

CRIOSTATO DEL RECEPTOR DE 22 GHz DEL CAY.

Informe Técnico del CAY 2005-12

Inmaculada Malo, José Antonio López Fernández, Félix Tercero
José Antonio Abad, Carlos Almendros, Joaquín Fernández, José María Yagüe

1. Introducción.

En el presente informe se resumen el diseño y las características más importantes del criostato del receptor de 22 GHz del CAY. En su diseño se emplean los mismos criterios que en los anteriores criostatos ya realizados en el CAY (Ref 1). Dispone de dos etapas, una fría a 12 kelvin y otra intermedia a 70 kelvin, para las cuales emplea una cabeza refrigeradora CTI-350. También emplea dos trampas criogénicas a base de zeolitas, las cuales mejoran de forma importante el funcionamiento del criostato. La presión alcanzada con el criostato frío es de unos 5×10^{-5} mbar. El tiempo de enfriado es de aproximadamente 6 horas, mientras que el tiempo de calentamiento es de aproximadamente 12 horas.



2. Geometría del criostato.

En la figura 1 se muestra el esquema del criostato de 22 GHz y se enumeran las partes más importantes.

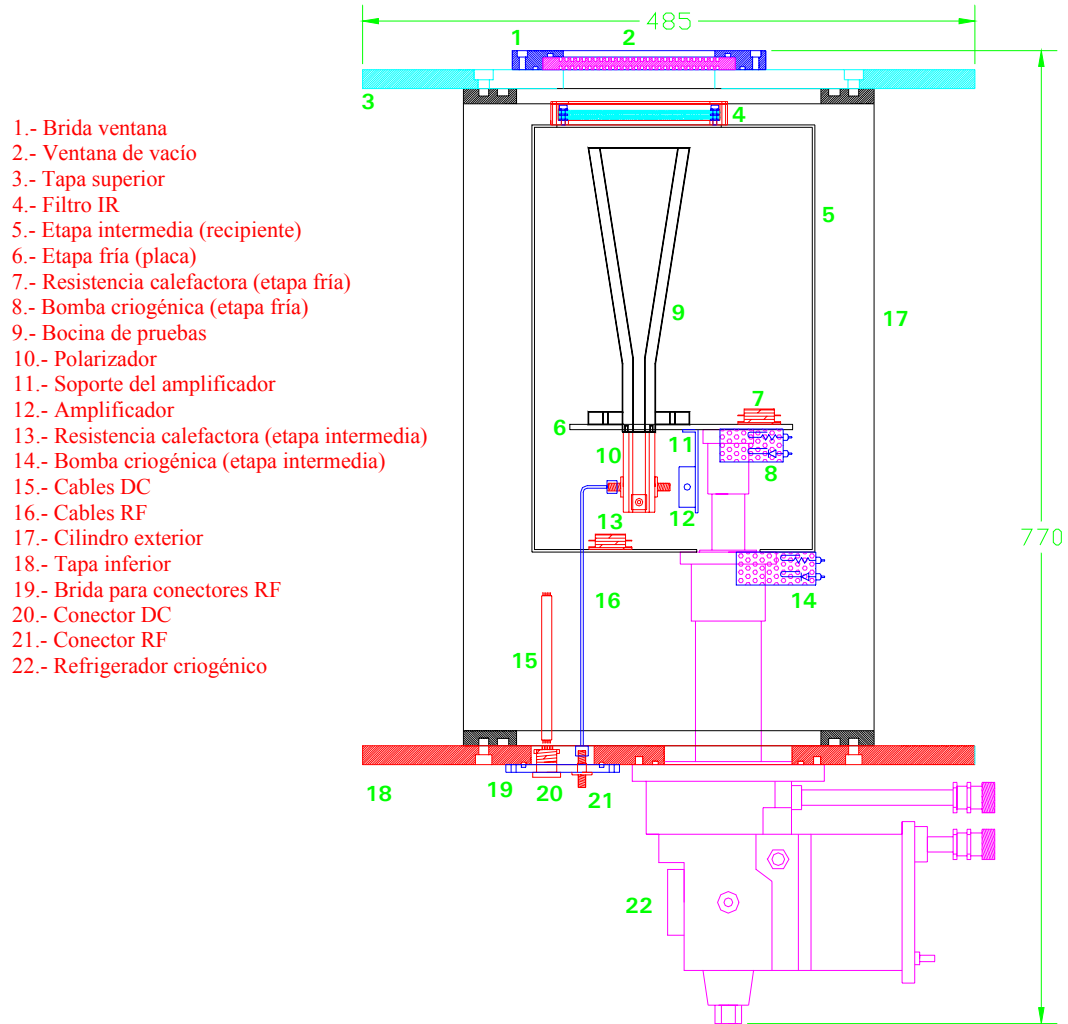


Figura 1: Esquema del criostato de 22 GHz

En la figura también aparecen los componentes fundamentales del receptor de 22GHz.

2.1. Etapa exterior (vacuum case)

Se diferencian tres partes: el cilindro exterior, la tapa superior y la tapa inferior. El cilindro exterior, ha sido hecho en acero inoxidable AISI-316. Consta de tres piezas, dos bridas y el cilindro, ensambladas mediante soldadura estanca bajo atmósfera inerte de gas argón por procedimiento automático TIG. Las soldaduras han sido limpiadas, decapadas y pasivadas. Después de pruebas de vacío no se han detectado fugas.

Las dos bridas están hechas en acero inoxidable AISI-316 de 325 x 241 x 12 mm de espesor, con 8 taladros ciegos roscados M8. En ella se ha torneado un canal para junta tórica. El acabado es pulido espejo BA en toda la brida, incluyendo el canal. El cilindro está hecho en el mismo tipo de acero y el mismo acabado, a partir de una chapa de 2 mm de grosor. Sus dimensiones son 496mm de largo y 325mm de diámetro.

Las tapas de aluminio se han fabricado en nuestros talleres a partir de una pletina de Duraluminio de 15 mm de grosor. Tienen forma octogonal circunscrita en una circunferencia de diámetro 485 mm. Tiene un taladro de 120 mm de diámetro para la entrada del haz del receptor. Este taladro se encuentra desplazado del centro del octógono. Para la fijación de la ventana de vacío se dispone alrededor de este taladro de 8 taladros ciegos roscados. Para la fijación de esta tapa al cilindro se dispone de 8 taladros pasantes.

La tapa inferior dispone, además de los mismos taladros para fijación al cilindro, de salidas para varios usos. Por un lado está la conexión al refrigerador criogénico, en la cual se ha torneado un canal para junta de vitón. Y rodeando a ésta, 8 taladros ciegos M5. También se encuentran dos salidas para vacío, una para bombeo y otra para medida de la presión. Además se dispone de otra salida para los conectores RF. Esta consiste en un taladro de 50 mm de diámetro donde se adaptará una brida (blanking) con cuatro conectores K. Finalmente hay tres taladros de 16 mm de diámetro para los conectores herméticos DC multipolo de Fischer.

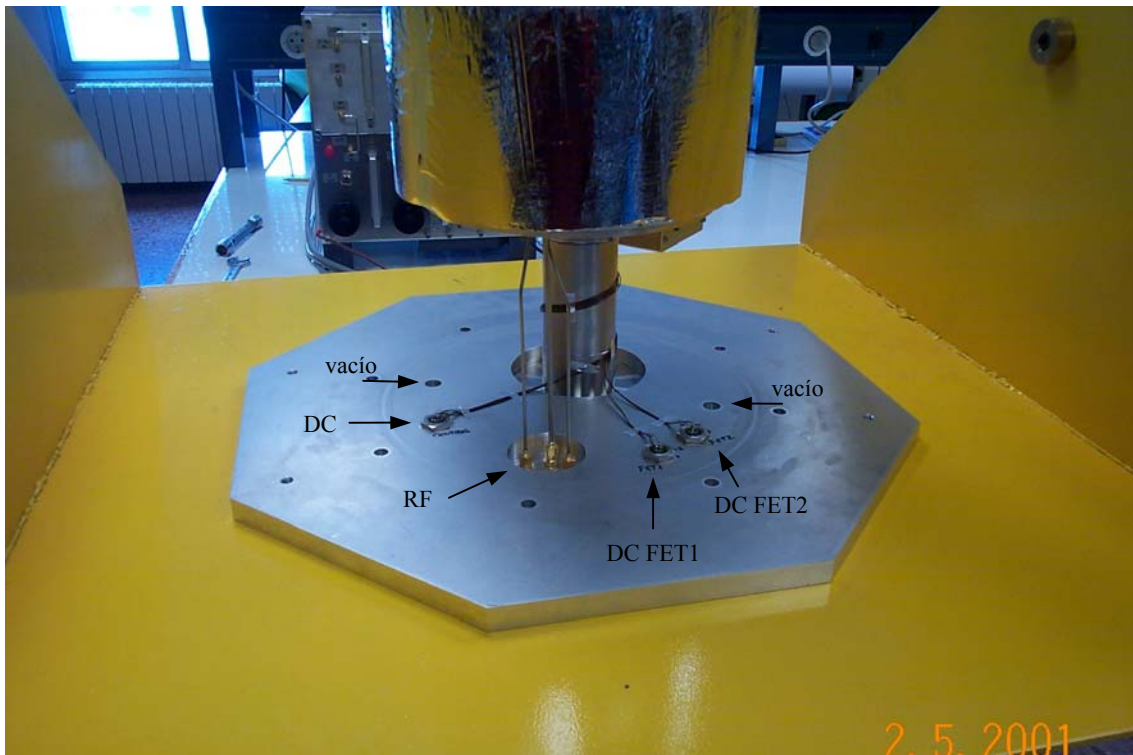


Foto 1: Vista de la tapa inferior. Se observan los conectores DC, el blanking con conectores SMA, los taladros de vacío, el taladro del refrigerador criogénico y los taladros de fijación al cilindro exterior.

