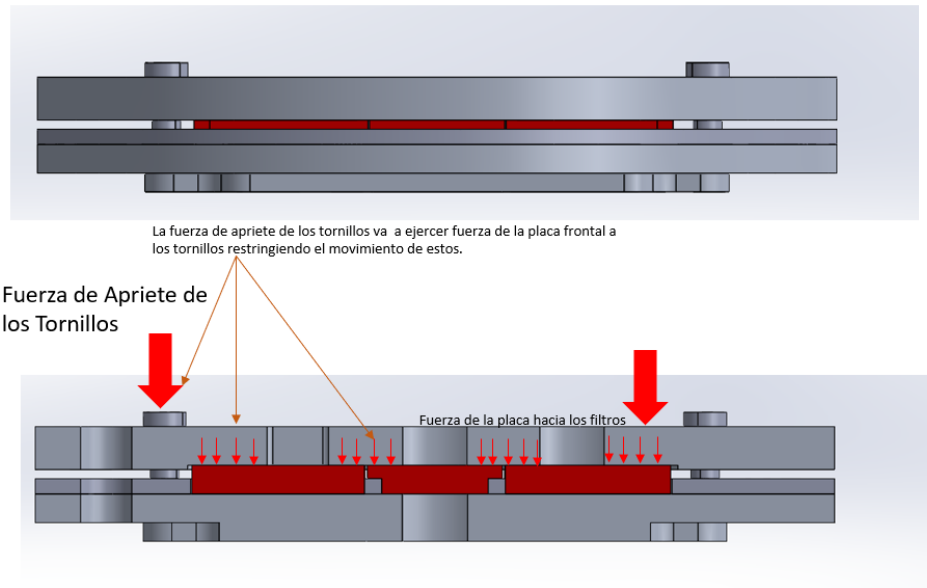


Figura 20. Fuente: Modelo CAD 5879-06 del Nuevo diseño del Módulo de Filtros

El nuevo diseño del módulo, presentado en esta propuesta (figura 21), se ensambla a la cámara de la misma manera que el diseño actual. Como se mencionó anteriormente, la cámara está sujeta a diversas condiciones de temperatura, como se indica en la tabla 4 del capítulo 2. Durante el ensamblaje del nuevo módulo de filtros, se pueden aplicar dos valores diferentes de torque en los tornillos, como se indica en la tabla 3 del capítulo 2. Además, el proveedor que fabrica las placas y los filtros de germanio maneja diferentes tolerancias (tabla 9, figura 22). Todas estas variables, descritas de temperatura, torque y tolerancias, se deben considerar para evaluar la resistencia mecánica del nuevo diseño del módulo de filtros y asegurar que las piezas no sufran algún daño durante su funcionamiento.

Figura 21. Explosionado del nuevo diseño del módulo de Filtros.

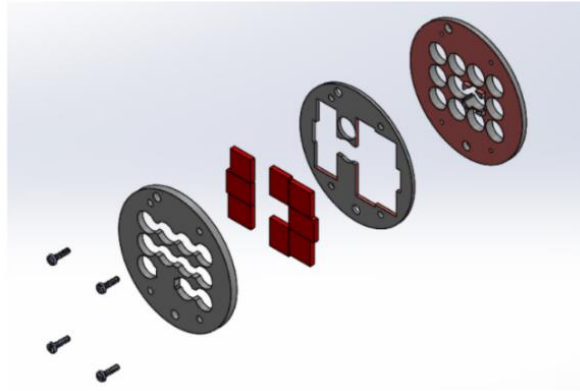


Figura 22. Dimensiones críticas que influyen en la sujeción de los filtros

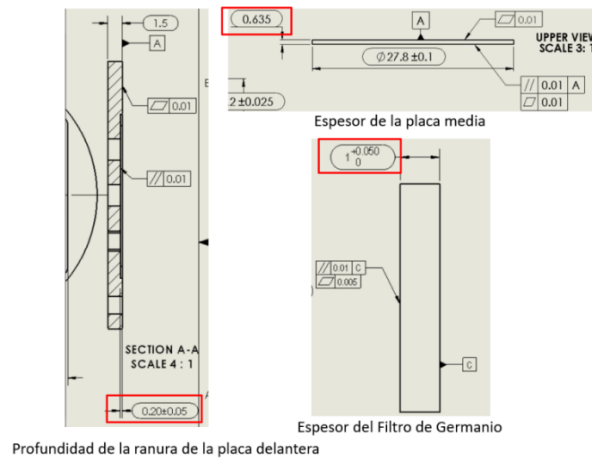


Tabla 9. Tolerancias de las piezas del módulo de filtros.

Dimensiones	Min. (mm)	Nominal (mm)	Máximo (mm)
Espesor de la placa media	0.535	0.635	0.735
Espesor del Filtro de Germanio	1	1	1.05
Profundidad de la Ranura de la Placa Delantera	0.15	0.2	0.25

La evaluación del comportamiento termo-mecánico del nuevo diseño del módulo se llevará a cabo mediante el método de elementos finitos utilizando el software Solidworks para

simular el comportamiento térmico del sol hacia la cámara y la transferencia de calor desde la superficie exterior de la cámara al módulo de filtros. Esto permitirá determinar la temperatura del módulo dentro de la cámara. Posteriormente, se utilizará el software Simsolid para simular el comportamiento mecánico del módulo de filtros bajo dos cargas: la temperatura a la que se encuentra el módulo, obtenida previamente en Solidworks, y el torque aplicado durante el ensamblaje del módulo. Los resultados de estas simulaciones en Simsolid nos ayudarán a determinar si el diseño del módulo presenta daños.

Los valores de temperatura, torque y tolerancias son las variables de entrada para las simulaciones, y hay hasta 80 combinaciones posibles de estos valores. Esto implicaría realizar 80 simulaciones, cada una con una duración de 3 horas, lo que resultaría en un total de 240 horas de simulación. Esta cantidad de tiempo y recursos computacionales es considerable. Para reducir el número de simulaciones, se llevará a cabo un Diseño de Experimentos (DOE) utilizando Minitab, el cual proporcionará un número reducido de simulaciones con las combinaciones más representativas de los valores de las variables.

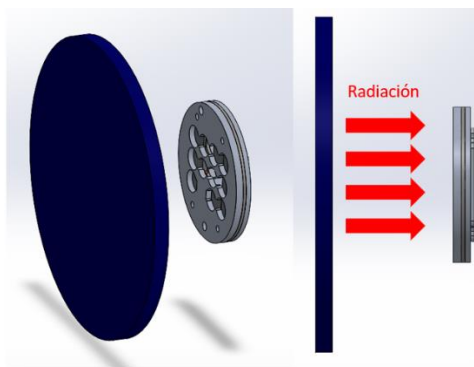
4.2. Metodología

Paso 1: Se realiza un análisis de simulación de radiación térmica en un sistema abierto utilizando Solidworks Simulation. Las condiciones son que una placa emite un flujo de calor equivalente a la energía de radiación del sol de 50 W/m^2 hacia la cámara, mientras que esta también recibe un flujo de aire a una temperatura de $50 \text{ }^\circ\text{C}$ con un coeficiente de enfriamiento de Newton de $25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, como se muestra en la figura 14 del capítulo 2. Esto determinará la temperatura de la cámara bajo la radiación del sol y la temperatura del aire ambiente.

