



**POSGRADO INTERINSTITUCIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

---

**Diseño de banco óptico criogénico de  
instrumento FRIDA**

# **TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO  
ACADÉMICO**

**MAESTRA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN  
DISEÑO Y DESARROLLO DE SISTEMAS  
MECÁNICOS**

**PRESENTA**

**Ing. Diana Lucero Alba**

**QUERÉTARO, QRO. MARZO 2017**

## Resumen

---

La instrumentación astronómica empleada para observar los astros y fenómenos del espacio dentro rango del espectro infrarrojo de la luz, requiere de tecnología para la instrumentación de satélites espaciales tanto de la NASA (por sus siglas en inglés, National Aeronautics and Space Administration) como de la ESA (por sus siglas en inglés European Space Agency). Dichos instrumentos utilizados en sus telescopios más modernos, son utilizados para albergar componentes opto-mecánicos que harán el análisis de la luz proveniente del espacio. En su gran mayoría estos instrumentos son de gran tamaño y usados para aplicaciones específicas, por lo que es difícil replicar el mismo instrumento para otro estudio similar, aunque los principios de funcionamiento son similares, estos deben analizarse y diseñarse bajo parámetros específicos tales como: cargas gravitatorias, puntos de apoyo, estabilidad térmica y estructural, vibraciones, entre otros.

Uno de los componentes de diseño especial y medular para el correcto desempeño de estos instrumentos astronómicos, es el desarrollo del “Banco Óptico”; cuyo propósito es ofrecer soporte a todos los componentes opto-mecánicos internos, para una estabilidad y alineación adecuada de todo el instrumento.

El presente trabajo aborda el diseño del “Banco Óptico” del instrumento FRIDA (inFRared Imager and Dissector for the Adaptive optics system) de propósito especial para el GTC (Gran Telescopio Canarias), cuyos retos tecnológicos entre otras cosas consiste de: un diseño de geometría dimensional compleja por el espacio disponible dentro de la plataforma “*Nasmyth*” donde será colocado repercutiendo en concentraciones de esfuerzos dentro del tanque de nitrógeno; como el banco estará sometido a baja temperatura se esperan contracciones térmicas y deformaciones a lo largo de todo el banco, para las cuales se realizarán los análisis numéricos y así poder predecir su comportamiento y hacer las compensaciones pertinentes y no haya desalineaciones de los opto-mecanismos. Por último y no menos importante el banco debe ser capaz de transmitir las cargas gravitatorias hasta la plataforma “*Nasmyth*” donde será anclado.

Todos los requerimientos de diseño anteriormente descritos se desarrollan a lo largo del presente trabajo, desde la adaptación de diseño mecánico para ocupar la envolvente proporcionada para el instrumento dentro de la plataforma, pasando por la transmisión de cargas gravitatorias, hasta la optimización de los refuerzos internos dentro del tanque de nitrógeno líquido para soportar la presión interna del tanque mediante análisis numéricos por el método de elementos finitos. Tanto las contracciones térmicas provocadas por el descenso de la temperatura como las cargas gravitatorias de los opto-mecanismos los cuales provocan desalineaciones a lo largo del tren óptico, estos fenómenos son analizados de manera separada por medio de análisis termo-estructurales de elementos finitos para obtener datos numéricos para establecer las compensaciones y adecuaciones pertinentes que deberán incluirse en su manufactura y ensamble para que la alineación del tren óptico no se vea afectada por dichos fenómenos.

Así mismo el presente trabajo se realiza bajo una metodología científica de diseño que incluye los máximos detalles de ingeniería posibles para las condiciones y requerimientos de precisión, operación y mantenimiento del instrumento; esto reduce en gran manera la incertidumbre del diseño creando las bases de manufactura adecuadas para su fabricación y correcto funcionamiento.

## AGRADECIMIENTOS

---

A mi jefe y amigo Vicente Bringas Rico, porque me enseñó todo lo que quería saber sobre ingeniería cada uno de los días que trabajamos juntos, por su confianza depositada en mí, por abrir la posibilidad de que se hiciera ingeniería de otro nivel en el Centro, por su impulso para la realización de esta meta en mi vida profesional, pero sobre todo por su amistad.

A mi amigo Jorge Andrés Uribe Uribe por todo el apoyo que siempre me ha mostrado, lo que me ha enseñado y todo lo que aprendimos juntos a lo largo de nuestra vida profesional y del descubrimiento de la instrumentación astronómica.

Al Dr. Luis del Llano Vizcaya por su apoyo y asesoría.

A mis compañeros y amigos del CIDESI: Alberto Rodríguez, Adi Corrales, Berenice Ángeles por el camino que hemos recorrido juntos.

A mis amigos Mary García, César Martínez, José Luis Lázaro, Diana Torres, Arturo Velázquez, Jesús Ayala, Christian Félix Martínez y Obdulio Marrero por su apoyo constante, sus palabras de aliento que no me dejaron claudicar.

A Areli Ramírez porque desde el inicio fuiste mi gran apoyo para poder realizar esta meta.

Al equipo de FRIDA del IAUNAM: Beatriz Sánchez, Salvador Cuevas, Carlos Espejo, Rubén Flores, Carolina Keiman, Luis Álvarez por confiar en mi trabajo, por enseñarme y por todo el tiempo que compartimos juntos.

Muchas gracias.

## DEDICATORIA

---

A Dios por la vida y por permitirme terminar esta etapa en mi vida profesional.

A mis hijos Zohar, Pablo y Lior mis principales motores.

A mi esposo Oswaldo por su amor, apoyo y paciencia.

A mis padres por enseñarme a buscar ser mejor cada día con dedicación y esfuerzo constante, por su amor, apoyo y confianza a lo largo de toda mi vida.

A mis hermanos Iván y Jesús y a mi tía Lucrecia por estar conmigo siempre.

A mi madre.

Los amo profundamente.

## Contenido

---

<b>1. Introducción</b> .....	<b>7</b>
1.1 Antecedentes.....	7
1.2 Justificación .....	8
1.3 Objetivos.....	9
1.4 Estado del Arte .....	9
1.4.1 Banco de instrumento NIFS.....	9
1.4.2 Banco de instrumento ALTAIR .....	11
1.4.3 Banco de instrumento EMIR.....	13
1.4.4 Banco de instrumento LIRIS.....	14
1.4.5 Conclusiones del estado del arte.....	16
1.5 Definición del problema .....	16
1.6 Hipótesis del trabajo .....	18
<b>2 Alternativas de diseño del banco óptico</b> .....	<b>19</b>
2.1 Alternativa 1 .....	19
2.2 Alternativa 2.....	20
2.3 Alternativa 3.....	21
<b>3 Propuesta de diseño conceptual</b> .....	<b>22</b>
3.1 Antecedentes.....	22
3.2 Diseño conceptual del banco óptico .....	23
3.2.1 Selección de material .....	25
3.3 Diseño conceptual soportes de baja conducción. ....	28
3.3.1 Selección de materiales.....	28
3.3.2 Resumen de análisis preliminares de soportes de baja conducción. ....	29
3.3.2.1 Conclusiones y recomendaciones para diseño. ....	30
3.3.3 Detalle de diseño conceptual.....	31
<b>4 Modelación y simulación numérica</b> .....	<b>34</b>
4.1 Análisis de banco óptico .....	34
4.2 Modelo térmico en estado estable (sólo conducción).....	34
4.2.1 Modelo de elemento finito.....	34
4.2.2 Resultados y conclusiones .....	39
4.3 Análisis transitorio para evaluar el tiempo necesario para alcanzar el estado estacionario .....	41

4.3.1	Resultados y conclusiones .....	44
4.4	Análisis estructural para el banco óptico. ....	44
4.4.1	Resultados y conclusiones .....	45
4.5	Análisis Modal.....	46
4.6	Desplazamientos sobre la base fría. ....	48
4.6.1	Conclusiones .....	50
4.7	Análisis de tanque de nitrógeno líquido y optimización .....	52
4.7.1	Introducción y análisis preliminares .....	52
4.7.2	Modelo de elemento finito.....	54
4.7.3	Optimización del tanque .....	56
4.7.4	Resultados.....	59
4.8	Conclusiones del capítulo.....	65
<b>5</b>	<b>Conclusiones generales .....</b>	<b>67</b>
<b>6</b>	<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>69</b>
<b>7</b>	<b>Índices .....</b>	<b>70</b>
7.1	Índice de figuras .....	70
7.2	Índice de tablas.....	72
<b>8</b>	<b>Apéndices .....</b>	<b>73</b>
8.1	Publicaciones relacionadas con el tema.....	73
8.2	Hojas de proceso para componentes de banco óptico.....	73
8.3	Manufactura de componentes .....	78

# CAPITULO 1

---

## 1. Introducción

El Gran Telescopio Canarias (GTC) es el telescopio que encabeza la lista de los grandes telescopios con una superficie colectora de luz de 10.4m de diámetro que se encuentra segmentada en 36 espejos. El GTC se encuentra instalado en La Palma, Islas Canarias, en España, bajo uno de los mejores cielos para la observación astronómica.

El Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) en conjunto con el Instituto de Astronomía de la UNAM (IAUNAM) crearon convenios de trabajo para poder participar en la construcción de instrumentos para el GTC, cada institución aportando la experiencia en los campos a los que se dedica. Resultado de dichos convenios se han tenido casos de éxito como la construcción del instrumento “*Comissioning*” y la cámara de verificación OSIRIS que actualmente se encuentran funcionando en el GTC.

La experiencia ganada con la construcción y puesta en marcha de los instrumentos, hizo que el CIDESI en conjunto con el IAUNAM buscarán el respaldo de otras instituciones como La Universidad de Florida, El Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) y La Universidad Complutense de Madrid (UCM) para formar una red interinstitucional de talla internacional de gran calidad, y participar en las convocatorias lanzadas por el GTC para la construcción de instrumentos de alta tecnología; de esta manera y con este gran grupo se ganó la licitación para el diseño y construcción del instrumento FRIDA (“*inFRared Imager and Dissector for the Adaptive optics system*”) que es uno de los instrumentos proyectados para formar parte de la llamada segunda generación de GTC.

México es el que toma el liderazgo del proyecto a través del IAUNAM, quedándose en CIDESI el Diseño Mecánico del instrumento, así como la fabricación de los componentes mecánicos y en el IAUNAM el diseño de la instrumentación óptica.

El diseño y construcción de este instrumento se ha convertido en todo un reto tecnológico no sólo por el impacto internacional que tiene, sino porque ni en México ni en toda América Latina se han construido instrumentos de esta categoría.

### 1.1 Antecedentes

FRIDA es un instrumento científico que trabajará en el rango de longitud de onda de la luz infrarroja (infrarrojo cercano) y que aprovechará el haz corregido por el sistema de óptica adaptativa del Gran Telescopio Canarias con el que se consigue corregir en tiempo real los efectos producidos por la turbulencia ocasionada por la atmósfera. Entre más turbulenta es la atmósfera, las trayectorias de los rayos de luz que vienen de los astros se hacen más erráticas, generando imágenes menos definidas y limitando así la capacidad de distinguir objetos que están muy juntos.

FRIDA podrá trabajar tanto para tomar imágenes del Universo con una resolución del orden de decenas de milisegundos de arco (se podría distinguir una moneda de un peso a más de 100 km de distancia) como para estudiar mediante espectros (espectroscopia integral de campo) la composición química y las propiedades físicas de los cuerpos celestes. Estas características abren ampliamente las posibilidades de estudio pues observará desde los astros del sistema solar hasta las galaxias más lejanas, haciéndolo superior a otros instrumentos construidos con la misma funcionalidad.

FRIDA estará colocado en la plataforma Nasmyth B del telescopio, detrás del instrumento de Óptica Adaptiva, donde se corregirá el haz de luz; posteriormente el haz corregido

entrará a través del mecanismo de Plano Focal de FRIDA para luego recorrer cada uno de los mecanismos y de esta manera hacer el tratamiento de las imágenes tomadas.

Para hacer el análisis de la luz que entra al instrumento es necesario el uso de un detector de luz para longitudes de onda que corresponden al infrarrojo cercano (800 – 2500 nanómetros), debido a que los objetos de interés para estudiarse (las nebulosas y galaxias lejanas) poseen fuentes de luz débiles y radiaciones del orden de 2200 nanómetros. Este tipo de detector es muy sensible a cualquier cambio en la temperatura que se encuentra a su alrededor por lo que la generación de cualquier fuente de calor cercana a él hace que el detector se sature y no se pueda realizar exitosamente el análisis. El uso de este detector implica que dentro del instrumento FRIDA no haya fuentes de calor que puedan saturarlo; de esta manera se debe conseguir una temperatura de trabajo menor a 100K de manera estable.

La manera de alcanzar la temperatura deseada de 100K dentro del instrumento es necesaria la generación de vacío para eliminar la transferencia de calor por convección y radiación y preocuparse únicamente por la conducción. Para cumplir con estos dos requerimientos de trabajo, el instrumento deberá trabajar en lo que es llamado criogenia.

El banco óptico del instrumento así como toda la instrumentación montada sobre el mismo estarán sometidos a contracciones térmicas debido a las condiciones de trabajo; a su vez, estas contracciones serán diferentes por los diferentes tipos de materiales empleados. Es de esperarse que al ser FRIDA un instrumento limitado por difracción (es decir, que los errores inducidos por la mecánica no sean mayores que los inducidos por la óptica) deba analizarse cada componente para prever su comportamiento desde y durante las etapas de enfriamiento hasta llegar a la temperatura de trabajo para no ir sumando errores que pudieran resultar en la falla de todo el instrumento.

## **1.2 Justificación**

El presente trabajo trata del diseño del banco óptico del instrumento FRIDA de operación en criogenia (-193°C) realizando análisis por el método de elementos finitos que ayuden a dar el respaldo de diseño de tal manera que pueda predecirse de manera certera el comportamiento del mismo y minimizar los posibles errores inducidos por este componente mecánico dentro del instrumento.

El correcto diseño y predicción del comportamiento del banco podrá repercutir en el ahorro de tiempo y costo del proyecto, pues se gastan miles de dólares durante el proceso de manufactura, ensamble y pruebas del mismo. Por hacer mención, las pruebas de funcionamiento de un componente pueden durar meses ya que, las piezas deben tratarse térmicamente, descontaminarse minuciosamente, ensamblarse, llevar el componente a temperatura de trabajo dentro de un criostato de prueba (proceso que tarda aproximadamente un par de semanas) con el uso de nitrógeno líquido, mantener la temperatura de -193°C para realizar las pruebas necesarias y una vez terminadas se debe esperar a que llegue de nuevo a temperatura ambiente y abrir el criostato para hacer modificaciones. Este proceso se repite las veces que sea necesario hasta obtener el funcionamiento adecuado.



### 1.3 Objetivos

El trabajo tiene los siguientes objetivos:

- Investigar el estado del arte de los bancos ópticos implementados por otros grupos de trabajo con el fin de evaluar su viabilidad técnica en diseño para su aplicación en el instrumento FRIDA.
- Generar de una propuesta de diseño del componente del banco óptico para el instrumento FRIDA para cumplir satisfactoriamente los requerimientos impuestos, de tal manera que los errores inherentes a la mecánica del banco óptico al sumarse con los errores del resto de la mecánica del instrumento no sean mayores a los asociados a la óptica (límite de difracción) en las condiciones de operación.
- Realizar análisis numéricos térmico-estructurales del componente para el respaldo de la propuesta de diseño.

### 1.4 Estado del Arte

Con el afán de lograr un diseño adecuado del banco óptico del instrumento se analizaron los trabajos de otros grupos que tuvieran algunas similitudes al diseño del banco óptico como tamaño, temperatura de trabajo, geometría de los soportes del banco al criostato externo, entre otros; cabe mencionarse que la información sobre este tipo de componentes es muy escasa debido a que los instrumentos construidos son pocos y la divulgación escasa; a continuación, se describen los bancos analizados:

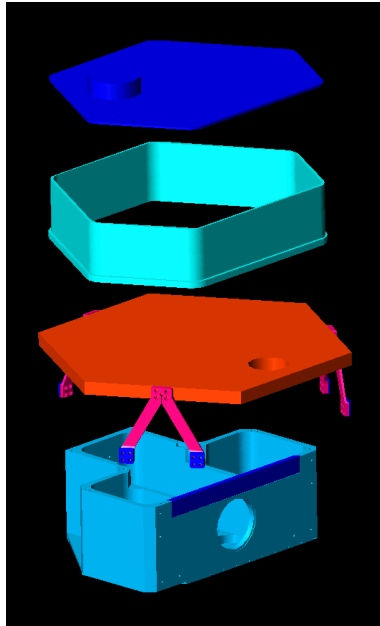
#### 1.4.1 Banco de instrumento NIFS

NIFS es el "*Near-Infrared Integral Field Spectrometer*" del Telescopio Gemini Norte construido por la Escuela de Investigación de la Universidad Nacional de Australia de Astronomía y Astrofísica.

NIFS está diseñado para ser alimentado por el sistema de Óptica Adaptativa del Gemini Norte; realiza espectroscopia en escalas tan pequeñas como 0.1" (arcsec) utilizando estrellas guía naturales o láser.

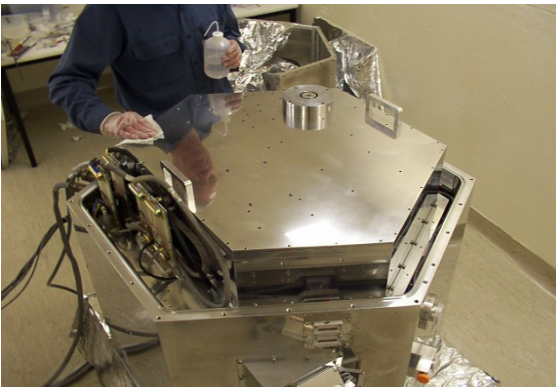
Su banco óptico es de forma hexagonal con dimensiones generales de alrededor de 1 m. El tanque de LN2 es una estructura monolítica de aluminio 6061 T6 que se encuentra soldada en la parte posterior del banco. (Figura 1-1)

Figura 1-1 Ensamble CAD del Banco Óptico de NIFS



Fuente: Research School of Astronomy and Astrophysics (2000, NIFS)

Figura 1-2 Instrumento NIFS ensamblado e instalado en el Telescopio Gemini Norte.



Fuentes: Research School of Astronomy and Astrophysics (2000, NIFS) y Gemini Observatory (2008, NIFS)

Luego del análisis de este banco óptico puede concluirse lo siguiente:

- La configuración del tren óptico, es decir, el camino que debe recorrer el haz de luz a lo largo del banco óptico es muy compacto, además de que su configuración es diferente a la de FRIDA. No es posible usar este mismo diseño.
- El costo para la manufactura de este componente es demasiado alto debido a que el tanque de nitrógeno líquido es monolítico. Pero debe rescatarse que usando un diseño monolítico es menos probable que haya una ruptura del

tanque de nitrógeno si se eleva la presión interna debido a una obstrucción en los ductos de nitrógeno. Deben analizarse otras opciones.

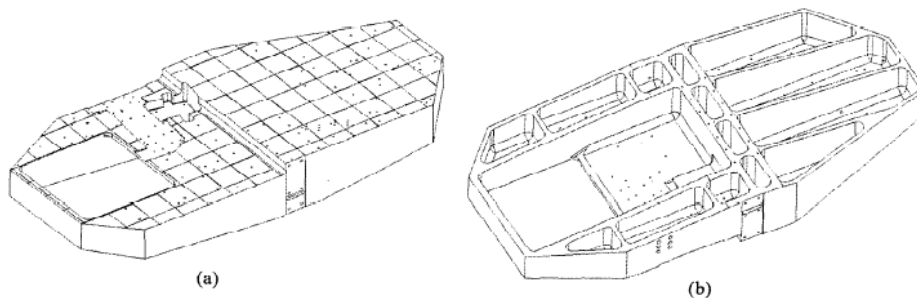
- Se toman en cuenta características importantes de este banco como son los materiales utilizados para la manufactura, pues presentaron buenos resultados durante las etapas de pruebas y manufacturas del componente.
- Se analiza el diseño de los soportes que van del banco óptico hacia el criostato externo, aunque el vector gravedad del componente sea usado en otra dirección que en el caso de FRIDA.

#### 1.4.2 Banco de instrumento ALTAIR

ALTAIR (*“ALTitude conjugate Adaptive optics for InfraRed”*) es la instalación de la estrella natural/laser guía del sistema de Óptica Adaptativa del Telescopio Gemini Norte que alimenta un haz de luz corregida hacia los instrumentos NIFS y NIRI. ALTAIR está equipado con un sensor de frente de onda Shack – Hartmann que utiliza la luz visible para medir el frente de onda. La corrección se realiza a la velocidad de hasta 1 kHz, y se optimiza automáticamente.

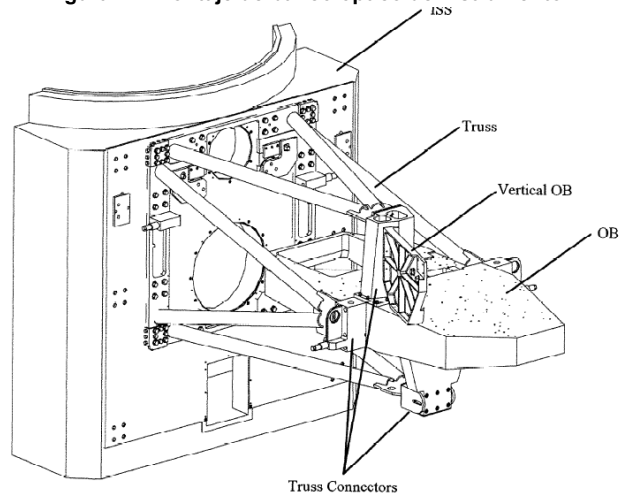
El diseño geométrico del Banco Óptico es una estructura monolítica con dimensiones finales de 1535 x 700 x 100 mm con un espesor tipo de pared, incluyendo las superficies de montaje superiores de 15- 20 mm. Una observación crítica en relación con el diseño del Banco Óptico del instrumento ALTAIR es el requisito de la rigidez estructural, pero al mismo tiempo dando a lugar a una estructura relativamente ligera. Inicialmente esto implicó seleccionar una aleación de aluminio de rigidez moderada como lo es el aluminio 6061 T6 el cual satisfizo los requisitos de resistencia, rigidez y masa total.

Figura 1-3 Vista Isométrica del banco óptico de ALTAIR



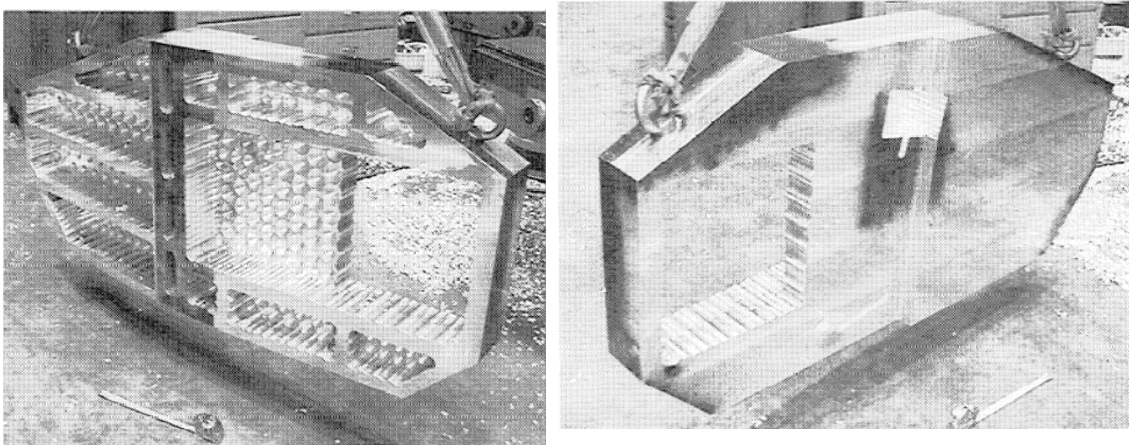
Fuente: Joeleff T. Fitzsimmons, Scott Roberts, Kei Szeto, Jerry Sebesta (abril 2000, p.900)

**Figura 1-4 Montaje de banco óptico de instrumento ALTAIR**



Fuente: Joeleff T. Fitzsimmons, et al. (abril 2000, pp. 900)

**Figura 1-5 Fabricación del Banco Óptico de ALTAIR**



Fuente: Joeleff T. Fitzsimmons, et al. (abril 2000, pp. 904-905)

De este banco puede mencionarse lo siguiente:

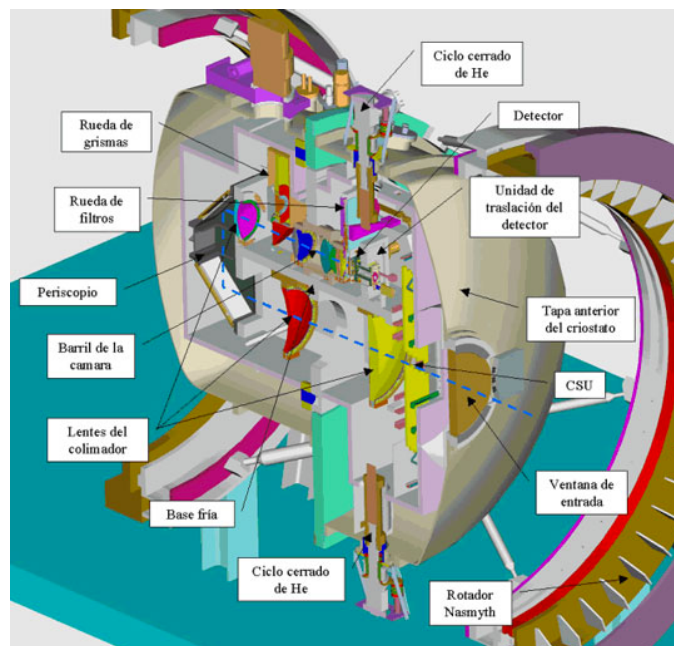
- Usan el mismo tipo de aluminio que el banco óptico del instrumento NIFS, destacando el uso de este material para cumplir en rigidez y optimización de peso, requerimientos que deben cumplirse debido a su gran tamaño y a la forma de sujeción y soporte del mismo.
- Se acerca a la configuración del tren óptico diseñado para FRIDA, pero la fabricación monolítica sigue siendo monolítica, que igual que en el caso anterior implica altos costos de manufactura.