2.2. Etapa intermedia (radiation shield).

Se diferencian 7 partes: el cilindro, el superaislamiento, el filtro de infrarrojos, la placa intermedia, la bomba criogénica intermedia, la resistencia calefactora y el sensor de temperatura.

El cilindro intermedio, foto 2, se compone de dos recipientes de aluminio de 1.5mm de grosor de las paredes laterales y 2.5 mm en los fondos. Una de ellos entra en el otro y ambos quedan fijados entre sí por tres tornillos M3. Esto facilita enormemente el montaje y desmontaje del receptor. La longitud total del conjunto es de 341 mm y el diámetro externo es de 224 mm. Por un lado el cilindro se sujetará a la etapa intermedia mediante 12 tornillos M3 y por el otro dispondrá de un taladro de 110 mm de diámetro para la entrada de la señal RF.

El filtro de infrarrojos está constituido por dos discos de wallmate de 2mm de espesor en un recipiente de PVC. El diámetro del filtro es 120 mm.

La placa intermedia es la conexión entre la etapa intermedia del refrigerador criogénico y el cilindro intermedio. Sobre ella se situarán la bomba criogénica intermedia, el sensor de temperatura y la resistencia calefactora de esta etapa. También servirá como punto de enfriamiento intermedio de los cables coaxiales RF del receptor. Para ello se emplea un cable de malla que se suelda al cable coaxial y a una pieza de cobre que se atornilla a la placa intermedia.

La bomba criogénica es un recipiente de 30 x 15 x 55 mm relleno de zeolitas. La masa aproximada de éstas es de 9.5 gramos, lo que equivale a unas 2100 bolas de zeolitas de 2 milímetros de diámetro. La superficie total de estas zeolitas es aproximadamente 268 cm². La bomba criogénica incluye una resistencia de regeneración de 100 Ω y 1W. El sensor de temperatura es un diodo D470-B1 de Lakeshore. La resistencia calefactora es de 20W y 100 Ω . Tanto el circuito de regeneración como el de calentamiento incluyen termostatos protectores de 40 ° \pm 3° C.

El cableado DC se realiza con cable criogénico de CuBe de Lakeshore Cryogenics, con aproximadamente 400mm de longitud total (unos 200mm por etapa).



Foto 2: Vista del cilindro intermedio en el criostato. Se observan los dos componentes que lo forman. En la foto, el superaislamiento rodea ambos.

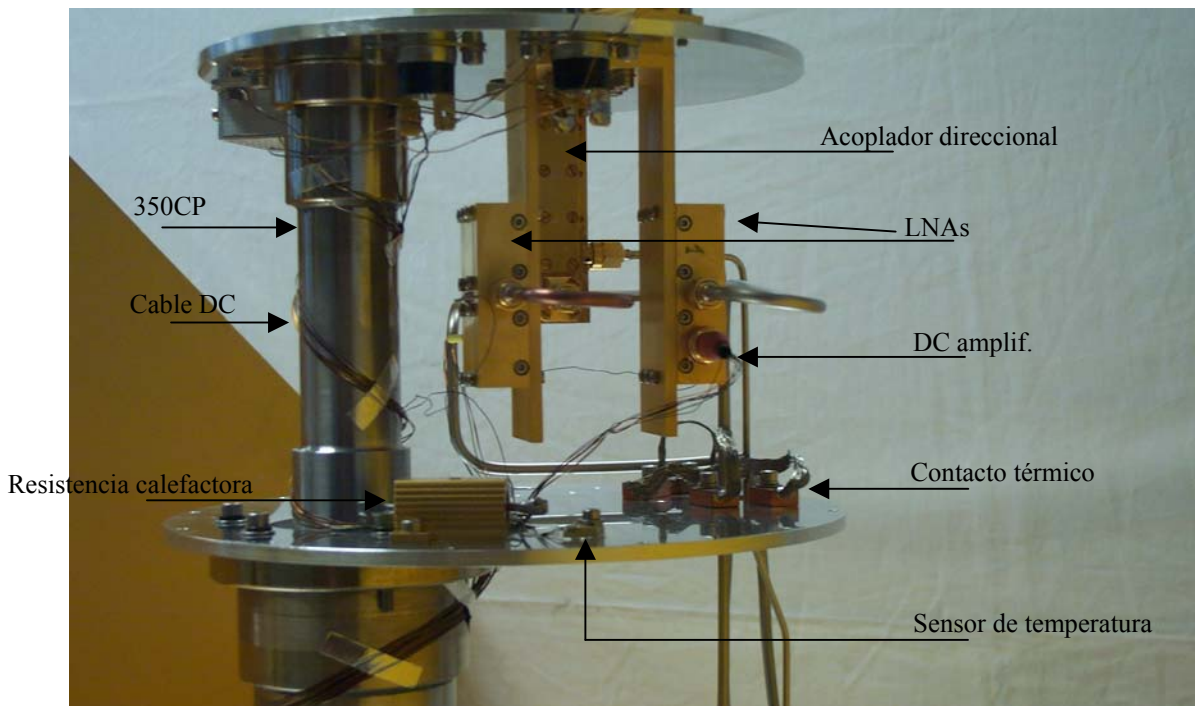


Foto 3: Interior del criostato. Se observan en primer término la bomba criogénica 350CP, los cables coaxiales y sus conexiones térmicas a la placa intermedia, el cable de polarización DC de los amplificadores y la resistencia calefactora.

2.3. Etapa fría (cold plate)

La etapa fría está constituida por la placa fría, la bomba criogénica fría, la resistencia calefactora, el sensor de temperatura y los soportes de los amplificadores.

La placa fría va conectada a la etapa fría de la cabeza refrigeradora mediante cuatro tornillos. La conexión térmica se mejora empleando indio. Lo mismo se realiza en los soportes de cobre de los amplificadores.

La bomba criogénica es un recipiente de 30 x 15 x 34 mm relleno de zeolitas. La masa aproximada de éstas es de 6.5 gramos, lo que equivale a unas 1500 bolas de zeolitas de 2 milímetros de diámetro. La superficie total de estas zeolitas es aproximadamente 188 cm². La bomba criogénica incluye una resistencia de regeneración de 100 Ω y 1 Watios.

El sensor de temperatura es un diodo D470-B1 de Lakeshore. La resistencia calefactora es de 20 W y 100 Ω . Tanto el circuito de regeneración como el de calentamiento incluyen termostatos protectores de 40 ° \pm 3° C.

2.4. Ventanas exterior (vacuum windows)

Las ventanas exteriores del criostato son: la ventana de vacío RF, la brida para conectores RF o RF blanking, la brida de pruebas y las bridas de vacío y los conectores DC.

La ventana exterior está compuesta de la brida y la ventana de teflón. La brida tiene dos juntas de vacío (136.12 x 3.53 mm y 160 x 3 mm). La ventana es corrugada por ambos lados y está hecha en teflón, su grosor total es 9.3 mm.

El RF blanking es una brida para que permite la salida de cuatro conectores RF simultáneamente. Dispone de una junta de vacío de 58.42 x 2.62 mm.

También se ha realizado una brida para pruebas de vacío, para sustituir la ventana de vacío. Además de la junta de vacío exterior de la ventana de vacío (160 x 3 mm) necesita otra de dimensiones 28 x 4 mm.

También se emplean dos bridas de vacío fabricadas en nuestro taller. Se adaptan a las bridas estándar KF16 y necesita una junta de vacío 28 x 4 mm.

Los conectores DC son herméticos de Fischer. El modelo es DEE104Z056.

2.5. Cableado interior

Los cables empleados en el interior del criostato son:

Tipo	Diam. Ext.	Diam. Int.	Material	Longitud 300-75K	Longitud 75-15K
Coax. RF LCP out	3.6	0.9	Acero exterior Cobre interior	100	100
Coax. RF RCP out	3.6	0.9	Acero exterior Cobre interior	100	100
Coax. Noise LCP	2.2	0.5	Acero exterior Cobre interior	100	100
Coax. Noise RCP	2.2	0.5	Acero exterior Cobre interior	100	100
DC	0.2	0.2	Cobre-Berilio	---	200

Tabla 1. Cables empleados en el criostato.