Paso 2: Se realiza una segunda simulación de radiación térmica en un sistema cerrado.

Utilizando el valor de la temperatura de la cámara obtenida en la simulación anterior, se puede determinar la temperatura de radiación del lente derecho de la cámara. Dado que la superficie interior del lente de la cámara y el módulo están dentro de la cámara, se considera que estos dos componentes forman un sistema cerrado. Por lo tanto, la única variable que se debe introducir en la simulación es la temperatura de radiación del lente derecho de la cámara (Figura 23). Esta segunda simulación determinará la temperatura del módulo debido a la radiación del lente derecho de la cámara.

Figura 23. Condiciones del Análisis de Radiación al módulo de Filtros



Paso 3: Se lleva a cabo una tercera simulación térmica considerando solo conducción en Simsolid. En esta simulación se introduce la temperatura de la cámara obtenida en la primera simulación de radiación del sistema abierto, así como la temperatura del módulo obtenida en la segunda simulación de radiación del sistema cerrado. El objetivo es conocer la distribución de temperatura de los componentes que se encuentran dentro de la cámara, como se muestra en la

figura 13 del capítulo 2. Esto permitirá determinar la temperatura del módulo de filtros debido a la radiación y la conducción térmica.

Paso 4: Utilizando el software Minitab, se realiza un Diseño de Experimentos (DOE) utilizando un diseño factorial de 5 factores, donde cada factor tiene 2 niveles: el máximo valor y el mínimo valor de cada factor (Tabla 10).

Tabla 10. Factores del DOE

Factor	Nivel Mínimo	Nivel Máximo
Espesor de la placa media (mm)	0.535	0.735
Espesor del Filtro de Germanio (mm)	1	1.05
Profundidad de la Ranura de la Placa Delantera (mm)	0.15	0.25
Torque (N*m)	0.0096	0.0193
Temperatura del Módulo (°C)	-20 °C	Valor obtenido de la tercera simulación de Solidworks (Paso 3).

Al tener 5 factores con 2 niveles cada uno, Minitab indica que se deben realizar al menos 16 experimentos (figura 24), lo que para este proyecto se traduce en 16 simulaciones termo-mecánicas en Simsolid. Además, Minitab proporcionará las condiciones de temperatura, tolerancia y torque que deben aplicarse en cada una de las simulaciones.

Figura 24. Número de experimentos recomendados para cada factor

Runs	Factors														
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
4	Full	III													
8		Full	IV	III	III	III									
16			Full	V	IV	IV	IV	III	III	III	III	III	III	III	III
32				Full	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
64					Full	VII	V	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
128						Full	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV	IV

Available Resolution III Plackett-Burman Designs

Paso 5: Se llevan a cabo las 16 simulaciones termo-mecánicas en el software Simsolid, como se muestra en la figura 12 del capítulo 2. En cada estudio se agrega la carga de temperatura, cuyo valor dependerá del DOE elaborado por Minitab. Cada simulación proporcionará la distribución de esfuerzos en cada uno de los componentes del módulo, así como la ubicación del esfuerzo máximo. Este valor es de gran importancia, ya que se comparará con el esfuerzo de fluencia del material indicado en la tabla 2 del capítulo 2. Si el valor del esfuerzo máximo es mayor al esfuerzo de fluencia, se puede considerar que puede haber un daño en la pieza. De esta manera, se podrá determinar en qué condiciones el diseño del módulo podría fallar.

Paso 6: Con los resultados de esfuerzo obtenidos, se llevará a cabo un análisis de varianza, una regresión multivariable y gráficas de interacción de factores en Minitab. El objetivo es identificar qué variables son estadísticamente significativas ($P < 0.05$) y tienen una mayor influencia en la distribución de esfuerzos.

Paso 7: Conociendo la influencia de cada variable en la distribución de esfuerzos y en qué condiciones puede fallar el diseño, se elaborarán conclusiones y una propuesta de mejora en el diseño para eliminar cualquier posible falla.

5. Resultados, análisis e interpretación

En la sección 4.2, relacionada con la metodología para validar el nuevo diseño del módulo de Filtros, se llevan a cabo tres simulaciones térmicas secuenciales. La primera simulación evalúa la radiación solar y la convección del aire del entorno hacia la cámara Rebellion, con el propósito de cuantificar el flujo de calor que incide en toda la estructura de la cámara, especialmente en su lente derecho, que está alineado con el módulo de filtros y sirve como conducto para la transferencia de energía térmica del exterior al módulo.

La segunda simulación analiza la transferencia de calor por radiación desde el exterior, absorbida por el lente de la cámara, hacia el módulo de filtros. Esto permite determinar la temperatura a la que llega el módulo debido a la radiación solar el cuál va a ser usar posteriormente como variable de entrada para realizar las simulaciones termo-mecánicas del módulo de filtros.

Finalmente, la tercera simulación se enfoca en la transferencia de calor por conducción desde los componentes internos de la cámara, comenzando desde su carcasa hacia el módulo de filtros. El objetivo es verificar si la temperatura del módulo, generada por la radiación solar, no se ve afectada por la conducción térmica de los componentes internos.

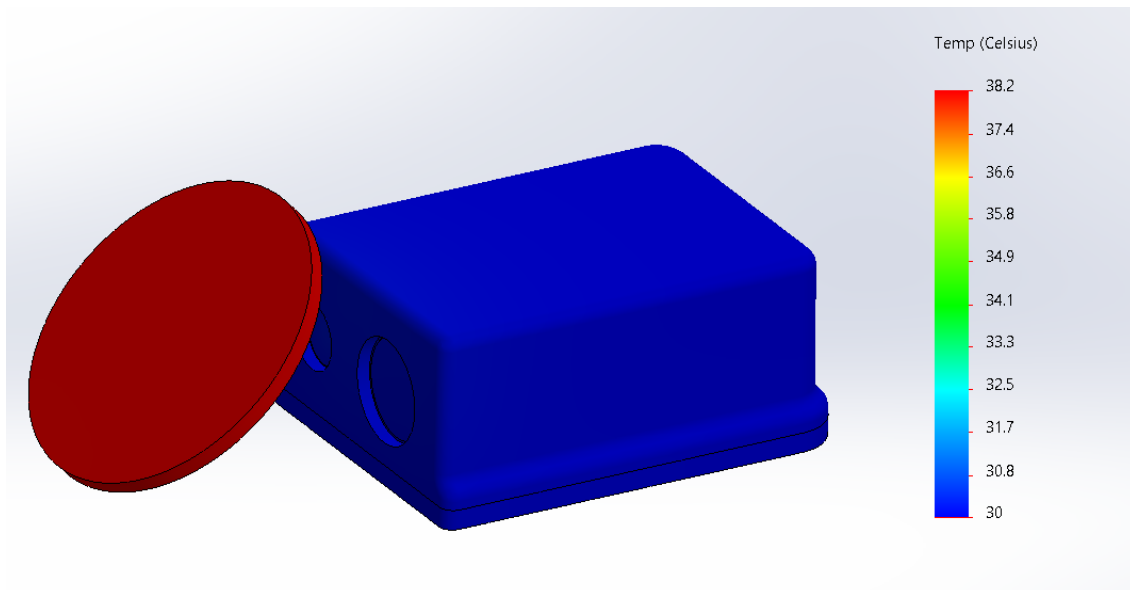
5.1. Simulación inicial de radiación y convección térmica en sistema abierto en