- Debido al diseño interno del tanque y al tamaño del propio componente el peso resulta demasiado grande para cumplir la restricción impuesta a FRIDA; por lo que debe buscarse otra opción de diseño para optimizarlo.

### 1.4.3 Banco de instrumento EMIR

- EMIR es una cámara de gran campo y un espectrógrafo multi-objeto de resolución-media para el infrarrojo-cercano. EMIR es un instrumento de segunda generación que se instalará en el foco Nasmyth del Gran Telescopio Canarias.
- El proyecto EMIR es liderado por el IAC (Instituto de Astrofísica de Canarias), con la participación del Laboratorio de Astrofísica – Observatoire Midi-Pyrenees (Francia), Universidad Complutense de Madrid y el Laboratorio de Astrofísica – Observatoire de Marseille (France).
- El banco óptico de EMIR tiene un perfil en forma de H, donde el plato central da rigidez en una dirección y se encuentra cerca del centro de gravedad, mientras que las otras placas planas perpendiculares soportan los componentes ópticos.
- Las dimensiones generales del Banco son de 1.20 m y cuenta con varios tanques de LN2 construidos monolíticamente. Los tanques de LN2 de enfriamiento están conformados de placas soldadas de 8-10 mm de espesor. Dichos tanques de enfriamiento pertenecen al módulo delantero y posterior.

#### • Interior del instrumento EMIR

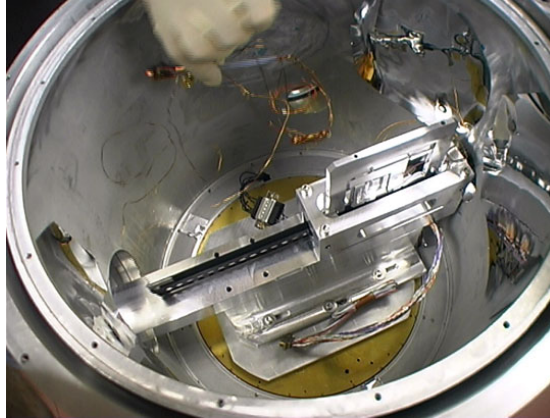


• Fuente: Consolider ingenio-GTC (s.f., parr. 5)

- Para el banco óptico del Instrumento EMIR:
- Es imposible adaptar esta configuración del banco ya que el tren óptico para FRIDA debe sufrir alteraciones y por la complejidad del diseño óptico no es posible realizar estos cambios.

- La masa resultante de este diseño es demasiado alta 4.5 ton.
- La manufactura continúa siendo costosa debido a la complejidad del banco y de los 4 depósitos de LN2 independientes.

Figura 1-6 Banco óptico de EMIR fabricado



Fuente: Consolider ingenio-GTC (2012, parr. 1)

#### 1.4.4 Banco de instrumento LIRIS

El Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) tiene a su cargo el diseño y construcción del espectrógrafo para el infrarrojo cercano LIRIS (*“Long-slit Intermediate Resolution Infrared Spectrograph”*) para el foco *“Cassegrain”* f/11 del Telescopio William Herschel.

El Banco óptico de LIRIS es una estructura soldada de aluminio, con el apoyo de un anillo frontal de la sección central de la cámara de vacío por tres armaduras hechas de material compuesto G10 glass-epoxy. Tiene una forma cilíndrica y sus placas actúan como superficie de referencia para el montaje de todos los mecanismos fríos. El Banco tiene un módulo de LN2 para pre-enfriar el instrumento con una dimensión generales de 1 m con una masa fría de 200 kg.

**Figura 1-7 Banco óptico montado en anillo central**



Fuente: Instituto de Astrofísica de Canarias (2002, LIRIS)

**Figura 1-8 Pruebas del instrumento ensamblado**



Fuente: IAC (2002, LIRIS)

Sobre este banco óptico se puede comentar lo siguiente:

- Las dimensiones del banco son pequeñas para adaptar el tren óptico.
- La geometría no corresponde con la configuración del tren óptico diseñado para FRIDA.
- El anillo interno que soporta el banco óptico es fabricado de material G10, para un adecuado aislamiento entre el exterior y el banco. Se obtuvieron buenos

resultados con este material, por lo que debe tomarse en cuenta para el diseño de los sistemas para aislamiento de FRIDA.

#### **1.4.5 Conclusiones del estado del arte**

Después de realizar el análisis de los diferentes grupos de instrumentación en sus trabajos referentes a los bancos ópticos para trabajo en criogenia, se concluye que no resuelven las necesidades para el instrumento FRIDA. Se corrobora lo planteado al inicio del presente trabajo en donde se habla que los requerimientos planteados para cada instrumento son específicos para cada aplicación, así, para FRIDA las limitantes de tamaño y de geometría son puntos críticos que no pueden ser cubiertos por los diseños de bancos ya existentes.

La información relacionada con los bancos ópticos encontrada es muy superficial y en muchos de los casos con escasas referencias sobre solución de problemas presentados a lo largo del proyecto; pues algunos de los casos que se presentaron como estado del arte son proyectos que aún se encuentran en proceso de ser terminados; por lo que se vuelve relevante el hecho de que muchas de las problemáticas que se presenten durante el desarrollo del presente trabajo deberán solucionarse con los medios de los que se disponen actualmente.

Se pudieron observar algunas consideraciones y coincidencias en cuanto a la selección de materiales que se emplearon para el diseño y la manufactura de dichos bancos; por lo que será importante hacer el análisis de dichos materiales para ser considerados durante el diseño del banco óptico del instrumento FRIDA.

#### **1.5 Definición del problema**

Al ser FRIDA un instrumento limitado por difracción y trabajar en criogenia, lleva al límite el diseño de la mecánica de cada uno de los diversos componentes del criostato debiéndose analizar minuciosamente cada uno de los fenómenos que ocurren en cada uno de ellos y sus afectaciones finales: distorsiones, esfuerzos, micro-fluencia, fluencia, frecuencias naturales, entre otros. Teniendo estudiado cada componente y las restricciones debidas al funcionamiento extremo al que estará sujeto, se debe predecir su comportamiento, pues cada componente individual irá sumando afectaciones en el funcionamiento del sistema en general. Entre más información se disponga sobre cada componente se podrán hacer las compensaciones necesarias para que cuando el sistema llegue a las condiciones de trabajo todo quede en la posición correcta.

A continuación, se mencionan los requerimientos planteados para el banco del instrumento FRIDA:

- El diseño del banco óptico se hará para trabajar a una temperatura 77K (-196°C), deberá mantener esta temperatura constante y no deberá tener gradientes de temperatura máximos de 5K por metro de longitud. El método de enfriamiento del banco óptico en su primera fase se hará introduciendo Nitrógeno Líquido en un tanque que se encontrará en la parte inferior de la base fría.
- Evitar la distorsión del tren óptico que implica mantener la alineación de los opto-mecanismos en un rango de  $\pm 100 \mu\text{m}$  y 1.7 mili-radianes. Esto implica tener claras las



deformaciones provocadas por las cargas gravitatorias tanto del banco como de los mecanismos distribuidos a lo largo de todo la base fría y las deformaciones provocadas por las contracciones térmicas ocasionadas por el descenso de temperatura a 77°K.

- El tanque de nitrógeno colocado debajo de la base fría en una primera etapa de operación deberá ser capaz de soportar una presión positiva de 4 atmósferas durante la primera etapa de enfriamiento; es decir cuando se introduce nitrógeno líquido dentro del tanque. Esta presión corresponde a la suma de la presión ejercida por ebullición del nitrógeno líquido más un factor de seguridad por obstrucción de los ductos de alimentación y ventilación si llegara a ocurrir la condensación del nitrógeno líquido en los ductos.
- Debido al diseño del tren óptico, las restricciones impuestas por el sistema de Óptica Adaptativa (AO) y el espacio disponible en la plataforma Nasmyth hace necesario que la geometría del banco óptico se vea restringida con una forma asimétrica, rectangular y con una extensión al frente. Lo descrito anteriormente implica un reto tecnológico pues no existe un banco con estas dimensiones, además de que la geometría resultante incrementa los esfuerzos en el componente.
- El banco óptico debe estar soportado por 3 puntos para conservar su isostaticidad, pero sin perder rigidez en el ensamble; además, estos tres soportes deben fungir como aislantes térmicos entre el criostato externo y el banco óptico para que no haya pérdidas térmicas. Estos tres soportes deben garantizar la transmisión de cargas gravitatorias del banco hasta los puntos permitidos sobre la plataforma Nasmyth.
- Se debe optimizar al máximo el peso del banco óptico, con miras a que se pueda alcanzar el objetivo de que todo el instrumento pese hasta 4 toneladas.
- Se debe garantizar la modularidad del ensamble para facilitar la manipulación de sus componentes durante todas las etapas del proyecto.

En la siguiente tabla se presentan los requerimientos solicitados, los datos medibles (en los casos que se puedan obtener) que deben cumplirse, y la posible forma de alcanzar dichos requerimientos:

Tabla 1-1 Planteamiento del problema

REQUERIMIENTO	VALORES MEDIBLES			POSIBLE SOLUCIÓN
<b>Garantizar que los esfuerzos ocasionados en los materiales debidos a la temperatura de trabajo sean menores o iguales a los valores dados.</b>	No poseer gradientes térmicos máximos de 5K por metro de longitud	No sobrepasar micro-yield del Aluminio de 80MPa.	No sobrepasar el esfuerzo último de los materiales usados para el banco.	Análisis MEF transitorio para predecir el comportamiento a lo largo del banco.
<b>Garantizar que las distorsiones por las cargas gravitatorias del banco sean menores o iguales que los valores dados.</b>	No mayores a $\pm 100 \mu\text{m}$ y 1.7 mili-radianes a lo largo del tren óptico. Es decir, a lo largo del tren óptico.			Análisis MEF de contracciones térmicas y estructurales para predecir el comportamiento a lo largo del banco
<b>Supervivencia del tanque de nitrógeno en la etapa</b>	Soporte de 4 atmósferas de presión positiva dentro del tanque.			Análisis MEF de presión

<b>de enfriamiento</b>		
<b>Diseño de geometría asimétrica</b>		Modelado en 3D considerando envolventes de otros componentes en la plataforma Nasmyth
<b>Diseño de soportes del banco isostáticos y aislantes</b>		Análisis MEF térmico para evaluación de transferencia de calor a través de soportes

Conocer, plantear y hacer que el diseño del banco cumpla con cada uno de los requerimientos será el tema a desarrollar durante los siguientes capítulos.

### **1.6 Hipótesis del trabajo**

Si se cumple con las especificaciones de operación, de estabilidad dimensional, térmica y planitud para evitar distorsiones en el tren óptico provocadas por deformaciones a lo largo del banco óptico, entonces es posible construir el banco óptico del instrumento FRIDA que trabaje adecuadamente en las condiciones impuestas para un instrumento limitado por difracción.

## CAPITULO 2

---

### 2 Alternativas de diseño del banco óptico

La configuración del recorrido del haz de luz dentro del instrumento se ha modificado durante el transcurso del proyecto para cumplir con los altos requerimientos que se le han impuesto al instrumento y por consecuencia también se han modificado el diseño mecánico.

A través de todas estas modificaciones que se tuvieron en el diseño y de las retroalimentaciones surgidas por parte de los clientes es que se alcanzó una mejor comprensión sobre el diseño que se debe tener en este tipo de componentes, ya que con cada una de ellas se fue acercando un diseño cada vez más óptimo.

En las siguientes figuras se observan diversos diseños del instrumento basados en varias configuraciones de la óptica incluyendo el banco óptico; en ellos pueden verse plasmadas algunas de las ideas obtenidas a través de la revisión de los bancos de otros instrumentos y tratando de cumplir con los requerimientos expuestos en la sección 1.5 en cada una de estas alternativas. Las características prevalecientes en cada uno de los diseños fueron las siguientes:

- El banco óptico posicionará y soportará los opto-mecanismos a lo largo del tren óptico y también contendrá el nitrógeno líquido para la etapa de pre-enfriamiento.
- El banco óptico debe incluir el depósito de LN2 de manera integral, de ser posible a todo lo largo del mismo para incrementar la eficiencia en el intercambio de calor durante la etapa de pre-enfriamiento.
- Los soportes de baja conducción, soportarán el peso de los opto-mecanismos y el banco óptico; además de fungir como aislante térmico entre el criostato externo y el banco óptico.

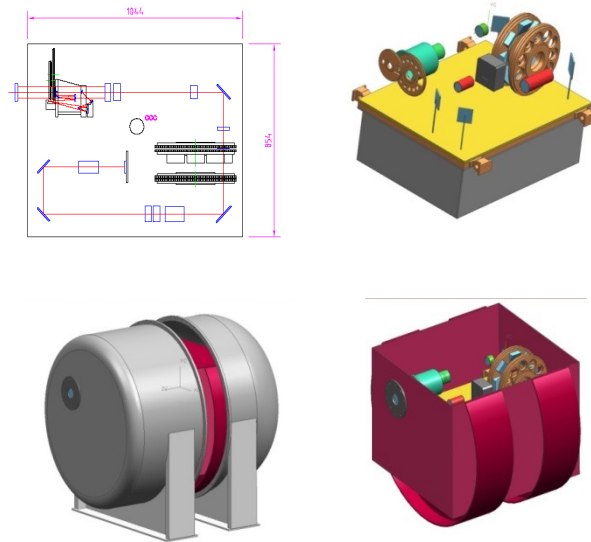
El depósito de nitrógeno líquido se usará únicamente para la etapa de pre-enfriamiento que es la etapa durante la cual se busca disminuir la temperatura del instrumento a la temperatura de trabajo  $-193^{\circ}\text{C}$  ( $77^{\circ}\text{K}$ ) para después mantenerla mediante componentes mecánicos.

Una vez realizadas estas observaciones a continuación se hace una breve descripción de las diversas alternativas.

#### 2.1 Alternativa 1

Para este diseño se puede observar un banco de gran tamaño en donde se buscaba almacenar la mayor cantidad de Nitrógeno líquido para la etapa de pre-enfriamiento; esto, de acuerdo a uno de los diseños preliminares de la óptica (como puede observarse en una de las figuras). Aún no se había definido con exactitud la envolvente disponible sobre la plataforma Nasmyth.

Figura 2-1 Alternativa 1 del banco óptico

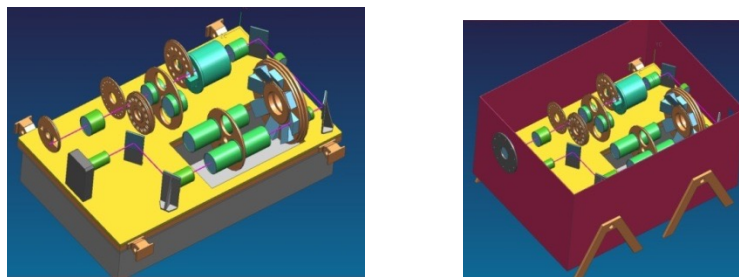


El diseño obtenido resultó demasiado masivo y los soportes hacia el criostato externo que servirán como aislantes no resistirían el diseño planteado pues se sostendrían solo en 4 puntos que afectaban grandemente las deformaciones sobre la base fría.

## 2.2 Alternativa 2

El siguiente modelo se modificó debido a la adición de nuevos componentes sobre el banco óptico y con la apertura de las distancias entre componentes. Para este diseño tampoco se había definido la envolvente disponible sobre la plataforma Nasmyth.

Figura 2-2 Alternativa 2 del banco óptico



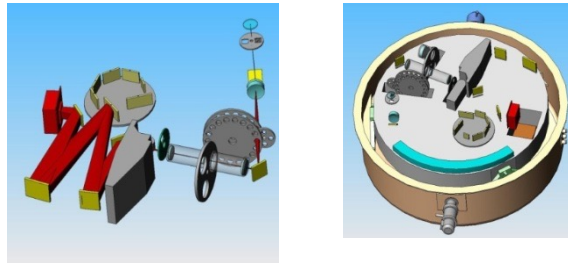
Para este diseño se ampliaron las dimensiones del banco y se disminuyó la altura del tanque de nitrógeno lo que disminuía en gran manera la masa del componente. Debido al diseño de la óptica debían sumergirse algunos mecanismos por debajo de la base fría, por lo que se propuso un banco monolítico, pero por las dimensiones resultaba muy complicado y costoso. Aún se complicó más el diseño con las interfaces de los mecanismos hacia la base fría. Se comenzó a tratar el tema de la forma del banco, pues con este diseño cuadrado se tendrían esquinas sobre las cuales se crearían zonas de acumulación de esfuerzos debidas a las condiciones de operación (presión positiva en el

interior del tanque y en el exterior condiciones de vacío). Se hacía poco factible la interfaz de los soportes laterales hacia el criostato externo.

### 2.3 Alternativa 3

En un tercer acercamiento en el diseño mecánico del criostato y del banco se cambia drásticamente a una geometría circular debido a las observaciones realizadas con el diseño anterior. El diseño óptico se compacta y se busca adaptar a esta geometría si tener aún la envolvente de la Nasmyth.

Figura 2-3 Alternativa 3 del banco óptico



Se retorna a un tanque de nitrógeno de gran tamaño, para compensar las pérdidas de volumen de LN2 causadas por las perforaciones hechas a la base fría para que los componentes queden sumergidos dentro del tanque. Con este concepto de nueva cuenta el costo de manufactura es muy alto.

Las interfaces de los soportes al criostato externo se hacían más factibles, pues se distribuyen de manera equitativa en toda la periferia del banco óptico.

Tras la entrega de este diseño, surgió la restricción de que los soportes de baja conducción, la estructura de soporte debe transmitir las cargas gravitatorias a los puntos de soldadura de la plataforma Nasmyth; cabe destacarse que esta restricción no se había plasmado hasta este punto, este diseño se descarta con esta nueva restricción. También como retroalimentación de este diseño se hizo necesario trabajar en una modificación del tren óptico para evitar la inmersión de los mecanismos dentro del tanque de nitrógeno y así disminuir costo de manufactura y evitar choques térmicos en los componentes debido a que la temperatura bajaría bruscamente en esos saques.

Estas son las alternativas analizadas y que fueron creando experiencia en el diseño de los diversos componentes del banco óptico y que hicieron ahondar en las restricciones para cumplir con todas ellas. Cada uno de estos diseños fue revisando por los clientes durante las diferentes etapas del proyecto. A continuación, se describirá el diseño propuesto que cumple con todos los requerimientos planteados.

## CAPITULO 3

### 3 Propuesta de diseño conceptual

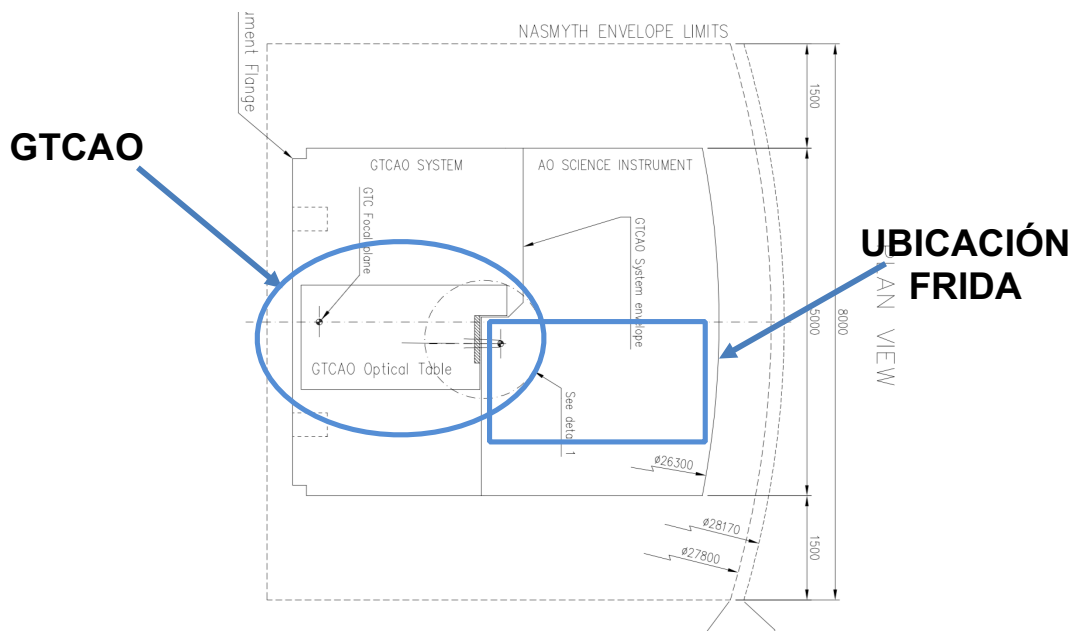
#### 3.1 Antecedentes

Para comenzar con el diseño conceptual del banco óptico se definieron restricciones importantes para el diseño del Instrumento que se revisarán a continuación.

- Se definió el diseño de la óptica, con lo que se puede trabajar en los diseños conceptuales de todos los componentes.
- Se cerraron las envolventes definitivas del instrumento de Óptica Adaptativa (que va colocado delante de FRIDA sobre la plataforma Nasmyth) y del instrumento FRIDA. Con estas envolventes se define tanto la geometría del banco como el tamaño del mismo. (ver Figura 3-1)

Además de estas restricciones se deben tomar en cuenta las que se establecieron en el apartado 1.5.

Figura 3-1 Lay-out GTCAO en plataforma Nasmyth



Fuente: Plano "Adaptive Optics System- Adaptive Optics Instrument"

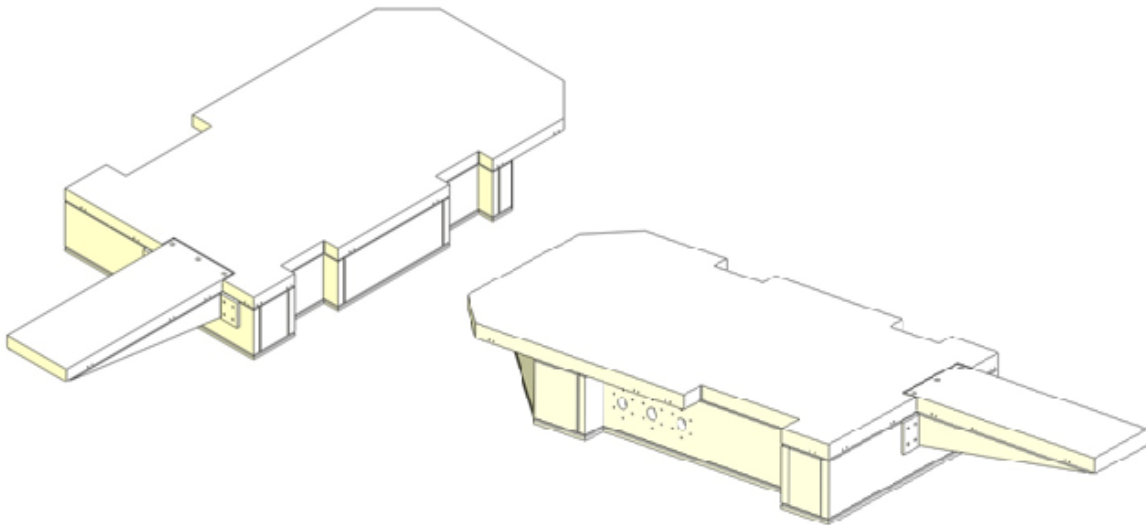
DR/I-AO-AO-001/001 Hoja 1-1 versión 2ª

El plano mostrado en la figura superior muestra la envolvente de GTCAO (encerrado dentro de la forma ovalada) y la ubicación de la envolvente de FRIDA delante de GTCAO (encerrado en un rectángulo), también dentro de esta figura rectangular podemos observar que existe un punto de inserción marcado con un símbolo de espiga dentro del plano, que nos indica que ahí es donde debe estar el primer mecanismo de FRIDA.