El cableado interior conecta los sensores de temperatura y las resistencias calefactoras y de regeneración al conector FISCHER de 11 pines hermético de mantenimiento o “Housekeeping” cuyo pin-out se muestra en la tabla 2.

<i>Fischer DEE104Z056 (conector exterior)</i>	Descripción
1	Común
2	Indicador de calentamiento resistencias
3	Calentamiento Resistencias
4	Sensor etapa intermedia (+)
5	Sensor etapa intermedia (-)
6	Sensor etapa fría (+)
7	Sensor etapa fría (-)
8	NC
9	NC
10	Indicador Calentamiento zeolitas
11	Calentamiento zeolitas

Tabla 2. Pin-out del conector de mantenimiento.

Los HEMT's se alimentan mediante otros dos conectores Microtech, su pin-out se muestra en la Tabla 3.

<i>Tensión</i>	<i>Fischer DEE104Z056 (conector exterior)</i>	<i>DB25</i>	<i>Microtech (conector transistor)</i>
-	1	libre	-
-	2	libre	-
LED	3	10	-
GND	4	libre	gnd
Vg3	5	19	1
Vd3	6	18	2
Vg2	7	17	3
-	8	libre	-
Vg1	9	15	5
Vd1	10	14	6
Vd2	11	16	4

Tabla 3. Pin-out de los conectores de alimentación de HEMT's (Microtech).

3. Referencias.

- Ref 1. *Criostato del receptor S/X del VLBI del CAY.* J.A.López, J.D.Gallego, P.de Vicente, J.A.Abad, C.Almendros. Informe Técnico OAN 1994-6.
- Ref 2. *Aumento del periodo térmico del criostato S/X del CAY.* J.A. López Fernández, F. Tercero, C. Almendros, J.A. Abad, J.M. Yagüe. Informe Técnico OAN 2002-8.
- Ref 3. *Cryogenic Heat Transfer.* Autor: Randall F. Barron. Editorial: Series in chemical and mechanical engineering. 1999.
- Ref 4. *Cryogenic Systems.* Randall F. Barron. Oxford University Press, New York. 1985.
- Ref 5. *A user's guide to vacuum technology.* John F. O'Hanlon. Ed. Wisley.

Anexo I. Estudio térmico.

El estudio térmico está basado en las consideraciones que ya se emplearon en el informe técnico 1994-6, Ref.1. Por ello, aquí sólo se presentan los resultados finales.

1.1.- Carga por conducción gaseosa.

La carga por conducción gaseosa para diferentes presiones es la siguiente:

<i>Etapa</i>	<i>Area (m²)</i>	<i>Temperat(K)</i>	<i>Presión(mbar)</i>	<i>K₁</i>	<i>a₀</i>	<i>W_{gas}</i>
Intermedia	0.32	70	10 ⁻²	1.2	0.5	36.8
Fría	0.1	15	10 ⁻²	1.2	0.5	3.3
Intermedia	0.32	70	10 ⁻³	1.2	0.5	3.68
Fría	0.1	15	10 ⁻³	1.2	0.5	0.33
Intermedia	0.32	70	10 ⁻⁴	1.2	0.5	0.368
Fría	0.1	15	10 ⁻⁴	1.2	0.5	0.033

Tabla I: Carga por conducción gaseosa en el criostato.

La capacidad refrigeradora de la cabeza CTI 350CP para obtener temperaturas del orden de 70 K para la etapa intermedia y 15 K para la etapa fría es de aproximadamente 6 Watios y 1 Watio respectivamente. Es conveniente reducir la presión dentro del criostato por debajo de 10⁻³ mbar.

1.2.- Carga por radiación.

En nuestro caso la etapa exterior es de acero $\epsilon=0.048$ y la etapa intermedia es de duraluminio $\epsilon=0.1$. La etapa fría está constituida de duraluminio, cobre ($\epsilon=0.6$) y oro ($\epsilon=0.03$). Si tenemos en cuenta que el primero de ellos es el más abundante se puede establecer una emisividad igual a la del duraluminio.

Así la carga térmica por radiación se resume en la tabla siguiente.

<i>Etapa</i>	<i>A₁ (m²)</i>	<i>A₂ (m²)</i>	<i>ε₁</i>	<i>ε₂</i>	<i>F</i>	<i>W_{rad} (W)</i>
Intermedia 70 K	0.32	0.697	0.1	0.048	0.052	7.6
Fría 15 K	0.1	0.32	0.1	0.1	0.078	0.01

Tabla II: Carga por radiación en el criostato sin superaislamiento.

1.2.1.- Superaislamiento.

La carga térmica por radiación sobre la etapa intermedia es muy alta. Para reducirla se emplean aislamientos multicapa, más conocidos como superaislamientos. El material empleado es NRC-2 “crinkled aluminized mylar” de 0.006 mm de grosor.

Para una densidad de capas de 35 capas por centímetro, la conductividad aparente mínima (a presiones inferiores a 10⁻³ mbar) del NRC-2 es 42 $\mu\text{W/m-K}$. Hasta 10 mbar esta conductividad tiene una dependencia lineal con la presión. Así a 10⁻² mbar se tienen 420 $\mu\text{W/m-K}$ y a 10⁻¹ mbar se tienen 2000 $\mu\text{W/m-K}$. Desde 10 mbar hasta presión atmosférica, la conductividad es 30 mW/m-K .

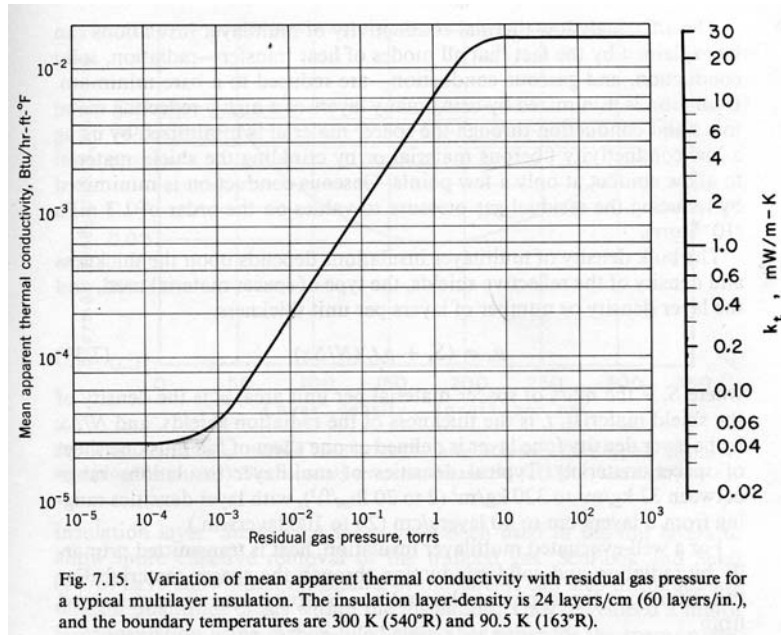


Figura 1: Variación de la conductividad térmica aparente de un superaislamiento con la presión. Ref.3, pg397.

En nuestro diseño se han empleado 6 capas de NRC-2 en un grosor de 3 mm, por lo que se estima una conductancia aparente que en el peor de los casos sería 2 veces superior a la especificada a presiones inferiores a 10^{-3} mbar, esto es: $84 \mu\text{W/m-K}$. Lo que hace que la carga por radiación sobre la etapa intermedia sea del orden de 2 Watios. Por lo dicho anteriormente no se prevé que esta carga se vea reducida aunque la presión baje de 10^{-5} mbar, como será el caso cuando se enfríe el criostato.

1.2.2.- Radiación de la ventana

La ventana de radiofrecuencia aumenta la carga debida a la radiación sobre ambas etapas. Esta carga por radiación se estima como la resultante entre dos placas paralelas de 160 mm de diámetro, una de teflón (emisividad aproximadamente unidad y a temperatura ambiente) y otra de aluminio (emisividad 0.1 y a 15 kelvin). Esto ofrece un resultado de 0.9 watios.

La presencia del filtro de infrarrojos enfriado a 70 kelvin, evita que esta radiación sea excesiva hacia la etapa fría. El diseño con varias capas de filtrado de material aislante permite suponer que la mayor parte de esta radiación, aproximadamente 0.9 watios, carga la etapa intermedia y no la fría.

1.2.3.- Carga total por radiación

La carga total por radiación teniendo en cuenta todo lo anterior es:

	Etapa 15K	Etapa 70K
Radiación ventana	---	0.9
Radiación con MLI	0.01	2
TOTAL	0.01	2.9

Tabla III: Carga por radiación total en el criostato.

1.3.- Carga por conducción por sólidos.

