

Instituto de astronomía

Publicaciones Técnicas



“Reporte Técnico”

RT-2011-01

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE BOTELLAS CRIOGÉNICAS COMO
CONTENEDORES DE DETECTORES ASTRONÓMICOS.**

M.H. Pedrayes, S. Zazueta, F. Quirós, B. Martínez, B. García, G. Guisa.

Marzo de 2011

Diseño y Construcción de Botellas Criogénicas como Contenedores de Detectores Astronómicos

María H. Pedrayes, Salvador Zazueta, Fernando Quiroz,
Benjamín Martínez, Benjamín García, Gerardo Guisar.

Observatorio Astronómico Nacional-Instituto de Astronomía,
Universidad Nacional Autónoma de México.

INDICE

1	Introducción	4
2	Definiciones	4
3	Requerimientos y especificaciones	5
3.1	Requerimientos generales	5
3.2	Requerimientos funcionales	5
3.2.1	Ventana	5
3.2.2	Detector	5
3.2.3	Base del detector	5
3.2.4	Dedo frío	6
3.2.5	Tarjeta de control y conector	6
3.2.6	Contenedor de nitrógeno líquido	6
3.2.7	Protector de radiación	6
3.2.8	Bomba pasiva.....	7
3.2.9	Cabeza.....	7
3.2.10	Cuerpo de la botella de vacío.....	7
3.2.11	Interfaz para llenado	7
3.3	Requerimientos de diseño	8
3.3.1	Disipación de calor y aislamiento térmico.....	8
3.3.2	Acceso al interior del instrumento	9
3.3.3	Materiales y terminación de las superficies	9
3.3.4	Características de los acoplamientos y válvulas	10
3.4	Desempeño, estabilidad y repetibilidad de la imagen	10
3.5	Requerimientos geométricos	11
3.5.1	Dimensiones generales pesos y momentos máximos	11
3.6	Requerimientos de confiabilidad	11
3.6.1	Tiempo de vida del instrumento	11
3.6.2	Tiempo de vida del nitrógeno líquido.....	11
3.7	Requerimientos ambientales	11
4	Diseño Logrado	12
4.1	Materiales empleados	14
4.2	Cálculo para el contacto térmico entre el detector y el contenedor de nitrógeno líquido	15
4.3	Análisis por elementos finitos	19
4.4	Pruebas de Vacío	25
4.5	Filosofía del control de Temperatura y Pruebas efectuadas	25
5	COSTOS Y TIEMPO DE MANUFACTURA	30
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	31

6.1	Agradecimientos.....	32
7	BIBLIOGRAFIA.....	32
8	TRADEMARKS	34

Diseño y construcción de botellas criogénicas como contenedores de detectores astronómicos

1 Introducción

Con este proyecto se pretende desarrollar dentro del Instituto de Astronomía la capacidad en todas las áreas relativas a la construcción de botellas criogénicas comparables a las comerciales para los CCD's que se requieren en los instrumentos astronómicos.

Actualmente, se están desarrollando controladores para CCD's y es deseable contar también con la capacidad de construir los criostatos que, en el mercado internacional, tienen un alto costo. En este reporte se presenta los requerimientos establecidos, el análisis, diseño final y las pruebas efectuadas para probar su confiabilidad.

2 Definiciones

El criostato es un sistema que contiene y mantiene al detector a baja temperatura para minimizar su señal oscura, optimizando su intervalo dinámico a bajas intensidades. El detector es el elemento que registra la imagen que proviene directamente del telescopio y es enfocada por la cámara, o que ha sido procesada por un instrumento previo al detector.

La unidad del criostato está formada por las siguientes componentes principales: un detector (CCD), la base a donde se fija el detector, el contenedor de nitrógeno líquido que a través de un elemento conductor transfieren la temperatura de la base del detector al contenedor, el protector de radiación, un calefactor interno que controla la temperatura alrededor del detector y un sensor de temperatura, las tarjetas de control del detector; y la botella de vacío que se puede dividir en dos partes: la cabeza donde se encuentra ubicada la platina que será la interfaz de montura, una ventana que permite al detector recibir la imagen, y el cuerpo principal de la botella al cual se fijan la base del CCD y el contenedor de nitrógeno líquido, la válvula de vacío, los conectores, la electrónica del CCD y la interfaz para el llenado del contenedor. Además dentro de la misma se fija una bomba pasiva (jaula con material absorbente de humedad).

A la botella se le hace alto vacío para aislar térmicamente por convección al sistema contenedor de nitrógeno líquido, el detector y su electrónica. El aislamiento por conducción se logra parcialmente a través de soportes con materiales de muy bajo coeficiente de conductividad (ejemplo G10) y manejando la resistencia térmica del contacto entre superficies. La radiación, que se incrementa en el vacío, se reduce puliendo la superficie externa del contenedor y las superficies internas de la botella y además a través de un escudo con una superficie de alta reflectividad.

3 Requerimientos y especificaciones

3.1 Requerimientos generales

La distancia entre la ventana del criostato y del detector es de 4 a 6 mm dependiendo del detector y del foco del instrumento donde se piensa emplear.

3.2 Requerimientos funcionales

3.2.1 Ventana

La función de la ventana es aislar a dos medios muy distintos, frío con vacío de otro caliente y mas denso permitiendo al detector la recepción de imagen y la protección del mismo. El material y recubrimiento de la ventana permitirá que pase la radiación deseada del telescopio disminuyendo las pérdidas. Esta ventana se fijará a la cabeza de la botella a través de un anillo de sujeción y de un sello para evitar la pérdida de vacío. Las dimensiones de esta ventana deben ser consideradas para que no bloquee o viñetee la visibilidad del detector y que soporte la diferencia de presión entre el exterior y el interior de la botella que será ≤ 1 atm.

3.2.2 Detector

Sensor altamente eficiente a la luz incidente. Debido a sus características, este sensor requiere de una temperatura baja y controlada además de un ambiente libre de contaminantes y una base que no lo someta a esfuerzos debido a las flexiones que presente su base por la carga térmica a la que es sometido.

3.2.3 Base del detector

La base del detector cumplirá distintas funciones. Sirve de medio para la transferencia de temperatura entre el detector a través de un conductor llamado dedo frío y el contenedor de nitrógeno líquido. También contiene a un calefactor para regular la temperatura del detector. Además la base sirve para alinear al detector con respecto a la ventana por lo que debe contar con un sistema para sujeción y alineación, ensamble y desensamble del mismo. Por lo anteriormente descrito, la base deberá de presentar estabilidad dimensional aun con el gradiente de temperatura previsto de 140° C.

La base debe estar aislada térmicamente del resto de la botella para evitar el consumo innecesario de nitrógeno líquido y la condensación de agua en la cara externa de la ventana.

3.2.4 Dedo frío

Este componente tendrá como función transferir el calor del detector al contenedor de nitrógeno líquido. Está conformado por varias partes: la base del detector, los seguros para mantener el contacto del detector con la base, las lanas que van de esta base al contenedor y las placas que aseguran su contacto. El coeficiente de conductividad térmica de los componentes del dedo frío será fundamental. Además se tendrá que determinar el flujo por unidad de área y la potencia transmitida por unidad de tiempo.

3.2.5 Tarjeta de control y conector

La tarjeta de control estará lo más próxima al detector y al conector de interfaz con el exterior pero al mismo tiempo debe de estar muy bien aislada térmica y eléctricamente.

El conector a emplear será especificado para alto vacío, y su ensamble con la botella deberá de considerar este aspecto sin detrimento de su fácil sustitución.

3.2.6 Contenedor de nitrógeno líquido

La capacidad mínima del contenedor de nitrógeno líquido será de 2 litros para asegurar que el detector se mantendrá a la temperatura establecida las horas en las que será empleado en el telescopio, pero teniendo cuidado de no introducir volumen innecesario y por lo tanto peso a la botella. Debe estar aislado del resto de la botella para evitar el consumo de nitrógeno líquido y la condensación en la ventana. Se debe tener especial cuidado en las uniones (soldadas) para que no existan fugas que provoquen la contaminación de la botella o que dificulten el proceso de vacío.

El contenedor será sometido a ciclos de cambios de temperatura que va de temperatura ambiente a la del nitrógeno líquido $-210\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo que habrá que poner especial cuidado en el material a emplear. Además este se evapora al entrar en contacto con material que presente una temperatura mayor, así es que el contenedor debe de permitir el llenado y ventilación del nitrógeno líquido.

3.2.7 Protector de radiación

La transferencia de calor por radiación entre la botella y el contenedor de nitrógeno líquido se reducirá al generar vacío entre sus paredes coincidentes y con acabados de alta reflectividad en las mismas.

3.2.8 Bomba pasiva

La bomba pasiva será un contenedor con material absorbente que ayudará a atrapar las moléculas de humedad y/o gases que no fueron eliminados por la bomba de alto vacío. De acuerdo al material empleado como absorbente estará en contacto térmico o no con la zona fría del criostato.

3.2.9 Cabeza

A la cabeza se fija la ventana y es retirada del cuerpo de la botella para exponer al detector y la electrónica para darles mantenimiento. A este componente se encuentra unida la platina.

La platina de la botella es la interfaz entre el detector de imagen y el guiador del telescopio o instrumento de descomposición de la luz. Esta tendrá que ser lo suficientemente rígida para soportar el peso de la botella con las torcas introducidas por los cables de la electrónica y el peso del nitrógeno líquido. Irá unida permanentemente a la cabeza de la botella y presentará barrenos en arreglo radial para su fijación al instrumento.

3.2.10 Cuerpo de la botella de vacío

Esta es la parte externa del criostato, servirá para aislar al contenedor de nitrógeno líquido y al detector del medio ambiente y así poder mantener al detector en condiciones de ambiente controlado.

3.2.11 Interfaz para llenado

El nitrógeno líquido al elevarse su temperatura a -196°C hierve y parte se evapora, así es que la interfaz debe de permitir el llenado y ventilación del mismo. Para acelerar el llenado de nitrógeno líquido se puede extraer el vapor con la bomba de vacío.