### 3.2 Diseño conceptual del banco óptico

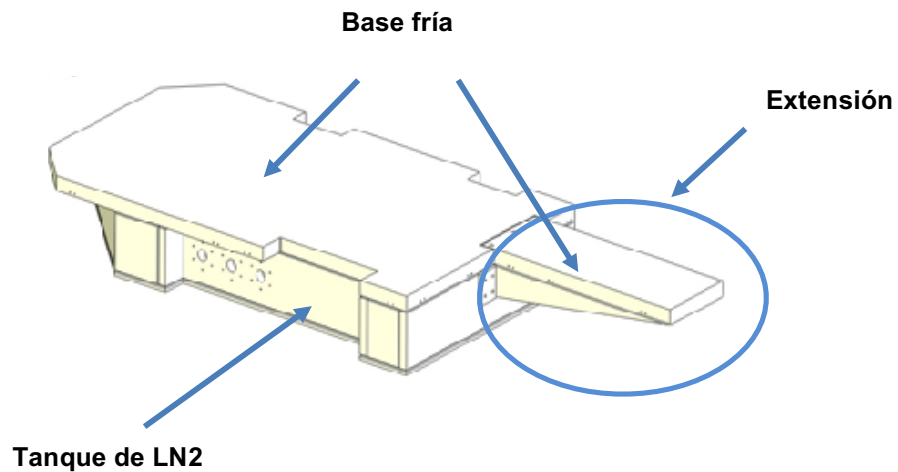
Con las restricciones ya establecidas para el banco se preparó el diseño conceptual del banco óptico para la revisión denominada “*Preliminar Design Review*” (PDR). A continuación, se hará una breve descripción de este diseño.

Figura 3-2 Diseño del banco óptico presentado en PDR



El banco óptico tiene una configuración rectangular con una placa en la parte superior que consta de dos secciones; ambas placas en su conjunto son llamadas base fría. La parte superior de la base fría proporciona la interfaz estructural con los mecanismos del instrumento y por la parte inferior se encuentra el contenedor o tanque de Nitrógeno Líquido (LN2) (ver Figura 3-3).

Figura 3-3 Componentes principales del banco óptico



La base fría tiene dos partes, una de ellas formando un ensamble con el tanque de nitrógeno aprovechando lo mejor posible el área de contacto y la transferencia de calor que se genera a través de esta área; la segunda parte colocada en la parte frontal como una extensión de la base fría del banco óptico para que el primer mecanismo del instrumento pudiera colocarse en el lugar marcado en el plano proporcionado por GTC (Figura 3-1).

La división de la base fría en dos partes obedece en primer lugar para facilitar el ensamble del instrumento. Con esta partición se disminuyen los costos de manufactura, pues fabricar una pieza de ese tamaño resulta demasiado costoso por la cantidad de material desperdiciado; por otro lado la extensión de la base fría induce la posibilidad de deformaciones que afecten el tren óptico, debido a la carga gravitatoria que tendrá en su parte más externa causada por el mecanismo colocado en esa posición y por la unión mecánica que existe entre ambas partes de la base fría. Es importante analizar estas afectaciones al funcionamiento del instrumento para encontrar la manera de compensarlas y disminuirlas.

En la Figura 3-3 la base fría cuenta con tres cortes rectangulares que servirán para el paso de los cables de los diferentes componentes colocados sobre el banco hacia sus respectivos conectores en la estructura del criostato externo.

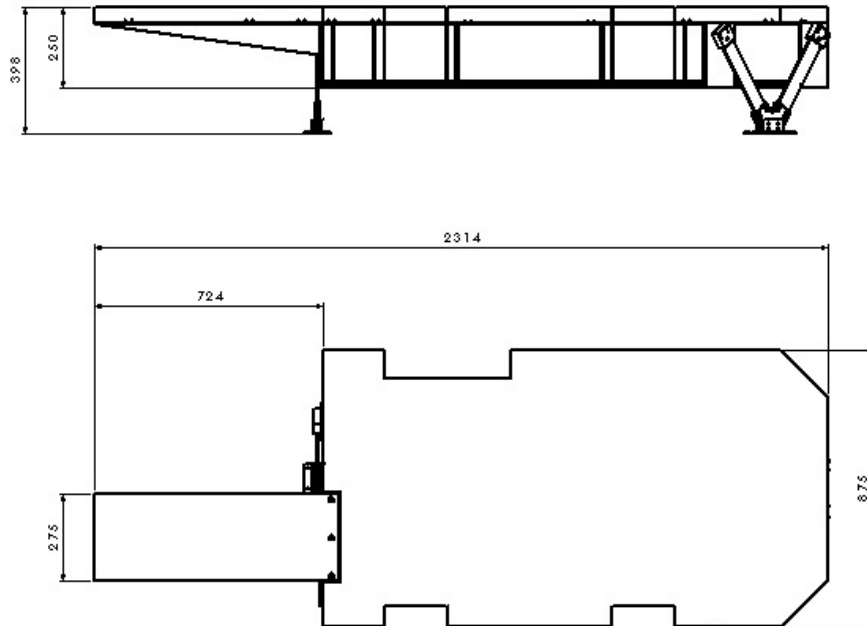
También en la Figura 3-3 pueden observarse tres orificios en la parte lateral del tanque, estos orificios tendrán su principal función durante la etapa de pre-enfriamiento utilizándose de la siguiente manera: uno para la entrada de nitrógeno líquido, otro para la salida de gases producto de la vaporización del LN2 y el último para la medición del nivel de nitrógeno. Para dicho funcionamiento se colocan en cada uno de los orificios componentes que sirven de interfaz entre el criostato externo y el interior del tanque de nitrógeno.

Las dimensiones generales del banco óptico son 2314mm de longitud x 875mm de ancho y 250mm de altura y se muestran en la siguiente figura (

Figura 3-4). En esta misma figura pueden observarse los soportes de baja conducción hacia el criostato externo, éstos se explicarán en una sección posterior.



Figura 3-4 Dimensiones generales banco óptico



Haciendo los cálculos pertinentes, se obtiene que el volumen efectivo de LN2 que puede almacenarse dentro del tanque de nitrógeno es de aproximadamente  $0.072 \text{ m}^3$ ; éste dato tomará importancia para la simulación numérica que se realizará en capítulos posteriores.

### 3.2.1 Selección de material

Como parte de los requisitos de diseño del Banco Óptico, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones para la selección del material:

- Trabajo en temperatura criogénica
- Facilidad de maquinado
- Soldabilidad
- Conductividad térmica
- Resistencia mecánica
- Baja desgasificación
- Experiencias previas en uso
- Disponibilidad

De acuerdo a lo establecido por otros grupos de instrumentación y el estudio del arte mencionado en la sección 1.4, se encuentra una aleación de aluminio que es la más viable. El material seleccionado para la fabricación del Banco Óptico es el aluminio 6061-T6 de carácter aeroespacial, debido a sus características de trabajo en criogenia, baja desgasificación, maquinabilidad con acabados de  $0.4 \mu\text{m}$  en rugosidad, capacidad de tratamiento por envejecimiento (requerido para la criogenia) y estabilidad térmica, además de buena resistencia mecánica, buena conductividad térmica, costo accesible y disponibilidad en el mercado.

La designación para esta aleación de aluminio en bruto se identifica como una aleación con contenido de Aluminio, Manganeso y Silicio. Para otorgarle las propiedades mecánicas con endurecimiento estructural a dicha aleación se requieren una secuencia de tratamientos térmicos, a lo cual se denomina estado T6, que indica que ha recibido un tratamiento térmico de solución, temple y madurado artificial.

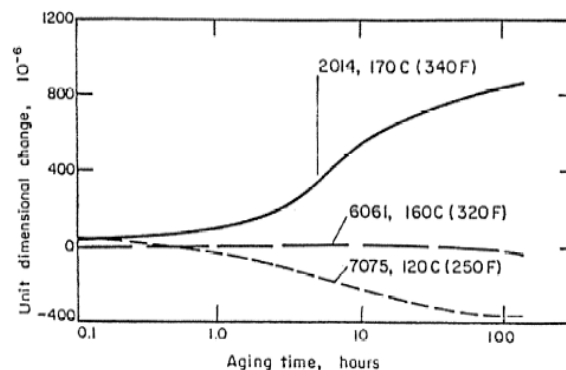
A continuación, se describen algunas de sus propiedades:

- Resistencia a la cedencia: 270 MPa
- Módulo de elasticidad: 68.9 Mpa
- Razón de Poisson: 0.33
- CTE de expansión lineal (20-100 °C):  $23.6 \mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$
- Conductividad térmica:  $167 \text{ W}/\text{m}^\circ\text{K}$

La aleación es una aleación dúctil y ligera (Aluminio, Magnesio y Silicio), con propiedades mecánicas similares a la de los aceros medios; excelente resistencia a la corrosión y se le puede dar un buen acabado; es la mejor aleación para soldar, teniendo pocas inclusiones.

El envejecimiento (T6) es un tratamiento en solución y un envejecimiento en horno que consiste en calentar el material a  $900^\circ\text{C}$  para poner los elementos precipitados en solución y posteriormente templearlo en agua para atrapar la solución sólida. Este endurecimiento por envejecimiento en los materiales permite ajustar las propiedades del material manteniéndolo de  $200$  a  $300^\circ\text{C}$  por varias horas y enfriándolo al aire. Este tratamiento permite pocas distorsiones y deformaciones a largo plazo por el cambio térmico durante la criogenia. Una característica importante es que la facilidad para el maquinado se mantiene hasta una distancia de  $50\text{mm}$  de la superficie; al acercarse al núcleo la maquinabilidad se dificulta.

Figura 3-5 Cambios dimensionales en tres aleaciones de aluminio causado por el envejecimiento artificial



Es estable térmicamente para las aplicaciones en criogenia por sus características estructurales.

El temple afecta la conductividad (eléctrica y térmica) en un 10% y tiene un efecto pronunciado en la dureza y la resistencia a la fluencia (factor de 2 a 3). El módulo de elasticidad no es afectado.

Otras características importantes para este material se pueden mencionar.

- Alta rigidez/peso.
- Alta resistencia micro-fluencia (80 MPa)
- Estabilidad dimensional a largo plazo.
- Propiedades térmicas y mecánicas muy buenas para el LN2.
- Ampliamente usado en recipientes a presión, escudos, bancos fríos y componentes fríos como opto-mecanismos.

En la siguiente tabla se pueden apreciar las propiedades del Aluminio 6061 T6 mejoran en los 77 °K, por lo que es un excelente material para trabajo en criogenia (se pone como referencia).

**Tabla 3-1 Propiedades del Aluminio 6061 de 293 a 77 K°**

	Temperature (K)				
	293	195	150	80	77
Tensile Strength (MPa)	309	351	371	401	402
Yield Strength (MPa)	291	302	312	337	337
Elongation (%)	16.5	19.4	20.8	22.9	23.0
Young Modulus (GPa)*	70	73	75	77	77
Thermal Conductivity (k) (W/mK)	172.7	146.8	129.5	98.0	96.0
Integral Conductivity (W/m)	34868	19007	12805	4810	4519
CTE x 10 <sup>-6</sup> (K <sup>-1</sup> )	22.5	20.0	16.8	9.5	9.0
(L <sub>T</sub> -L <sub>293</sub> )/L <sub>293</sub> (%)	0	-0.21	-0.3	-0.39	-0.4

Specific Heat (J/kg.K)	872	723	616	300	290
Integral Specific Heat (J/kg)	152110	72828	42438	8650	7700

Interpolación lineal entre 293 y 77<sup>a</sup>K

Fuente: Nota técnica FR/TN-ST/016 Propiedades de los materiales de Instrumento FRIDA

### 3.3 Diseño conceptual soportes de baja conducción.

Las funciones principales de los soportes de baja conducción son:

- Mantener la isostaticidad del ensamble.
- Evitar la transferencia de calor a través de ellos hacia el banco óptico, ya que están en contacto con el criostato externo.
- Soportar las cargas gravitatorias de los opto-mecanismos y del banco óptico.
- Transmitir las cargas gravitatorias hacia la estructura de soporte y de ahí directamente a los rieles de la plataforma Nasmyth.

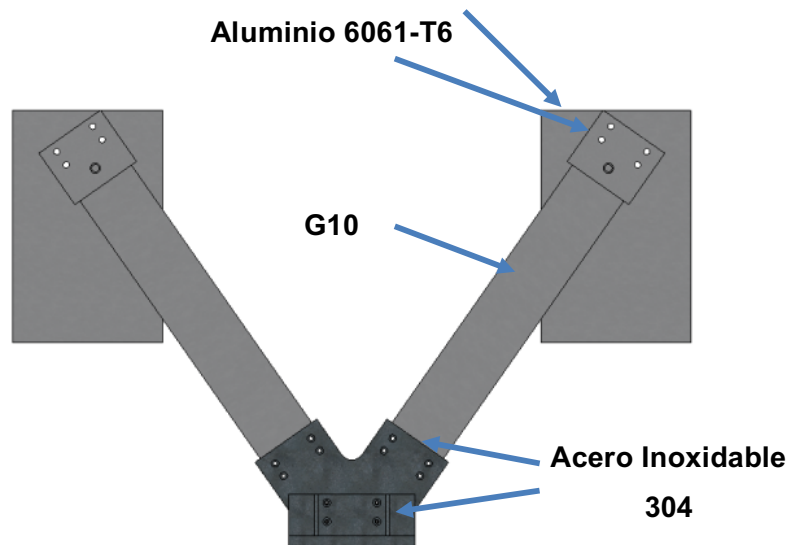
El diseño conceptual de estos soportes parte de analizar los diseños utilizados en otros instrumentos y por los buenos resultados que se obtuvieron se decidió adaptarlo al instrumento FRIDA.

#### 3.3.1 Selección de materiales

Al igual que el material seleccionado para el banco óptico, los materiales para los soportes fueron seleccionados tomando como referencia los usados para otros instrumentos.

Debido a que estos soportes servirán de enlace entre dos componentes que se encuentran a diferentes temperaturas y con diferentes materiales la selección de los materiales que estarán en contacto con cada una de las superficies debe ser del mismo tipo de material para evitar distorsiones entre las interfaces. Así y siguiendo con la premisa anteriormente descrita la parte superior de los soportes (que incluye las placas de interfaz y la cubierta superior) que entran en contacto con el banco óptico se diseñan de Aluminio 6061-T6, y la parte inferior que estará en contacto con el criostato externo (que incluyen las bases) serán de Acero inoxidable aleación 304 (Figura 3-6).

Figura 3-6 Materiales para cada componente del soporte



Debido a la temperatura interna que habrá en el interior del instrumento ( $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), los componentes sufrirán contracciones térmicas. Dadas las condiciones de los materiales que estarán en contacto con los soportes de baja conducción tanto en la parte superior como en la inferior se prevé que la diferencia en las contracciones térmicas entre uno y otro material (además de las cargas gravitatorias) provocará que existan esfuerzos muy grandes en el componente intermedio; por lo que se debe seleccionar un material que pueda resistir estas condiciones de trabajo.

Dado lo anterior y con las experiencias de los otros equipos de trabajo de otros instrumentos, se selecciona para este componente el compuesto G-10 debido a sus buenas propiedades estructurales y su baja conductividad térmica.

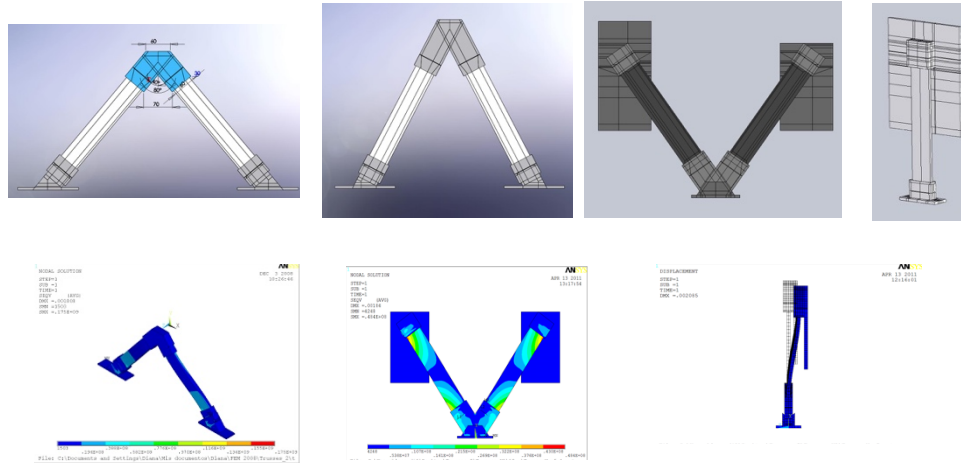
El compuesto G10 debido a que es una fibra reforzada posee diferentes propiedades mecánicas en las diferentes direcciones de las fibras, por lo que es importante tomar en cuenta estas características tanto para los análisis numéricos y para la fabricación de cada uno de los componentes. Es difícil señalar todas las propiedades, pues varían de acuerdo a las presentaciones del material y actualmente se dispone de muy poca información del comportamiento de este material.

### 3.3.2 Resumen de análisis preliminares de soportes de baja conducción.

Los soportes de baja conducción son los componentes que se analizaron por medio del método de elemento finito para asegurar que su funcionamiento fuera el adecuado. El cliente pidió que para mantener la isostaticidad del sistema era necesario que el banco óptico estuviera colocado sobre tres puntos, por lo que se plantearon diversas configuraciones de dichos soportes y que estuvieron evaluándose. Primeramente, se plantearon las configuraciones para dichos soportes, evaluándose los ángulos de incidencia entre las barras de G10, los espesores de la barra de G10 y si se colocaban en forma de "A" o "V" o inclusive si se colocaban en forma de "I". A continuación, se muestran algunas imágenes que muestran algunos pasos del camino recorrido durante las evaluaciones numéricas sobre los soportes a través del método de elemento finito en

Ansys<sup>R</sup> clásico únicamente haciendo un análisis de esfuerzos considerando las cargas gravitatorias esperadas.

Figura 3-7 Configuraciones y resultados de análisis de soportes



Algunas de las condiciones del modelado que se toman en cuenta para los análisis son:

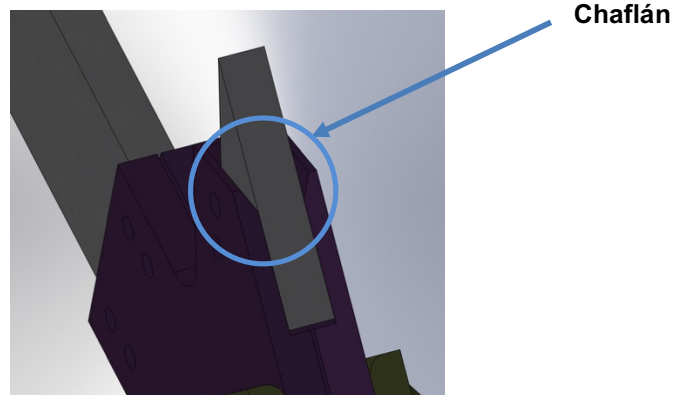
- La asignación de las propiedades de los materiales para cada uno de los componentes.
- Asignación de ejes coordenados locales a lo largo de las barras de G10 para simular la alineación de las fibras del material y representar las condiciones orto-trópicas del material.
- Desplazamientos a lo largo del eje Z, simulando las contracciones del banco óptico en la parte superior del soporte.
- Restricción de todos los grados de libertad de la base.

### 3.3.2.1 Conclusiones y recomendaciones para diseño.

Entre cada uno de los análisis realizados se fueron haciendo modificaciones y el camino para encontrar la configuración adecuada fue bastante largo, pero se hicieron conclusiones y recomendaciones para el diseño que se tomaron en cuenta para el diseño presentado para el PDR y que se enlistan a continuación:

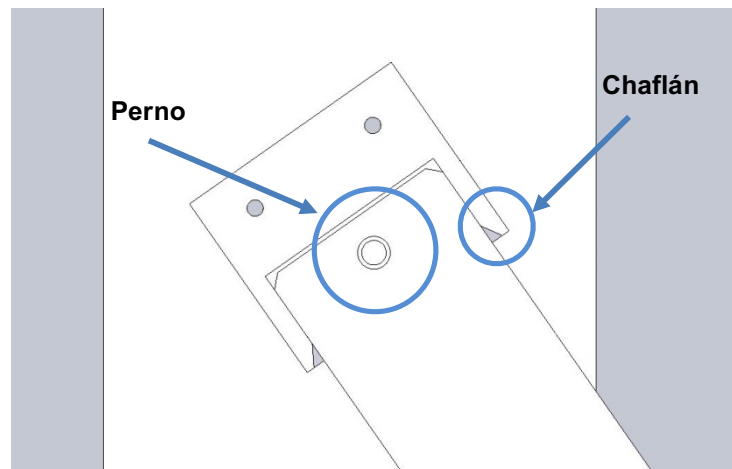
- La configuración y la geometría de los soportes queda en tres soportes en forma de "V". Se describirá en los siguientes apartados.
- Las bases de los soportes deben llevar chaflanes en las partes internas que se encuentran en contacto con la barra de G10 para evitar la concentración de esfuerzos y la ruptura del material.

Figura 3-8 Chaflán interno en componente de soporte



- Se coloca un perno en la parte superior e inferior de los soportes, de tal manera permita el libre movimiento de las barras de G10 para que trabajen sólo a tensión y compresión.

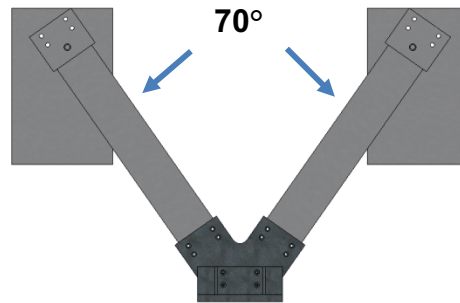
Figura 3-9 Detalle de perno y chaflán



### 3.3.3 Detalle de diseño conceptual

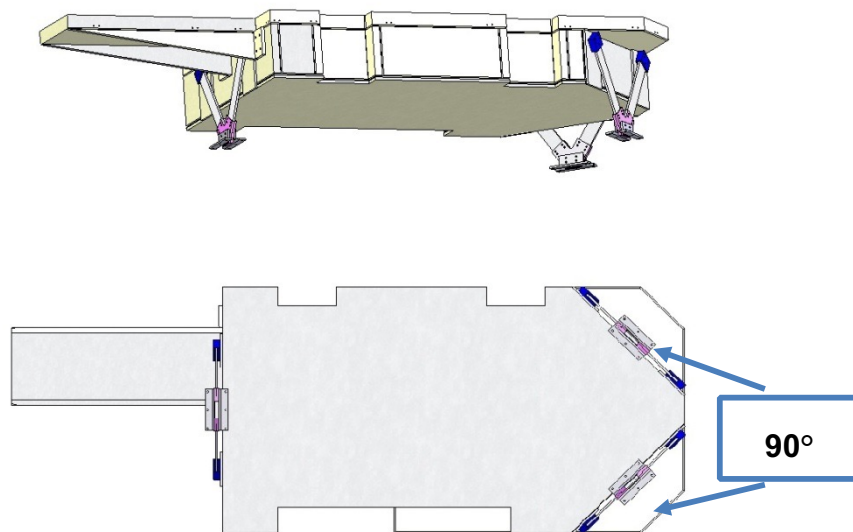
Como ya se mencionó, el banco óptico está fijo al criostato externo mediante los soportes de baja conducción que tienen forma de V con una separación de  $70^\circ$  entre ambas partes (Figura 3-10). Los soportes se encontrarán fijos a las paredes externas del tanque de nitrógeno por medio de placas colocadas en la parte superior de cada uno de los soportes y por la parte inferior se fijarán al criostato externo por medio de bases (Figura 3-6).

**Figura 3-10 Soportes de baja conducción en forma de "V"**



Con una configuración de tres soportes en el banco para cumplir con los requerimientos del cliente, se muestra en la Figura 3-11. Uno de los soportes se encuentra localizado en la parte frontal del tanque y los otros dos soportes se encuentran en la parte posterior colocados en un ángulo de 45° con respecto al tanque. Colocados los soportes en esta posición, se prevé que se eliminen modos de vibración no deseados en el banco. Esta suposición se analiza en capítulos posteriores.

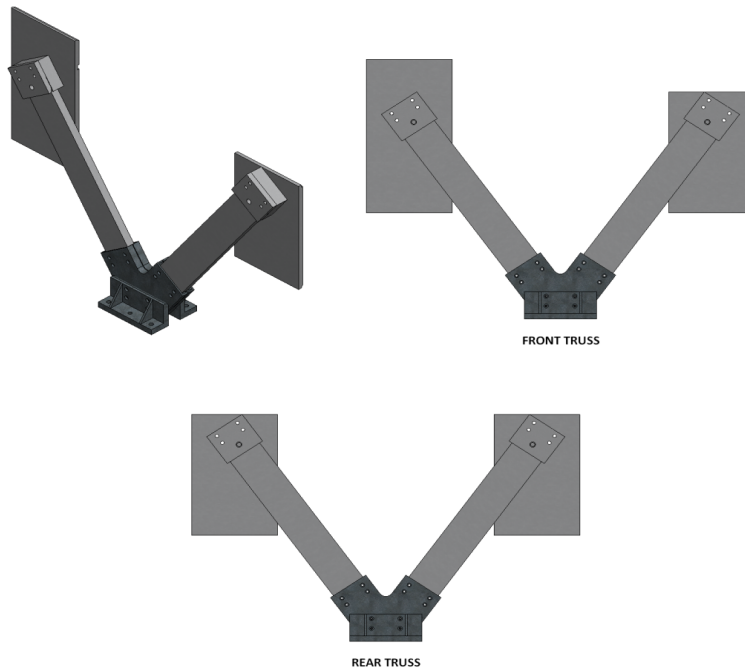
**Figura 3-11 Distribución de los soportes de baja conducción montados en el banco óptico**



Como resultado de la colocación de los soportes en las posiciones indicadas anteriormente y por la geometría del banco, se hizo necesario definir dos configuraciones diferentes para estos soportes, una para la parte frontal y otra para los soportes posteriores (Figura 3-12) entre estas dos configuraciones la variación son las placas posteriores que van ancladas directamente al tanque de nitrógeno para poder adaptarlas a los espacios disponibles.