Solidworks

La energía de radiación emitida por la placa (50 W/m^2) y la temperatura del flujo de aire de $50 \text{ }^\circ\text{C}$ generan una temperatura de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ en la superficie exterior de la cámara y los lentes (Figura 25). Si fuera un sistema abierto, el flujo de calor del aire por convección \dot{Q}_{conv} , por sí solo generaría una temperatura en la superficie exterior de la cámara y los lentes de $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Sin

embargo, al considerar la radiación solar, la alta emisividad del material (0.85 para la carcasa de la cámara) genera un flujo de calor por radiación $\dot{Q}_{rad,sol}$, cuyo valor sería negativo debido a las diferencias de temperatura entre la carcasa de la cámara y el aire. Por lo tanto, el flujo de calor que llega a la cámara, $\dot{Q}_{total,abierto}$, es menor que el flujo de calor por convección del aire, $\dot{Q}_{conv,aire}$ (ecuación 6), lo que resulta en que la temperatura de la superficie no alcance los 50 °C, sino que se mantenga en 30 °C (Cengel et al., 2019).

Figura 25. Simulación de temperatura por Radiación Térmica hacia la carcasa



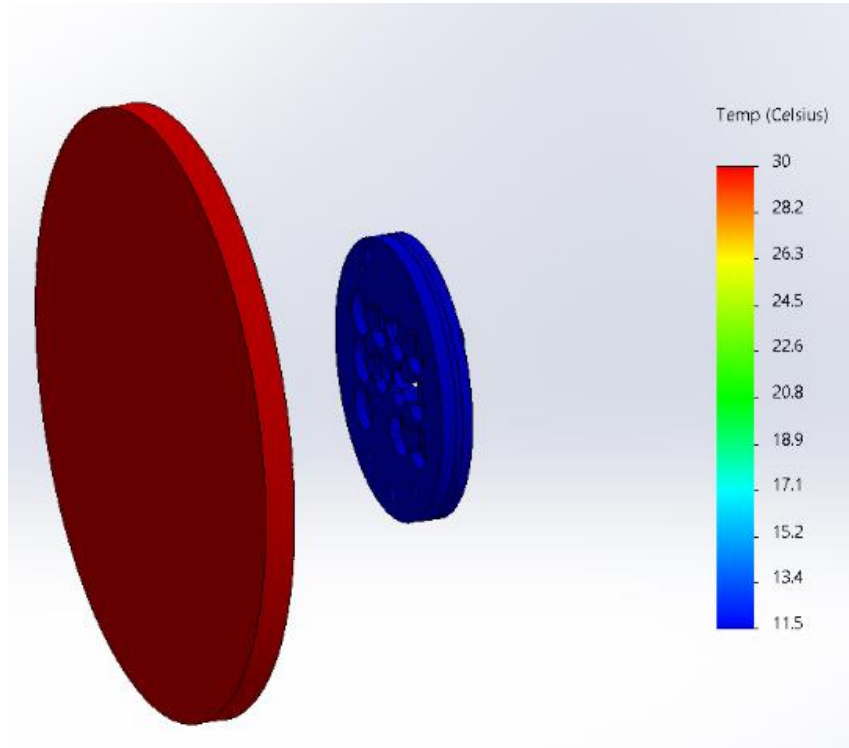
$$\dot{Q}_{total,abierto} = \dot{Q}_{conv,aire} - \dot{Q}_{rad,sol} \quad (6)$$

5.2. Segunda simulación de radiación térmica en sistema cerrado en Solidworks.

La radiación solar, junto con el flujo de aire, hace que el lente derecho de la cámara alcance una temperatura de 30 °C. Esta misma radiación solar atraviesa el lente derecho, convirtiéndolo en el cuerpo emisor de radiación hacia el módulo de filtros de germanio, que se encuentra en un sistema cerrado al estar dentro de la cámara. Esto provoca que el módulo alcance una temperatura de 11.5 °C (Figura 26). Este fenómeno ocurre debido a que el módulo de filtros de germanio, al estar en un sistema cerrado, inicialmente se encuentra a una temperatura de 0 °C*.

Dado que el único flujo de calor, $\dot{Q}_{total,cerado}$, que llega al módulo es la radiación proveniente del lente, $\dot{Q}_{rad,lente}$ (ver ecuación 7) (Reddy et al., 2010), su temperatura aumenta de 0 °C* a 11.5 °C.

Figura 26. Simulación de temperatura por Radiación Térmica en el módulo de filtros.



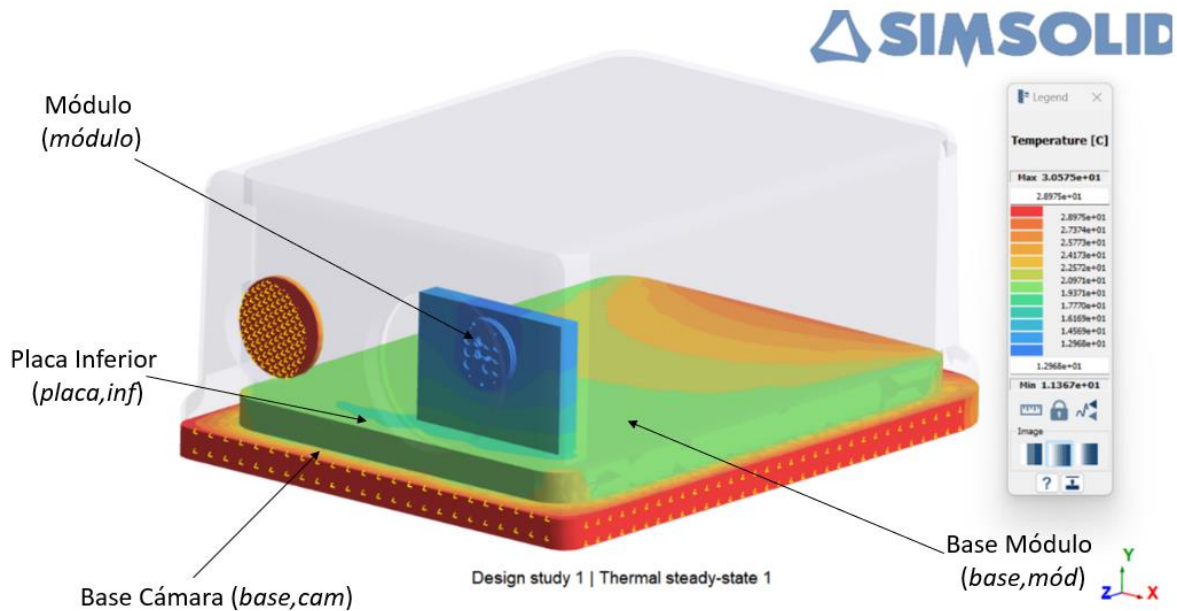
$$\dot{Q}_{total,cerado} = \dot{Q}_{rad,lente} \quad (7)$$

* Durante el ensamblaje de la cámara, todos sus componentes se ensamblan dentro de una cámara de vacío, lo que resulta en que al finalizar el proceso, los componentes internos alcanzan una temperatura de 0 °C.