En nuestro criostato, entre etapas a diferente temperatura, disponemos de cables coaxiales de acero y cables de cobre-berilio de LAKESHORE CRYOGENICS. En la tabla siguiente se estima la carga térmica por conducción por sólidos a partir de los datos de conductividades térmicas promedio especificados en el informe técnico 6-1994, Ref.1.

<i>Función</i>	<i>Cable</i>	\varnothing_{ext},mm	\varnothing_{int},mm	<i>Long,mm</i> <i>300-75K</i>	<i>Long,mm</i> <i>75-15K</i>	<i>W</i> <i>300-75K</i>	<i>W</i> <i>75-15K</i>
<i>Salida LCP</i>	Acero	3.6	0.9	100	100	0.63	0.33
<i>Salida RCP</i>	Acero	3.6	0.9	100	100	0.63	0.33
<i>Ruido LCP</i>	Acero	2.2	0.5	100	100	0.2	0.1
<i>Ruido RCP</i>	Acero	2.2	0.5	100	100	0.2	0.1
<i>Polar y sensores</i>	Cu-Be X32	---	---	---	200	---	0.005
<i>Total</i>						1.86	0.87

Tabla IV: Carga por conducción por sólidos en el criostato.

1.4.- Carga disipada.

El criostato alberga dos amplificadores HEMT que disipan aproximadamente 100 mW. Además ambos llevan tres LEDs que disipan 50 mW cada uno. En total la potencia total disipada 500 mW.

1.5.- Carga total.

La carga térmica total del criostato se resume en las tablas siguientes para los casos en que la presión interior sea de 10^{-3} mbar y 10^{-6} mbar.

P=10^{-3} mbar	Etapa 15K	Etapa 70K
Conducción por gas	0.33	3.68
Radiación	0.01	2.9
Conducción sólidos	0.87	1.86
Disipada	0.5	0
Total	1.71	6.44

Tabla V: Carga térmica total en el criostato a 10^{-3} mbar.

P=10^{-6} mbar	Etapa 15K	Etapa 70K
Conducción por gas	0.03	0.37
Radiación	0.01	2.9
Conducción sólidos	0.87	1.86
Disipada	0.5	0
Total	1.41	5.13

Tabla VI: Carga térmica total en el criostato a 10^{-6} mbar.

**Anexo II. Medidas del comportamiento
térnico del criostato.**

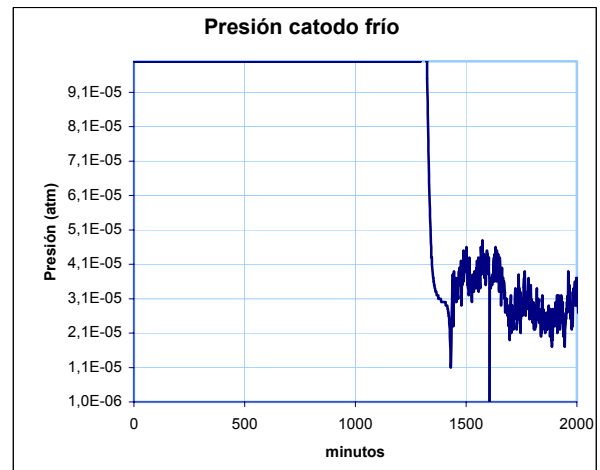
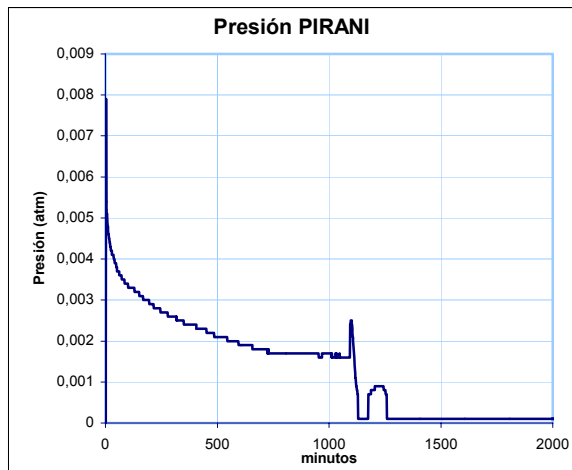
II.1.- Medidas de vacío.

Los sensores para medir el vacío utilizados en CAY son dos: la sonda de cátodo frío y la sonda Pirani. En las medidas realizadas se muestran los datos de las dos sondas en dos gráficas independientes.

Las medidas de vacío del criostato se dividen en las tres partes del ciclo de trabajo de un criostato: la fase de enfriamiento, la de funcionamiento normal en carga, y la fase de calentamiento. A continuación se presentan cada una de ellas:

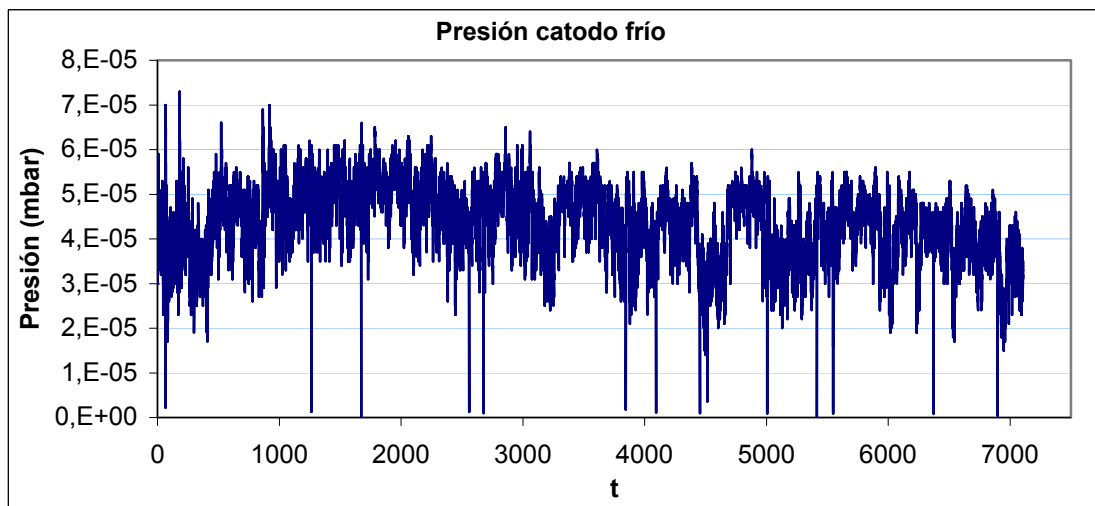
II. 1.1. Enfriamiento del criostato.

La medida comienza al poner en marcha la bomba de vacío. En el minuto 1100 se conecta la cabeza refrigeradora. En el apartado II.2.1 se calcula que el tiempo de enfriamiento es de unas 6 horas.



II. 1.2. Funcionamiento en carga del criostato

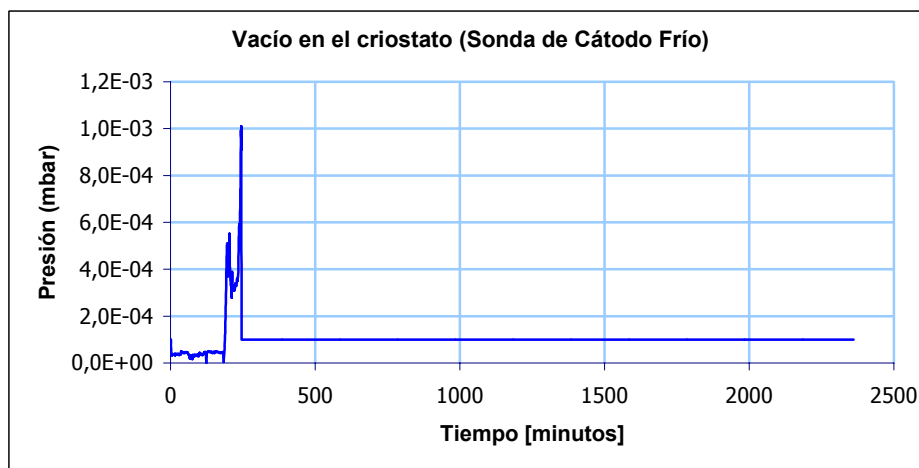
La gráfica siguiente presenta las medidas de presión tomadas con la sonda de cátodo frío con el criostato refrigerado y en carga, entre las 14:00h del 30/4/2004, viernes, y las 10:00h del 10/5/2004, lunes.