**Figura 3-12 Configuración de los soportes de baja conducción**



En el siguiente capítulo y tomando las premisas dadas tanto para el banco como para los soportes de baja conducción se realizarán las respectivas modelaciones numéricas para definir el diseño definitivo en base a los resultados que se obtengan.

## CAPITULO 4

---

### 4 Modelación y simulación numérica

#### 4.1 Análisis de banco óptico

Todos los modelos presentados en este trabajo son parte del proceso de diseño y la configuración final y topología de cada componente analizado están de acuerdo con los resultados del Análisis de Elemento Finito.

- Los fenómenos térmicos y estructurales en estado estable o transitorio son el objetivo de estos análisis. En general, se realizaron los siguientes análisis y se explicarán en las siguientes secciones:
- Modelo térmico en estado estacionario para determinar la distribución de la temperatura en todo el banco óptico
- Análisis estructural para evaluar los esfuerzos que se desarrollan en el banco óptico y los soportes de baja conducción como resultado de las cargas gravitatorias y las contracciones térmicas.
- Análisis modal del banco óptico teniendo en cuenta el modelo pre-estresado resultado del análisis de las cargas gravitatorias y contracciones térmicas.
- Análisis transitorio del banco óptico para evaluar el tiempo necesario para que este componente alcance el estado estable térmico.
- Para este modelo, también se está considerando el calor añadido al banco óptico mediante un conjunto de motores correspondientes a los mecanismos.

#### 4.2 Modelo térmico en estado estable (sólo conducción)

Este análisis determinará la distribución de la temperatura en el banco óptico de FRIDA en estado estable, considerando que los mecanismos que se apoyarán en él estarán fijos y en contacto con su superficie. Esta parte del análisis es sólo para la transferencia de calor por conducción.

Al analizar este fenómeno se espera encontrar la distribución final de la temperatura en el banco óptico, que tan grande es el gradiente de temperatura que se espera y la región donde se presentará el gradiente térmico más grande.

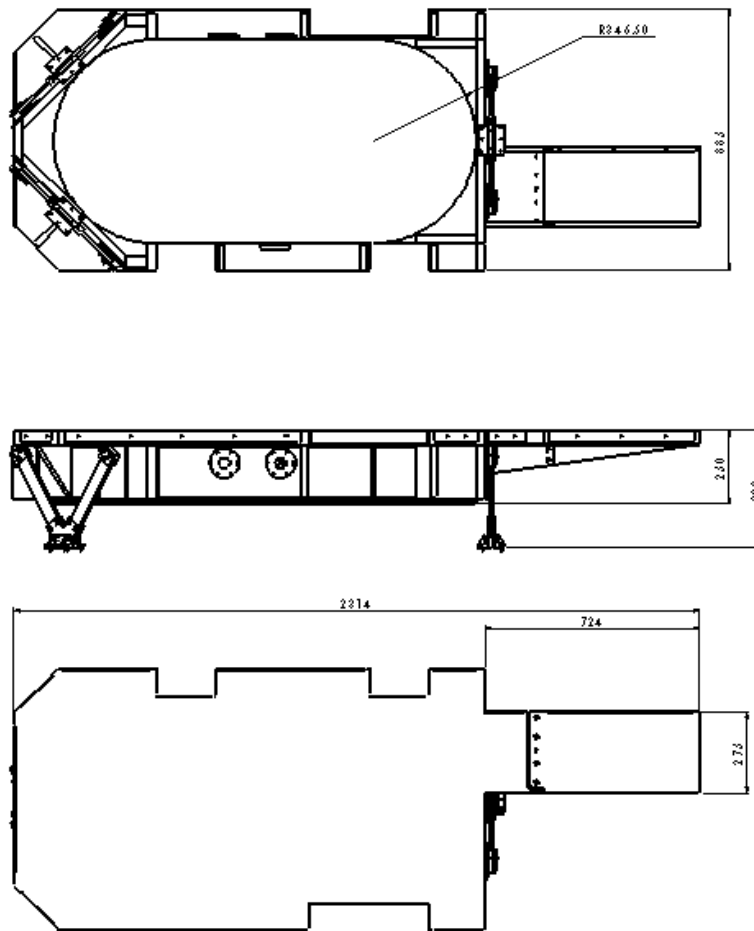
##### 4.2.1 Modelo de elemento finito

El modelo para el análisis de elemento finito fue realizado con los componentes mostrados en la Figura 4-1 , incluyendo los soportes de baja conducción y con las dimensiones mostradas en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1 Dimensiones generales del banco óptico

Dimensiones generales	(mm)
<b>Longitud total</b>	2314
<b>Longitud de la extensión del banco óptico</b>	724
<b>Ancho total</b>	885
<b>Ancho de la extensión del banco óptico</b>	275
<b>Altura del banco óptico con los soportes</b>	398
<b>Altura del banco óptico</b>	250

Figura 4-1 Configuración del banco óptico

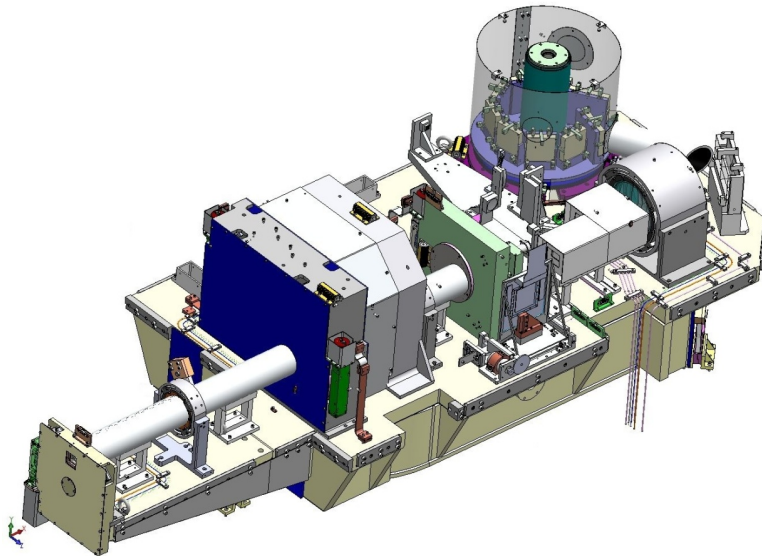


Cada uno de los componentes del banco óptico se le aplicó una malla utilizando elementos finitos tridimensionales con propiedades térmicas. El elemento utilizado fue el Solid70.

El diseño de cada mecanismo colocado sobre el banco óptico ha alcanzado un buen nivel de detalle en esta etapa del proyecto, por lo que se ha podido desarrollar un modelo muy completo que se utilizará para el análisis.

La figura 3.3.2 muestra el diseño conceptual del banco óptico con los mecanismos montados y distribuidos sobre la superficie en los lugares correspondientes.

**Figura 4-2 Modelo sólido del banco óptico y mecanismos diseñado usando CAD**



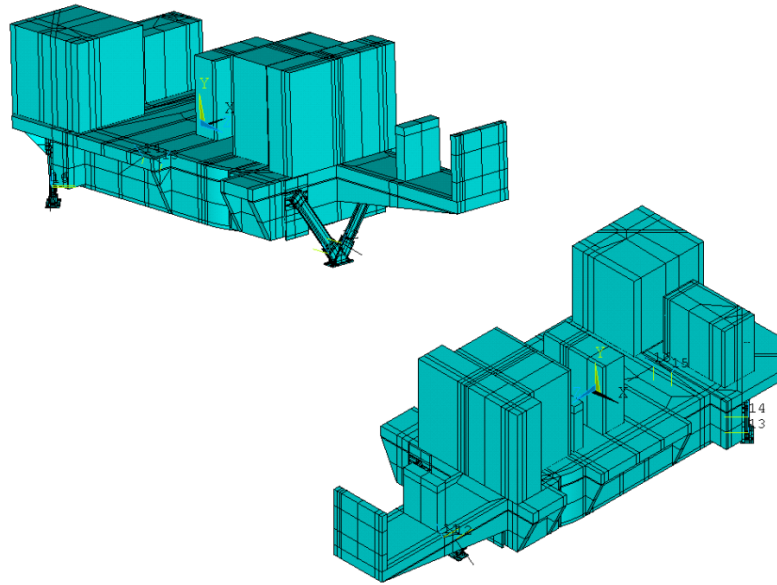
Con el propósito de crear el modelo para el Análisis de Elemento Finito, el banco óptico se hizo muy similar con respecto al diseño del modelo 3D realizado en el software CAD (por su nombre en inglés Diseño Asistido por Computadora) *Solidworks*. Por otro lado, los mecanismos no se modelarán con el mismo grado de detalle, sino que se representan utilizando bloques sólidos que tienen aproximadamente la misma envolvente y el mismo peso.

La Figura 4-3 muestra, en dos perspectivas diferentes, el modelo sólido que se preparó para los análisis térmico y estructural. El hacer la preparación del modelo significa que en un ensamble se deben hacer las particiones al modelo sólido de tal manera que entre componentes exista líneas de continuidad que hagan que el acoplamiento sea el adecuado para que el software tome en cuenta que es un sólido y no un ensamble.

Figura 4-3 Modelo sólido preparado para el Análisis de Elemento Finito

1  
VOLUMES  
TYPE NUM

ANSYS  
FEB 25 2011  
17:00:41



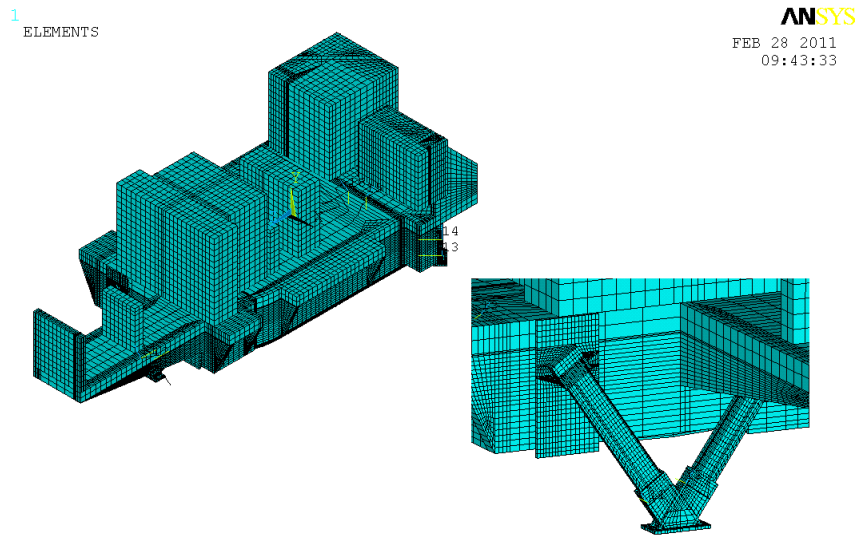
Para el mallado de este modelo, se utilizan elementos finitos del tipo “brick”. La densidad de la malla es controlada por el nivel de detalle que se requiere para generar un acoplamiento confiable entre las barras G10 y sus componentes de soporte. Para la generación de la malla de todo el ensamble se comienza por este acoplamiento; ésta es la razón de que la densidad de malla sea controlada a partir de estos componentes.

En particular, las barras G10 utilizadas para los soportes de baja conducción del banco óptico están malladas teniendo cuidado de representar el comportamiento mecánico ortotrópico del material G10. Para esto, la alineación de los elementos finitos sobre las barras G10 toma primordial relevancia para ajustar las propiedades mecánicas según la orientación correspondiente del material.

En general, se utilizan elementos finitos del tipo “brick” Solid70 con tres grados de libertad.

La Figura 4-4 muestra el modelo de elementos finitos que da el detalle de la región donde las barras G10 están acopladas con el banco para visualizar el refinamiento de la malla. Para la creación de la malla se dieron las propiedades mecánicas para cada uno de los componentes de dicho ensamble.

Figura 4-4 Modelo de elemento finito donde se muestra el nivel de refinamiento empleado para el análisis



Este es un modelo simplificado, una de estas simplificaciones es que todos los mecanismos están representados por volúmenes rectangulares que tienen densidades equivalentes de acuerdo al peso de cada uno de ellos. En la Tabla 4-2 se hace un listado de cada uno incluyendo el peso.

Tabla 4-2 Densidades equivalentes de mecanismos

Mecanismo	Peso (kg)	Densidad Equivalente (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Rueda de Plano Focal</b>	6	2600
<b>Barril de Colimador</b>	2.3	1141.27
<b>Mecanismo de Pupilas</b>	30.5	908.025
<b>Rueda de Cámaras</b>	22.5	503.018
<b>Barril de Cámara Media</b>	2.2	1141.27
<b>Rueda de Cambio de Modo</b>	12	992.133
<b>Barril del Espectrógrafo</b>	17	1092.436
<b>Mecanismo de Carrusel</b>	45.4	1032.86

Con respecto a las condiciones de carga y de frontera, para el modelo se suponen que tres cuartas partes de la capacidad volumétrica total del tanque del banco óptico están en contacto con nitrógeno líquido. Con este fin, el conjunto de nodos que pertenecen a las correspondientes superficies internas del tanque, tal como se ha descrito, se define con una temperatura constante de 77K correspondiente al LN2.

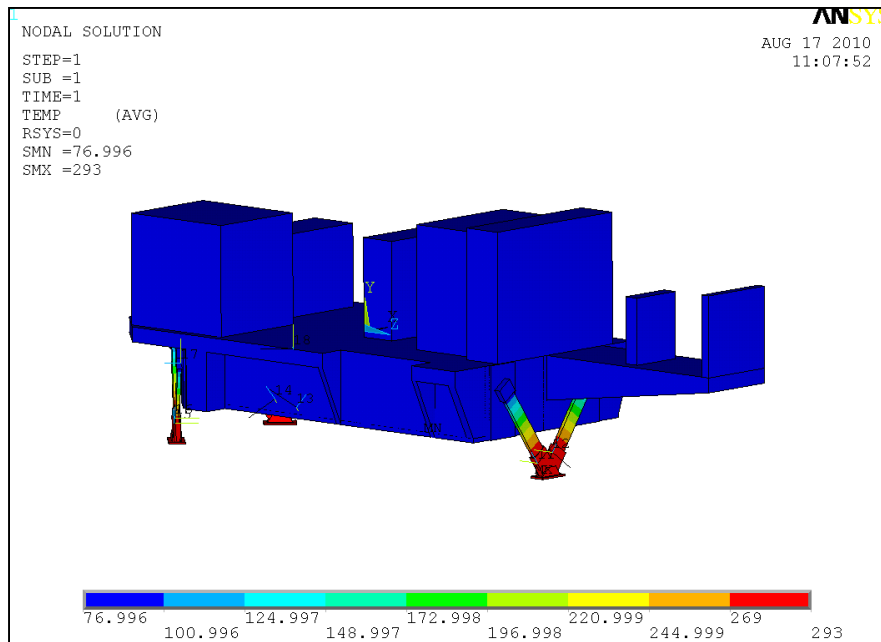
Por otra parte, se definieron los nodos de las cubiertas inferiores de los soportes de baja conducción que sirven de acoplamiento entre las barras de G10 y el criostato externo con

una temperatura de 293 K que es la temperatura ambiente. Esta temperatura también se establece como la temperatura de referencia para todo el análisis de conducción.

La carga térmica generada por los motores de pasos está incluida dentro de los mecanismos y también se considera para el análisis. En el modelo los ocho motores a pasos operan simultáneamente generando 8 Watts cada uno, para una generación de calor total de 64 Watts por los motores.

La muestra el patrón de temperatura obtenido aplicando las condiciones descritas anteriormente.

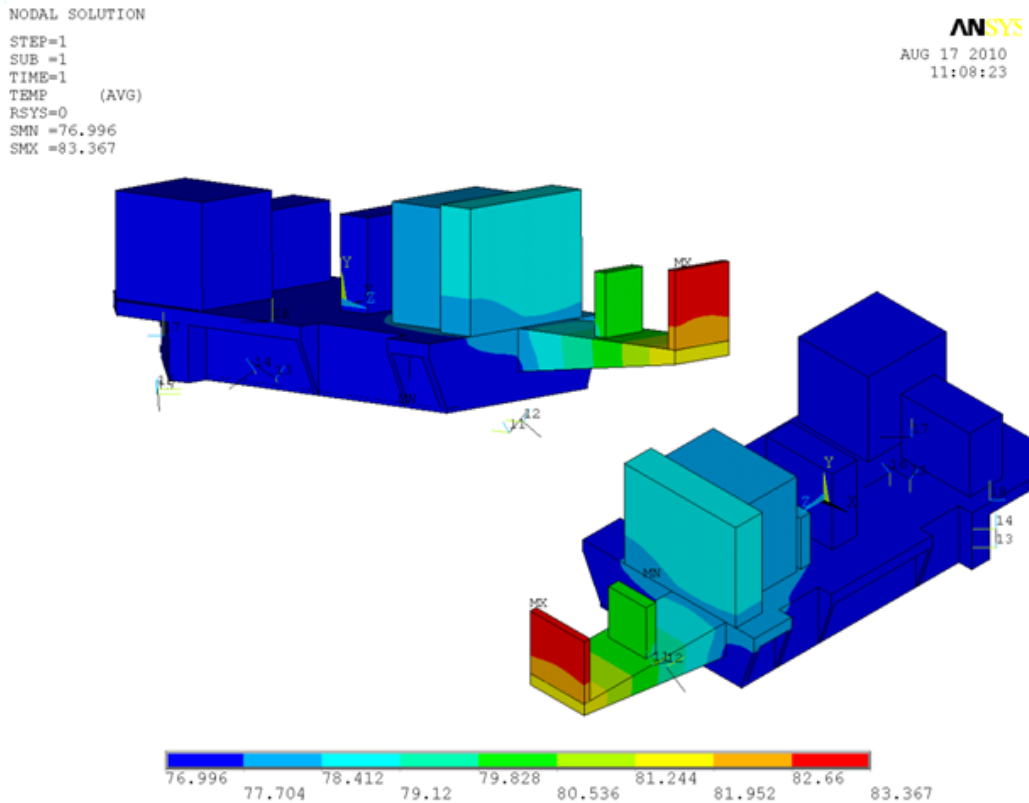
Figura 4-5 Distribución de temperatura producida por el sistema



#### 4.2.2 Resultados y conclusiones

Los gradientes térmicos más altos se desarrollan en los soportes de baja conducción, la Figura 1-1 muestra la distribución de la temperatura a lo largo de las barras G10. Debido a esto, los soportes de baja conducción se ocultaron dentro del modelo para poder observar la distribución de la temperatura en el banco óptico y los mecanismos sin tener en cuenta las temperaturas de las barras G10.

Figura 4-6 Distribución de temperatura producida en el banco óptico y mecanismos



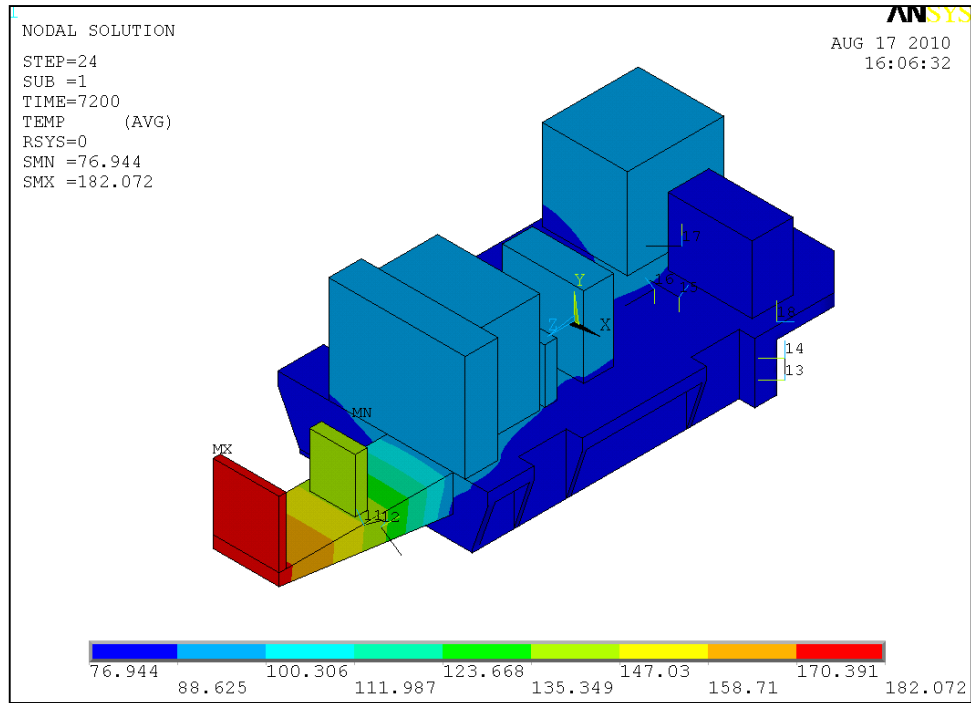
La Figura 4-6 muestra que la temperatura más alta se desarrolla en la parte más lejana de la extensión del banco óptico. Este resultado es algo que podría preverse ya que la punta de la extensión del banco óptico es la sección más alejada del banco óptico desde la condición de frontera de temperatura del nitrógeno líquido definida.

Podemos observar a partir de esta misma figura que la temperatura más alta que se alcanzaría bajo estas condiciones es alrededor de 83K. Este valor representa una diferencia de 5K con respecto a los 77K de la temperatura de nitrógeno líquido que prevalece en las secciones más frías del banco óptico. Sin embargo, debemos tomar en cuenta que la obtención de este gradiente de 5 K para toda la superficie del banco óptico se debe al hecho de que se modela una condición muy extrema en la que los 8 motores a pasos estarían funcionando simultáneamente durante el tiempo en que se alcanza el estado estable. Aunque esta situación es útil para evaluar una condición extrema, no se espera que se aplique para condiciones reales de trabajo y, en consecuencia, el gradiente de temperatura 5K está muy por encima de lo que en realidad se podría esperar.

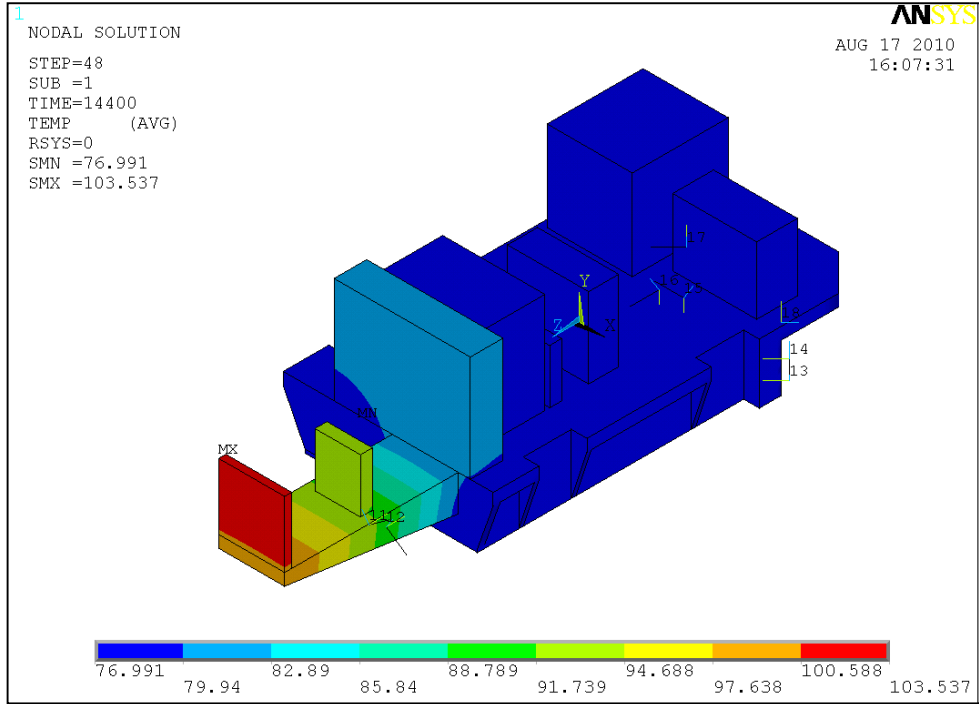




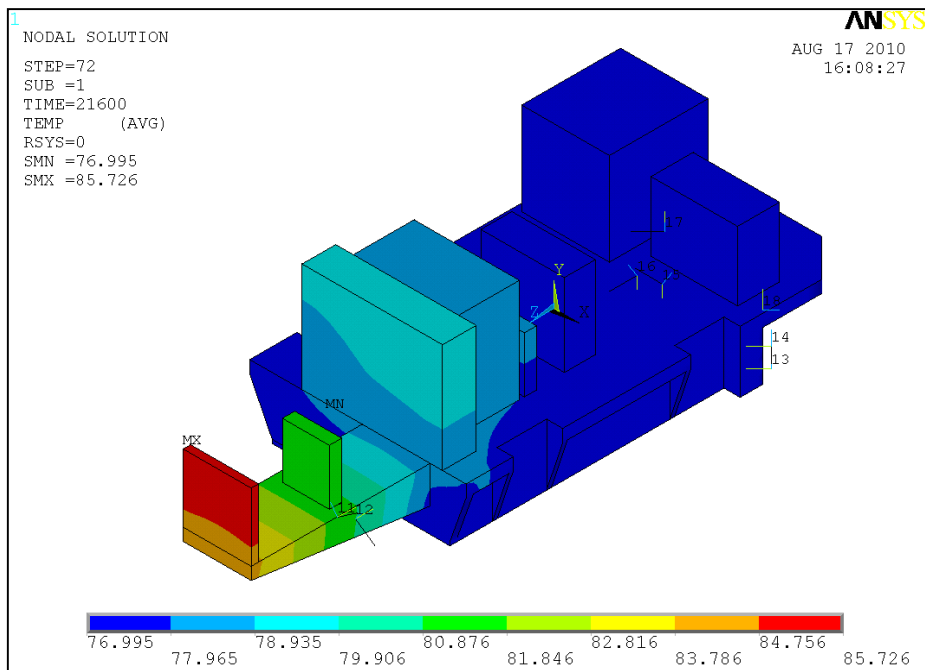
Figura 4-8 Distribución de temperatura del análisis transitorio para 7200 segundos (2 hrs)



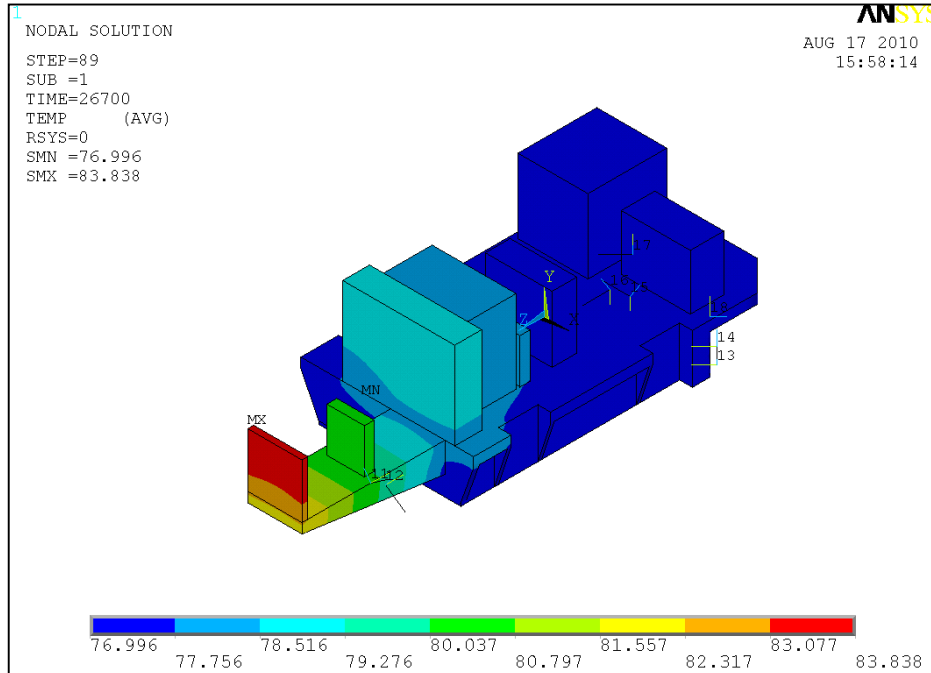
**Figura 4-9 Distribución de temperatura del análisis transitorio para 14400 segundos (4 hrs)**



**Figura 4-10 Distribución de temperatura del análisis transitorio para 21600 segundos (6 hrs)**



**Figura 4-11 Distribución de temperatura del análisis transitorio para 26700 segundos (7.42 hrs)**



#### 4.3.1 Resultados y conclusiones

Las figuras anteriores muestran el progreso de la disipación de calor sobre el banco óptico y los mecanismos con respecto al tiempo. La Figura 4-11 muestra la condición final donde finalmente se ha alcanzado el estado estacionario.