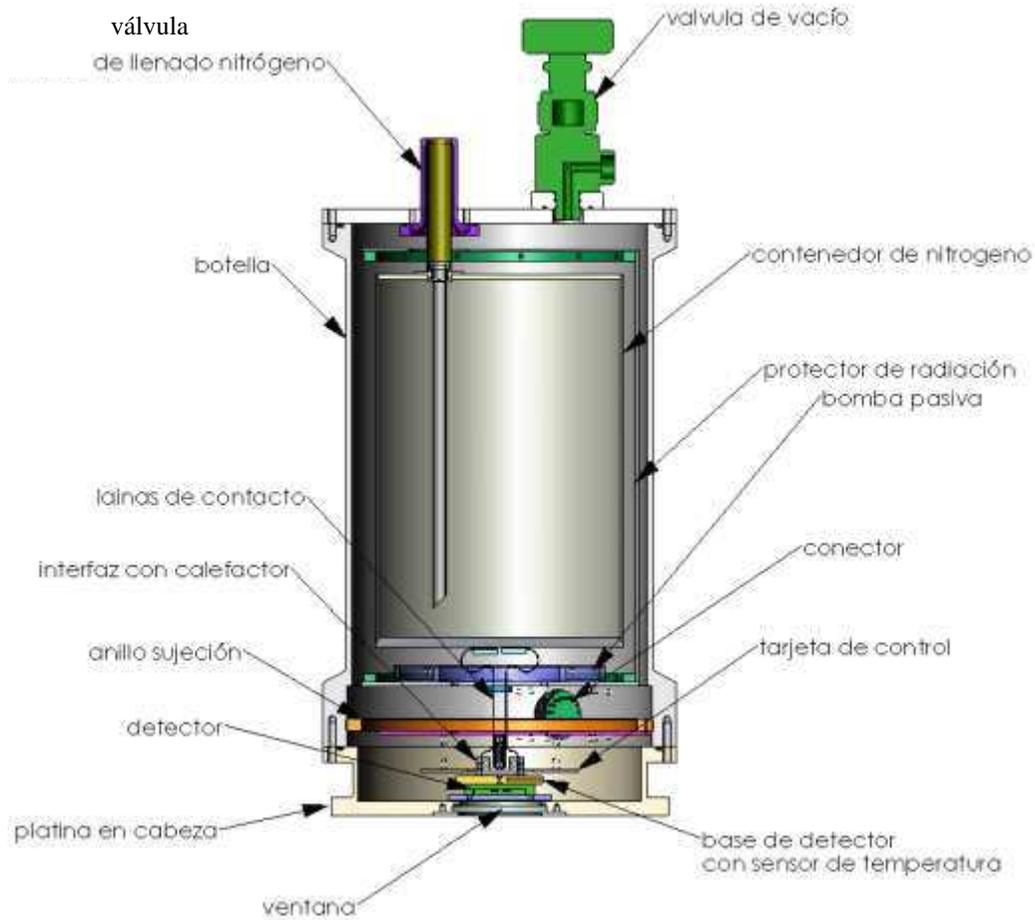


Fig. 1. Corte del diseño del Criostato con los nombres de las partes

3.3 Requerimientos de diseño

3.3.1 Disipación de calor y aislamiento térmico

La disipación de calor en el interior del instrumento deberá de ser mínima y concentrada solamente para controlar la temperatura del detector. Las componentes de mayor disipación se conectaran térmicamente al contenedor de nitrógeno líquido.

La temperatura de operación del detector dependerá del tipo de detector y del funcionamiento del calefactor, pero oscilará entre: -100° a -209° C (153° a 165° K).

Para incrementar el aislamiento térmico por radiación entre el contenedor de nitrógeno líquido y la botella se deberá de envolver al contenedor con un protector de radiación el

cual se puede lograr con varias capas intercaladas de hojas de aluminio y malla de fibra de vidrio.

O se podrá sustituir por un escudo de lámina de aluminio pulido espejo.

3.3.2 Acceso al interior del instrumento

La cabeza de la botella podrá retirarse fácilmente para la orientación o fijado del detector, así como la calibración, el mantenimiento, y sustitución de las componentes electrónicas cuando lo requieran. Además, deberá tenerse especial cuidado en que la jaula de la bomba pasiva pueda ser retirada fácilmente para hornear o substituir el material absorbente cuando se haya contaminado.

3.3.3 Materiales y terminación de las superficies

Los materiales a emplear dentro de la botella deberán presentar un bajo coeficiente de gasificación.

El material y soldaduras empleadas para el contenedor de nitrógeno líquido, las lanas y todas aquellas componentes empleadas para la transferencia de baja temperatura al detector deben de presentar estabilidad cristalina y que no se vuelvan quebradizos a temperaturas de -196°C .

Los materiales, uniones, pegamentos y/o soldaduras no deben de ser porosos.

La soldadura empleada será TIG ó MIG ó soldado con cobre y plata a muy alta temperatura. Los componentes antes de ser soldados deberán ser limpiados con agentes químicos para evitar que se contaminen las soldaduras. El cordón de soldadura será aplicado de manera continua por el lado que será evacuado.

Se deberán reducir los huecos o cavidades que de alguna manera dificulten el flujo de aire para su evacuación o que atrapen partículas o aceites, así como las burbujas de aire. Se especificará en la medida de lo posible, en las paredes interiores de la botella el “acabado espejo” y/o electropulido NS225 en las piezas de acero inoxidable para reducir el atrapado de las moléculas de aire o partículas microscópicas que dificultan y alargan el proceso de evacuación, así como reducen la transferencia de calor por radiación.

Las paredes externas del contenedor de nitrógeno líquido y sobre todo la base de esta deben de ir de ser posible “gold electroplated” para así incrementar la reflectividad y reducir la radiación. También es aconsejable someter las paredes internas del protector de radiación al mismo tratamiento.

Las paredes externas de la botella podrán ser anodizadas o pintadas.

3.3.4 Características de los acoplamientos y válvulas

Las válvulas deben ser metálicas y de buena calidad para garantizar el sellado adecuado a alto vacío (10^{-8} Torr). Podrán ser de aguja o de diafragma siendo las de aguja las más adecuadas para mantener alto vacío.

Evitar en la medida de lo posible los arosellos, y de no ser esto posible tener especial cuidado en diseñar la cavidad para que la presión sea uniforme en el arosello y no mayor a un 35% de su volumen, así como el acabado de los bordes, la superficie de la cavidad, es deseable que queden calidad pulido espejo, y su limpieza.

Evitar el uso de grasas para vacío y de ser necesario emplear la grasa para alto vacío (Dow Corning high vacuum grease) a los arosellos, para que se adhieran a la unión entre las dos partes, aplicando una capa muy fina solamente en la superficie del arosello.

3.4 Desempeño, estabilidad y repetibilidad de la imagen

La unidad debe ser tal que mantenga al detector enfriado a temperatura criogénica constante.

La botella no propiciará la condensación en la superficie de la ventana.

La presión de vacío dentro de la botella no será mayor a: 5×10^{-6} Torr y el tiempo en que deben mantener esta condición es de: 6 meses

La máxima velocidad de enfriamiento del detector será de: 5° / minuto.

La botella podrá ser operada de manera invertida y dentro de un rango $\pm 60^\circ$ con respecto al cenit.

La posición y orientación del detector con respecto a su sistema coordenado debe mantenerse fijos una vez enfriado el detector.

La imagen sobre el detector no deberá moverse más de 13×10^{-6} m (13 micras) en cualquier dirección durante una exposición, tomando en cuenta que la botella se montara vertical o invertida y será rotada a un ángulo de hasta 60° en cualquier dirección.

El criostato será sometido a cambios de temperatura muy grandes, alrededor de 140° por lo que se recomienda permitir que el subsistema se estabilice térmicamente antes de ser usado. El tiempo aproximado será de 4 hrs.

3.5 *Requerimientos geométricos*

3.5.1 Dimensiones generales pesos y momentos máximos

La platina de la botella presentará barrenos en arreglo radial para su fijación al instrumento. En el Instituto de Astronomía se ha estandarizado tanto el diámetro de barrenación como el tamaño y características de los tornillos a emplear

El diámetro sobre el que se encuentren ubicados los barrenos será de: 165.1 mm \varnothing .
El número y diámetro de barrenos será de: 8 barrenos de 6.35 mm \varnothing .
Tornillos estándar de 1/4-20.

El peso del criostato será de acuerdo a lo que soportan los instrumentos en San Pedro Mártir sin afectar su buen funcionamiento y tendrá como límite 7.00 Kg. llenado con el nitrógeno líquido. El momento que producirá el subsistema al instrumento será a los más 0.3 Kg.-m.

3.6 *Requerimientos de confiabilidad*

3.6.1 Tiempo de vida del instrumento

La botella y sus componentes sin contar al detector deberán funcionar y permanecer en buenas condiciones por lo menos 15 años.

La presión de vacío dentro de la botella será de 10^{-6} Torr y el tiempo en que deben mantener esta condición es de 6 meses

3.6.2 Tiempo de vida del nitrógeno líquido

El tiempo mínimo de operación del criostato sin necesidad de ser recargado de nitrógeno líquido será de 10 horas siendo el óptimo 12 horas. Por las limitantes de dimensiones y peso de la botella que se desea se calcula que la capacidad del contenedor de nitrógeno líquido no debe de ser mayor a 3 litros.

3.7 *Requerimientos ambientales*

Los requerimientos ambientales (externos a la botella) serán:

- Mínimo intervalo de operación: -10°C a 16°C
- Mínimo intervalo de supervivencia: de -16°C a 34°C

La referencia térmica para el desempeño de la botella será de +3°C para todas las dimensiones y tolerancias. En la tabla 1 se muestran de manera esquemática algunos valores de referencia ambientales.

	Condiciones Nominales	Limite de operación	Limite de supervivencia
Variaciones térmicas en una hora	0.4°C	1.3°C	10°C
Humedad relativa	47%	5%-90%	4%-100%
Presión atmosférica	557 mmHg	548 a 567 mmHg	500 a 760 mmHg

Tabla 1. Condiciones de operación y límites de supervivencia del instrumento.

Resumen de especificaciones

- Tolerancias de posicionado del CCD con respecto a la ventana de la botella
 - Inclinaciones: 0.016° en X, Y, Z.
 - Posición: 13×10^{-6} m (0.013 mm) en X, Y, Z
- La temperatura de operación del detector dependerá del tipo de detector y del funcionamiento del calefactor, pero oscilará entre : -100° a -209° C
- Tiempo mínimo de operación sin necesidad de ser recargado 10 h, ideal 12 horas.
- La presión de vacío dentro de la botella será de 2×10^{-6} Torr y el tiempo en que deben mantener esta condición es de 6 meses
- La distancia mínima entre la ventana y el detector es de 0.005 m (5 mm)
- La capacidad mínima del contenedor de nitrógeno líquido es de 2 litros.
- La botella podrá ser operada de manera invertida y dentro de un rango de $\pm 60^\circ$
- Máxima velocidad de enfriamiento: 5° / minuto.
- Calefactor que no disipe más de 5 Watt. Meta 1 Watt

4 Diseño Logrado.

Se presenta un esquema del diseño logrado con sus partes en la figura 1. En la figura 2 se muestra tres vistas del Criostato con sus dimensiones.