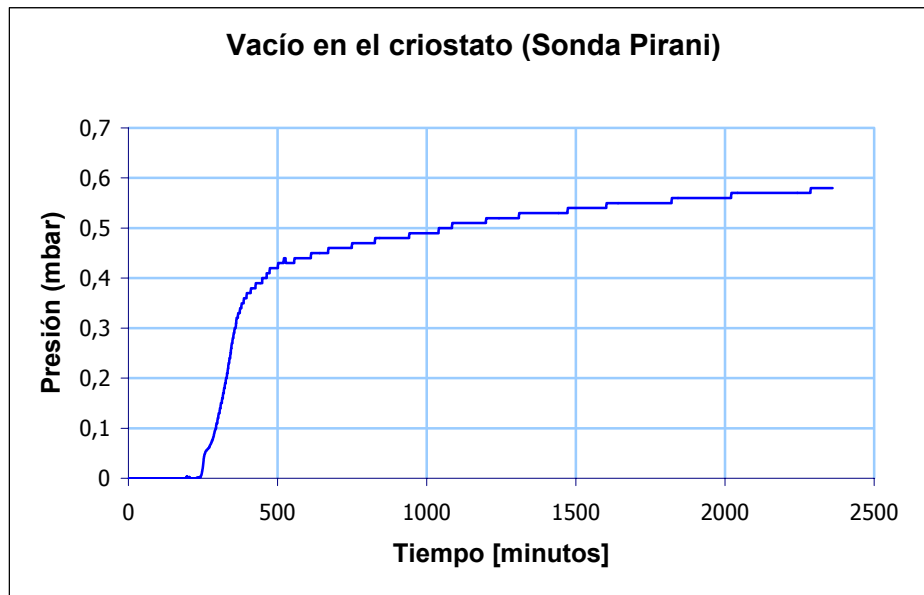


El vacío medio, eliminando los valores raros (muy distintos), es de $4.35 \cdot 10^{-5}$ mbar o $3.3 \cdot 10^{-5}$ torr.

II.1.3.- Calentamiento del criostato

Estas medidas se corresponden con las de temperatura presentadas en el apartado II.2.3. El tiempo de calentamiento se estima en unas 12h. En la gráfica de la presión medida por la sonda de Cátodo frío se observa que, en cuanto comienza a calentarse el criostato, la presión aumenta drásticamente por el efecto del vacío criogénico.





II.2. Pruebas de enfriado.

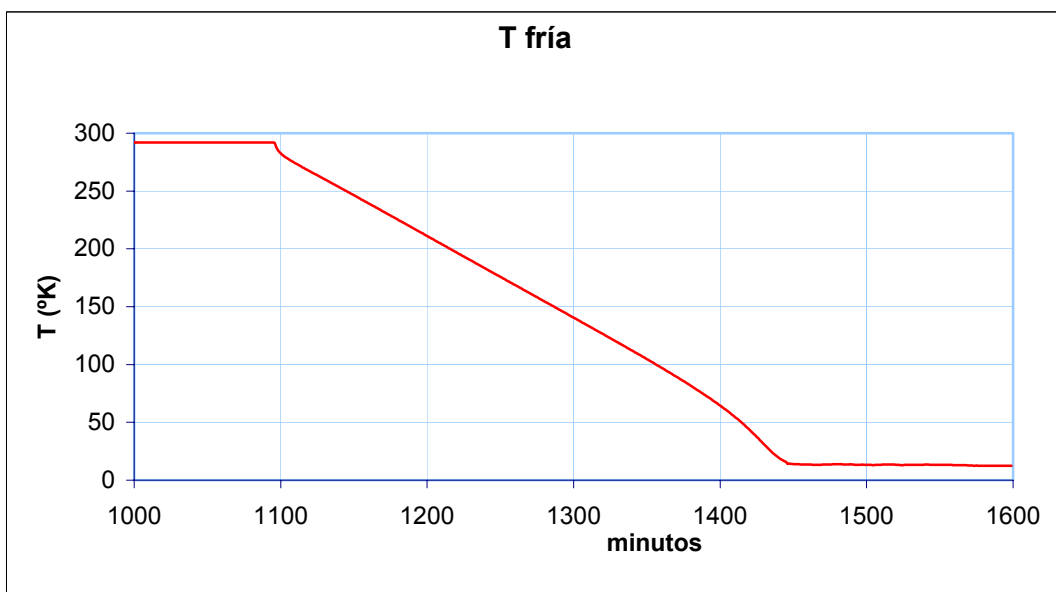
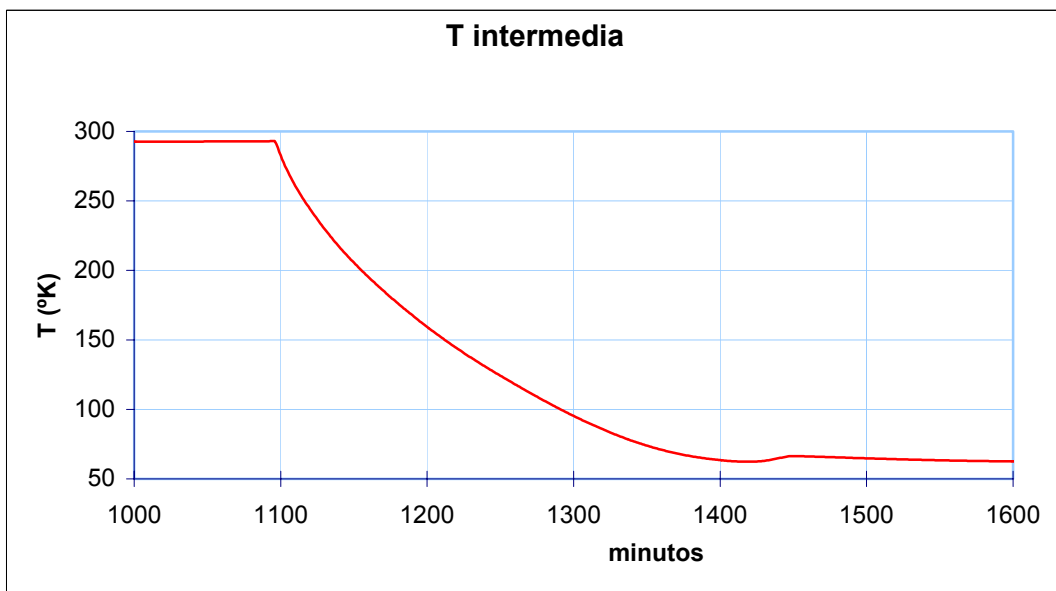
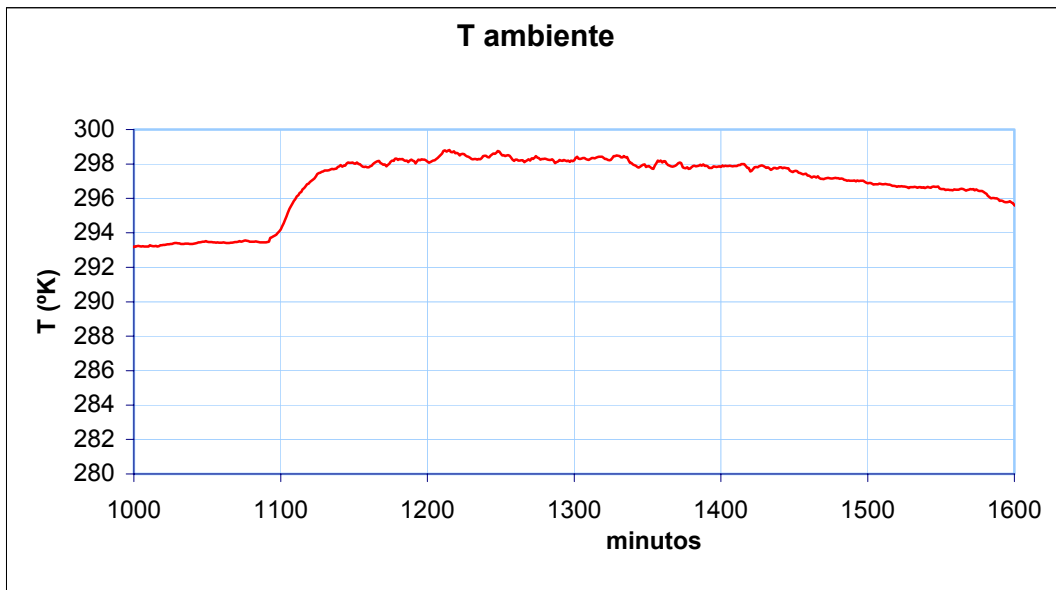
Las medidas de funcionamiento del criostato se dividen en las tres partes del ciclo de trabajo de un criostato: la fase de enfriamiento, la de funcionamiento normal en carga, y la fase de calentamiento. A continuación se presentan cada una de ellas:

II.2.1. Enfriamiento del criostato

El tiempo de enfriamiento es de 5h53min., esto es, unas **6horas**.

La temperatura ambiente aumenta al ponerse en marcha el compresor, refrigerado por aire, puesto que el sensor de temperatura ambiente se encuentra relativamente cerca de la salida de aire del compresor (en concreto, a 0.5m por encima del compresor).

El aumento de la pendiente de descenso de la temperatura fría a partir de los 100k se debe a que, a partir de esta temperatura hacia temperaturas inferiores, la conductividad térmica del acero inoxidable y del CuBe disminuyen a mayor velocidad que para temperaturas superiores. Por tanto, la carga de la etapa fría por conducción por sólidos, que es la que más carga esta etapa, disminuye a partir de los 100k, por lo que ésta se enfría a mayor velocidad.