Una comparación entre la Figura 4-6 y la Figura 4-11 muestra la misma distribución de temperatura y magnitud. El análisis transitorio terminó cuando el tiempo para el cálculo alcanzó 26700 segundos (7.42hr).

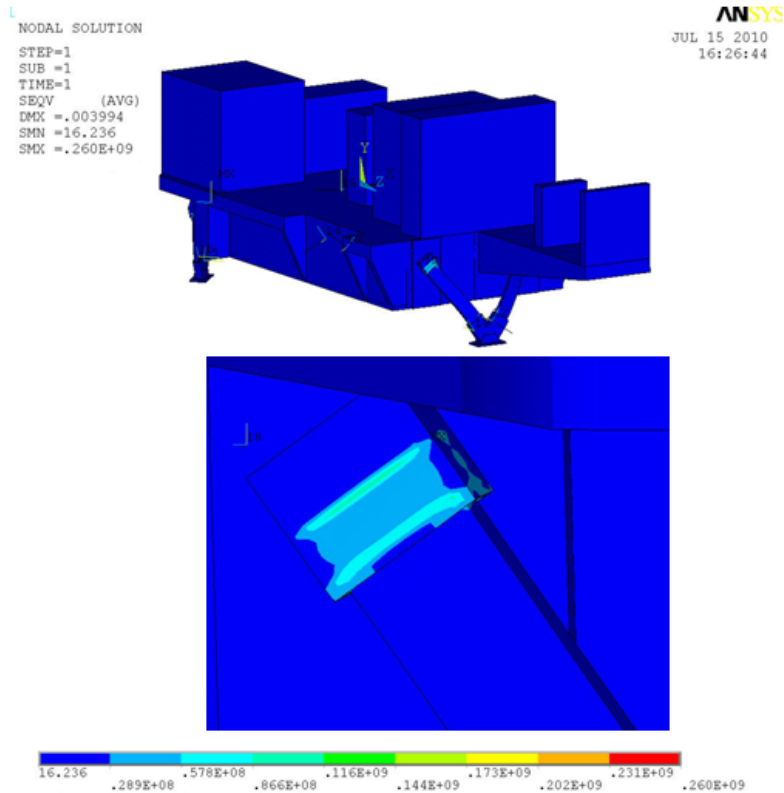
#### 4.4 Análisis estructural para el banco óptico.

Una vez que se ha evaluado el análisis térmico en las condiciones de estado estacionario, es importante ahora encontrar los esfuerzos que se desarrollan en el banco óptico como resultado de los gradientes térmicos y las cargas gravitatorias, incluyendo el peso del banco óptico y el nitrógeno líquido.

Las condiciones de frontera definidas para el modelo estructural fueron las necesarias para cancelar los grados de libertad de las bases que unen las barras de los soportes de baja conducción el criostato externo. De esta manera, el modelo alcanza las condiciones requeridas para ser resuelto sin inducir movimiento de cuerpo rígido.

La Figura 4-12 muestra los resultados de este análisis.

Figura 4-12 Patrón de esfuerzos para el banco óptico y los soportes de baja conducción



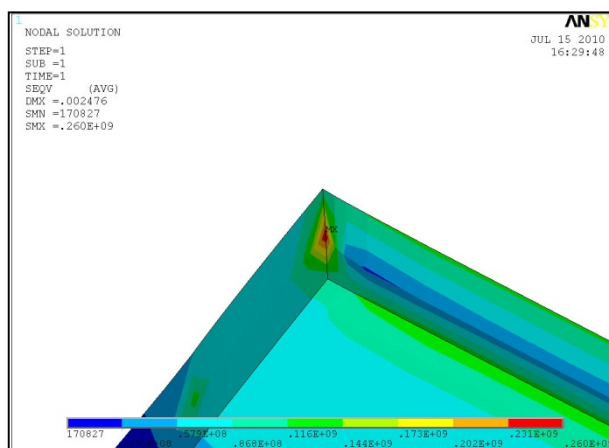
#### 4.4.1 Resultados y conclusiones

La Figura 4-12 permite sólo una vista parcial del patrón de esfuerzos completo (basado en la barra de color de la figura). Aunque los mayores esfuerzos no pueden ser observados a partir de esta imagen, es evidente que están ocultas dentro de la cubierta de la barra de G10. Para esta imagen la cubierta de aluminio muestra que el esfuerzo máximo es de 58 MPa.; si tomamos en cuenta que el límite de elasticidad para este aluminio a 77K es  $\sigma_{ys} = 337$  MPa y el micro-yield es  $\sigma_{m-ys} = 80$  MPa, tenemos confianza en que el diseño propuesto funcione adecuadamente ya que el esfuerzo máximo obtenido es menor que las referencias de diseño.

La

Figura 4-13 muestra el área de la barra G10 donde se están desarrollando los esfuerzos máximos.

Figura 4-13 Esfuerzos máximos desarrollados por las barras de G10. Sección dentro de la cubierta



De la Figura 4-13 se puede observar que los esfuerzos máximos se desarrollan en un borde muy afilado de la barra G10 y su magnitud es de 260 MPa. Estos esfuerzos máximos se encuentran en las esquinas de la barra y se encuentran tan altos porque para el modelado las esquinas de las barras G10 están continuamente unidas a las esquinas interiores de la cubierta de aluminio haciendo que la barra de G10 sea muy vulnerable a desarrollar altas tensiones ya que el aluminio transfiere la carga directamente a las esquinas; es decir funciona como un concentrador de esfuerzos. Esta situación, sin embargo, puede no ser motivo de preocupación ya que, en realidad, las barras G10 se mecanizarán de manera que las esquinas no existan; pues en lugar de ellas se maquinarán chaflanes.

Mediante la implementación de esta acción, el nivel crítico de las tensiones en la barra G10 disminuiría considerablemente a menos de 100 MPa. Si se toma en consideración que la magnitud del esfuerzo de tensión menor para el G10 a la temperatura de trabajo es de 77K es = 459 MPa se considera que es confiable.

#### 4.5 Análisis Modal

Se realizó un análisis modal FEM del banco óptico para obtener las frecuencias naturales analíticas.

La Tabla 4-3 muestra los valores obtenidos para los primeros cinco modos.

Tabla 4-3 Modos de vibración del banco óptico con mecanismos

Modo	Tiempo/Frecuencia (Hz)
1	38.024
2	40.829
3	79.892
4	80.739

Las siguientes figuras muestran los primeros modos de vibración.

Figura 4-14 Primer modo

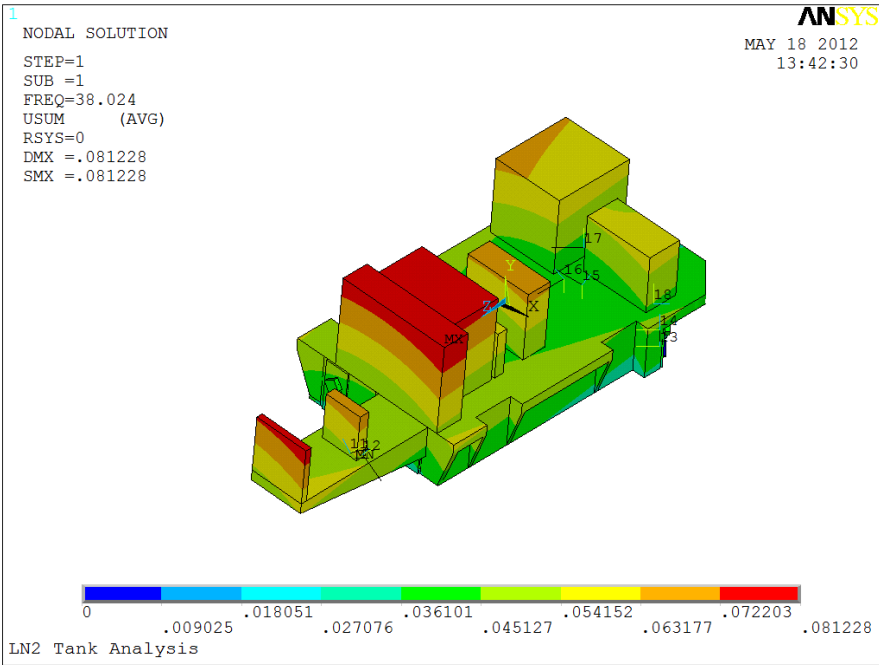


Figura 4-15 Segundo modo

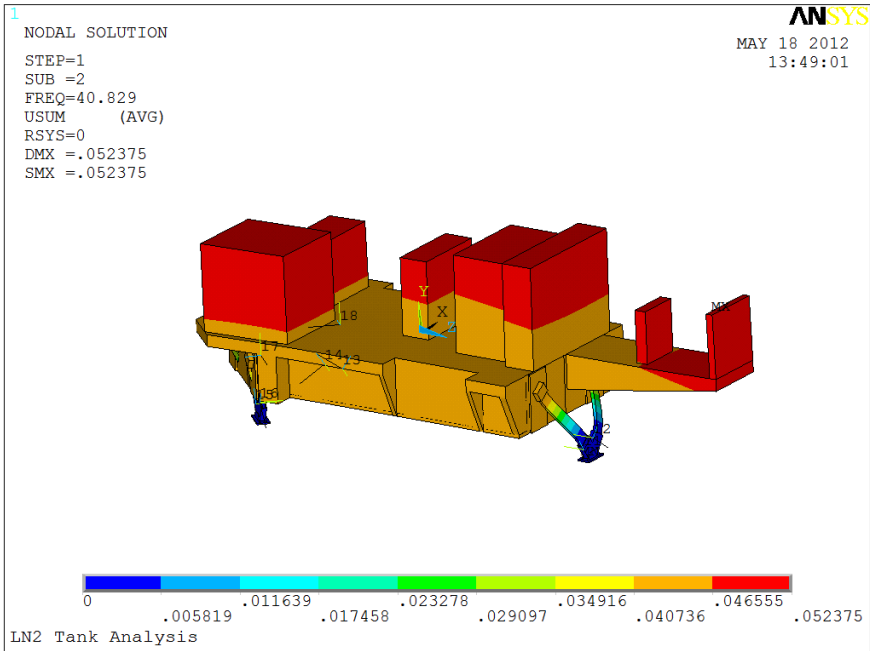
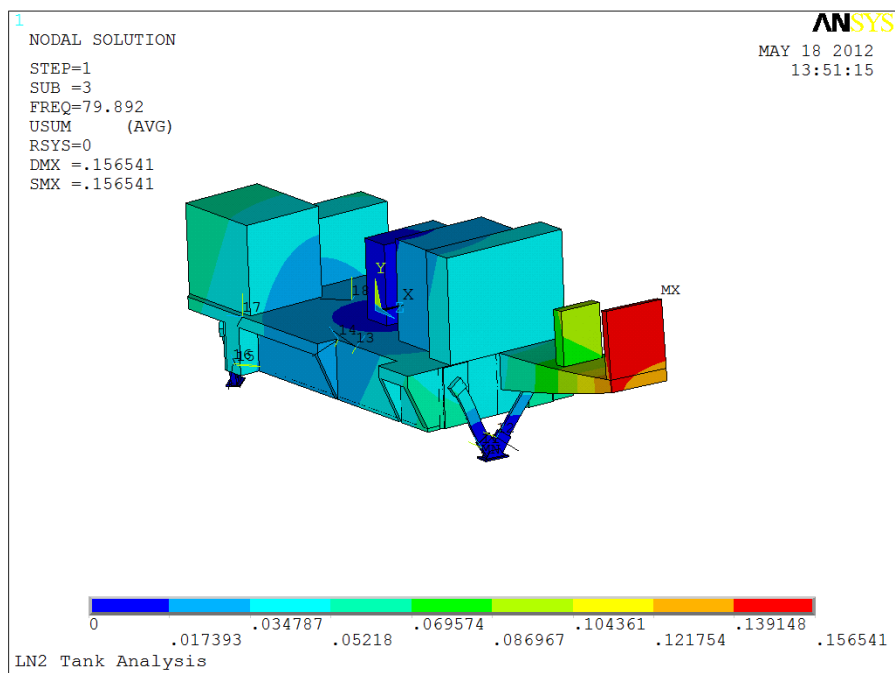


Figura 4-16 Tercer modo



Con la obtención de estos modos de vibración aseguramos que los valores no estén en los valores proporcionados en los requerimientos de mayor a 14Hz (Modo de vibración del telescopio) y no estar en 60Hz (Motores).

#### 4.6 Desplazamientos sobre la base fría.

Debido a las cargas en el banco óptico (cargas térmicas y cargas gravitatorias), se esperan cambios dimensionales sobre el banco. Para hacer un análisis sobre estos cambios se consideraron algunos nodos de referencia en diferentes ubicaciones sobre la base fría y luego cuando los análisis estructurales se terminaron se verificó la posición de estos mismos nodos para obtener los desplazamientos respecto a su ubicación original.

En la Tabla 4-4 se enumeran los nodos y sus respectivos desplazamientos (en mm).

Tabla 4-4 Nodos de desplazamiento sobre la base fría

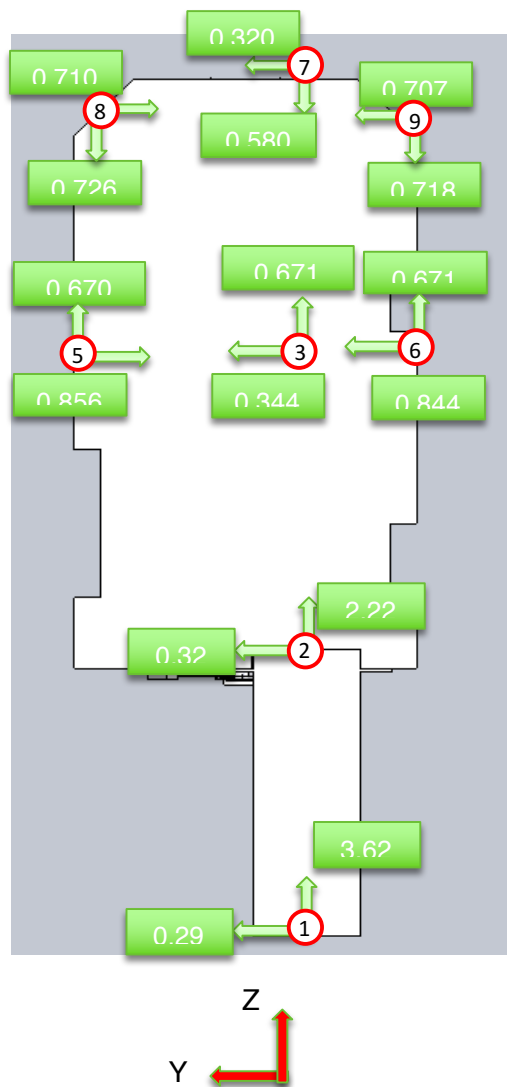
Nombre	Nodo	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
<b>Final de la Extensión</b>	1	1.076000	0.297590	-3.625900
<b>Unión de la Extensión</b>	2	1.048100	0.324990	-2.220000
<b>Centro (Eje óptico)</b>	3	1.041900	0.344770	-0.671340
<b>Centro</b>	4	1.039500	0.006306	-0.671150

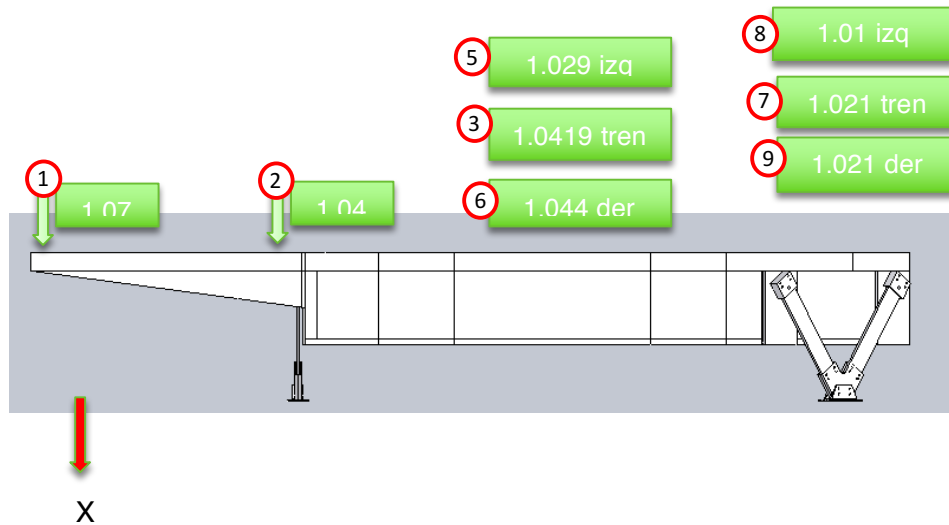


<b>Centro-izquierda</b>	5	1.029700	-0.856900	-0.670700
<b>Centro-derecha</b>	6	1.044000	0.844300	-0.671600
<b>Posterior</b>	7	1.021300	0.320170	0.580570
<b>Posterior-izquierdo</b>	8	1.010800	-0.710030	0.726960
<b>Posterior-derecho</b>	9	1.021800	0.707050	0.718360

Con el fin de mostrar los vectores de desplazamiento en la Figura 4-17 se pueden encontrar los números descritos en la tabla anterior. El nodo de referencia es el colocado en la parte más alejada de la extensión marcado con el número 1.

Figura 4-17 Desplazamientos sobre la base fría.



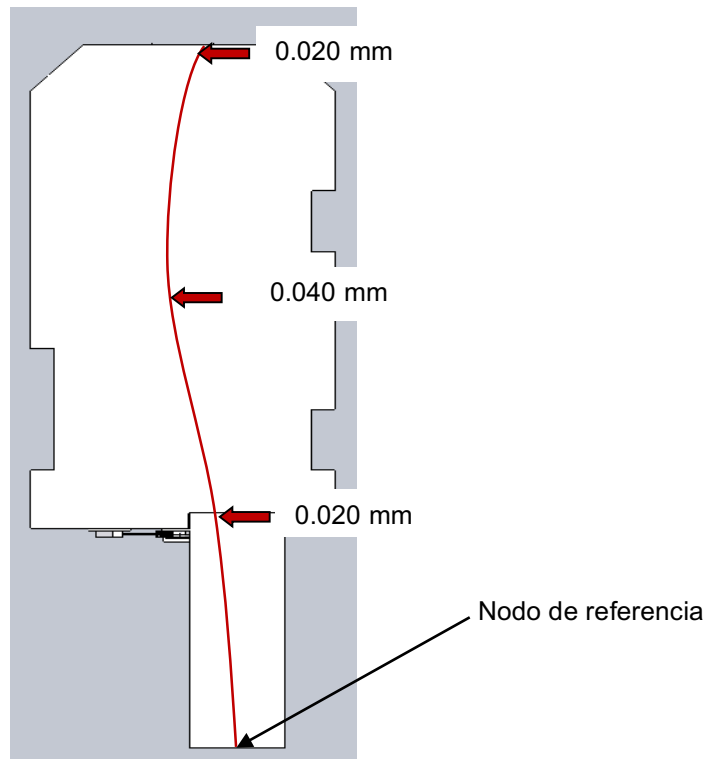


#### 4.6.1 Conclusiones

Como puede observarse, en los nodos situados debajo del eje óptico se encuentra una diferencia casi constante que permanece entre ellos de 0,020 mm en la dirección "y". Con estos datos el comportamiento de los nodos a lo largo del eje óptico se localizarán como se muestra en la Figura 4-18.

*Nota: La línea que indica la flexión del eje se muestra en una escala diferente para notar el dobléz de los nodos sobre el eje óptico.*

Figura 4-18 Comportamiento de los nodos a lo largo del eje "y"(eje óptico)



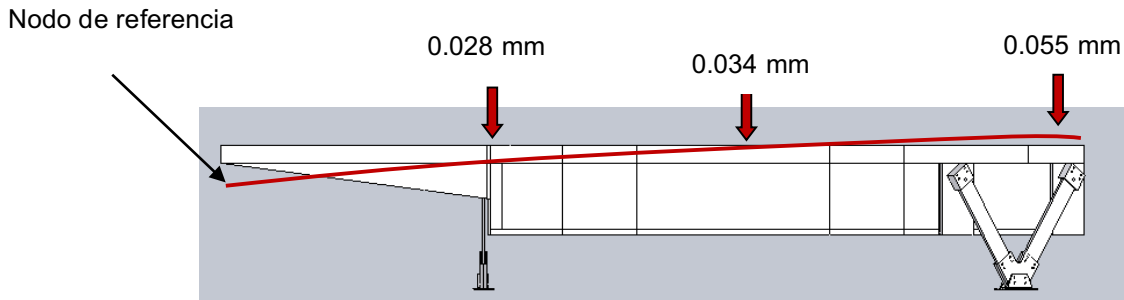
En la dirección "X" el comportamiento de los nodos tiene más variaciones que la dirección "y" y las diferencias se muestran en la Tabla 4-5 y en la Figura 4-19.

Tabla 4-5 Variaciones de los nodos en el eje "X"

NODO	DIFERENCIA (mm)
1-2	0.028
2-3	0.0061
3-7	0.0209

*Nota: La línea que indica la flexión del eje se muestra en una escala diferente para notar el doblez de los nodos sobre el eje óptico.*

Figura 4-19 Comportamiento de los nodos sobre el eje "X"



Estas variaciones deben ser consideraciones serias para cuando se monten los mecanismos, ya que deben compensarse de alguna manera para no perder la alineación de la luz sobre el tren óptico, toda vez que no se pueden colocar mas refuerzos en el banco óptico para poder compensarlas.