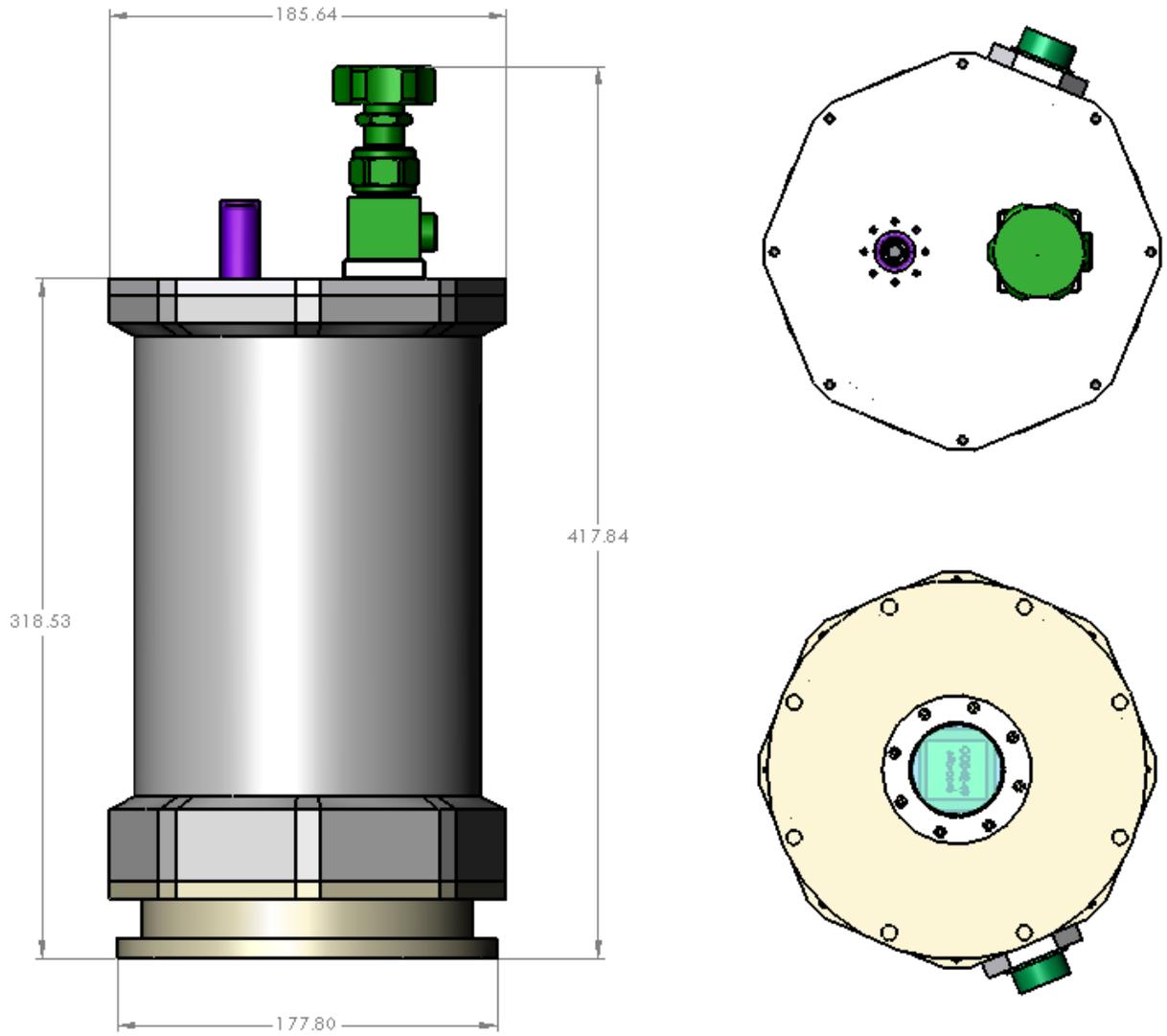


Fig. 2. Vistas de la Botella Criogénica con sus dimensiones en mm.



Fig. 3. Fotografía de la botella Criogénica ya construida.

Se decide estandarizar el tipo y tamaño de los acoplamientos para su conexión con la bomba de vacío y con la manguera de llenado de nitrógeno líquido a los de brida ISO del tipo KF, 1/4NPT.

4.1 Materiales empleados.

A continuación se presenta una lista de materiales que se seleccionaron para la fabricación de piezas del criostato. En la tabla 2 se muestra la razón de gasificado y permeabilidad de los materiales empleados que presentan estos fenómenos y que se tomaron en cuenta para lograr el vacío especificado, así como su conductividad y emisividad para lograr aislar o conducir el calor donde se requiere.

	Coef.exp T. /C°	Cond. Térmica (W/m*K)	Calor esp. (J/Kg*K)	emisividad (sin unidad)	Gasificación 1×10^{-3} bar-l /sec-cm ²	Perm. std. cm ³ /cm sec
COOPER 101	17 x 10 ⁻⁶	390 (puede caer a 52)	385 a 420	0.5 (stably oxidize) 0.04 (muy pulido)		
INVAR36	1.3 x 10 ⁻⁶	10.15	515	0.33 (ligeramente oxidado)	2 x 10 ⁻⁸	
SS 304	17.3 x 10 ⁻⁶	14.9 a 16.3	477			
SS 316	16	16.3	500			
Teflón	14 x 10 ⁻⁵	0.22 a 0.35	1080			
Al 6061	23.5 x 10 ⁻⁶	180.14	963.8	0.22 (pulido)	9 x 10 ⁻⁹	
G10	40 x 10 ⁻⁶	0.29	795			
BK7	3.25 x 10 ⁻⁶	1.12	830 / C	0.90 a 0.95		
Viton					2 x 10 ⁻⁶	1.29 x 10 ⁻⁸

Tabla 2. Propiedades de los materiales empleados.

La grasa de contacto empleada entre la base del contenedor de nitrógeno líquido y las lanas, así como de las lanas al dedo frío y de este al detector es la "Heat sink compound" TechSpray 1977-DP o en su defecto la grasa de APIEZON (alto vacío). Siempre hay que aplicar una capa muy fina y asegurar que el contacto entre las superficies sea uniforme.

4.2 Cálculo para el contacto térmico entre el detector y el contenedor de nitrógeno líquido.

Si simplificamos el problema de transferencia de calor entre el contenedor de nitrógeno líquido y la base del CCD, tenemos:

$$q = [k \cdot (T_1 - T_2) / L] \cdot A$$

q = tasa de transferencia de calor (heat rate)

Esperamos una diferencia de temperatura de $50^\circ = T_1 - T_2$

k = 390 (cobre 101)

A = $(0.000381 \times 0.016875 \times 2) \text{ m}^2$

L = 0.106 m

El area resulta de multiplicar el largo por el espesor de la lana. Se realizaron los cálculos suponiendo que se colocan dos lanas de cobre (ver figura 4) por lo que el área de una lana se multiplica por dos.

El flujo de calor a través de dos lanas de cobre será de 2.372 joules/seg (Watts)

Si lo comparásemos con la transferencia que obtendríamos con una barra de 10 mm de diámetro 5 cm de largo y un separador de teflón de 0.2 mm de espesor tendremos

$$q = (T_1 - T_2) / R$$

donde $R = R_{\text{barra}} + R_{\text{separador}}$

$R = L/kA$ suma de las resistencias a la conducción tanto de la barra como del teflón)

q = 13.9 joules/seg (Watts)

Obtenemos que hay una diferencia de 11.52 watts que hay que controlar.

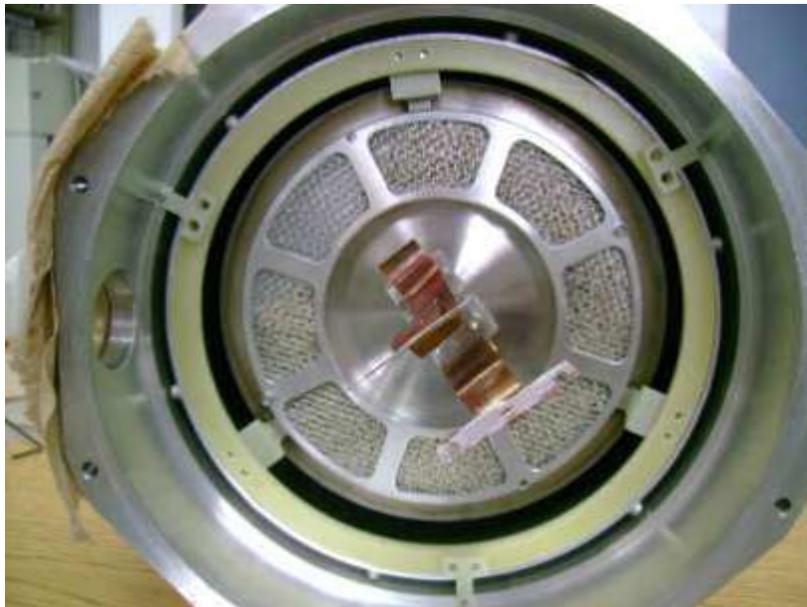


Fig. 4. Contenedor de zeolita sujeto al contenedor de nitrógeno líquido y las lanas de contacto que van al dedo frío.

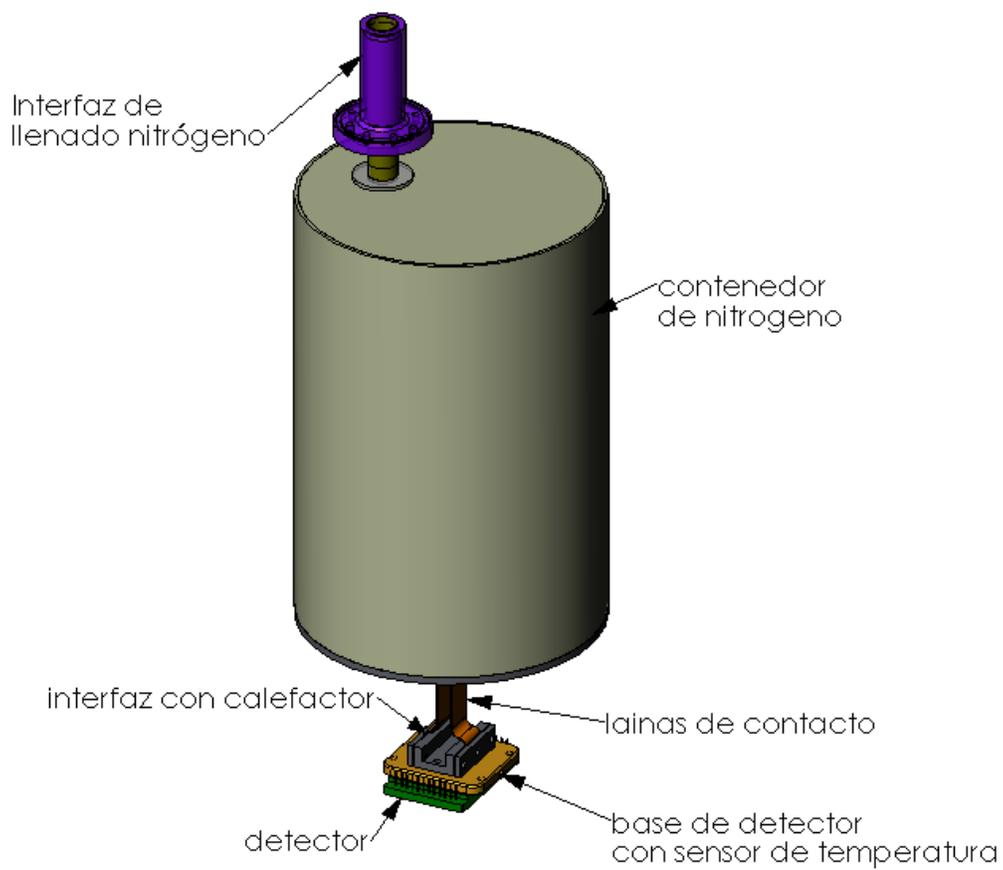


Fig. 5. Camino térmico entre el detector y el nitrógeno líquido.