II.2.2. Funcionamiento en carga del criostato

Las medidas que se presentan a continuación son las medidas de temperatura tomadas con el criostato refrigerado, entre el día 30.3.05 y el día 29.4.05, esto es, 31 días, durante los cuales los LNAs permanecieron apagados salvo entre el día 27.4 (a mediodía se encienden) y el día 28.4 (a mediodía se apagan). Con el conjunto Lakeshore y Labview se toma una medida de temperatura cada minuto.

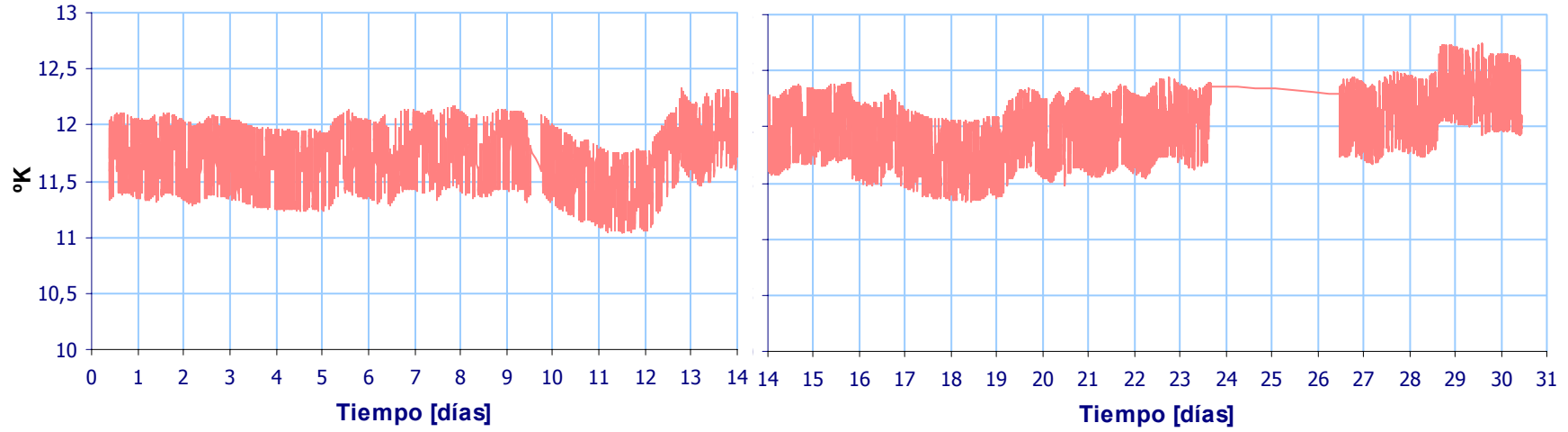
En las medidas se observa:

- Una oscilación diaria en la temperatura de las etapas intermedia y fría producida por la oscilación diaria de la temperatura ambiente. Esta oscilación de la temperatura ambiente se amortigua en la intermedia y todavía se amortigua más en la etapa fría, dando lugar a fluctuaciones diarias inferiores a los 0.2k en la etapa fría.
- un incremento de la temperatura de la etapa intermedia, de 6k, y, por consiguiente, un ligero aumento en la temperatura de la etapa fría, de 1k. No se debe a una fuga o pérdida de presión puesto que la presión en el criostato se mantiene constante durante los 31 días. Tampoco se puede correlar con un aumento de la temperatura ambiente.

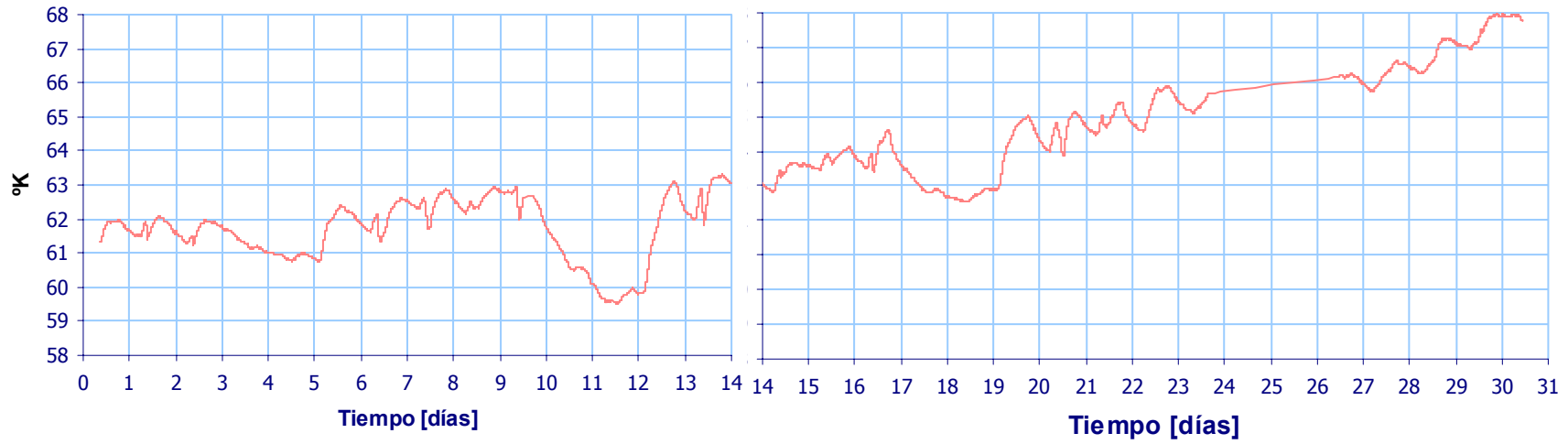
En la Gráfica 1 se observa el efecto de encender los LNAs (con los leds encendidos) sobre la etapa fría. Produce un incremento de la temperatura de la etapa fría de unos 0,25k.

En la Gráfica 2 se observan las variaciones de la temperatura de la etapa fría cuando la temperatura de la etapa intermedia y caliente apenas varía. Estas variaciones no presentan un patrón temporal, si bien su amplitud pico a pico máxima es menor de 0.7K.