5.3. Tercera simulación de conducción térmica en los componentes internos de la cámara en Simsolid.

Se puede observar que durante la transferencia de calor por conducción en los materiales que se encuentran dentro de la cámara y que están conectados desde la superficie exterior de la cámara hasta el módulo de filtros, hay una pérdida de calor debido a la disminución de temperatura entre los materiales, que va desde los 30 °C en la base de la cámara hasta los 11.5 °C en el módulo de filtros (Figura 27). Esto ocurre porque en el flujo de calor por conducción, $\dot{Q}_{cond,materiales}$ las resistencias térmicas, k , de cada material en conjunto con el espesor, L , y el área, A , de cada material tienden a reducir el flujo de calor y, por lo tanto, la temperatura de la superficie del material expuesto al exterior, que en este caso es la base de la cámara $T_{base,cam}$ siempre va a ser mayor a la temperatura del módulo $T_{módulo}$ como se muestra en la ecuación 8 (Lienhard, 2019).

Figura 27. Resultados de la simulación de conducción en el módulo de filtros.



$$\dot{Q}_{cond,materiales} = \frac{T_{base,cam} - T_{módulo}}{\frac{L_{base,cam}}{A_{base,cam}k_{base,cam}} + \frac{L_{placa,inf}}{A_{placa,inf}k_{placa,inf}} + \frac{L_{base,mod}}{A_{base,mod}k_{base,mod}} + \frac{L_{módulo}}{A_{módulo}k_{módulo}}} \quad (8)$$

5.4. Diseño de Experimentos (DOE) con Minitab.

Como se detalla en el paso 4 de la metodología, al diseñar los experimentos, se consideraron cinco factores, cada uno con dos niveles: el espesor de la placa media, que varía desde 0.535 mm hasta 0.735 mm; el espesor del filtro, que oscila entre 1 mm y 1.05 mm; y la profundidad de la ranura, que va desde 0.15 mm hasta 0.25 mm. Es importante destacar que estos valores mínimo y máximo son los límites que el proveedor puede alcanzar al fabricar estas piezas. Otro factor es la temperatura del módulo, que varía desde -20 °C hasta 11.5 °C cuando la cámara alcanza una temperatura de 50 °C, según las simulaciones térmicas mediante elementos finitos. Finalmente, el último factor considerado es el torque aplicado, que se encuentra en el rango de 0.0096 N*m a 0.0463 N*m, siendo estos los dos valores recomendados para los tornillos M1. De acuerdo Minitab al utilizar los valores mínimos y máximos de estos 5 factores se deben realizar al menos 16 simulaciones con las siguientes combinaciones de factores para comprender el comportamiento termo-mecánico del módulo de filtros como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Experimentos del DOE.

Simulación (#Experimento)	Espesor de la placa Media (mm)	Espesor del Filtro (mm)	Profundidad de la Ranura (mm)	Temperatura del Módulo (°C)	Torque aplicado (N*m)
1	0.735	1	0.15	-20	0.0096
2	0.735	1.05	0.15	11.5	0.0096
3	0.735	1.05	0.25	11.5	0.0463
4	0.735	1.05	0.15	-20	0.0463
5	0.535	1.05	0.25	-20	0.0463
6	0.735	1.05	0.25	-20	0.0096
7	0.535	1.05	0.15	-20	0.0096
8	0.535	1	0.25	-20	0.0096
9	0.735	1	0.25	-20	0.0463
10	0.535	1.05	0.15	11.5	0.0463
11	0.535	1	0.15	-20	0.0463
12	0.535	1	0.25	11.5	0.0463
13	0.735	1	0.15	11.5	0.0463
14	0.535	1.05	0.25	11.5	0.0096

Simulación (#Experimento)	Espesor de la placa Media (mm)	Espesor del Filtro (mm)	Profundidad de la Ranura (mm)	Temperatura del Módulo (°C)	Torque aplicado (N*m)
15	0.535	1	0.15	11.5	0.0096
16	0.735	1	0.25	11.5	0.0096

5.5. Simulación termo-mecánica en Simsolid.

Los resultados de los 16 experimentos muestran que, en la distribución de esfuerzos de los filtros de Germanio, el esfuerzo máximo σ_{max} se localiza en las esquinas de los filtros que están cercanas a los tornillos que sujetan las piezas del módulo (Figura 28). Esto se debe a que por la posición de los tornillos y el torque aplicado en estos, que en conjunto con la temperatura que recibe el módulo se genera una deformación radial δ_{max} en los componentes por la dilatación del material (Nisbett et al, 2014) y la presión de la placa frontal hacia el módulo de filtros (Figura 20 del capítulo 3) por lo que la distribución de esfuerzos es radial σ_{rad} y sus valores máximos se distribuyen en las esquinas de los filtros de germanio y en los barrenos donde se ensamblan los tornillos. (Figura 29).

Figura 28. Localización del esfuerzo máximo en los módulos de filtros. Resultados de 4 simulaciones cuyo esfuerzo máximo es mayor al esfuerzo de fluencia.