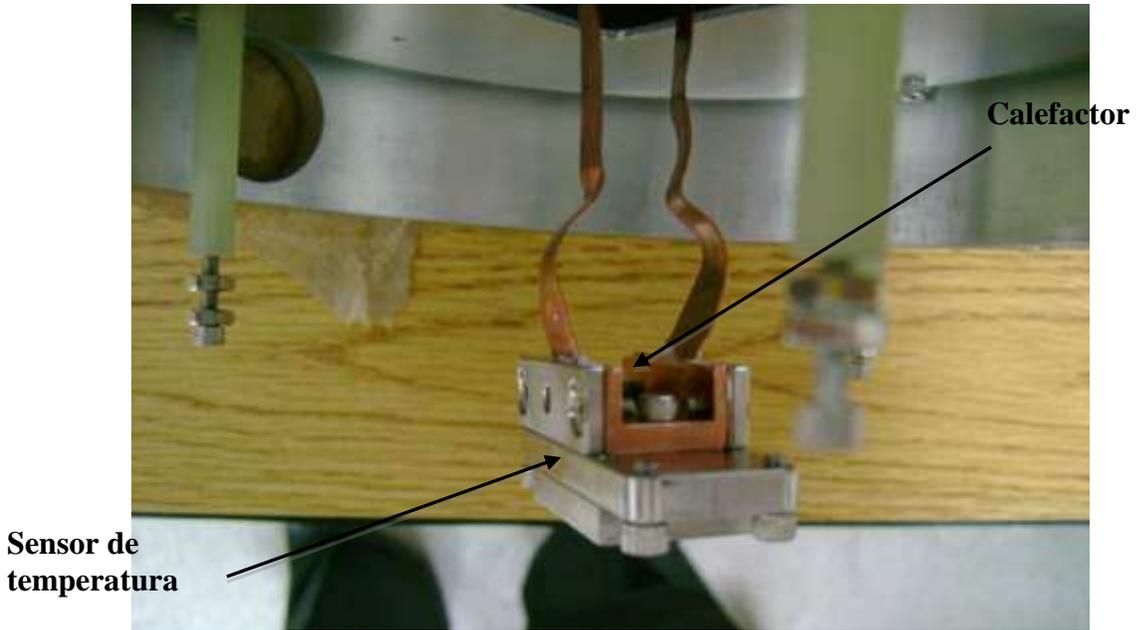


Fig. 6. Dedo frío listo para montar al detector.

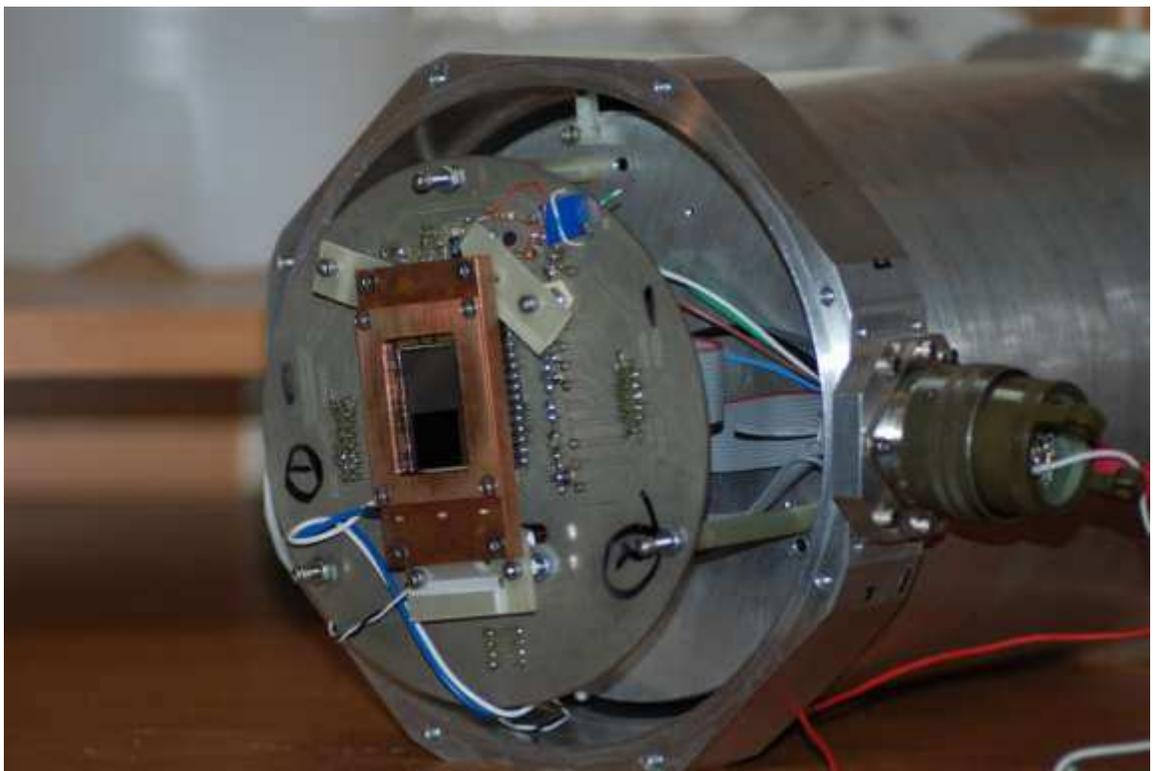


Fig. 7. Fotografía de la botella con el detector CCD201-20.

Protector de Radiación

En la botella prototipo se decidió usar como escudo un cilindro de aluminio rígido para evitar la radiación de calor pues este permitía el ensamble y desensamble del interior de la botella sin riesgo de contacto entre el contenedor de nitrógeno líquido y las paredes internas de la botella misma.

Sellos

Se emplearon arosello de elastómero ya que permite el desensamble rápido y fácil de los componentes.

Se diseñó la cavidad que los contiene de tal manera que las superficies en contacto fueran lo más planas y pulidas que se pueden alcanzar en el taller mecánico del instituto de Astronomía en Ensenada, además de que el arosello quedara confinado lo más posible sin que se evitara el 30% de deformación, y así a la sección expuesta al vacío fue mínima para evitar la pérdida de material por la presión. El material que se seleccionó para el arosello fue el Viton que es el que menor pérdida de peso presenta a un vacío de 1×10^{-6} Torr expuesto 336 horas, 0.07 %.

Propiedades de masa de la botella Dewar³

Sin nitrógeno líquido.

Masa = 6.42 kg.

Volumen = 1.786×10^{-3} m³

Área de la superficie = 1.133 m²

Centro de masa: (metros)

X = 0.132 (3.3528×10^{-3})

Y = 6.977 (0.177)

Z = -0.030 (0.838×10^{-3})

Orientación de los ejes de inercia y momentos tomados a partir del centro de masa. (libras * pulgada cuadrada)

I_x = (0.047, 0.999, 0.008) P_x = 95.875

I_y = (-0.897, 0.039, 0.440) P_y = 365.299

I_z = (0.439, -0.028, 0.898) P_z = 367.006

El contenedor de nitrógeno líquido tiene una capacidad 2.38 litros, esto representa una masa extra de 2.049 Kg. si tomamos la densidad de 861 Kg/m³. Las flexiones que presenta la botella con esta carga no afectan a la posición del detector por la manera en la que esta soportado el mismo y porque la carga no desplaza de manera significativa el centro de masa. Lo que si introduce una torca extra que es la ejercida por la manguera de llenado si se le deja acoplada durante el empleo de la botella en el telescopio.

4.3 Análisis por elementos finitos.

Por ser la base del detector uno de los elementos que será sometido a un fuerte gradiente térmico de posiblemente hasta 140 °C y el cual sostendrá al detector, es muy importante tomar en cuenta sus deflexiones y como estas provocaran esfuerzos en el detector que pueden llegar a causar el quiebre del mismo o la separación de las los contactos que este presenta con la tarjeta de control, amén de que por el desplazamiento de las partes se desenfoca la imagen sobre el detector por lo que hay que prever este comportamiento, evitar esfuerzos peligrosos y caracterizar los desplazamientos para ajustar la posición de la botella con respecto al elemento que provee la imagen.

El gradiente térmico considerado sale de tomar la temperatura ambiente extrema de 16°C a temperatura de operación del detector (ver requerimientos ambientales y de operación del detector).

Efectuamos diversos análisis dependiendo del detector que se montaría en la botella diseñada, así como del diseño de la base y de la tarjeta de control que se emplearía.

El primer trabajo de análisis se realizo para caracterizar el comportamiento de las laines ante las cargas térmicas del nitrógeno líquido y el calefactor; además observar las deflexiones producidas por este gradiente térmico y por el peso de los componentes que soportaría la estructura sujeta por tres extremos a la botella como se puede observar en la figura 4. Las primeras tres imágenes son los resultados de estas simulaciones (figuras 8, 9,10).