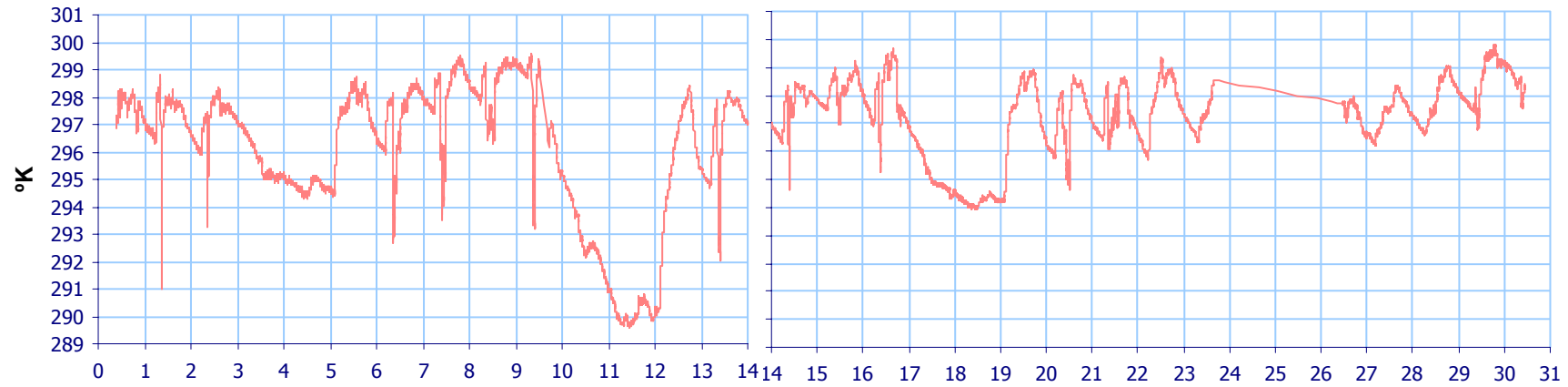
Temperatura Etapa Fría



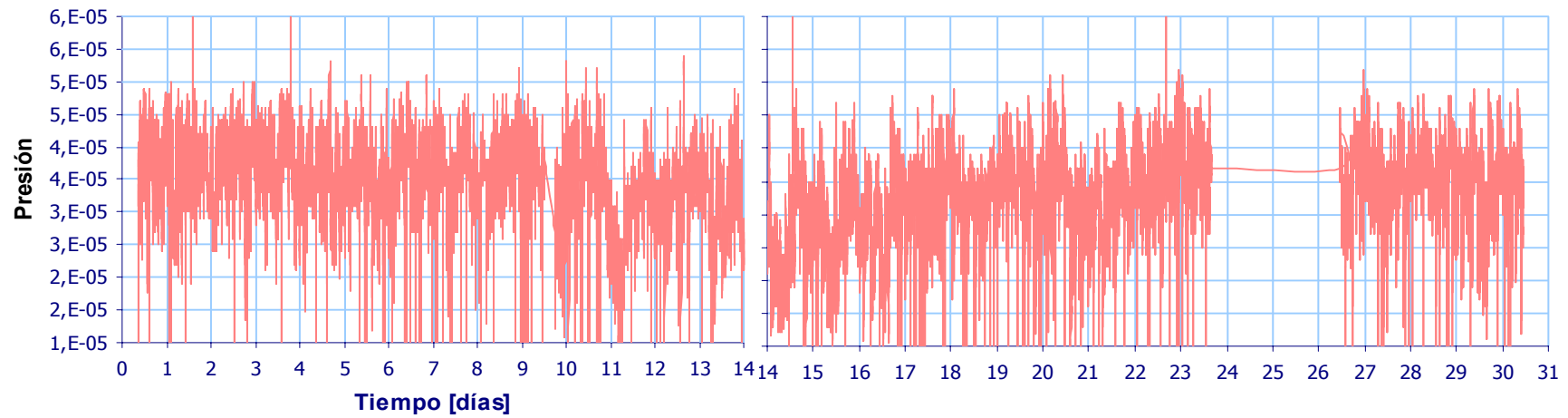
Temperatura Etapa Intermedia

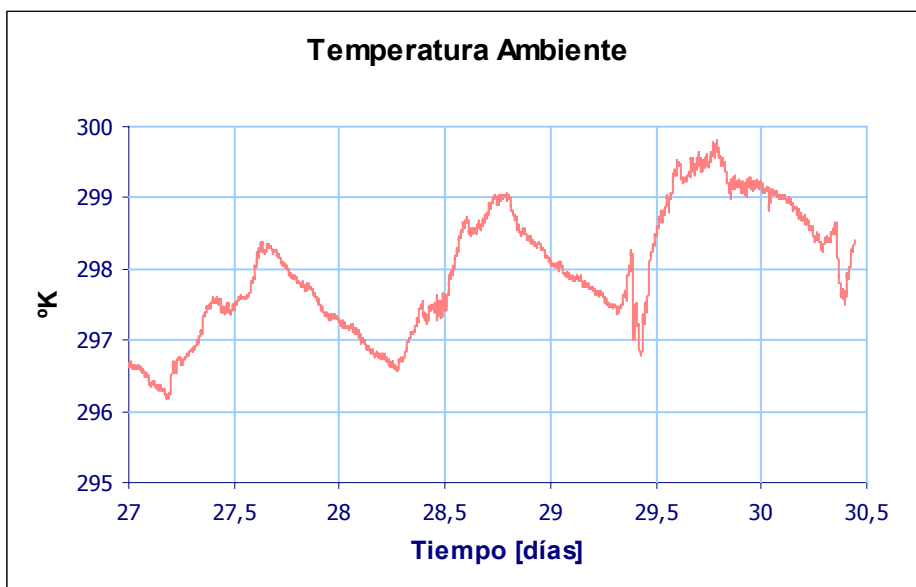
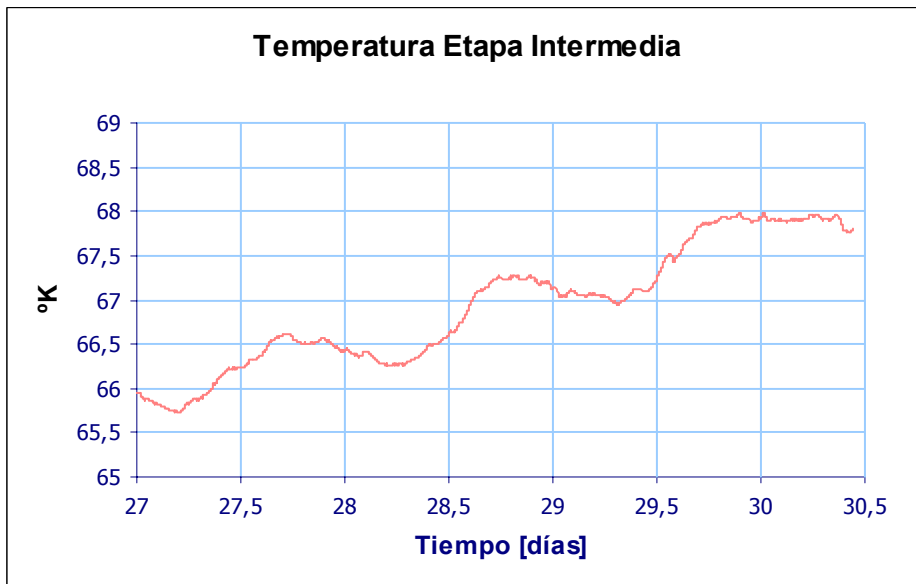
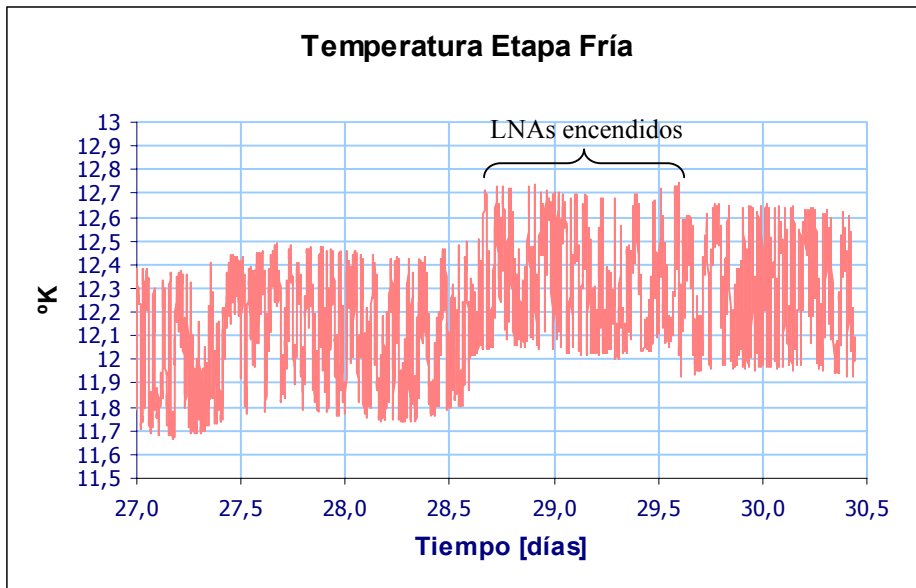


Temperatura Ambiente

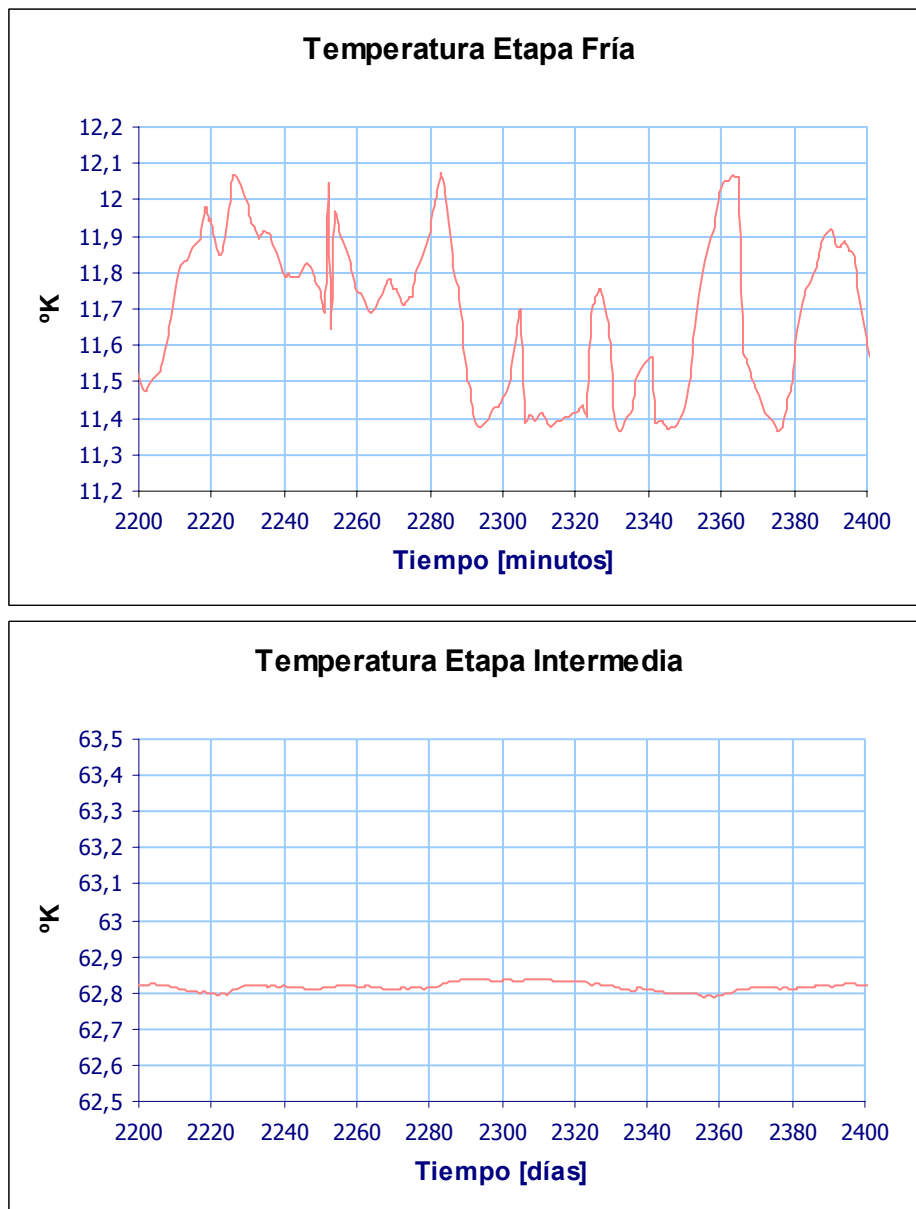


Vacío en el criostato (Sonda de Cátodo Frío)