## 4.7 Análisis de tanque de nitrógeno líquido y optimización

### 4.7.1 Introducción y análisis preliminares

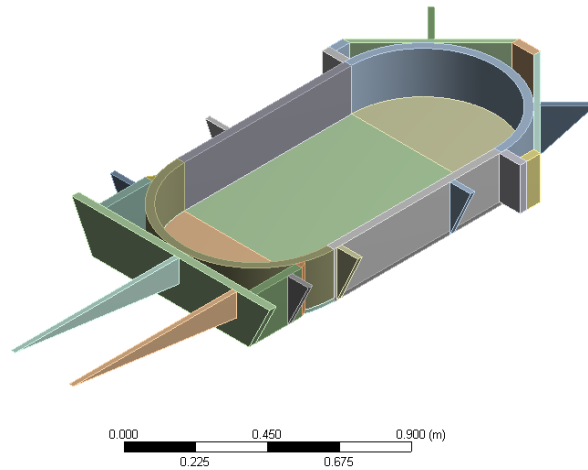
El tanque de aluminio contiene el nitrógeno líquido (LN2), utilizado para enfriar los mecanismos sobre el banco óptico. El tanque debe resistir una presión positiva interna de 4 atm. Como requisito para resistir las cargas en caso de que ocurra una obstrucción en la entrada o en las líneas de salida del nitrógeno líquido.

Para cumplir estos requisitos, es necesario analizar el tanque para asegurar que los esfuerzos producidos por las cargas de presión tengan valores seguros; para este caso, el micro-yield del aluminio es de 80 MPa.

Se analizaron varias configuraciones del tanque, empezando por una simple con un tanque no reforzado y luego modificándolo añadiendo los elementos estructurales necesarios que permitan al tanque resistir las cargas aplicadas.

La figura 4.1 muestra la forma básica del tanque, que no es lo suficientemente fuerte para resistir las cargas de presión sin exceder el punto de micro-rendimiento del aluminio.

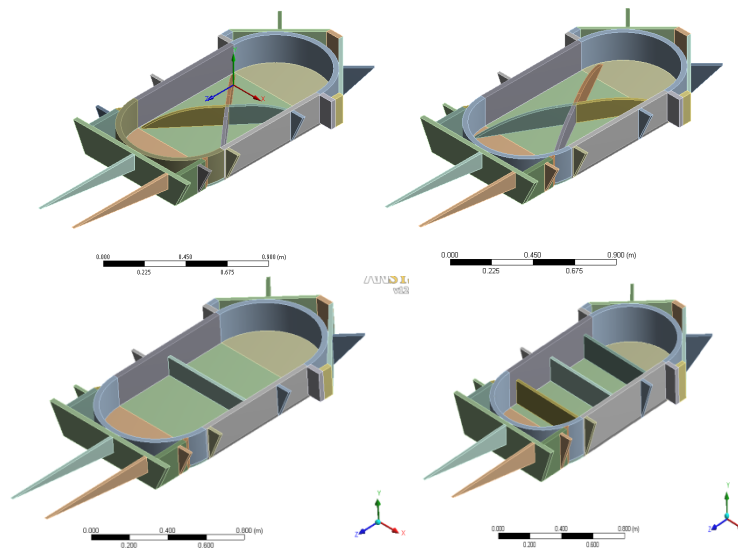
Figura 4-20 Configuración básica del tanque sin refuerzos internos



Luego de realizar varias corridas en el software, se obtuvo como resultado que la placa inferior no era lo suficientemente fuerte para resistir la carga de presión, y debido a esto, varias configuraciones se probaron para encontrar la mejor geometría y ubicación de algunas vigas internas que reforzaran esta parte.

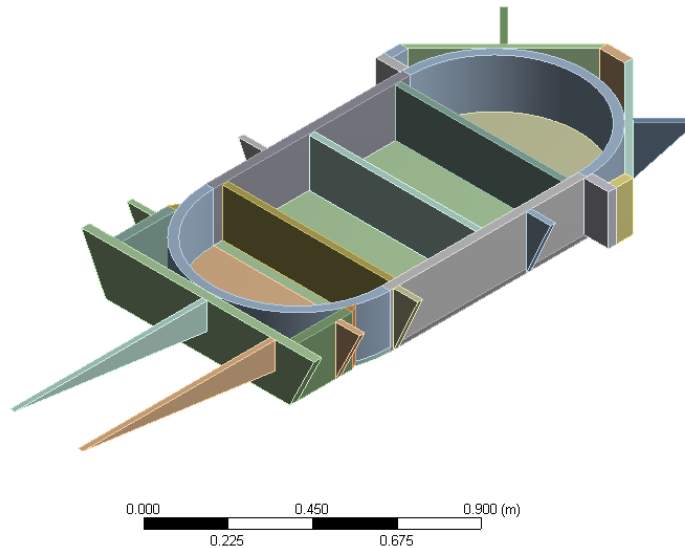
Las figuras siguientes muestran las diferentes geometrías utilizadas para las vigas y los cambios realizados en la geometría hasta obtenerse la óptima.

Figura 4-21 Configuraciones de los refuerzos internos en el tanque



La siguiente figura muestra la configuración óptima.

Figura 4-22 Configuración óptima de refuerzos



La base fría (no mostrada en la figura anterior) se oculta para permitir una mejor visión de los refuerzos internos, pero se consideró para el análisis.

#### 4.7.2 Modelo de elemento finito

Aunque en esta sección se describe el modelo para la última configuración, procedimientos similares se llevaron a cabo para todas las geometrías con el fin de evaluar el rendimiento de los refuerzos.

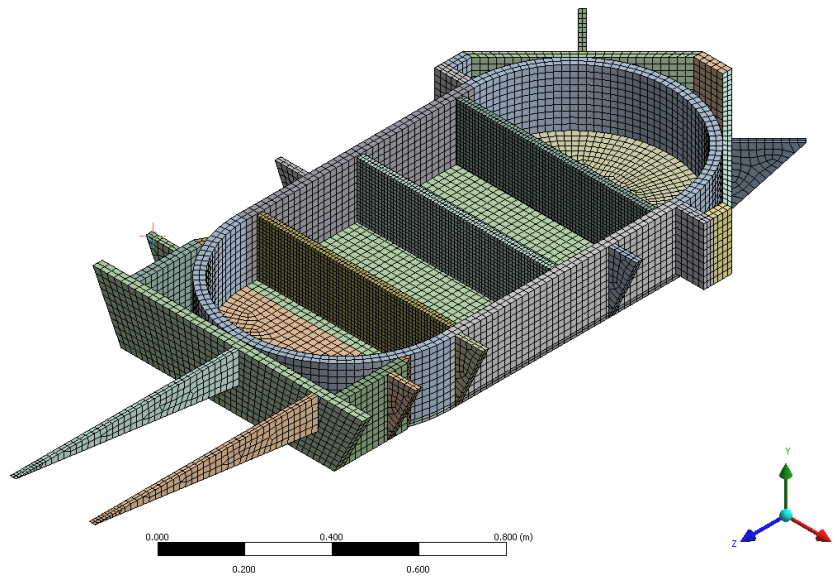
El modelo 3D se creó con Solidworks en una forma simplificada. Todas las entidades pequeñas como filetes y chaflanes que eran irrelevantes o inútiles para los resultados generales fueron descartados. Esto se hizo para mantener el modelo simple y capaz de ser resuelto, sin comprometer la exactitud de los resultados generales.

El modelo se exporta a ANSYS Workbench, donde se realiza todo el procesamiento previo. La preparación del modelo para el análisis incluye definición de materiales, definición de cargas y restricciones, definición de geometrías, mallado, etc. como en los análisis previos realizados al banco óptico.

Una vez que el modelo es importado, todas las partes del ensamble son unidas usando tecnología de contacto. La ventaja de utilizar dicha tecnología es que el modelo puede mantenerse como partes separadas sin una continuidad. Con la tecnología de contacto, el número y el tamaño de los elementos se pueden controlar para cada parte.

Una vez definidas los acoplamientos entre las partes, las partes se mallan, creando el modelo de elementos finitos. En la se muestra el modelo de elementos finitos utilizado para este análisis.

Figura 4-23 Modelo de elementos finitos para el tanque de nitrógeno

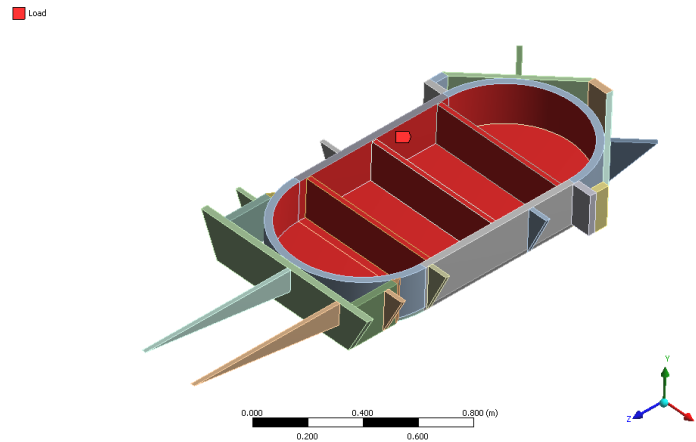


Es posible observar que la malla no es continua entre las diferentes partes, permitiendo una mayor densidad de elementos en las vigas que en otros elementos estructurales que tienen menos impacto en la resistencia de la placa inferior. El acoplamiento de los grados de libertad de estos elementos es llevado por los contactos definidos entre cada parte.

Aunque se trata de un elemento de alto orden, el programa deshabilita los efectos de los nodos intermedios automáticamente, lo que significa que no se utilizará si no es necesario.

Las cargas aplicadas para la primera parte del análisis fueron de 4 atm en las paredes internas del tanque. La dirección de la carga de presión va a la pared (presión positiva). Se han definido unos soportes fijos, para evitar el movimiento de cuerpo rígido del tanque, cerca del punto de fijación real de las vigas G10, y están colocados de tal manera que no interfiere con el movimiento de las partes críticas del tanque. La Figura 4-24 muestra la carga aplicada en las superficies.

**Figura 4-24 Carga de presión de 4 atm en la superficie interna del tanque**



### **4.7.3 Optimización del tanque**

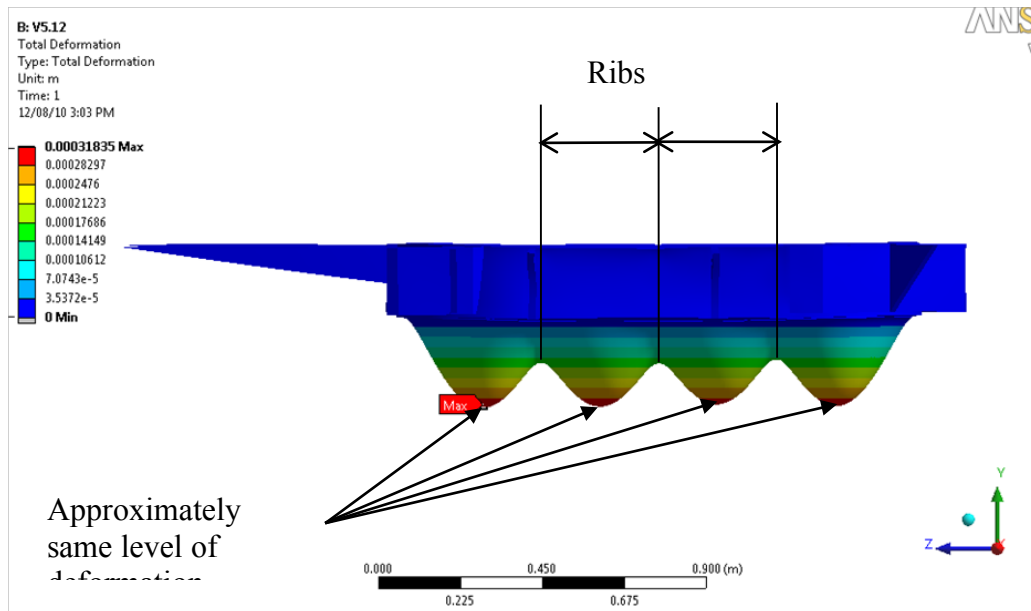
Para obtener los valores más bajos de esfuerzo es necesario colocar los refuerzos en lugares específicos. El objetivo de mover los refuerzos a lo largo del eje z en la Figura 4-24 es distribuir patrones de tensión a lo largo de toda la superficie, evitando altas concentraciones o bajos niveles en diferentes áreas.

Para conseguir esta distribución uniforme, es necesario que las secciones de la placa inferior limitadas por los refuerzos tengan aproximadamente la misma separación, es decir, que la carga esté bien distribuida en toda la placa.

Después de varias iteraciones, fue posible encontrar la ubicación que presenta la mejor distribución de estos desplazamientos (ver Figura 4-25).

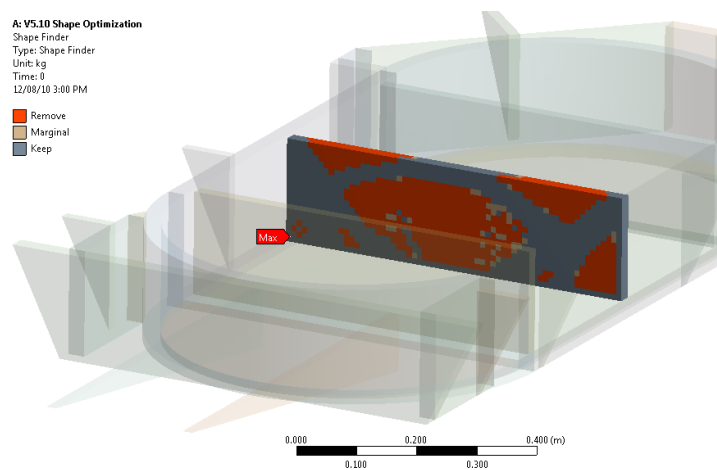


Figura 4-25 Distribución de desplazamientos



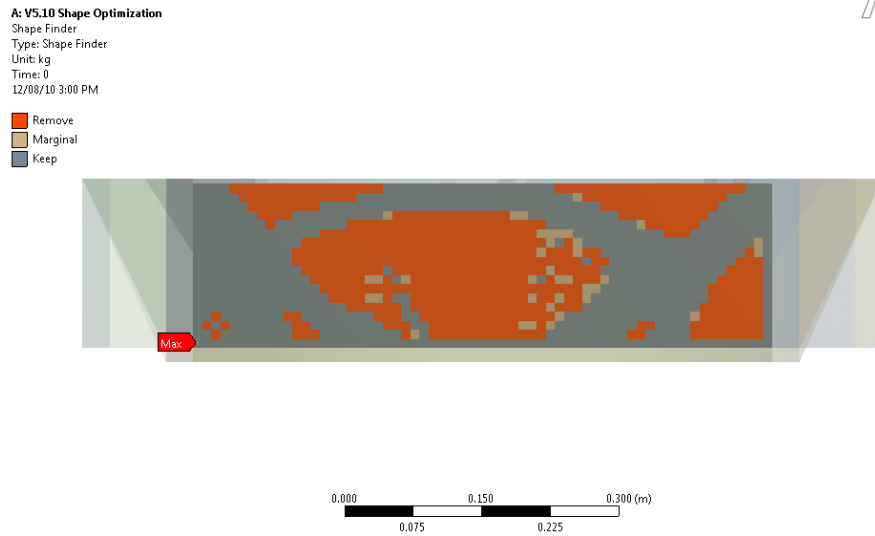
Una vez optimizada la ubicación de los refuerzos, es necesario mejorar la geometría de los refuerzos para mantener un bajo peso y permitir el flujo del nitrógeno líquido, pero sin comprometer la integridad estructural. Para ello, se desarrolló una optimización de la forma de dichos refuerzos con ayuda de un análisis energético. El propósito del análisis de optimización de forma es encontrar la mejor geometría para los componentes. Esto implica optimizar la distribución del material de modo que una estructura tenga la máxima rigidez para un conjunto de cargas. El resultado de este análisis es un gráfico de contorno que muestra las porciones de la geometría que menos contribuye a la estructura

Figura 4-26 Resultados de la optimización de forma de los refuerzos



Para este análisis, la masa se definió como el parámetro objetivo. El modelo fue cargado y los resultados se pueden observar en detalle en la Figura 4-27.

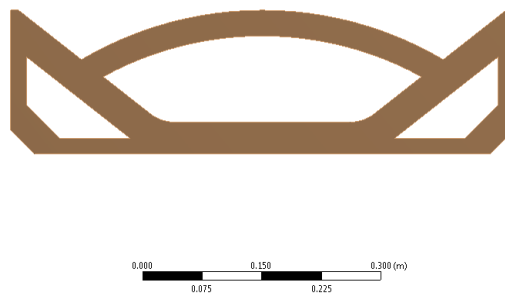
**Figura 4-27 Áreas que pueden quitarse de los refuerzos**



A partir de la última figura, es posible observar que las áreas denotadas como "retirar" no están contribuyendo a la rigidez y pueden ser retiradas con seguridad del refuerzo. Las áreas grises deben mantenerse debido a que son las que llevan la mayor parte del trabajo realizado por la parte.

Como resultado, la forma final de las vigas se puede observar en la Figura 4-28.

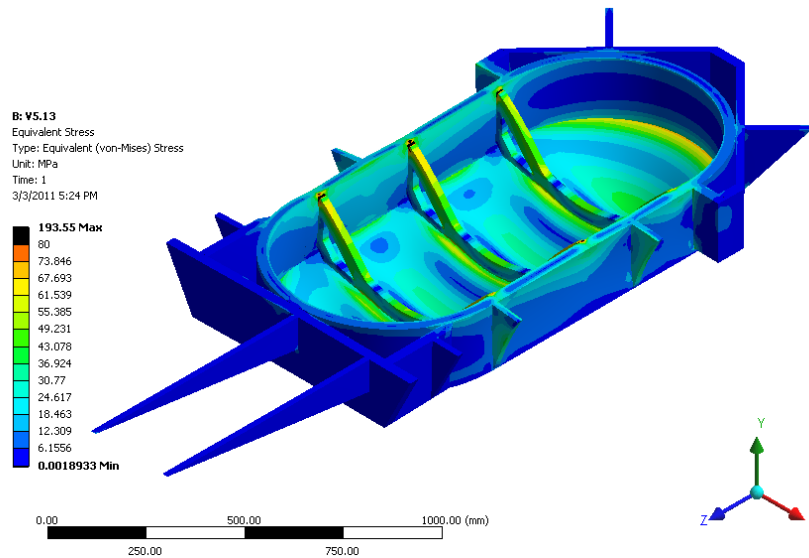
**Figura 4-28 Forma final de los refuerzos**



#### 4.7.4 Resultados

Una vez determinadas las modificaciones a los refuerzos internos resultado de los análisis previos se vuelven a hacer corridas en el software; así, los resultados de los refuerzos optimizados bajo las condiciones de carga se muestran en la Figura 4-29.

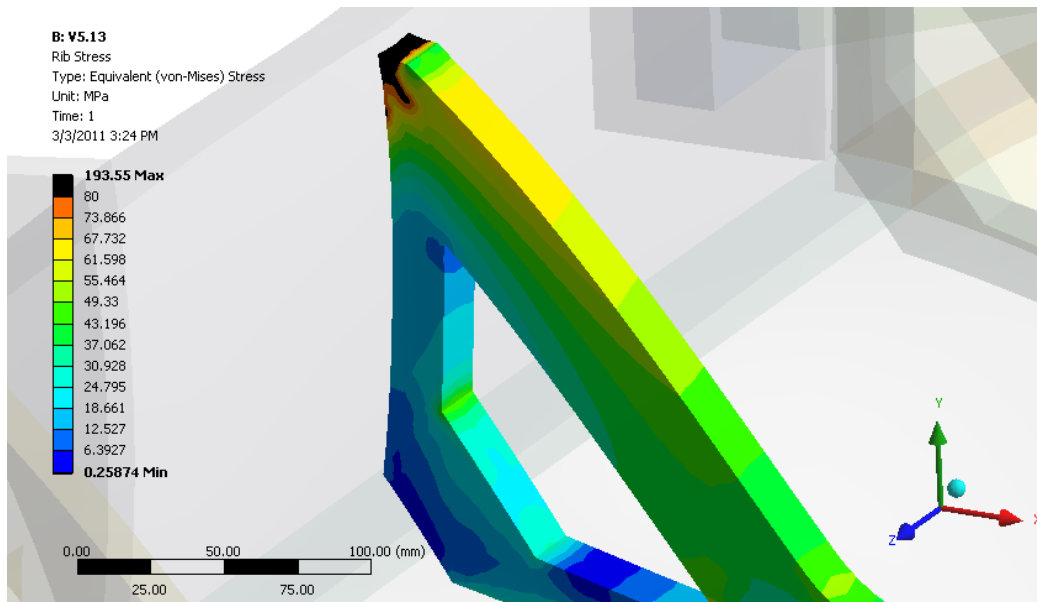
Figura 4-29 Patrón de esfuerzos equivalentes



A partir de la figura, se puede observar que los valores de esfuerzo son en general seguros, usando como referencia el punto de micro-yield del aluminio, que es cercano a 80 MPa. Aunque es posible observar valores más altos, los esfuerzos más altos se localizan en concentradores de esfuerzo, lo que significa que es muy probable que esas tensiones se creen artificialmente debido a la simplificación del modelo.

La Figura 4-30 muestra el área donde se encuentran los valores más altos.

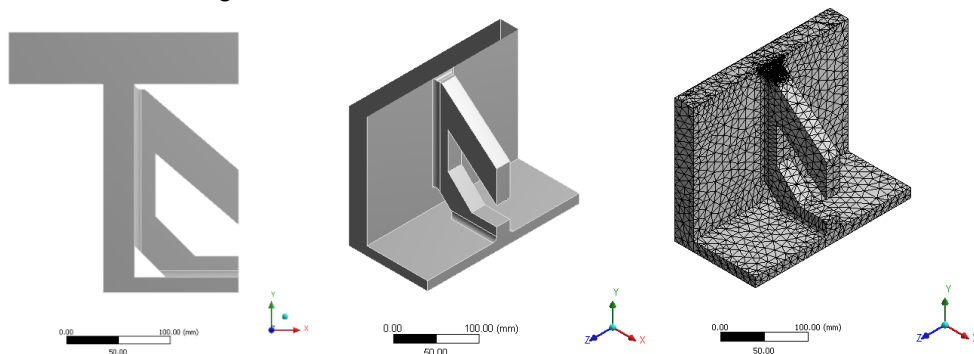
Figura 4-30 Zona de concentración de esfuerzos



Se puede observar que el esfuerzo máximo se localiza exactamente en el vértice del refuerzo. Esos vértices no existirán porque la soldadura y los filetes o chaflanes harán la transición entre la costilla y el tanque lisa, permitiendo una mejor distribución de la tensión. Es posible ver para el resto de los refuerzos que los valores del esfuerzo son bastante más bajos que el valor objetivo de 80 MPa.

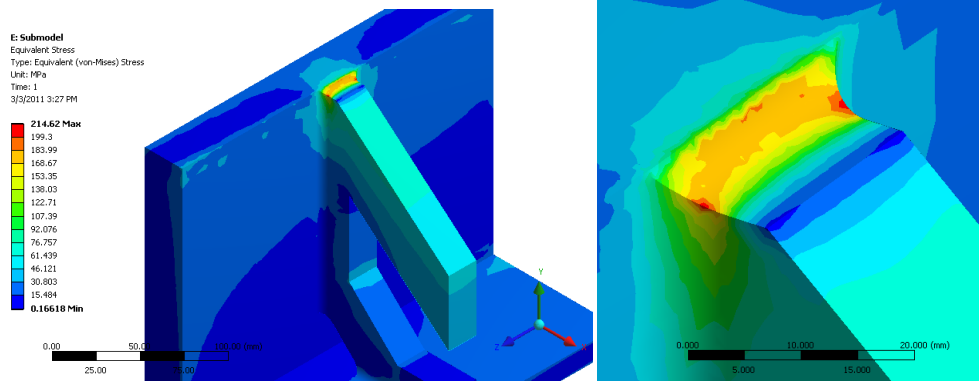
Esto se verificó mediante un proceso de sub-modelado de estas secciones, que exporta los grados de libertad de los elementos del modelo general en un modelo más detallado. El sub-modelo de elementos finitos del refuerzo se muestra en la siguiente figura. Detalles como el tamaño de los filetes se asignaron arbitrariamente para fines de evaluación sólo en el área.

Figura 4-31 Modelo de Elemento Finito del Sub-modelo



La figura siguiente muestra cómo estos valores están localizados y por lo tanto puede ser descartados para el alcance de este trabajo en la evaluación del rendimiento general del sistema.

Figura 4-32 Esfuerzos equivalentes en el Sub-modelo

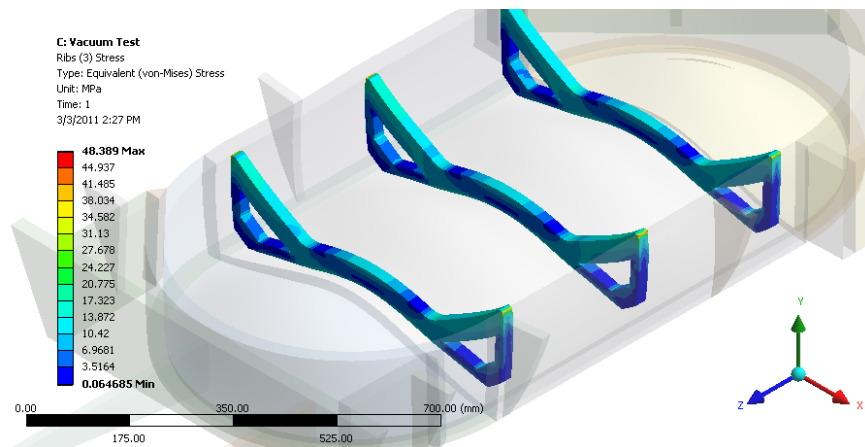


Para la fabricación del tanque, estos puntos deben ser alisados y reforzados para evitar esta concentración, lo que podría dar lugar a la aparición de grietas que podrían causar la ruptura de las paredes.