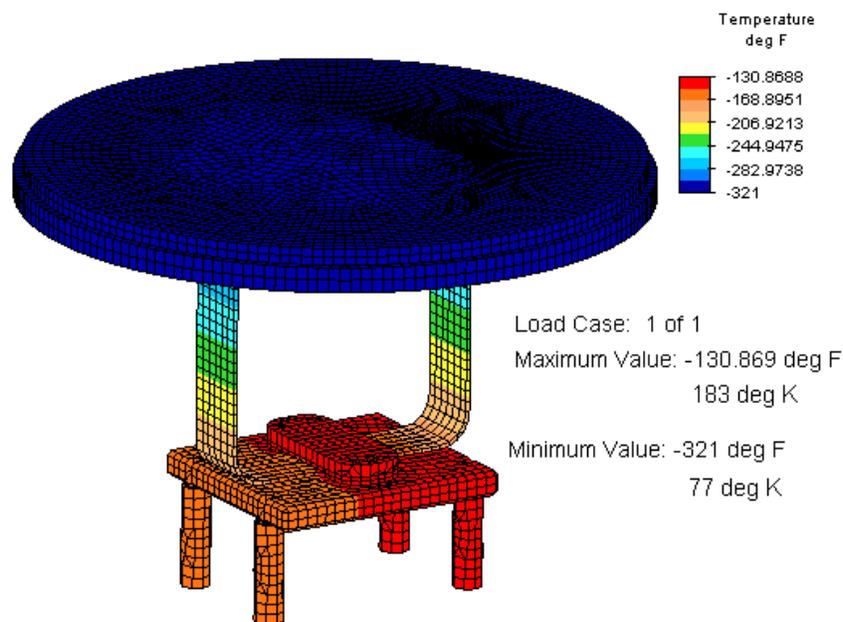


Figura 8. Distribución de temperaturas en la base del contenedor de nitrógeno líquido, laines, y base del detector debido a las cargas térmicas del nitrógeno líquido y calefactor.

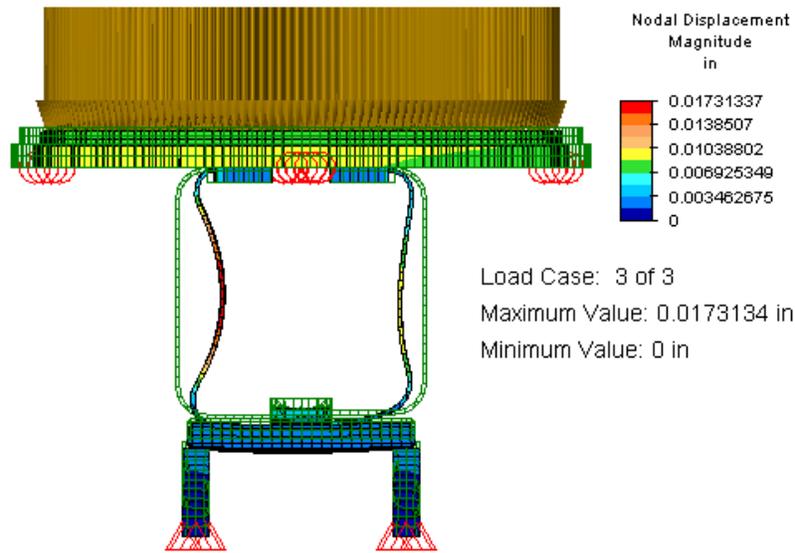


Figura 9. Desplazamientos en la base del contenedor de nitrógeno líquido, laines, y base del detector debido a los esfuerzos térmicos introducidos por las cargas térmicas y de peso.

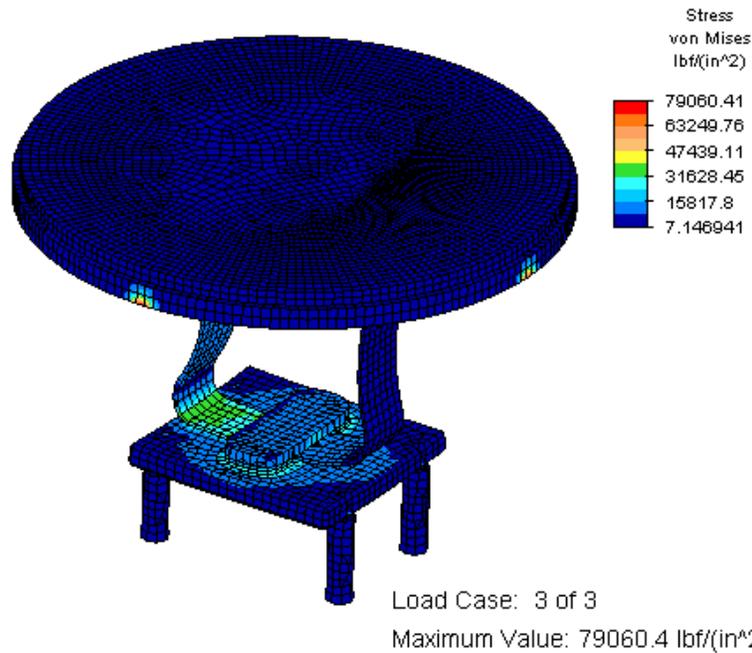


Figura 10. Esfuerzos debido a las cargas térmicas y de peso de los componentes.

En un segundo trabajo de simulaciones donde se modificó el dedo frío para el detector CCD201-20, se detalló más la interfaz del contenedor con la botella que sería a través de un anillo de material compuesto G10 y 4 soportes que irían del contenedor de nitrógeno líquido al anillo y los tres que irían del anillo a la botella como se puede observar de nuevo en la figura 4. Se introdujeron como cargas térmicas 10 watts que simulaban lo

producido por el calefactor y una temperatura constante de -200°C temperatura a la que hierve el nitrógeno líquido. Estos como valores extremos de funcionamiento.

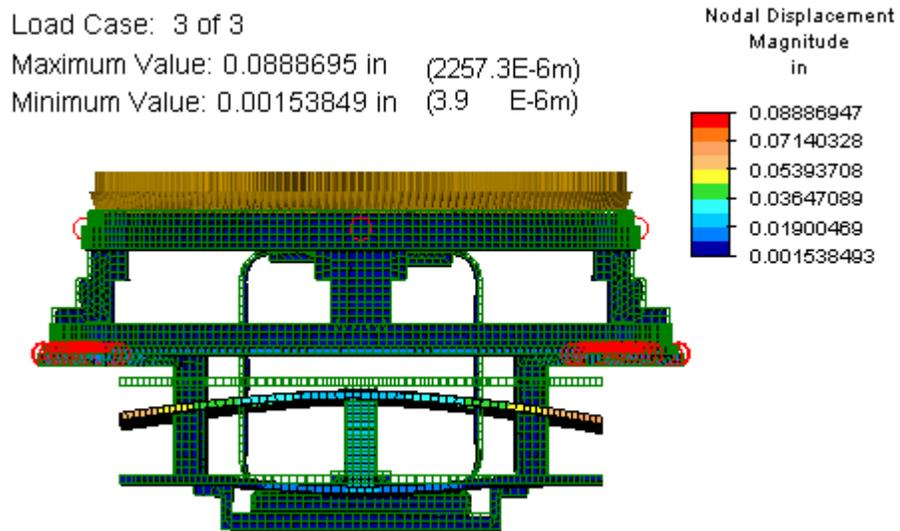


Fig. 11. Magnitud de los desplazamientos en las partes críticas del camino hacia el detector, con la carga térmica del nitrógeno líquido y la fuente de calor a 10 Watts; además del peso de los componentes del resto de la botella, simulados con fuerzas para provocar flexiones.

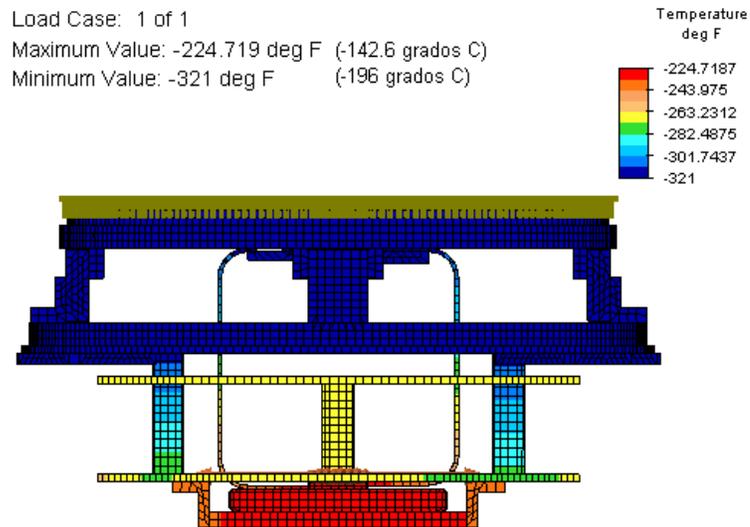


Fig. 12. Distribución de temperaturas del contenedor de nitrógeno líquido a la base del detector con la carga térmica del nitrógeno y una fuente de calor a 10 Watts

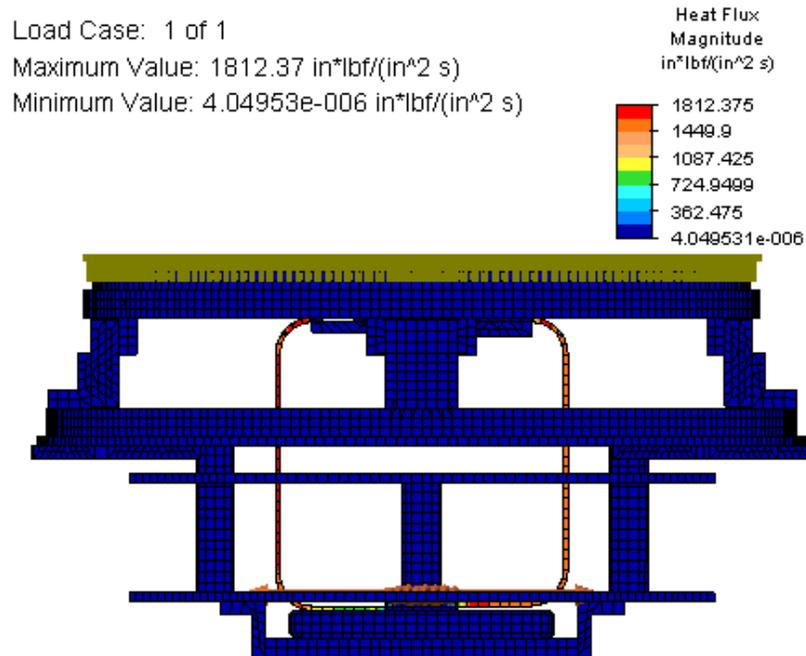


Fig. 13. Distribución de flujos de calor del contenedor de nitrógeno líquido a la base del detector con la carga térmica del nitrógeno y una fuente de calor a 10 Watts. Con esta imagen podemos comprobar que el flujo de calor se concentra en las lanas y en la base del detector que es el objetivo.

La conclusión que se obtuvo con este análisis es que había que contemplar la sujeción adecuada de la tarjeta de control que es la que mas flexiones presentó, además de reducir todavía mas el contacto térmico y/o incrementando la resistencia entre el anillo que serviría de interfaz entre el contenedor de nitrógeno líquido y la botella.