Gráfica 1. Temperaturas entre el 26.4.05 00:00h y el 29.4.05 10:40h



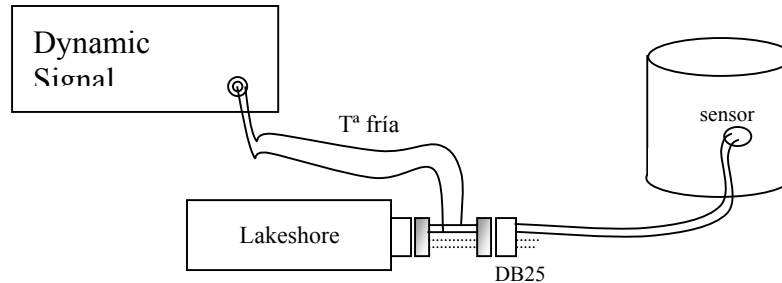
Gráfica 2. Variación de la temperatura de la etapa fría e intermedia.

La temperatura media de ambas etapas es:

Etapa	Temperatura (K)
Fría	11.99
Intermedia	62.82

Las fluctuaciones lentas de temperatura (diarias) tanto en la etapa fría como en la intermedia están producidas por las fluctuaciones de la temperatura exterior (temperatura ambiente), mayores en los días laborables por la calefacción. Las fluctuaciones de la temperatura ambiente se transmiten amortiguadas por un factor 3 a la temperatura intermedia, y amortiguadas por un factor 24 a la temperatura fría.

Las fluctuaciones rápidas de la temperatura de la etapa fría se analizan con el “Dynamic Signal Analyzer” de Agilent 35670A, que calcula la densidad espectral de potencia de la tensión en bornas del sensor de temperatura, tomadas antes del termómetro Lakeshore (que es el que polariza el sensor) usando un conector intermedio, según el siguiente esquema:



La densidad espectral que se obtiene es un conjunto de máximos de frecuencia y tensión especificados en la siguiente tabla:

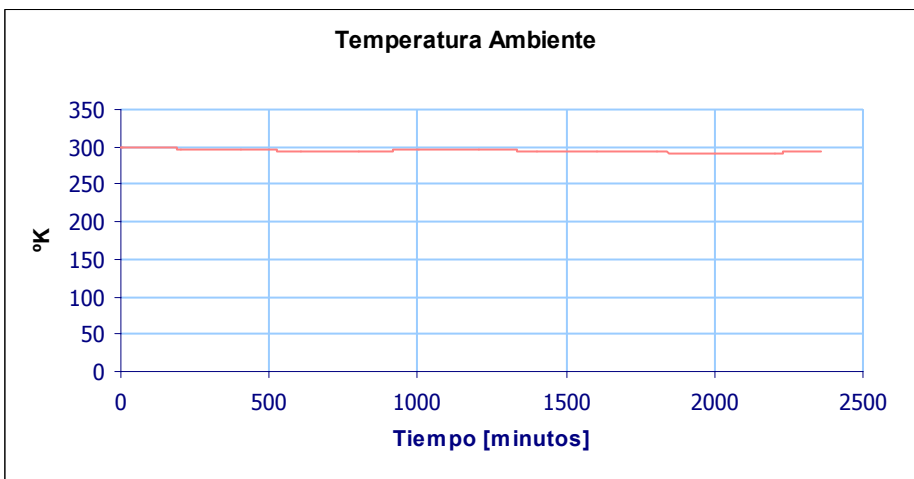
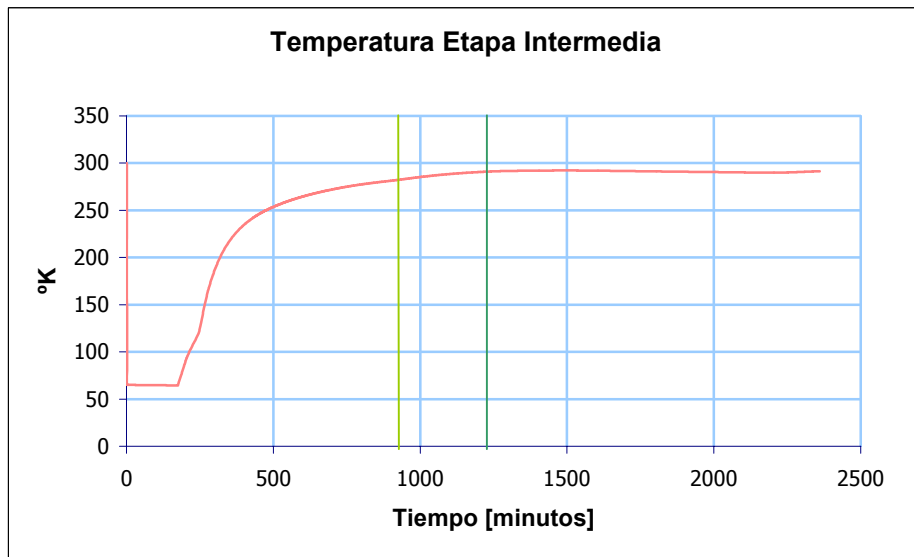
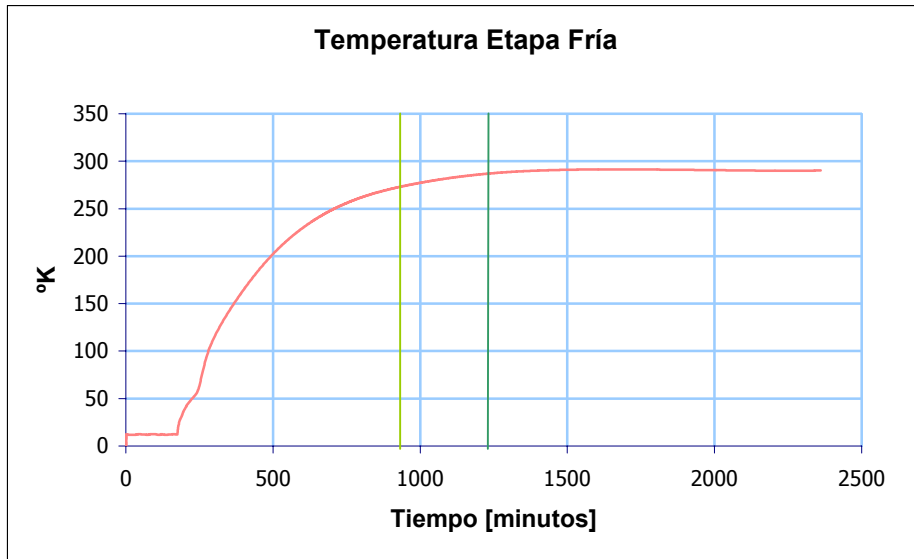
<i>Frecuencia (Hz)</i>	<i>Tensión (μVrms)</i>
1	4800
2	267
3	372
4	72
5	20

La fluctuación más importante se produce cada 1sg. Puesto que el sensor de temperatura de la etapa fría tiene $\Delta V/\Delta T = 0.019$ V/K, para $\Delta V_{rms} = 4800$ μ Vrms tenemos que $\Delta T_{rms} = 0.25$ Krms lo que supone una oscilación pico-pico, cada segundo, de **0.71 K**.

II. 2.3.- Calentamiento del criostato

Sin utilizar las resistencias de calefacción, el tiempo que tarda el criostato en enfriarse desde que se para el funcionamiento de la cabeza fría es:

- 12h37min para que la temperatura de la etapa fría suba a 273k (línea verde claro, en las siguientes gráficas),
- 17h 42min para que suba a 290k (línea verde oscuro, en las gráficas).



Conclusión:

Tiempo de calentamiento: 12 horas y 37 minutos.

Tiempo de enfriamiento: 6 horas.