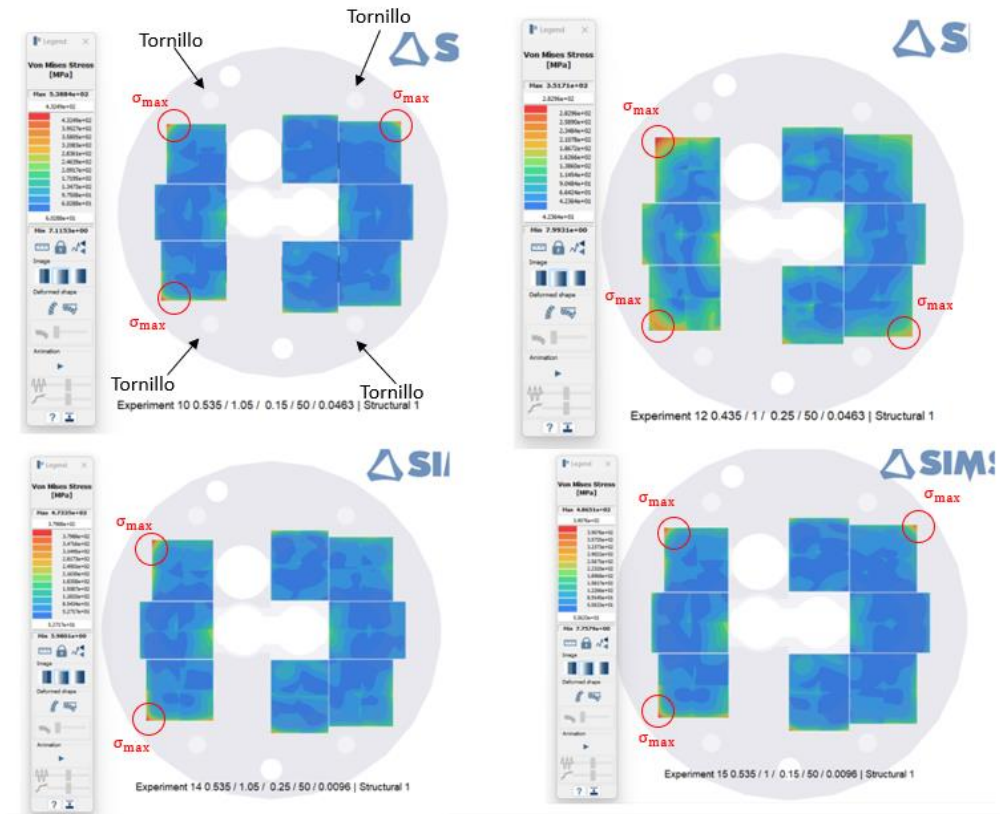
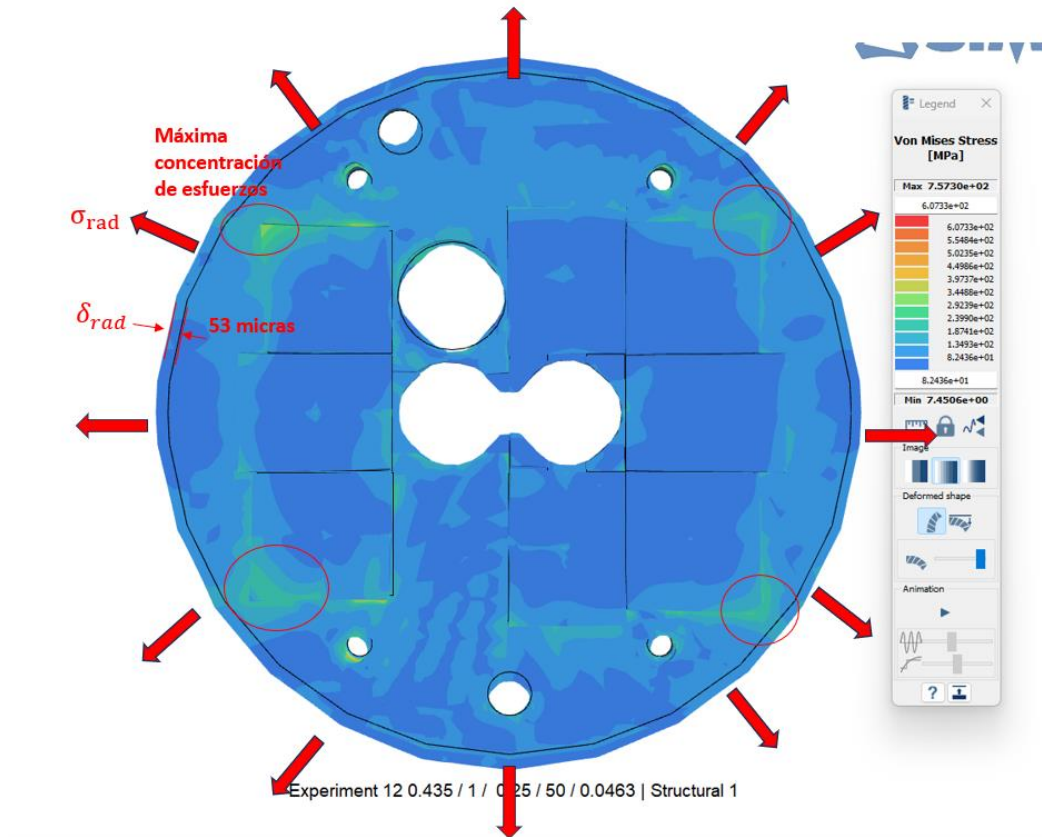


Figura 29. Comportamiento y dirección del esfuerzo en el módulo de filtros.



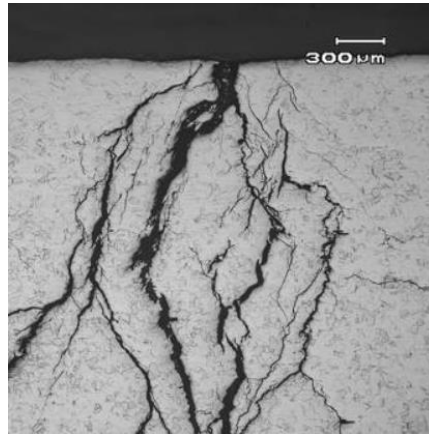
Cuatro de las 16 simulaciones mostraron que los filtros experimentaron un esfuerzo máximo mayor al esfuerzo de fluencia del material de germanio de grado óptico (Tabla 12). Los análisis estadísticos en la siguiente sección nos ayudarán a determinar qué variables tienen una mayor influencia en los esfuerzos máximos y las condiciones en las que es posible alcanzar un valor mayor a 310 MPa.

Tabla 12. Resultados de las 16 simulaciones.

Simulación (#Experimento)	Esfuerzo máximo en los filtros (MPa) σ_{\max}	$\sigma_{\max} > 310$ MPa
1	109.91	No
2	301.76	No
3	242.58	No
4	119.45	No
5	188.99	No
6	86.937	No
7	258.7	No
8	153.8	No
9	93.776	No
10	538.84	Si
11	241.1	No
12	351.71	Si
13	277.92	No
14	473.35	Si
15	486.51	Si
16	231.46	No

Durante el ensamblaje, la aplicación del torque de apriete en los tornillos genera un esfuerzo residual en las esquinas del filtro. Cuando se produce un aumento de temperatura, se añade un esfuerzo térmico que incrementa el esfuerzo residual. Si este sobrepasa el límite de fluencia del material, se genera una fuerza impulsora de fisura que propaga una grieta de forma inestable por todo el filtro, causando daños permanentes (Figura 30). Es importante destacar que el germanio no experimenta deformación plástica; por lo tanto, cuando alcanza el límite de fluencia, el material se fractura inmediatamente. Por consiguiente, el diseño debe mantener los esfuerzos por debajo del límite de fluencia tanto como sea posible (Glodež et al., 2020).

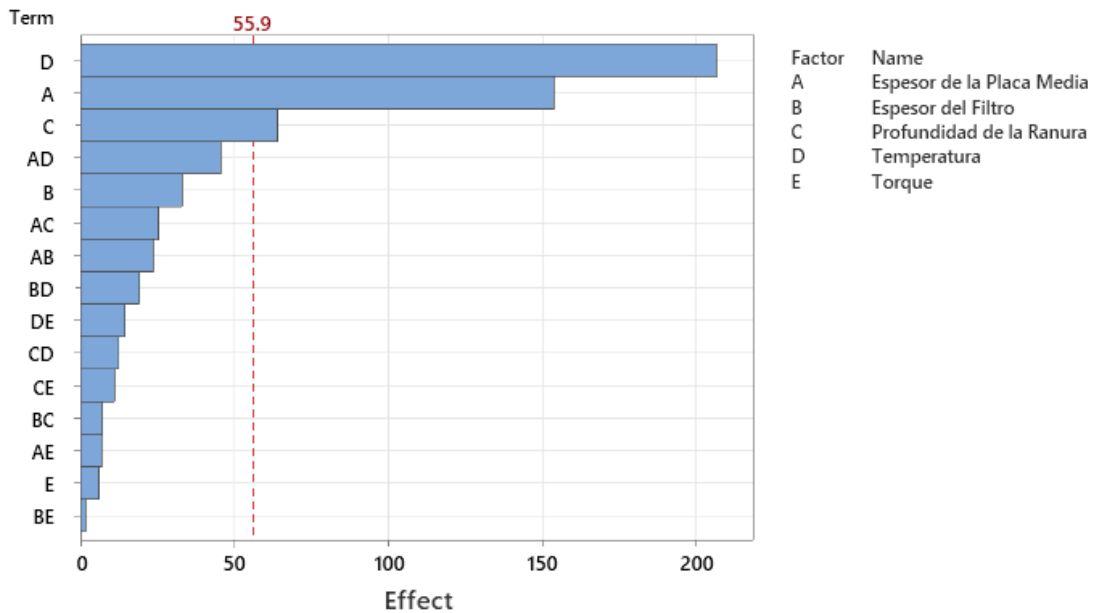
Figura 30. Micrografía de inspección de filtros de Germanio donde se encontraron grietas pronunciadas.