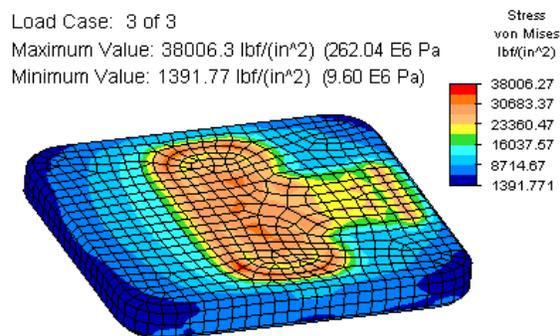


Fig. 14. Distribución de esfuerzos en base del detector

En lo observado con el comportamiento de la base donde se fijaría al detector, se encontró que la diferencia en desplazamiento dentro de la base con un área de 37 x 40mm fue de 84.97×10^{-6} m, esto es 84 micras valor no aceptable si se contempla fijar firmemente el detector a la base pues lo sometería a esfuerzos de torsión y flexión además de que desplazaría la posición del mismo.

Load Case: 1 of 1
Maximum Value: -226.001 deg F (-143.3 grados C)
Minimum Value: -241.269 deg F (-151.82 grados C)

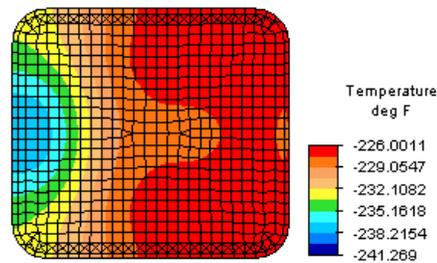


Fig. 15. Distribución de temperaturas en la base del detector.

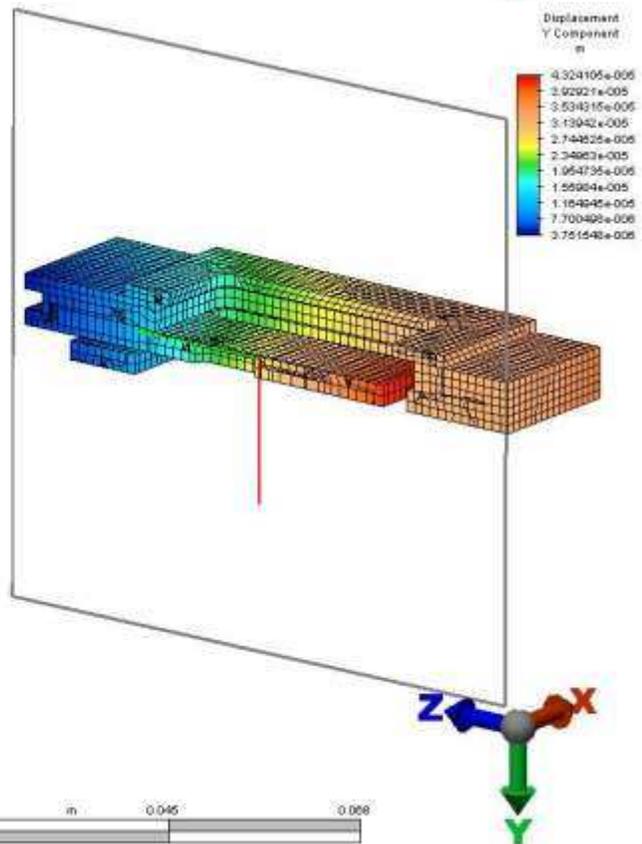
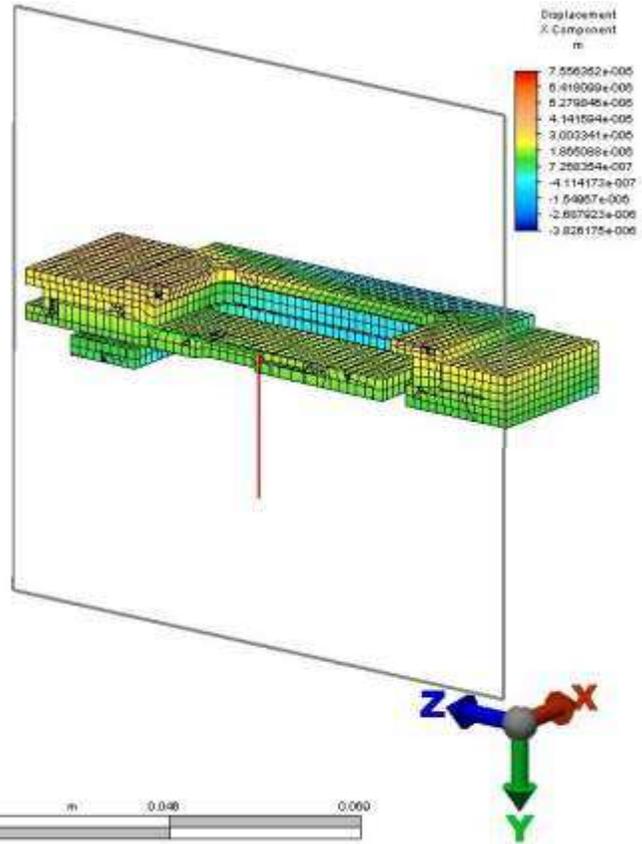
De los análisis efectuados concluimos que las lánas no debían ser atornilladas directamente a la base del detector sino a un componente intermedio que distribuyera más uniformemente la temperatura. También se comprobó que el gradiente producido por esas dos temperaturas extremas no debía ser alcanzado y esto marca la pauta para establecer los límites de operación en el control.

En las figuras 5 y 6 se puede observar que el calefactor se puso por debajo del detector pero con una masa lo necesariamente grande entre ambos para distribuir uniformemente la temperatura a la superficie en contacto con el detector y al mismo tiempo se contemplo el aislamiento térmico para evitar el calentamiento innecesario de componentes y así disminuir el consumo de nitrógeno líquido.

En un tercer modelo analizado para el mismo detector CCD201 se diseñó una cazuela de cobre (ver figura 7) que se fijo a la tarjeta de control con material de baja conductividad y se analizó su comportamiento encontrando los siguientes resultados que se pueden observar en las imágenes de la figura 16.

Los valores máximos de contracción de la cazuela fueron 7.5 micras en una dirección, 13 micras en la dirección que forma el plano paralelo al detector y 40 micras de desplazamiento en la dirección del eje óptico. Estos valores nos sirvieron para tomarlos en cuenta y diseñar el dedo frío con las tolerancias pertinentes para no afectar al detector.

Este diseño se probó con el detector CCD201 encontrando un buen comportamiento del sistema, desgraciadamente el detector era de calidad ingeniería y no sirvió para trabajo astronómico.



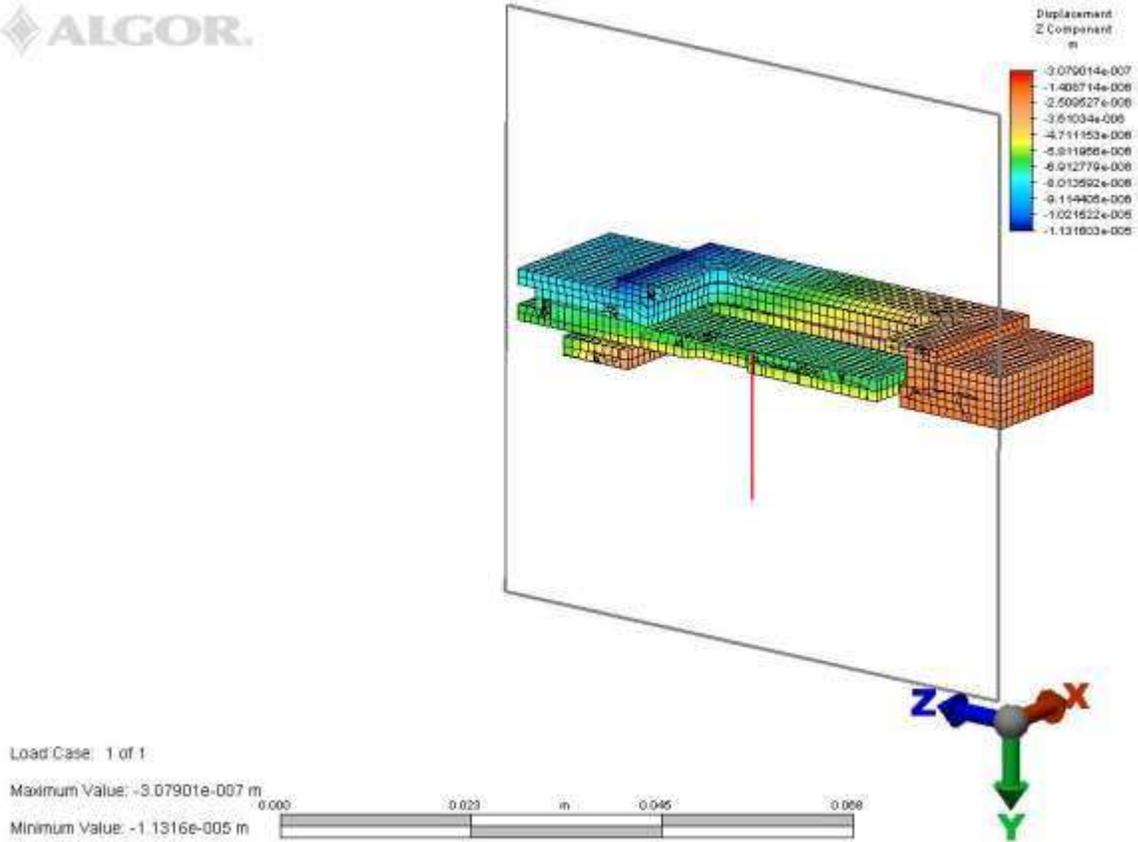


Fig. 16. Desplazamientos en la base del detector con la carga térmica del nitrógeno líquido y una fuente de calor a 3 Watts

4.4 Pruebas de Vacío

De las extensas pruebas de vacío realizadas se llegó a la conclusión de que para purgar un sistema que ha sido limpiado solamente con alcohol y agua destilada sin haber sido horneadas sus partes (excepto la zeolita), y sus superficies no alcanzaron el pulido tipo espejo, se requiere de al menos 2 horas por día durante 5 días de evacuación para poder purgar y llegar a la presión de alto vacío.

4.5 Filosofía del control de Temperatura y Pruebas efectuadas

En la botella diseñada con sus diferentes configuraciones debidas al detector empleado, se uso el mismo control de temperatura que a continuación se describe.

El control de temperatura se basa en un sensor de temperatura y un calefactor, integrados dentro de la botella; así como un dispositivo electrónico inteligente que controle una cierta temperatura dentro de la botella. Ver figura 17.