Aunque esto compromete la integridad del tanque en una situación aparentemente alarmante, esto no es crítico ya que la posibilidad de que el tanque se exponga a 4 atm de presión es muy remota, y también porque ese nivel de esfuerzo produciría micro-yield pero no falla.

El patrón de esfuerzos sólo en los refuerzos es mostrado en la Figura 4-33. Es posible observar que los patrones de esfuerzos son similares en los tres refuerzos, lo que significa que los tres están desarrollando el mismo trabajo.

Figura 4-33 Vista general de la distribución de esfuerzos de los refuerzos internos



Las figuras siguientes muestran la distribución de esfuerzos en la placa inferior, y es posible observar que no hay zonas de alta concentración de esfuerzos creadas individualmente. La tensión a lo largo de todo el área es igual, con la excepción de las

zonas de soldadura, donde se espera tener valores más altos debido a la contribución de las paredes en la rigidez del fondo.

Figura 4-34 Vista superior de la distribución de esfuerzos en el tanque

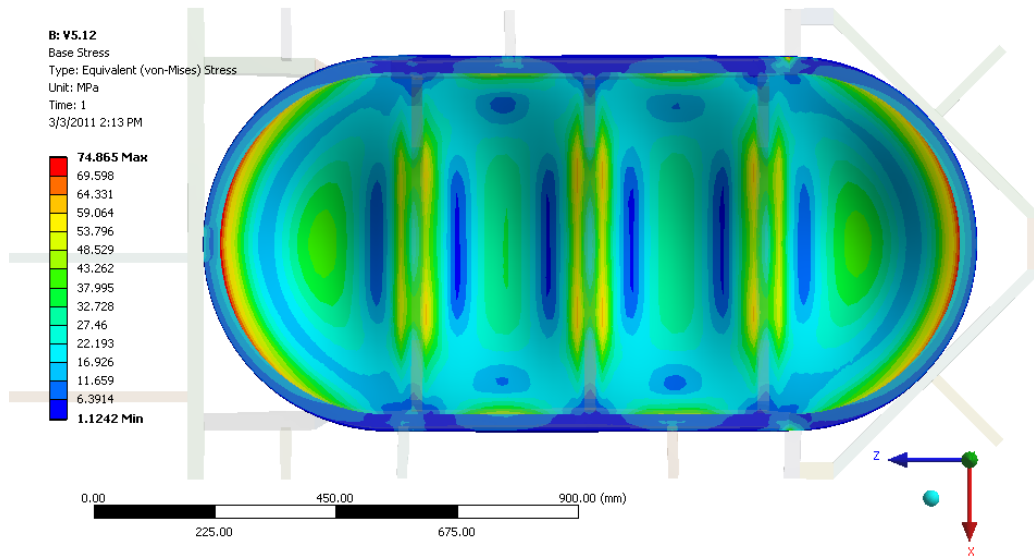
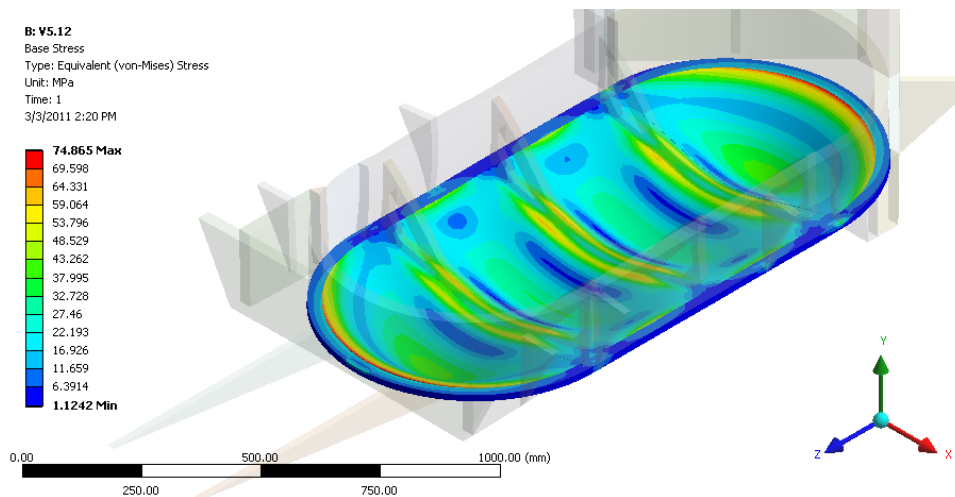


Figura 4-35 Distribución de esfuerzos en la placa inferior

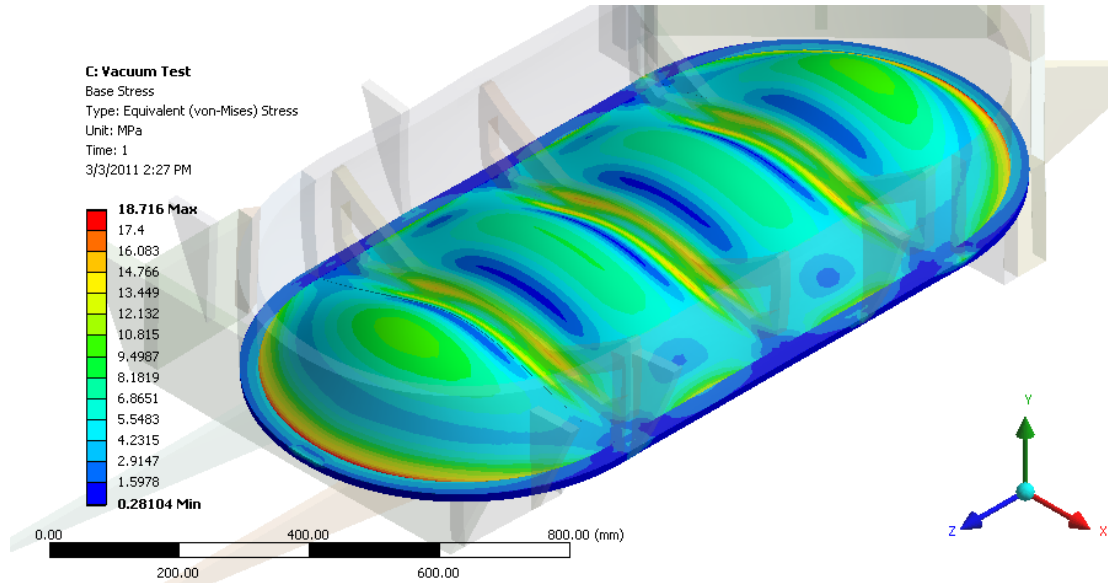


El banco óptico se omitió de las imágenes con el fin de facilitar la apreciación de los patrones, los niveles de desplazamiento y esfuerzos están muy por debajo del límite de seguridad.

El siguiente paso para cumplir con los requisitos de carga del tanque de LN2 es aplicar una carga de vacío en el espacio interior del tanque. La carga dentro de las caras se

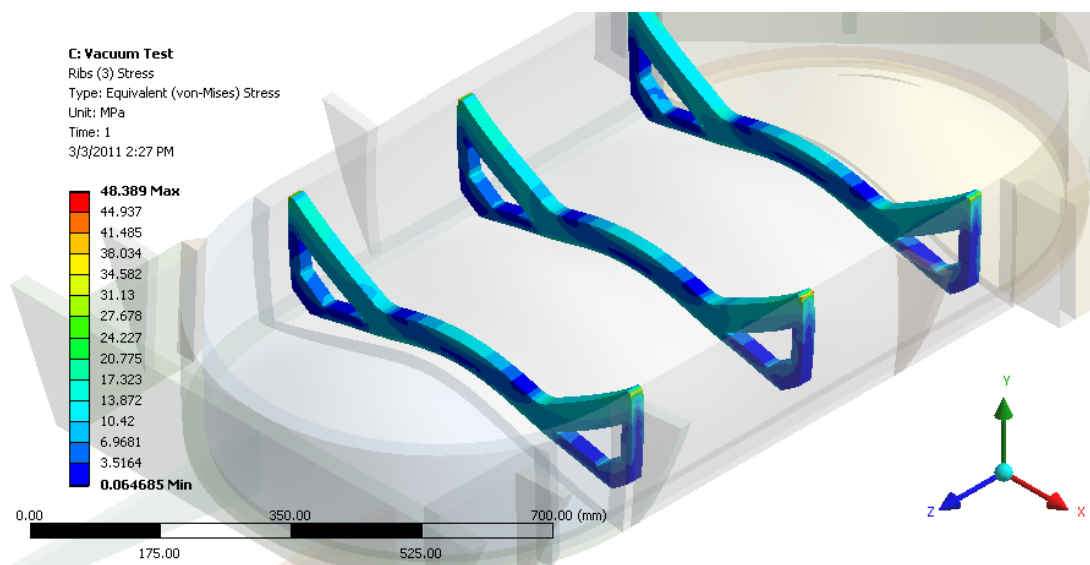
invierte y la magnitud cambió a 1 atm (vacío perfecto). Se utilizó el mismo modelo y se pueden observar los resultados del desplazamiento en las siguientes figuras.

Figura 4-36 Desplazamiento de la placa inferior en vacío



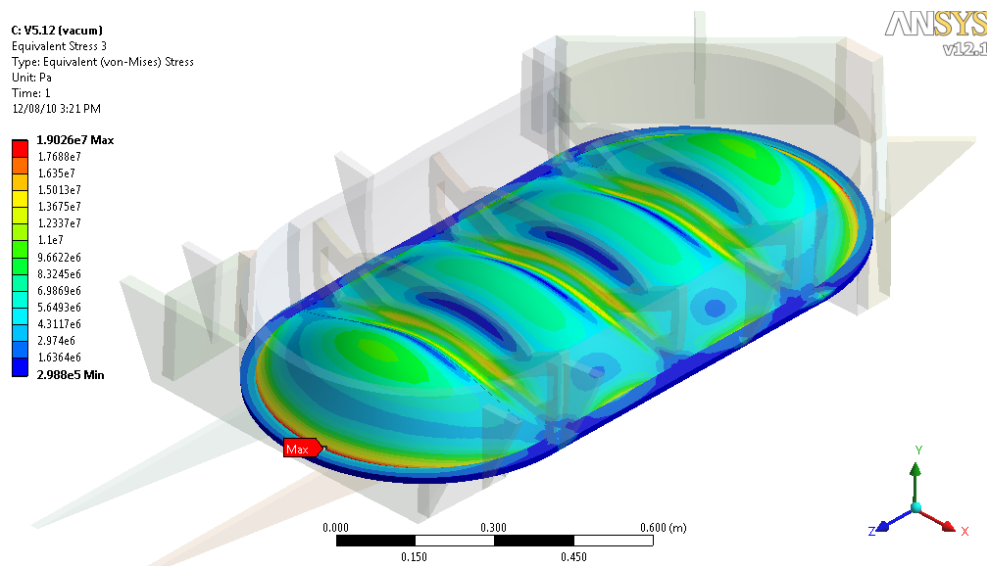
Las vigas también deben ser evaluadas, ya que fueron diseñadas para trabajar con la carga invertida. Los valores de esfuerzo reportados están por debajo del límite de seguridad, como se puede observar en la Figura 4-37.

Figura 4-37 Patrón de esfuerzos en los refuerzos en vacío



El patrón de esfuerzos en la placa inferior se muestra en la Figura 4-38. Es posible observar que los valores están también por debajo del límite de seguridad.

Figura 4-38 Patrón de esfuerzos en la placa inferior en vacío

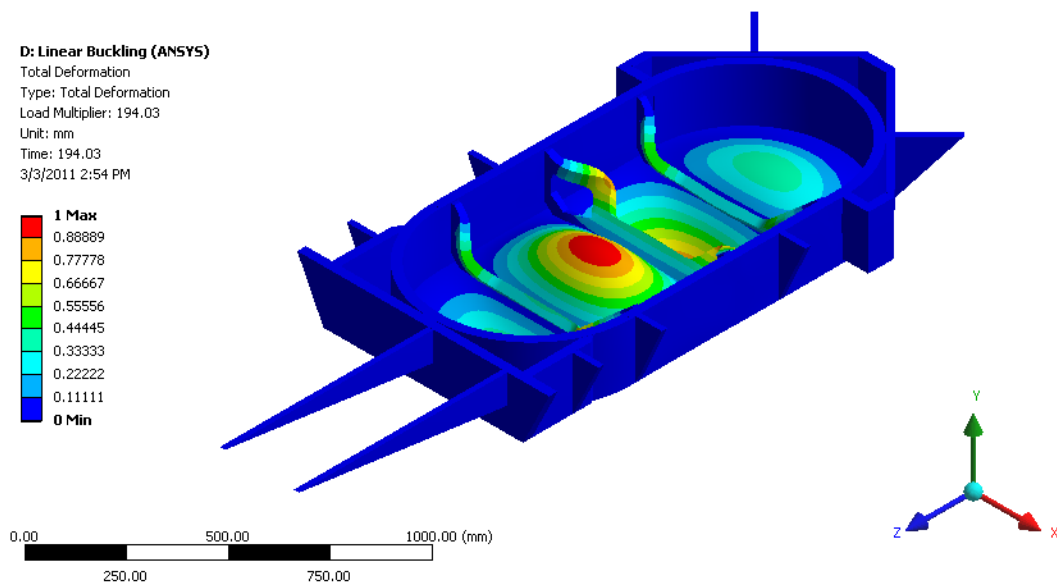


Para evitar la posibilidad de colapso del tanque bajo carga de vacío, se realizó un análisis de pandeo. Se utilizó una carga unitaria de 1 atm para cargar el tanque (en vacío). Los resultados presentados muestran que el multiplicador de carga necesario para alcanzar el primer modo de colapso es superior a 500 (los valores se pueden observar en la siguiente figura), lo que significa es seguro.

La Figura 4-39 muestra el primer modo de pandeo y la escala representa el valor normalizado del desplazamiento. Aunque se calcularon cuatro modos, sólo el primero es relevante, ya que es la causa de falla más común si se aplica una carga en rampa.

Figura 4-39 Resultados del análisis de pandeo





El primer modo de falla se produce con un multiplicador de 194,03 cargas. Para este análisis se realizó utilizando una carga unitaria (1 atm), significa que el tanque debe soportar con seguridad alrededor de 190 atm antes de la falla, por lo que el riesgo de colapso por vacío es mínimo.

#### 4.8 Conclusiones del capítulo.

Los resultados obtenidos con la serie de análisis realizados a lo largo de los apartados de este capítulo fueron de gran utilidad, pues con ellos se pudieron realizar las modificaciones pertinentes en cada uno de los componentes analizados y cumplir con los requerimientos planteados al principio del presente trabajo. Cabe destacarse que debido a la forma de trabajo para realizar los análisis, las modificaciones que se iban realizando para los modelos de elementos finitos se plasmaban directamente al modelo 3-D asegurando que éste último estuviera actualizado con los avances de los análisis correspondientes.

El componente cumple las especificaciones planteadas.

Una vez realizados estos cálculos fueron presentados para el CDR al panel de expertos encargados de la revisión exhaustiva del diseño de todo el instrumento. Para el caso del diseño mecánico los modelos y análisis fueron aprobados para ser manufacturados, recibiendo una felicitación por el nivel de trabajo presentado.

A partir de este punto se debe ir trabajando en la manufactura de los componentes, por lo que en los siguientes capítulos se describirán brevemente los pasos a seguir para continuar con el trabajo y finalizar el componente.

A continuación se muestran las figuras del diseño del banco óptico y sus mecanismos finalizado para CDR.

Figura 4-40 Estructura interna de tanque en modelo 3-D

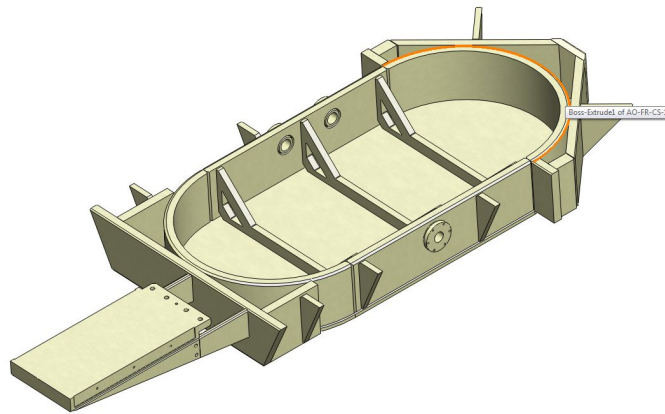
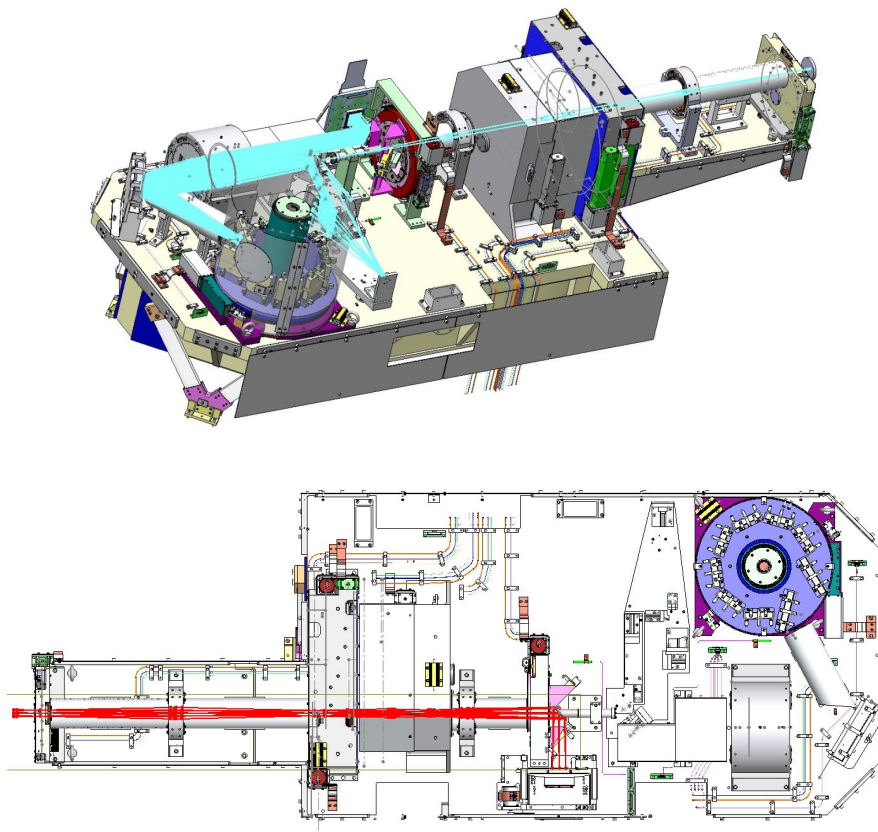


Figura 4-41 Banco óptico con instrumentos



## CAPITULO 5

---

### 5 Conclusiones generales

El diseño final del banco óptico cumple los requerimientos de envolvente con una configuración cuadrada, irregular y colocado sobre tres puntos de fijación hacia la plataforma Nasmyth, que permite la transmisión de cargas directamente a los puntos marcados sobre la plataforma para poder anclar el instrumento, cumpliendo de esta manera con los requerimientos de isostaticidad y transmisión de carga.

Para cumplir con los requerimientos de estabilidad térmica y deformaciones sobre el banco óptico se realizaron análisis termo-estructurales por elementos finitos.

Análisis Térmico:

- Se analizó la distribución de la temperatura en las condiciones de trabajo obteniendo que el gradiente de temperatura es de 5K en una condición extrema que no ocurrirá en ninguno de los modos de funcionamiento del instrumento. En todo caso para el mecanismo que presenta la mayor diferencia de temperatura en comparación con 77K de nitrógeno (temperatura de trabajo) que se encuentra en el extremo de la extensión, se plantea la opción de colocar anclajes térmicos conectados directamente al tanque de nitrógeno, de tal manera que ayuden a que el mecanismo alcance la temperatura de trabajo de manera adecuada.
- Como factor de referencia tenemos que para alcanzar el estado estable en condiciones ideales de un poco más de 7 horas. Este tiempo es poco probable que se alcance, pero resulta importante para verificar que la distribución de la temperatura sea homogénea para evitar que los componentes del instrumento sean dañados.

Análisis Estructural:

- Una vez alcanzado el estado estable, se procede al análisis estructural, lo que permitió ver que al aplicar las cargas de contracciones térmicas del material y las cargas gravitatorias de todos los componentes no hacen fallar al banco, pues el esfuerzo máximo para el aluminio que se muestra es de 58 MPa comparado con el límite de elasticidad para el aluminio a 77K es 337 MPa, lo que hace confiar en que el diseño propuesto funcione adecuadamente.
- Los esfuerzos máximos resultado del análisis estructural se observan en las esquinas de la barra G10 con 260MPa, éstos debido a la modelación; para el caso real, se pretende quitar estas esquinas y colocar chaflanes que no permitan que se genere un concentrador de esfuerzos; esperando con esto que las tensiones se reduzcan en 100MPa. Comparando con la magnitud de tensión menor para el G10 a 77K es 459MPa se considera confiable.
- Con los resultados del análisis estructural y con ayuda de nodos de control colocados en la línea que corresponde al haz de luz, se definieron los desplazamientos que se tendrán sobre la base fría (y en la posición de inserción de cada mecanismo), de tal manera que se pueden compensar estos desplazamientos esperados en el diseño de cada uno de los mecanismos independientes para que el sistema funcione adecuadamente.

Del análisis modal realizado al banco óptico con los componentes, se obtiene que durante los 5 primeros modos de vibración se asegura que los valores no se encuentren dentro de los valores de 14Hz y 60 Hz. Cumpliendo de esta manera el requerimiento para el análisis modal.

Es importante destacar la labor de los soportes de baja conducción, pues pueden observarse de estos análisis que son lo que absorben las grandes deformaciones que resultan de las contracciones térmicas y las cargas gravitatorias sin sufrir daño en su estructura interna. La forma en “v” y configuración de los soportes en el banco permiten que los modos de vibración queden como se muestran en las imágenes y sean de magnitud adecuada para cumplir los requerimientos.

El tanque de nitrógeno líquido es un componente que en un caso extremo debe soportar las 4 atm de presión, por lo que se realizó el análisis de presión correspondiente para asegurar que el tanque no colapse, dando como resultado que se cumple el requerimiento de manera satisfactoria alcanzando un valor menor de 80MPa en caso muy remoto de que se alcanzará dicho valor de presión. En todo caso, como se explicó habrá micro-yield, pero no fallará. El tanque de nitrógeno en su parte interna, cuenta con refuerzos que fueron optimizados para reducir peso.

A lo largo del proyecto, se han realizado diversas publicaciones sobre el tema del presente trabajo, y se encuentran listados en el Apéndice.

Una vez terminado el diseño y las optimizaciones correspondientes se realizaron las hojas de proceso para la fabricación del mismo (Apéndice) y se procedió al comienzo de la manufactura (Apéndice); esto, después de que se aprobara la Revisión Crítica de Diseño en donde revisores expertos de Holanda, España, E.U. y Francia dieron luz verde para la fabricación definitiva de FRIDA. El presente trabajo formó parte de la documentación entregada a los expertos para aprobar dicha revisión.

Una vez terminado con los análisis y cumpliendo con los requerimientos del instrumento, se concluye que es posible construir el banco óptico del instrumento FRIDA.