5.6. Resultados estadísticos en Minitab

El diagrama de Pareto muestra los valores absolutos de los efectos estandarizados, ordenados desde el efecto más grande hasta el efecto más pequeño. Además, incluye una línea de referencia que indica qué efectos son estadísticamente significativos. Se observa que los tres efectos o variables que superan la línea de referencia de 55.9 son la temperatura, seguida del espesor de la placa media y la profundidad de la ranura. Dado que estos efectos son estadísticamente significativos en el nivel de 0.05 con los términos actuales del modelo, podemos concluir que estas tres variables influyen considerablemente en el esfuerzo máximo σ_{\max} que se encuentra en los filtros de germanio. Por debajo de la línea de referencia se encuentran otras combinaciones de variables, como el espesor de la placa media con la temperatura, el espesor del filtro y la combinación del espesor de la placa media con la profundidad de la ranura, entre otras. Sin embargo, estas combinaciones no tienen un efecto relevante en el esfuerzo máximo σ_{\max} (Figura 31).

Figura 31. Pareto de efectos sobre el esfuerzo del material calculado con alfa de 0.05



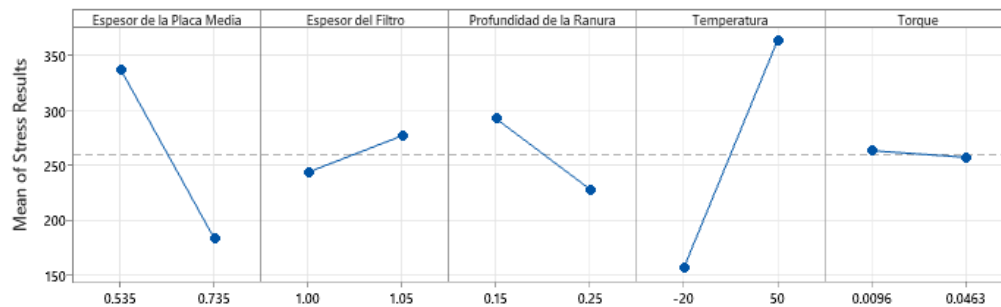
Lenth's PSE = 21.7498

Una gráfica de efectos principales sirve para examinar las diferencias entre las medias de nivel para uno o más factores. Hay un efecto principal cuando diferentes niveles de un factor afectan la respuesta de manera diferente. Una gráfica de efectos principales grafica la media de respuesta para cada nivel de factor conectado por una línea. A través del gráfico (Figura 32) se puede concluir lo siguiente de cada una de las variables:

- Al aumentar el espesor de la placa media de 0.535'' a 0.735'' los esfuerzos se pueden reducir 47% de 340 MPa a 180 MPa.
- Al aumentar espesor del filtro de 1'' a 1.05'' hay un aumento en en el esfuerzo poco considerable del 10% de 250 MPa a 275 MPa corroborando que está variable no es estadísticamente significativa en el pareto de efectos.
- Al aumentar la profundidad de la ranura de 0.15'' a 0.25'' hay una disminución en el esfuerzo del 25% de 300 MPa a 225 MPa.

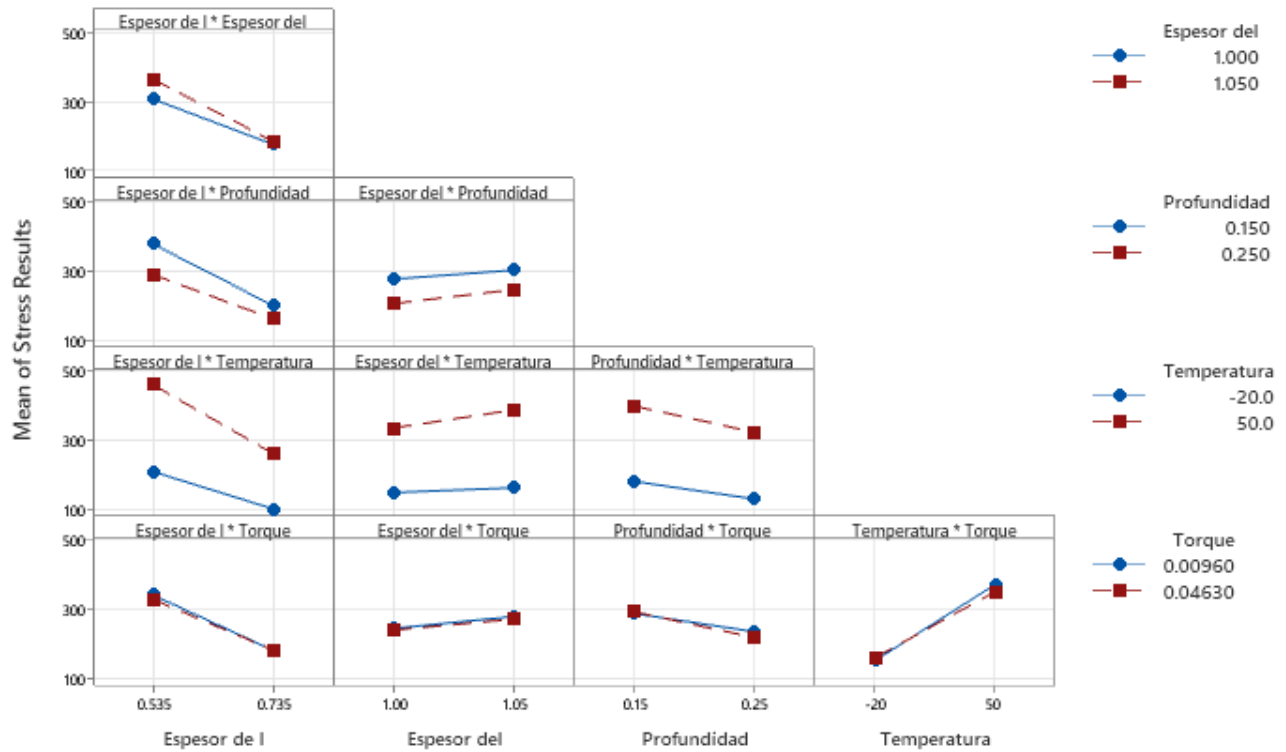
- Al aumentar la profundidad de la ranura de -20 °C a 50 °C hay un aumento considerable en el esfuerzo del 133% de 150 MPa a 350 MPa siendo esta la variable que tiene mayor impacto en el esfuerzo máximo σ_{max} de los filtros y corroborando que esta variable es la más estadísticamente significativa de acuerdo al pareto de efectos.
- El torque, al tener una línea de comportamiento casi paralelo al eje de las X se puede concluir que tiene un efecto nulo en el esfuerzo máximo de los filtros.