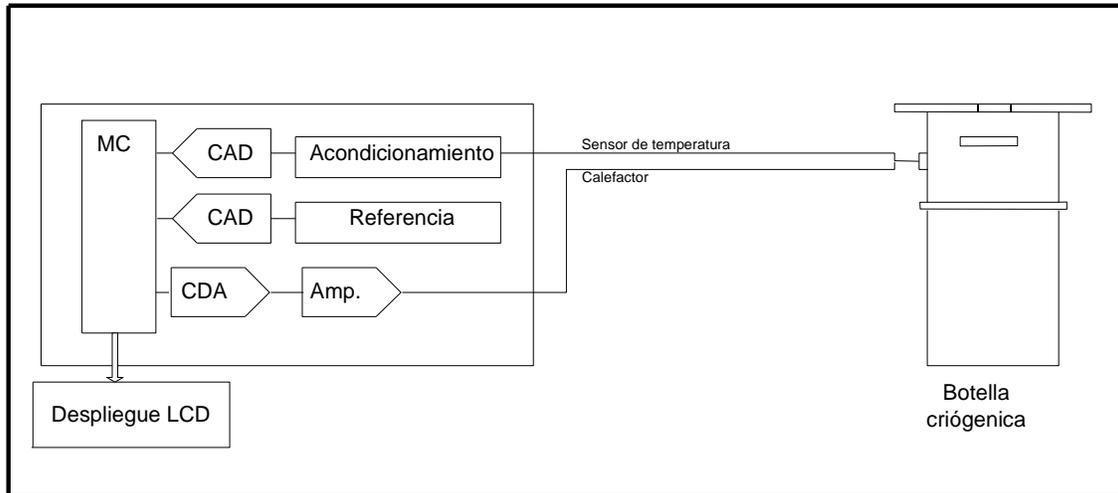


Figura 17. Esquema general del control de temperatura.

Un micro controlador tomará la temperatura del sensor y la comparará con el valor de referencia dado por un potenciómetro, en función de lo que resulte se realizará la calefacción. El valor de la temperatura, como el nivel de referencia será desplegado en el LCD.

Se propone una resistencia de 100Ω como calefactor, la cual disipa una potencia de 1.44 Watts máximo, con una alimentación de +12 Vcd.

Como sensor de temperatura se propone una resistencia de platino, ya que poseen un gran intervalo dinámico de operación. En específico la resistencia de platino de la serie HEL-700 de la compañía Honeywell, la cual presenta un intervalo de operación de $-200 \text{ }^\circ\text{C}$ a $600 \text{ }^\circ\text{C}$, caracterizado por la siguiente ecuación:

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2 - 100CT^3 + CT^4)$$

$$T = (R_T - R_0) / (R_0 * A)$$

$$R_0 = 100 \Omega$$

$$A = 3.81 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -6.021 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$$

$$C = -6.00 \times 10^{-12} \text{ }^\circ\text{C}^{-4}$$

Para el intervalo de nuestro interés, el término hasta tercer orden es suficiente, a lo sumo tendría un error $< 2\%$.

Calibración.

Debido a que la respuesta del sensor de temperatura no es lineal, se analizó la respuesta del mismo; esto con el fin de ajustarle una función de linealización en la parte de procesamiento dentro del microcontrolador. Con este análisis calculamos el rango dinámico de la señal (span), ganancia (K) y el desbalance (offset).

Acotando la función de respuesta del sensor, y aplicando el análisis hecho en términos de la digitalización, obtenemos:

$$T_{emp} = 14.35425 * [ND / 452.09 - 1.81] / [0.162 - (ND / 32237.15)]$$

Donde ND, es el número digital en el microcontrolador.

Una vez con el modelo matemático de la respuesta, se realizaron los ajustes finos utilizando resistencia de precisión y ajustando la etapa de acondicionamiento hasta obtener los valores esperados.

Algunos resultados.

En la figura 18, se muestra la gráfica de la función de la resistencia contra temperatura, la línea verde es utilizando solo el primer orden de la función, y la línea roja utilizando la función completa, la constante C tiene un valor de cero para temperaturas mayores que cero.

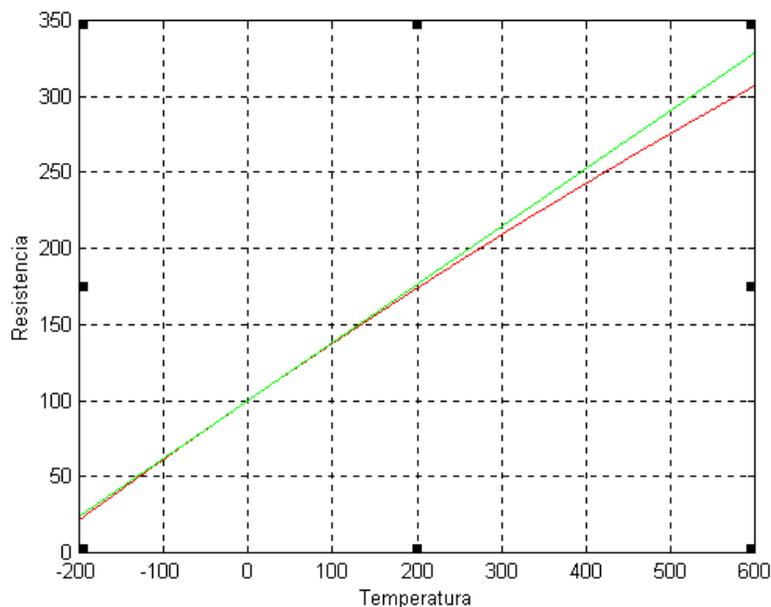


Figura 18. Respuesta del sensor de temperatura. Línea verde, utilizando solo el primer orden de la función. Línea roja, utilizando la función completa.

Es claro en la Figura 18, que la desviación entre las dos líneas es mínima en el intervalo de operación del CCD (-120 °C a 25 °C), por lo que para análisis de datos, se utilizará la función que utiliza solo el primer orden.

Para encontrar el comportamiento de la botella a los distintos parámetros físicos, se efectuaron varias pruebas tanto de vacío como de enfriamiento. Para ello se ensamblaron todas las componentes de la botella excepto el detector. Se colocó el sensor y el calefactor propuestos en la base del detector llamado también dedo frío (ver figura 6) y se encontraron los siguientes resultados:

Velocidad de enfriamiento. Se midió el gradiente de temperatura que alcanzaba la base del detector contra el tiempo y se encontró que alcanzó un máximo de 4.1° / minuto siendo el promedio 2.2 ° / minuto.

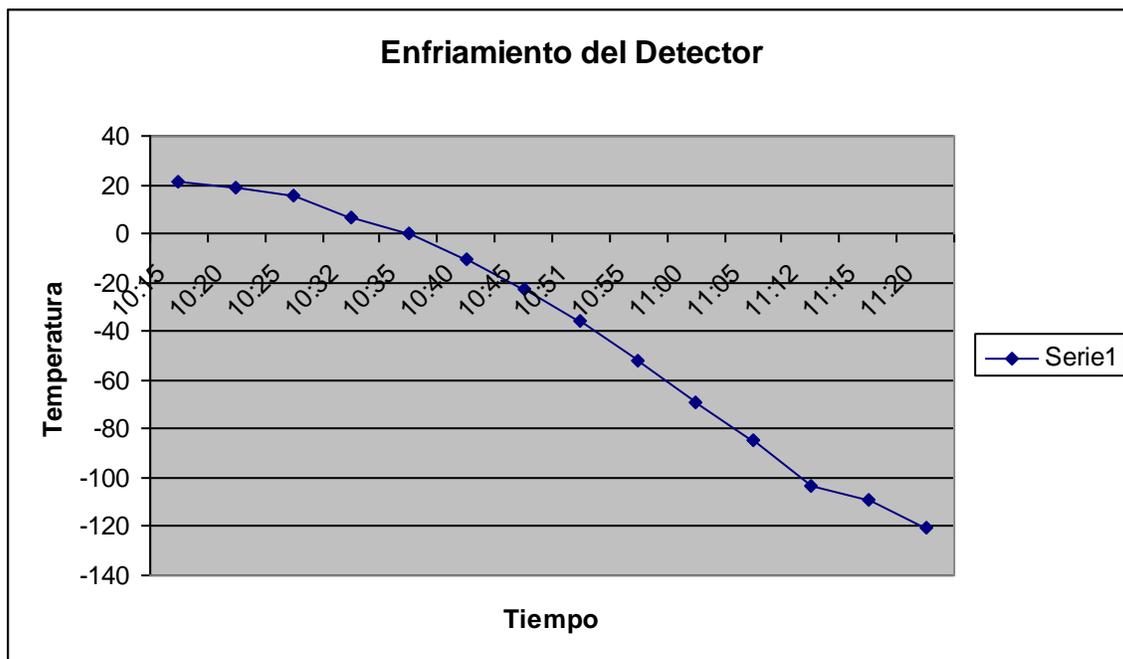


Figura 19. Gráfica de temperatura contra tiempo de enfriamiento de la base para el detector.

Como parte del trabajo, también se realizaron una serie de pruebas para ver la estabilidad térmica del sistema una vez que alcanzo la temperatura de -120° C

Se monitoreo la temperatura de la botella criogénica cada 3 minutos, cerciorándose de que no le hiciera falta nitrógeno líquido. Los resultados se muestran en la grafica de la Figura X. Analizando los datos, presentaron una desviación estándar de **0.3963° C**, con una incertidumbre de **0.6295° C**.

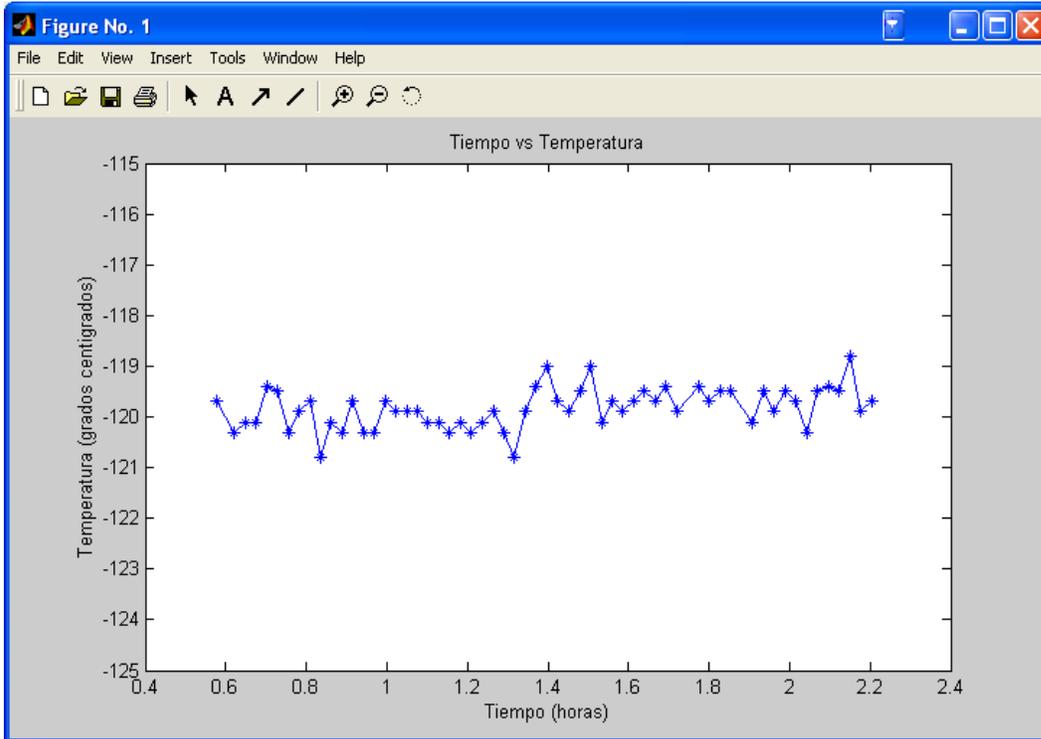


Figura X. Respuesta térmica del controlador en la botella criogénica.