## CAPITULO 6

---

### 6 Referencias bibliográficas

1. Gemini observatory (2008, 7 de enero). NIFS on Gemini North instrument support structure *NIFS*. Consultado el 8 de septiembre de 2015 de <http://www.gemini.edu/sciops/instruments/nifs/?q=sciops/instruments/nifs>
2. Research School of Astronomy and Astrophysics (2000, marzo). *Optical bench Assembly. Gemini Near-Infrared Integral-Field Spectrograph (NIFS)*. Picture Gallery: CoDR Pictures: March 2000. Consultado el 9 de septiembre de 2015 de <http://www.mso.anu.edu.au/nifs/gallery/mar00/index.shtml>
3. Research School of Astronomy and Astrophysics (2000, marzo). *Spectrograph skirt and cover. Gemini Near-Infrared Integral-Field Spectrograph (NIFS)*. Picture Gallery: First Cooldown with Mechanisms: May 2002. Consultado el 9 de septiembre de 2015 de <http://www.mso.anu.edu.au/nifs/gallery/may02/index.shtml>
4. Joeleff T. Fitzsimmons, Scott Roberts, Kei Szeto y Jerry Sebesta (2000, abril). *Manufacturing and heat-treatment procedure for the ALTAIR optical bench*. Optical and IR Telescope Instrumentation and Detectors. Vol. 4008 SPIE. 899-906.
5. Consolider Ingenio-GTC (s. f.). Reportaje: EAST, entre el astrónomo y el instrumento I, Hablando de EMIR. Consultado el 7 de octubre de 2015. [http://www.iac.es/proyecto/consolider-ingenio-gtc/index.php?option=com\\_content&view=article&id=291:east-entre-el-astronomo-y-el-instrumento-i&catid=49:reportajes&Itemid=72](http://www.iac.es/proyecto/consolider-ingenio-gtc/index.php?option=com_content&view=article&id=291:east-entre-el-astronomo-y-el-instrumento-i&catid=49:reportajes&Itemid=72)
6. Consolider Ingenio-GTC (2012, 15 de junio). Noticia: EL instrumento EMIR, hacia su ensamblaje. Consultado el 10 de octubre de 2015. [http://www.iac.es/proyecto/consolider-ingenio-gtc/index.php?option=com\\_content&view=article&id=845:el-instrumento-emir-hacia-su-ensamblaje&catid=6:noticias&Itemid=1](http://www.iac.es/proyecto/consolider-ingenio-gtc/index.php?option=com_content&view=article&id=845:el-instrumento-emir-hacia-su-ensamblaje&catid=6:noticias&Itemid=1)
7. Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) (2002, 8 de marzo). *LIRIS Long-slit Intermediate Resolution Infrared Spectrograph for the WHT*. Photo Gallery: Page 1. Consultado el 13 de octubre de 2015. <http://www.iac.es/proyecto/LIRIS/photoGalery/photogal.html>
8. V. Bringas, D. Lucero, J. Uribe, A. Rodríguez, A. Corrales, R. Estrada, (30 de octubre de 2011). FRIDA Mechanical Performance Analysis, FR/DD-MC/134, 3A. CIDESI

## CAPITULO 7

---

### 7 Índices

#### 7.1 Índice de figuras

Figura 1-1 Ensamble CAD del Banco Óptico de NIFS .....	10
Figura 1-2 Instrumento NIFS ensamblado e instalado en el Telescopio Gemini Norte. ....	10
Figura 1-3 Vista Isométrica del banco óptico de ALTAIR.....	11
Figura 1-4 Montaje de banco óptico de instrumento ALTAIR .....	12
Figura 1-5 Fabricación del Banco Óptico de ALTAIR .....	12
Figura 1-6 Banco óptico de EMIR fabricado .....	14
Figura 1-7 Banco óptico montado en anillo central .....	15
Figura 1-8 Pruebas del instrumento ensamblado .....	15
Figura 3-1 Lay-out GTCAO en plataforma Nasmyth .....	22
Figura 3-2 Diseño del banco óptico presentado en PDR .....	23
Figura 3-3 Componentes principales del banco óptico .....	24
Figura 3-4 Dimensiones generales banco óptico .....	25
Figura 3-5 Cambios dimensionales en tres aleaciones de aluminio causado por el envejecimiento artificial .....	26
Figura 3-6 Materiales para cada componente del soporte .....	29
Figura 3-7 Configuraciones y resultados de análisis de soportes .....	30
Figura 3-8 Chaflán interno en componente de soporte .....	31
Figura 3-9 Detalle de perno y chaflán .....	31
Figura 3-10 <i>Soportes de baja conducción en forma de "V"</i> .....	32
Figura 3-11 Distribución de los soportes de baja conducción montados en el banco óptico .....	32
Figura 3-12 Configuración de los soportes de baja conducción .....	33
Figura 4-1 Configuración del banco óptico.....	35
Figura 4-2 Modelo sólido del banco óptico y mecanismos diseñado usando CAD.....	36
Figura 4-3 Modelo sólido preparado para el Análisis de Elemento Finito .....	37
Figura 4-4 Modelo de elemento finito donde se muestra el nivel de refinamiento empleado para el análisis .....	38
Figura 4-5 Distribución de temperatura producida por el sistema.....	39
Figura 4-6 Distribución de temperatura producida en el banco óptico y mecanismos .....	40

Figura 4-7 Distribución de temperatura del análisis transitorio para 300 segundos (5 min.)	41
Figura 4-8 Distribución de temperatura del análisis transitorio para 7200 segundos (2 hrs)	42
Figura 4-9 Distribución de temperatura del análisis transitorio para 14400 segundos (4 hrs)	43
Figura 4-10 Distribución de temperatura del análisis transitorio para 21600 segundos (6 hrs)	43
Figura 4-11 Distribución de temperatura del análisis transitorio para 26700 segundos (7.42 hrs)	44
Figura 4-12 Patrón de esfuerzos para el banco óptico y los soportes de baja conducción	45
Figura 4-13 Esfuerzos máximos desarrollados por las barras de G10. Sección dentro de la cubierta	46
Figura 4-14 Primer modo	47
Figura 4-15 Segundo modo	47
Figura 4-16 Tercer modo	48
Figura 4-17 Desplazamientos sobre la base fría	49
Figura 4-18 Comportamiento de los nodos a lo largo del eje “y”(eje óptico)	51
Figura 4-19 Comportamiento de los nodos sobre el eje “X”	52
Figura 4-20 Configuración básica del tanque sin refuerzos internos	53
Figura 4-21 Configuraciones de los refuerzos internos en el tanque	53
Figura 4-22 Configuración óptima de refuerzos	54
Figura 4-23 Modelo de elementos finitos para el tanque de nitrógeno	55
Figura 4-24 Carga de presión de 4 atm en la superficie interna del tanque	56
Figura 4-25 Distribución de desplazamientos	57
Figura 4-26 Resultados de la optimización de forma de los refuerzos	57
Figura 4-27 Áreas que pueden quitarse de los refuerzos	58
Figura 4-28 Forma final de los refuerzos	58
Figura 4-29 Patrón de esfuerzos equivalentes	59
Figura 4-30 Zona de concentración de esfuerzos	60
Figura 4-31 Modelo de Elemento Finito del Sub-modelo	60
Figura 4-32 Esfuerzos equivalentes en el Sub-modelo	61
Figura 4-33 Vista general de la distribución de esfuerzos de los refuerzos internos	61
Figura 4-34 Vista superior de la distribución de esfuerzos en el tanque	62
Figura 4-35 Distribución de esfuerzos en la placa inferior	62
Figura 4-36 Desplazamiento de la placa inferior en vacío	63
Figura 4-37 Patrón de esfuerzos en los refuerzos en vacío	63

Figura 4-38 Patrón de esfuerzos en la placa inferior en vacío .....	64
Figura 4-39 Resultados del análisis de pandeo .....	64
Figura 4-40 Estructura interna de tanque en modelo 3-D .....	66
Figura 4-41 Banco óptico con instrumentos .....	66
Figura 8-1 Hojas de proceso de banco óptico .....	74
Figura 8-2 Rolado de partes circulares que forman el tanque .....	79
Figura 8-3 Presentación de las diferentes componentes del banco óptico .....	79
Figura 8-4 Soldadura del banco óptico .....	80
Figura 8-5 Ensamble de banco óptico y presentación de mecanismos sobre el banco ....	80

## 7.2 Índice de tablas

Tabla 1-1 Planteamiento del problema .....	17
Tabla 3-1 Propiedades del Aluminio 6061 de 293 a 77 K° .....	27
Tabla 4-1 Dimensiones generales del banco óptico .....	35
Tabla 4-2 Densidades equivalentes de mecanismos .....	38
Tabla 4-3 Modos de vibración del banco óptico con mecanismos .....	46
Tabla 4-4 Nodos de desplazamiento sobre la base fría .....	48
Tabla 4-5 Variaciones de los nodos en el eje "X" .....	51



### 8 Apéndices

#### 8.1 Publicaciones relacionadas con el tema

1. **"Current status of FRIDA: diffraction limited NIR instrument for GTC,"** Beatriz Sánchez<sup>a</sup>, José A. Acosta<sup>d</sup>, Luis Carlos Álvarez<sup>a</sup>, Vicente Bringas<sup>c</sup>, Nicolás Cardiel<sup>f</sup>, Adi Corrales<sup>c</sup>, Salvador Cuevas<sup>a</sup>, Oscar Chapa<sup>a</sup>, José Javier Díaz<sup>d</sup>, Stephen S. Eikenberry<sup>e</sup>, Carmen Eliche<sup>f</sup>, Carlos Espejo<sup>a</sup>, Rubén Flores<sup>a</sup>, Francisco Garzón<sup>d</sup>, Peter Hammersley<sup>d</sup>, Carolina Keiman<sup>a</sup>, Gerardo Lara<sup>a</sup>, José Alberto López<sup>b</sup>, Pablo López<sup>d</sup>, **Diana Lucero**<sup>c</sup>, José Manuel Montoya<sup>c</sup>, Heidy Moreno<sup>d</sup>, Sergio Pascual<sup>f</sup>, Jesús Patrón<sup>d</sup>, Almudena Prieto<sup>d</sup>, N. Raines<sup>e</sup>, Alberto Rodríguez<sup>c</sup>, Jorge Uribe<sup>c</sup>, Alan Watson<sup>a</sup>. <sup>a</sup>Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México, Apdo.Postal 70-264, 04510, México D.F., México. <sup>b</sup>Instituto de Astronomía, UNAM, Campus Ensenada. <sup>c</sup>Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial. Av. Playa Pie de la Cuesta 702, 76130, Qro. México. <sup>d</sup>Instituto de Astrofísica de Canarias, c/Vía Láctea s/n, E-38200 La Laguna, Tenerife, Spain <sup>e</sup>Astronomy Department, University of Florida, 211 Bryant Space Center, PO Box 112055, Gainesville FL, 32611-2055, USA <sup>f</sup>Universidad Complutense de Madrid. PAPER NUMBER: 8446-75 "Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV" SPIE Conference 1-6 July 2012 in Amsterdam, Netherlands.
2. **FRIDA: Integral-field spectrograph and imager for the adaptive optics system of the Gran Telescopio Canarias**. Salvador Cuevas<sup>a</sup>, Vicente Bringas<sup>f</sup>, Nicolas Cardiel<sup>g</sup>, Stephen. S. Eikenberry<sup>c</sup>, Peter L. Hammersley<sup>e</sup>, Jeff Julian<sup>c</sup>, Robert Julian<sup>c</sup>, **Diana Lucero**, J. Manuel Montoya<sup>f</sup>, Alan Watson<sup>d</sup>: Infrared Physics & Technology Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications Edited by C. Corsi and M. Strojnik. *Elsevier*.
3. **"Opto-mechanical design of FRIDA"**, V. Bringas, **D. Lucero**, A. Corrales, J. Uribe, A. Rodríguez, J.M. Montoya, L. Álvarez, E. Gómez, B. Sánchez, S. Cuevas, O. Chapa, C. Espejo, R. Flores-Meza, G. Lara, S.S. Eikenberry. Science with the GTC IV Congress, October 16- 18 2011, Santa Cruz de la Palma Canarias.

#### 8.2 Hojas de proceso para componentes de banco óptico.

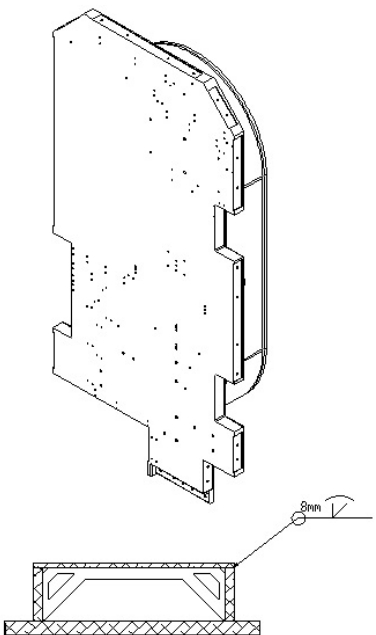
Para la manufactura del banco óptico se realizaron diversas hojas de proceso de cada uno de los componentes, que servirán para llevar un control de los diferentes procesos a los que será sometida la pieza. En cada hoja existen fase, descripción de la operación, máquina o herramienta empleada, estándar a cumplir, la forma de inspeccionar la operación, responsable y observaciones. De esta manera se pretende dar un correcto seguimiento a cada pieza. A continuación, se muestran algunos ejemplos de las hojas de proceso.

Figura 8-1 Hojas de proceso de banco óptico

PROYECTO:		Cold Bench		Hoja 1 de 6		CIDESI	
QD0067							
N° de plano:							
DR/AO-FR-CS-100/110, DR/AO-FR-CS-100/111							
N° de parte:							
AO-FR-CS-100-110, AO-FR-CS-100-111							
Nombre:							
Cold Bench							
Material:							
Al 6061-T6							
Medidas en bruto:							
Checar Plano y dar sobrematerial (10 mm sugerido)							
Temperatura de Ref.:							
26°C (para fabricación)							
Tratamiento térmico:							
Envejecido frío							
Acabado Superficial:							
Ra= 0,4 µm N5							
Inspección:							
Dimensional							
Elaboró							
V. Bringas							
<p>NOTA: Habilitar con corte por agua, el sobre espesor de materiales es de 10 mm para un total de 60 mm de espesor de placa. Los patrones de barrenos deben realizarse una vez que esté soldado con el LN2 tank. Seguir proceso indicado .</p>							
Fase	Descripción de la operación	Máquina/Herramienta	Especificación o estándar	Método de Inspección	Fecha	Responsable	Observaciones
1	Verificación material (proceso 11, (14))	TM (Espectrómetro de emisión óptica)	Al 6061 T6	Químico	TBD	TBD	Certificados
2	Habilitación de blank por corte de agua (proceso 1, (10))	Cortadora de agua Mitsubishi	Sobrematerial recomendado 10 mm en espesor	Dimensional	TBD	TBD	
3	Inspección final (proceso 17, (14))	Cinta métrica	Diseño (plano)	Dimensional	TBD	TBD	Verificar alabeo de la placa

<p><b>PROYECTO:</b> Cold Bench LN2 Tank</p> <p>OD0067</p> <p><b>N° de plano:</b></p> <p>DR/AO-FR-CS-100/052 110 1A, DR/AO-FR-CS-100/052 210 1A, DR/AO-FR-CS-100/052 310 1A, DR/AO-FR-CS-100/118, AO-FR-CS-100/119</p> <p><b>N° de parte:</b></p> <p>AO-FR-CS-100</p> <p><b>Nombre:</b> Cold Bench LN2 Tank</p> <p><b>Material:</b> Al 6061-T6</p> <p><b>Medidas en bruto:</b> Checar Plano</p> <p><b>Temperatura de Ref.</b> 26°C (para fabricación)</p> <p><b>Tratamiento térmico:</b> Envejecido frío</p> <p><b>Acabado Superficial:</b> Ra= 0,4 µm N5</p> <p><b>Inspección:</b> Dimensional</p> <p><b>Elaboró</b> V. Bringas</p>	<p><b>NOTA:</b> Habilitar todos con corte por agua, . Los patrones de barrenos en caso de placas laterales realizar antes de soldar. Soldar las bridas en 2 y 3 antes de armar el tanque , carearlas a la medida una vez soldadas en las placas. Seguir proceso indicado .<b>NO RAYAR NI MALTRATAR</b></p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

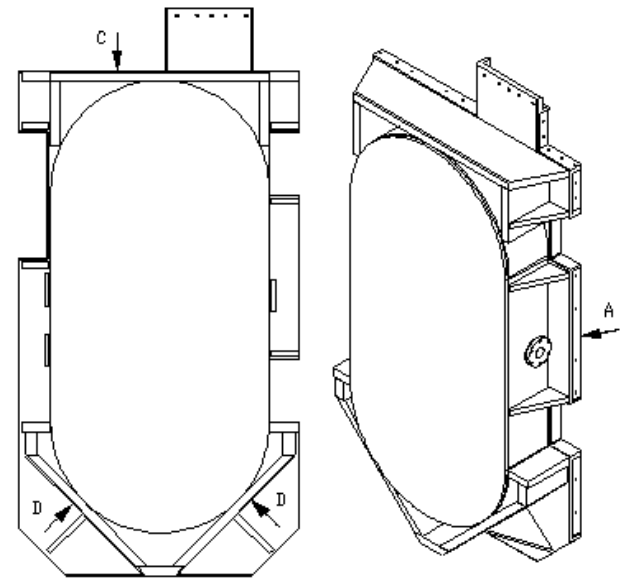
Fase	Descripción de la operación	Máquina/Herramienta	Especificación o estándar	Método de inspección	Fecha	Responsable	Observaciones
1	Verificación material (proceso 11, (14))	TM (Espectrómetro de emisión óptica)	Al 6061 T6	Químico	TBD	TBD	Certificados
2	Habilitación de blanks 1, 2 , 3 y 5 por corte de agua (proceso 1, (10))	Cortadora de agua Mitsubishi	Diseño (plano)	Dimensional	TBD	TBD	Si es requerido calenta en horno a 200 °C para evitar Hidrógeno superficial
3	Soldado de bridas AO-FR-CS-100-119 a placas 2 y 3 (proceso 13 (4))	Soldadora FRONIUS CMT	Diseño (plano)	Dimensional	TBD	TBD	Calentar de 60°C a 100 °C procedimiento WPS-GTAW-05 con aporte ER4043 0.045"
4	Maquinado de las caras de las bridas AO-FR-CS-100-119 a medida final para eliminar alabeo de la soldadura (proceso 2a (13) (sobrematerial de la brida 5mm)	Fresadora Phoebus	Diseño (plano)	Dimensional	TBD	TBD	Componente crítico las caras deben ser perfectamente planas con rugosidad de 0.4
5	Inspección de la soldadura de las bridas	Líquidos penetrantes	END-IP-001-00 Tipo II Método C	NDT	TBD	TBD	Revisar ambos lados para evitar degasificación

<b>PROYECTO:</b>	Cold Bench y LN2 Tank	Hoja 4 de 6
<b>ODD067</b>		
<b>N° de plano:</b>		
DR/AO-FR-CS-100/052 410 1A		
<b>N° de parte:</b>		
AO-FR-CS-100		
<b>Nombre:</b>		
Cold Bench		
<b>Material:</b>		
Al 6061-T6		
<b>Medidas en bruto:</b>		
<b>Temperatura de Ref.</b>		
26°C (para fabricación)		
<b>Tratamiento térmico:</b>		
Envejecido frío		
<b>Acabado Superficial:</b>		
Ra= 0,4 µm N5		
<b>Inspección:</b>		
Dimensional		
<b>Elaboró</b>		
V. Bringas		

**NOTA: Al soldar el tanque al Optical Bench cuidar no preesforzar la unión .NO RAYAR NI MALTRATAR**

Fase	Descripción de la operación	Máquina/Herramienta	Especificación o estándar	Método de inspección	Fecha	Responsable	Observaciones
1	Integración del LN2 Tank al optical bench por soldadura (proceso 13 (4)) no preesforzar durante el ensamble los componentes ajustan de manera natural de lo contrario corregir alabeos	Soldadora FRONIUS CMT	Diseño (plano)	Dimensional	TBD	TBD	Calentar de 60°C a 100 °C procedimiento WPS-GTAW-05 con aporte ER4043 0.045"
2	Utilizar madera y dispositivos de protección para el rayado y golpes	NA	NA	NA	TBD	TBD	Se diseñarán
3	Inspección de la soldadura del tanque antes de continuar con cartabones y refuerzos en siguiente proceso (proceso 14)	Líquidos penetrantes	END-IP-001-00 Tipo II Método C	NDT	TBD	TBD	De ser requerido usar rayos X
5	Limpieza final (proceso 3)	Equipo de limpieza	NA	NA	TBD	TBD	Limpieza profunda y eliminar todos los contaminantes
6	Inspección final (proceso 17, (14))	Cinta métrica	Diseño (plano)	Dimensional	TBD	TBD	Verificar alabeo de la placa

<b>PROYECTO:</b>	Cold Bench y LN2 Tank
OD0067	
<b>N° de plano:</b>	
DR/AO-FR-CS-100/052 710 1A	
<b>N° de parte:</b>	
AO-FR-CS-100	
<b>Nombre:</b>	Cold Bench
<b>Material:</b>	Al 6061-T6
<b>Medidas en bruto:</b>	Checkar Plano
<b>Temperatura de Ref.</b>	26°C (para fabricación)
<b>Tratamiento térmico:</b>	Envejecido frío
<b>Acabado Superficial:</b>	Ra= 0,4 µm N5
<b>Inspección:</b>	Dimensional
<b>Elaboró</b>	V. Bringas



**NOTA:** La perpendicularidad de las piezas C y D contra A debe ser mejor o igual a 0.1 mm esta perpendicularidad es crítica. El ángulo entre D-D es crítico y debe ser 90°, lo mismo que C, con respecto de ambas D.

Fase	Descripción de la operación	Máquina/Herramienta	Especificación o estándar	Método de inspección	Fecha	Responsable	Observaciones
1	Integración de los cartabones y los soportes de los Trusses al optical bench por soldadura (proceso 13 (4)) no preesforzar durante el ensamble los componentes ajustan de manera natural de lo contrario corregir alabeos. Durante el proceso cuidar la perpendicularidad y posición de los elementos C y D contra la superficie del Banco óptico con un valor mejor o igual a 0.1mm. Estos elementos son cruciales ya que definen la posición de los Support Trusses del banco.	Soldadora FRONIUS CMT	Diseño (plano)	Dimensional	TBD	TBD	Calentar de 60°C a 100 °C procedimiento WPS-GTAW-05 con aporte ER4043 0.045"
2	Utilizar madera y dispositivos de protección para el rayado y golpes	NA	NA	NA	TBD	TBD	Se diseñarán
3	Inspección de la soldadura de los elementos al tanque	Inspección Visual con Kit de inspección y lente 3x con luz blanca natural	NA	Visual ASME sección VIII división I	TBD	TBD	No es necesario usar NDT eso es para la hermeticidad del tanque, solo inspeccionar calidad para arantizar resistencia mecánica
5	Limpieza (proceso 3)	Equipo de limpieza	NA	NA	TBD	TBD	Limpiar profundamente y eliminar todos los contaminantes

<b>PROYECTO:</b>	Cold Bench y LN2 Tank	Hoja 6 de 6
<b>OD0067</b>		
<b>N° de plano:</b>	2314	
<b>DR/AO-FR-CS-100/052</b> 110 1A al 1010 1A		
<b>N° de parte:</b>		
AO-FR-CS-100		
<b>Nombre:</b>	Cold Bench	
<b>Material:</b>	Al 6061-T6	
<b>Medidas en bruto:</b>	Checar Plano	
<b>Temperatura de Ref.</b>	26°C (para fabricación)	
<b>Tratamiento térmico:</b>	Envejecido frío	
<b>Acabado Superficial:</b>	Ra= 0,4 µm N5	
<b>Inspección:</b>	Dimensional	
<b>Elaboró</b>	V. Bringas	

Fase	Descripción de la operación	Máquina/Herramienta	Especificación o estándar	Método de inspección	Fecha	Responsable	Observaciones
1	Montar la extensión al banco frío antes de maquinar para garantizar la planitud total del mismo a lo indicado en plano y diagrama	Grúa, herramienta de mano y placas de anclaje	Diseño (plano)	Dimensional	TBD	TBD	El montaje debe ser realizado sin esforzar los elementos y garantizando el mejor paralelismo entre el Cold Bench y el Centro de Maquinado
2	Relaizar el primer desbaste con el centro de maquinado, cuidar no pandear la extensión por la carga de la herramienta de corte para ello colocar soportes en la misma Proceso (13, (2))	Centro de maquinado Hardford	Diseño (plano)	Dimensional	TBD	TBD	Sobreespesor en banco de 10 mm en la cara superior. Aproximar medida a 5 mm de la final
3	Utilizar madera y dispositivos de protección para el rayado y golpes para manipulación y transporte	NA	NA	NA	TBD	TBD	Se diseñarán
4	Tratamiento de envejecimiento en LN2 y horno (10, (11)) en Querétaro	Horno y tina con LN2	Procedimiento FR/TN/ST/089	Dimensional	TBD	TBD	Tratar antes de llevar a maquinado de la superficie del Optical Bench

### 8.3 Manufactura de componentes

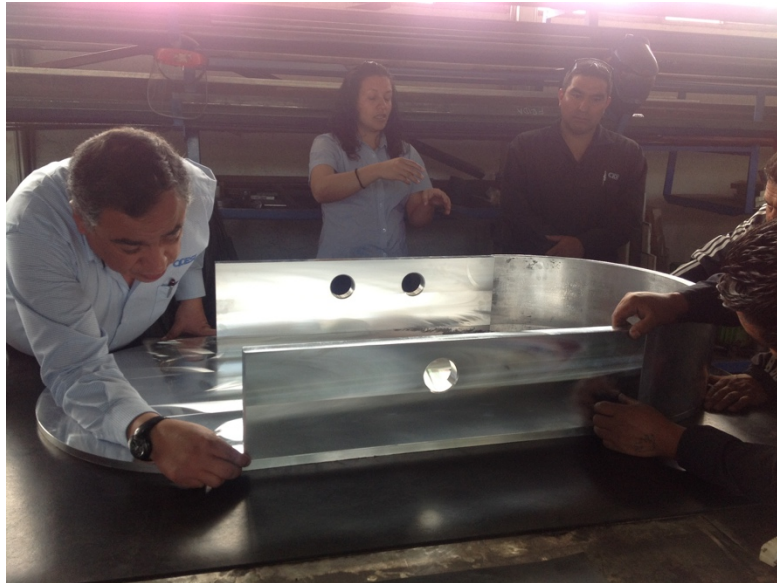
A continuación, se muestran fotografías de la manufactura de cada uno de los componentes y de la soldadura del banco óptico.

En las siguientes figuras se muestra el rolado de las partes circulares del tanque de nitrógeno líquido y posteriormente la presentación de los componentes del tanque de nitrógeno para verificar la colocación adecuada de las piezas y proceder a la soldadura del todo el componente.

**Figura 8-2 Rolado de partes circulares que forman el tanque**



**Figura 8-3 Presentación de las diferentes componentes del banco óptico**



Soldadura de todos los componentes del tanque de nitrógeno.

**Figura 8-4 Soldadura del banco óptico**



Una vez terminada la soldadura del tanque de nitrógeno líquido, se procede con el ensamble de todos los otros componentes y la presentación de los mecanismos ya fabricados para verificación de posiciones.

**Figura 8-5 Ensamble de banco óptico y presentación de mecanismos sobre el banco**