Figura 32. Efectos sobre el esfuerzo calculado mediante DOE



La gráfica de interacciones muestra la media ajustada del valor del esfuerzo máximo en función de las combinaciones de temperatura, espesor de la placa media, profundidad de la ranura, espesor del filtro y torque. Aunque esta gráfica muestra los efectos aparentes de las interacciones, se observa que todas las líneas de efectos tienden a ser paralelas (Figura 33). Esto indica que las interacciones entre las variables no son estadísticamente significativas y no tienen una influencia relevante en el esfuerzo máximo de los filtros σ_{max} , lo cual confirma lo observado en el diagrama de Pareto, donde todas las combinaciones de variables se encuentran por debajo de la línea de referencia. Por lo tanto, no hay relevancia en analizar la interacción entre cada variable.

Figura 33. Interacción entre variables



Un análisis de regresión genera una ecuación para describir la relación estadística entre uno o más predictores y la variable de respuesta, y para predecir nuevas observaciones. La regresión lineal multivariable generalmente utiliza el método de estimación de mínimos cuadrados ordinarios, el cual obtiene la ecuación al minimizar la suma de los residuos al cuadrado. La ecuación 9 de regresión de comportamiento predictivo, tiene coeficientes que representan el cambio medio en la respuesta para una unidad de cambio en el predictor, manteniendo constantes otros predictores incluidos en el modelo. Esta ecuación puede utilizarse para predecir nuevas observaciones dados los valores de los predictores especificados.

$$\text{Stress Results} = 158 - 786 \text{ Espesor de la placa media} + 661 \text{ Espesor del Filtro} - 639 \text{ Profundidad de la Ranura} + 2.949 \text{ Temperatura} - 164 \text{ Torque} \quad (9)$$

Al multiplicar los valores de las variables que causan un mayor esfuerzo por los coeficientes, observamos que el esfuerzo resultante es de 491.2 MPa (Tabla 13). Por el contrario, si multiplicamos los valores que conducen a un menor esfuerzo por los coeficientes, obtenemos un valor de 28.2 MPa (Tabla 14). Como se mencionó anteriormente, esta ecuación nos ayuda a predecir el comportamiento del esfuerzo para ciertos valores de las variables.

Tabla 13. Multiplicación de los coeficientes por las variables de diseño que generan mayores esfuerzos

Variable	Coeficiente	Valor	Resultado (Coeficiente * Valor) MPa
Espesor de la placa Media	-768	0.535 mm	-410.88
Espesor del Filtro	661	1.05 mm	694.05
Profundidad de la Ranura	-639	0.15 mm	-95.85
Temperatura	2.949	50 °C	147.45
Torque	-164	0.0096 N*m	-1.5744
Resultado de la Ecuación			491.1956

Tabla 14. Multiplicación de los coeficientes por las variables de diseño que generan menores esfuerzos

Variable	Coeficiente	Valor	Resultado (Coeficiente * Valor) MPa
Espesor de la placa Media	-768	0.735 mm	-564.48
Espesor del Filtro	661	1 mm	661
Profundidad de la Ranura	-639	0.25 mm	-159.75
Temperatura	2.949	-20 °C	-58.98
Torque	-164	0.0463 N*m	-7.5932
Resultado de la Ecuación			28.1968

Otro resultado proporcionado por la regresión multivariable, es el valor p de cada coeficiente, que prueba la hipótesis nula de que el coeficiente es igual a cero (sin efecto). Por lo tanto, los valores p bajos indican que el predictor es una adición significativa al modelo. Tradicionalmente, se compara el valor p con valores de α menores que 0.05 para determinar si los valores son estadísticamente significativos. En este caso, las variables de espesor de la placa media, profundidad de la ranura y temperatura cumplen con este criterio, lo que coincide con lo observado en el diagrama de Pareto y la gráfica de efectos, donde se demostró que son las variables que tienen mayor influencia en los esfuerzos generados en el módulo de filtros.

Figura 34. Coeficientes del valor P de Minitab

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	158	429	0.37	0.720	
Espesor de la Placa Media	-768	103	-7.46	0.000	1.00
Espesor del Filtro	661	412	1.61	0.139	1.00
Profundidad de la Ranura	-639	206	-3.11	0.011	1.00
Temperatura	2.949	0.294	10.03	0.000	1.00
Torque	-164	561	-0.29	0.776	1.00

6. Conclusiones

De acuerdo con los resultados de las simulaciones y el análisis estadístico realizado en el capítulo anterior, se concluye que la temperatura es la variable que más afecta a los filtros y puede llegar a causar daños en estos. Si bien no podemos cambiar la especificación del producto y reducir la temperatura máxima establecida de 50 °C, podemos controlar la segunda variable que afecta a los filtros: el espesor de la placa intermedia.

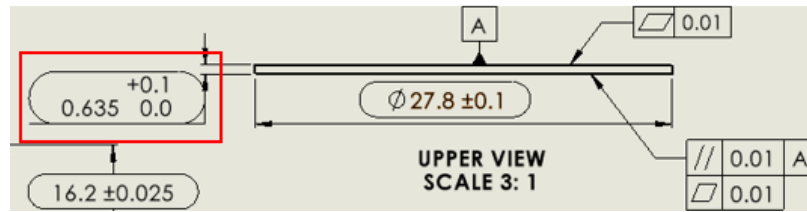
La dimensión del espesor de la placa intermedia varía de 0.535 mm a 0.735 mm, con un valor nominal de 0.635 mm, como se especifica en la tabla 9 del capítulo 3. Según los resultados de las simulaciones, se observa que en las 4 simulaciones donde el esfuerzo máximo supera el esfuerzo de fluencia del material, el espesor de la placa tiene el valor mínimo de 0.535 mm y una temperatura de 11.5 °C, producida por la máxima temperatura exterior del ambiente de 50 °C (Tabla 15).

Tabla 15. Experimentos del DOE.

Simulación	Espesor de la placa Intermedia (mm)	Espesor del Filtro (mm)	Profundidad de la Ranura (mm)	Temperatura del Módulo (°C)	Torque aplicado (N*m)	Esfuerzo máximo en los filtros (MPa)	>310 MPa
10	0.535	1.05	0.15	11.5	0.0463	538.84	Si
12	0.535	1	0.25	11.5	0.0463	351.71	Si
14	0.535	1.05	0.25	11.5	0.0096	473.35	Si
15	0.535	1	0.15	11.5	0.0096	486.51	Si

Para solucionar este problema se ajustará el límite mínimo de la dimensión del espesor de la placa media de 0.535 mm al valor nominal de 0.635 mm y la dimensión máxima de 0.735 mm queda igual, por lo que en el dibujo se elimina la tolerancia de -0.1mm dejando solamente +0.1 mm como se muestra figura 36.

Figura 35. Tolerancia nueva del espesor de placa



Las 4 simulaciones 10, 12, 14 y 15 se volvieron a correr usando la dimensión nominal de 0.635 mm y se observa que los esfuerzos máximos ya son menores al esfuerzo fluencia del material (Figura 37 y Tabla 16) asegurando que los filtros no van a recibir ningún daño durante el funcionamiento de la cámara.