El tiempo que duró la base del detector a esa temperatura fue de 28 hrs con el calefactor encendido.

Al incluirse el detector con su tarjeta de control se emplearon como 3.3 watts para calentar al detector y se puede decir que esto fue debido a la perdida por conducción y radiación de los componentes electrónicos en la tarjeta de control y las piezas extras para asegurar al detector al dedo frío. El tiempo promedio de duración del nitrógeno líquido en la botella fue de 10 horas.

5 COSTOS Y TIEMPO DE MANUFACTURA

A la fecha de elaboración del reporte los costos de una botella se muestran en la tabla 3

Costos por Botella

<u>MATERIALES</u>	dimensiones en pulgadas	Precio dls.
Al 6061 (barra 7 ")	10	128.00
Al 6061 (tubo 7")	6.5 diam. ext. x 5.5 diam. int. x 12	290.00
Al 6061 (placa rectangular)	3/8 x 3/4 x 24	16.00
Al 6061 (lámina)	1/16 x 4 x 12	51.00
Tubo SS'(3/8 x 0.035)	3.39 (10)	50.00
SS 304 (barra)	½ diam. x 12	60.00
SS 304(barra rectangular)	1/8 x 1/2 x 24	17.00
SS 304(placa)	12 x 12 x 3/32	61.00
SS 304(placa)	12 x 12 x 1/4	61.00
Teflón	6 x 6 x 1/2	58.50
Invar. (placa)	2 x 2 x 3/16	40.00
G-10 (placa)	12 x 12 x 1	23.50
G-10 (placa)	13 x 13 x 1/4	23.50
<u>COMPONENTES</u>		
Tornillería miniatura (SS 304)	8.40 (per package)	42.00
Conector 41 pines	Detronics	91.00
Anillo SS306/Viton ISO-K	1 pieza 44.65	44.65
O-Rings	(5.80 por paquete)	23.20
Adaptadores tubería ISO-KF	1 pieza 225	225.00
Ventana BK7	2.5 diam.	120.00
Zeolita	36.00 (1 lb.)	36.00
Válvulas Nupro	186	186.00
Sensores de temperatura	24.56	50.00
	TOTAL en dólares	1697.35

Tabla. 3. Costos de los elementos genéricos en una botella para detector astronómico

El tiempo que se requiere para maquinar, ensamblar la botella y probar el vacío de la misma es de 2.5 meses y puede variar dependiendo de las necesidades especiales para el ensamblado de cada detector y su electrónica.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Se logró una botella que cumple con los requerimientos inicialmente establecidos. Esto es, el vacío que alcanza la botella una vez purgada es de 2×10^{-6} Torr. La duración del alto vacío en la botella es de no menos de 6 meses (tiempo máximo que se ha dejado sin ser abierta para efectuar otras pruebas).

El tiempo que el detector permanece a una temperatura de -120°C es de no menos de 10 horas y este puede ser mayor dependiendo del detector empleado.

Se logró que el sistema de enfriamiento del detector quedara aislado pues en la ventana de la botella no se condensa la humedad esto se logró con separadores de baja conductividad térmica.

Se ha usado la botella para probar diferentes detectores con su control en los telescopios de Cananea y San Pedro Mártir como cámara directa o con el espectrógrafo Boller & Chivens y se le ha llenado de nitrógeno líquido en sus dos posiciones extremas cumpliendo con las expectativas.

En la figura 20 muestra a la botella siendo empleada con el detector CCD97 y el control desarrollado por el Dr. Benito Orozco (fue el tema de su tesis).

Las recomendaciones que pueden mejorar su funcionamiento son las siguientes:

El carbón activado solo baja la presión dentro de la botella (esto es aumenta el vacío) pero no absorbe el agua a temperatura ambiente. Lo que hay que tener cuidado es de agregar además del carbón activado una cantidad suficiente de zeolita, pues cuando una botella se pone a temperatura ambiente solo con carbón e inmediatamente se abre la válvula de vacío, la presión parcial del agua es agregada al la del aire y ocurre condensación en las partes que permanecen frías como es el detector.

Además es conveniente agregar un calefactor al contenedor de la zeolita para deshidratarla cuando se comience a evacuar la botella y así eliminar la humedad retenida con mayor facilidad. Esto reduciría considerablemente el tiempo de purgado.

También es necesario resolver el problema del pulido de las superficies a un acabado espejo pues al menos en los metales la emisividad se eliminaría un factor de diez y la conductividad deseada entre componentes se incrementaría.

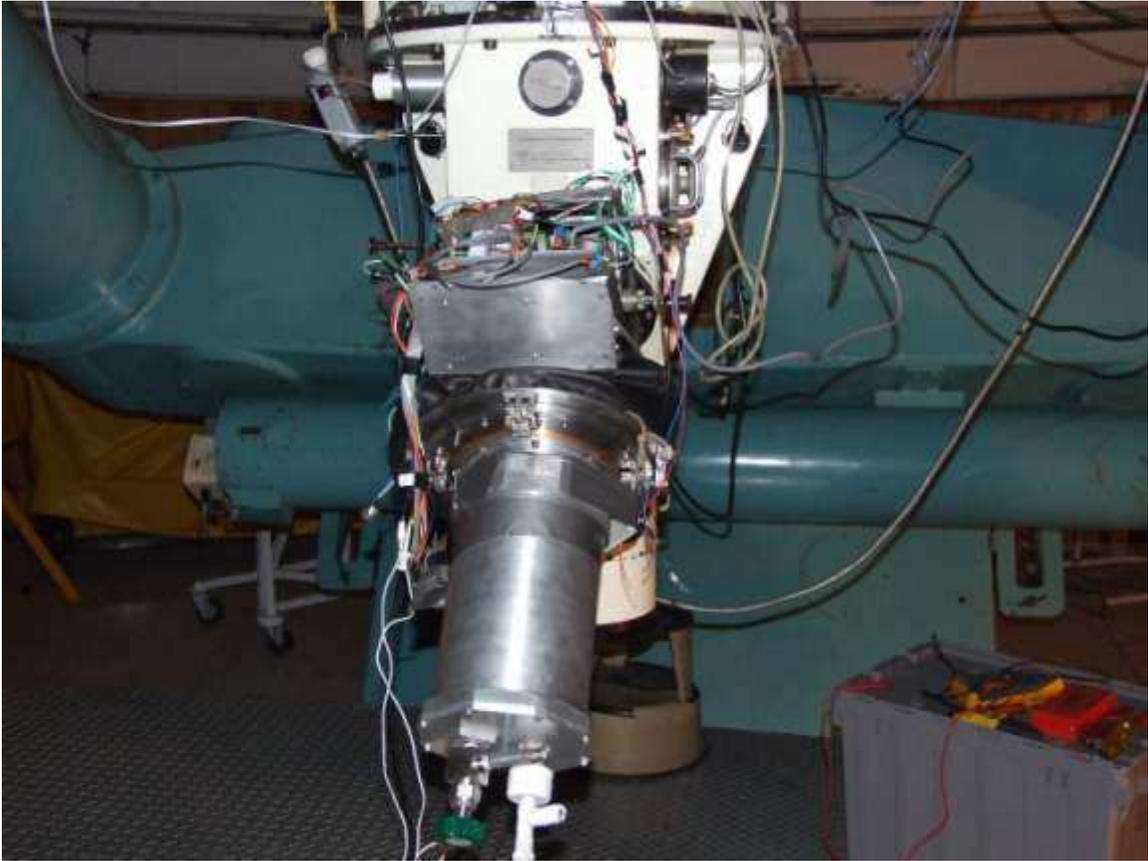


Fig. 20. Fotografía de la botella con el detector CCD97 montada al espectrógrafo B&CH en el telescopio 2.1m del OAN/San Pedro Mártir, B.C.

6.1 Agradecimientos.

Se agradece a Eduardo López y a Jorge Valdez su valiosa información y experiencia con las botellas comerciales existentes en San Pedro Mártir.

7 BIBLIOGRAFIA

Introduction to Heat Transfer
Frank P. Incropera, David P. De Witt
John Wiley & Sons
2002

Fundamentals of Vacuum Technology
Leybold Vacuum Products and Reference Book
2001/2002
D00.07

Ultraclean CCD project

ESO

Sebastian Deiries

www.eso.org

2004

Practical Considerations for LN2cooled, O-Ring-Sealed, Vacuum Insulated Dewars for Optical and IR Detectors

Bruce Atwood and Thomas P. OBrien

www.astronomy.ohio-state.edu/~isl/papers/Aadsorb.htm

Para las propiedades de materiales, pegamentos y grasas, así como de los componentes comerciales:

Masterbond (pegamento)

www.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp

Acetal (PolyOxy-Methylene) Specifications

www.boedeker.com/ilamg_p.htm

Glass base phenolics (G10)

www.sdplastics.com

Apiezon

www.2spi.com/catalog/msda

Zeolita

www.safetysorbzeolita.com

Torlon

www.drakeplastics.com

Conector sellado hermético

<http://www.detoronics.com/pd.aspx/DT%20%28MIL-DTL26482%20Series%20I%20Type%29>

Para acoplamientos y grasas

<http://www.vacuum-pumps.us/Varian.html>

Cámaras Astronómicas de Visión Nocturna basadas en CCDs Multiplicadores de Electrones

Benito Orozco Serna

Tesis sometida como registro para obtener el grado de Doctor en Ciencias en la especialidad de Astrofísica

Instituto nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

Noviembre 2010

8 TRADEMARKS

Viton[®] is a registered trademark of Dupont Dow Elastomers.

Invar[®] is a registered trademark of Carpenter Technology Corporation

Teflon[®] is a registered trademark of Dupont



**Comité Editorial de Publicaciones Técnicas
Instituto de Astronomía
UNAM**

**M.C. Urania Ceseña
Dr. Carlos Chavarria
M.C. Francisco Murillo**

**Observatorio Astronómico Nacional
Km. 103 Carretera Tijuana-Ensenada
22860 Ensenada B.C.
editorial@astrosen.unam.mx**