Figura 36. Simulaciones similares a 10, 12, 14 y 15 (a-d) fijando el espesor de la placa intermedia en 0.635 mm

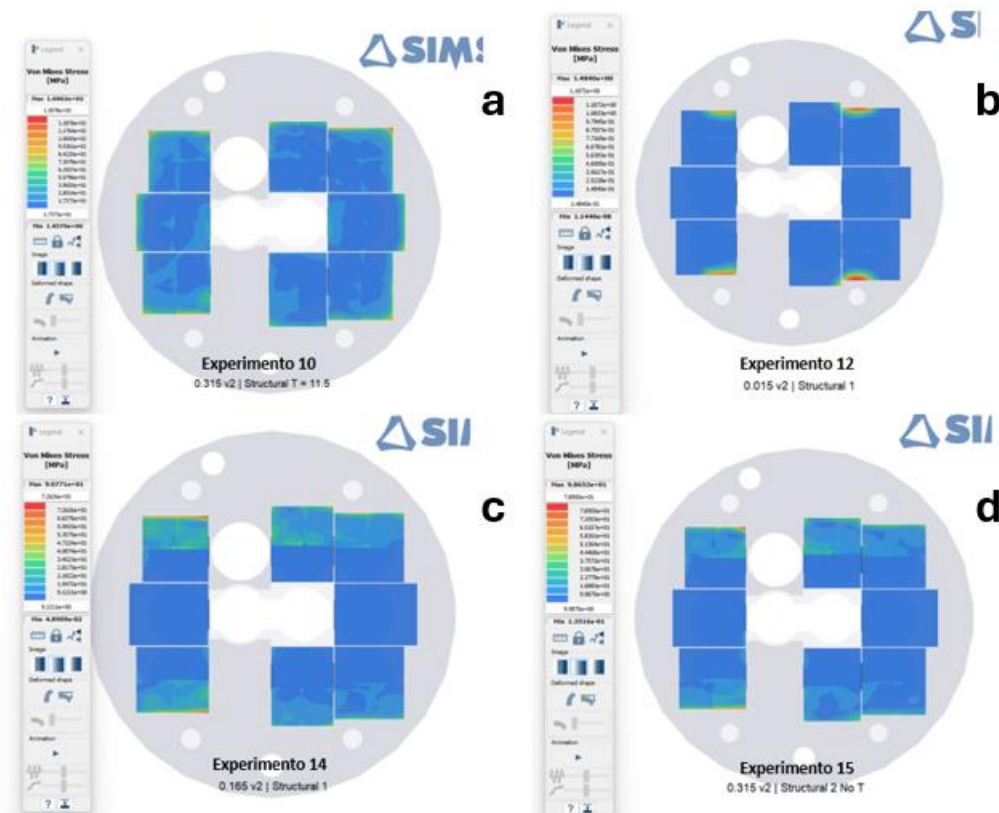


Tabla 16. Experimentos del DOE después de ajustar la tolerancia de la placa intermedia.

Simulación	Espesor de la placa Intermedia (mm)	Espesor del Filtro (mm)	Profundidad de la Ranura (mm)	Temperatura del Módulo (°C)	Torque aplicado (N*m)	Esfuerzo máximo en los filtros (MPa)	>310 MPa
10 (a)	0.635	1.05	0.15	11.5	0.0463	160.62	No
12 (b)	0.635	1	0.25	11.5	0.0463	1.48	No
14 (c)	0.635	1.05	0.25	11.5	0.0096	90.77	No
15 (d)	0.635	1	0.15	11.5	0.0096	98.65	No

Como se planteó en el diagnóstico del capítulo 1, con el objetivo de evitar el elevado gasto en muestras prototipo y pruebas de ingeniería del nuevo diseño del módulo de filtros para resolver las problemáticas de ensamble y fugas de luz, se propuso seguir una metodología que empleara herramientas de elemento finito para evaluar digitalmente el nuevo diseño y el uso de herramientas estadísticas, para determinar las variables de diseño más influyentes en el comportamiento termo-mecánico del mismo, identificar fallos de diseño y corregirlos. En este trabajo se observa que esta metodología ayuda a optimizar el proceso de diseño. Al identificar que la temperatura, el espesor de la placa intermedia y la profundidad de la ranura provocan fallos en los filtros de Germanio, se ajustaron las tolerancias de la placa intermedia y realizar se hizo una última iteración de simulaciones para confirmar que la falla se había corregido. De lo contrario, habría sido necesario realizar numerosas simulaciones para identificar las variables que afectan el diseño, lo que habría implicado un consumo considerable de tiempo y recursos computacionales. Con estos resultados, ahora se pueden llevar a cabo las pruebas físicas con la certeza de que serán exitosas y de que no habrá fallos en el módulo durante el funcionamiento de la cámara.

Referencias Bibliográficas

Jespen, T. (2016). *ATEX—Explosive Atmospheres Risk Assessment, Control and Compliance*. Springer

Dechaumphai, P., y Sucharitpwatskul, S. (2019). *Finite Element Analysis with Solidworks Simulation*. Alpha Science International

Gadala, M. S. (2020). *Finite Elements for Engineers with Ansys Applications*. Cambridge University Press

Lawrence, K. L. (2022). *Structural & Thermal Analysis Using the ANSYS Mechanical APDL Release 2022 Environment*. SDC Publication

Petela, R. (2010). *Engineering Thermodynamics of Thermal Radiation: for Solar Power Utilization*. McGraw Hill Professional

Kurowski, Paul. (2022). *Thermal Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2022 and Flow Simulation*. SDC Publication

Zhang, S., Fine, J. P., Touchie, M. F., y O'Brien, W. (2020). A simulation framework for predicting occupant thermal sensation in perimeter zones of buildings considering direct solar radiation and ankle draft. *Building and Environment*, 183.

Gedney, B. L., y Rizos, D. C. (2022). Combining welding-induced residual stress with thermal and mechanical stress in continuous welded rail. *Results in Engineering*, 16.

Kumar Sundaram, S., Rahul, K., Roshan Ram Dayal, D., Survesh, S., y Swamenathan, R. (2022). Fatigue life estimation of preloaded aluminium (al2024- t6) aircraft fasteners using finite element method. *Materials Today: Proceedings*, 62, 1369-1374. (Second International Conference on Engineering Materials, Metallurgy and Manufacturing).

Montgomery, D. C. (2020). *Design and Analysis of Experiments*. Wiley.

Mathews, P. G. (2005). *Design of Experiments with MINITAB*. ASQ Quality Press.

Tamhane, A. C. (2012). *Statistical Analysis of Designed Experiments*. John Wiley & Sons

Fabila, G. C. (2020). *Diseño y análisis de experimentos industriales*. Universidad Iberoamericana.

Hamilton, A., Xu, Y., Kartal, M. E., Kumar, S., Gadegaard, N., y Mulvihill, D. M. (2023). Optimisation of interlocking microstructured adhesive joints via finite element modelling, design of experiments and 3d printing. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 120.

Alaneme, K. K., Kareem, S. A., Ozah, B. N., Alshahrani, H. A., y Ajibuwa, O. A. (2022). Application of finite element analysis for optimizing selection and design of ti-based biometallic alloys for fractures and tissues rehabilitation: a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 19, 121-139.

Cengel, Y. A., y Ghajar, A. J. (2019). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Education.

Reddy, J. N., y Gartling D. K. (2010). *The Finite Element Method in Heat Transfer and Fluid Dynamics*. CRC Press.

Lienhard, J. H. (2019). *Heat Transfer*. Courier Dover Publications

Nisbett, K. J., y Budynas R. G. (2014). *Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill Education.

Glodež, S., y Aberšek B. (2020). *The Life of Cracks: Theory and Application*. Cambridge Scholars Publishing.