

**CRIOSTATO DE LOS RECEPTORES
S/C/CH DE LA ANTENA ARIES XXI
DEL CAY**

J.A.López Fernández, José Manuel Serna Puente, I.Malo,
F.Tercero, J.M.Yagüe, J.A.Abad

INFORME TÉCNICO IT – OAN 2007 - 23

ÍNDICE

1	Introducción.....	1
2	Geometría del criostato.....	2
2.1	Cableado interior DC.....	5
2.1.1	Cableado de polarización de los amplificadores de bajo ruido.....	11
2.1.2	Cableado de “house-keeping”.....	13
2.1.3	Cableado interior de Radiofrecuencia.....	17
2.2	Piezas de interconexión entre las distintas etapas.....	31
2.3	Etapa exterior (vacuum case).....	33
2.4	Etapa intermedia (radiation shield).....	36
2.5	Etapa fría (cold plate).....	40
2.5.1	Instalación de los amplificadores.....	42
3	Sistemas criogénicos.....	46
3.1	Vacío.....	47
3.2	Frío.....	49
3.2.1	Refrigerador Gifford-McMahon.....	52
3.3	Aspectos prácticos.....	57
3.3.1	Medida de la presión.....	57
3.3.2	Medida de la temperatura.....	58
3.3.3	Comportamiento de los materiales.....	59
3.4	Sistemas criogénicos empleados en el criostato del receptor S/C/CH.....	62
4	Diseño térmico del criostato.....	63
4.1	Conducción gaseosa.....	63
4.2	Conducción por radiación.....	64
4.2.1	Conducción por radiación en la etapa intermedia.....	66
4.2.2	Conducción por radiación en la etapa fría.....	67
4.2.3	Resultados de carga por radiación.....	67
4.2.4	MLI (MultiLayer Insulation).....	68
4.3	Conducción por sólidos.....	72
4.3.1	Piezas de PVC de interconexión entre etapas.....	72
4.3.2	Cables en el interior del criostato.....	73
4.4	Carga térmica disipada en el criostato.....	74
4.5	Carga total en el criostato.....	74
5	Medidas efectuadas en el receptor S/C/CH.....	76
	Referencias.....	86
	Fotografías del criostato.....	87
	Anexos.....	92
	Anexo A: Especificaciones de los LNAs.....	93
	Anexo B: Especificaciones del cable criogénico Lakeshore.....	94
	Anexo C: Especificaciones de los sensores de T ^a (DT470-B1).....	95
	Anexo D: Especificaciones de los termostatos.....	96
	Anexo E: Especificaciones de la cabeza refrigeradora CTI-350.....	97
	Anexo F: Especificaciones del compresor CTI-8200.....	98
	Anexo G: Especificaciones del cable remirígido UT-085-SP.....	99
	Anexo H: Especificaciones del cable remirígido UT-085-SS.....	100

1 Introducción.

En el presente informe se resumen el diseño y las características más importantes del criostato de los receptores de las bandas S, C y CH que irá instalado en la cabina de receptores de la antena ARIES de 40 metros del Centro Astronómico de Yebes (CAY).

En su diseño se emplean los mismos criterios que en los anteriores criostatos ya construídos en el CAY (referencias 1 y 2).

Se trata de un criostato de ciclo cerrado de dos etapas, una fría a menos de 20 Kelvin y otra intermedia a menos de 70K, para las cuales se 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 10^{-7} mbar. **El tiempo de enfriado es de aproximadamente 7 horas, mientras que el tiempo de calentamiento es de aproximadamente 15 horas.**

Las temperaturas criogénicas se consiguen en los **criostatos**. Estos constan de dos partes: el dewar y el refrigerador criogénico. Los componentes del sistema a enfriar se introducen en un recipiente en el que se hace el vacío, el dewar, con lo que se anula totalmente la convección, se reduce la conducción a niveles muy bajos y además elimina la condensación de gases sobre las superficies frías de los componentes electrónicos delicados.

Existen diferentes tipos de criostatos, siendo el refrigerador criogénico el que establece la diferencia. Cuando se emplean ciclos térmicos por bombeo de gases, Helio, se llaman criostatos de ciclo cerrado. Mientras que cuando se emplean fluidos criogénicos del tipo He líquido o Nitrógeno líquido se les denomina de ciclo abierto. Cuando se usan ambos métodos simultáneamente se habla de criostatos híbridos.

Los criostatos de ciclo cerrado se diseñan por lo general para trabajar a temperaturas inferiores de 20K, aunque bajo diseños especiales pueden conseguirse 4K. Los criostatos de ciclo abierto emplean nitrógeno líquido, 77K, que puede ser la etapa fría o la etapa intermedia de un criostato donde la etapa fría se consigue con He líquido, 4K. Los criostatos híbridos emplean una etapa intermedia realizada con tecnología de criostato de ciclo cerrado y una etapa fría de He líquido. En cualquiera de los tres casos puede existir aún una etapa ultra fría, para la cual se emplea He-3 y se consiguen temperaturas de 0.5K.

En el diseño de un criostato se tienen en cuenta dos factores. El primero es la **capacidad refrigeradora del criogenerador**. El segundo las **cargas térmicas**. Estas pueden ser de cuatro tipos: conducción gaseosa, conducción por radiación, conducción por sólidos y carga térmica disipada en el interior.

2 Geometría del criostato.

En la siguiente figura se muestra el esquema del criostato construido.

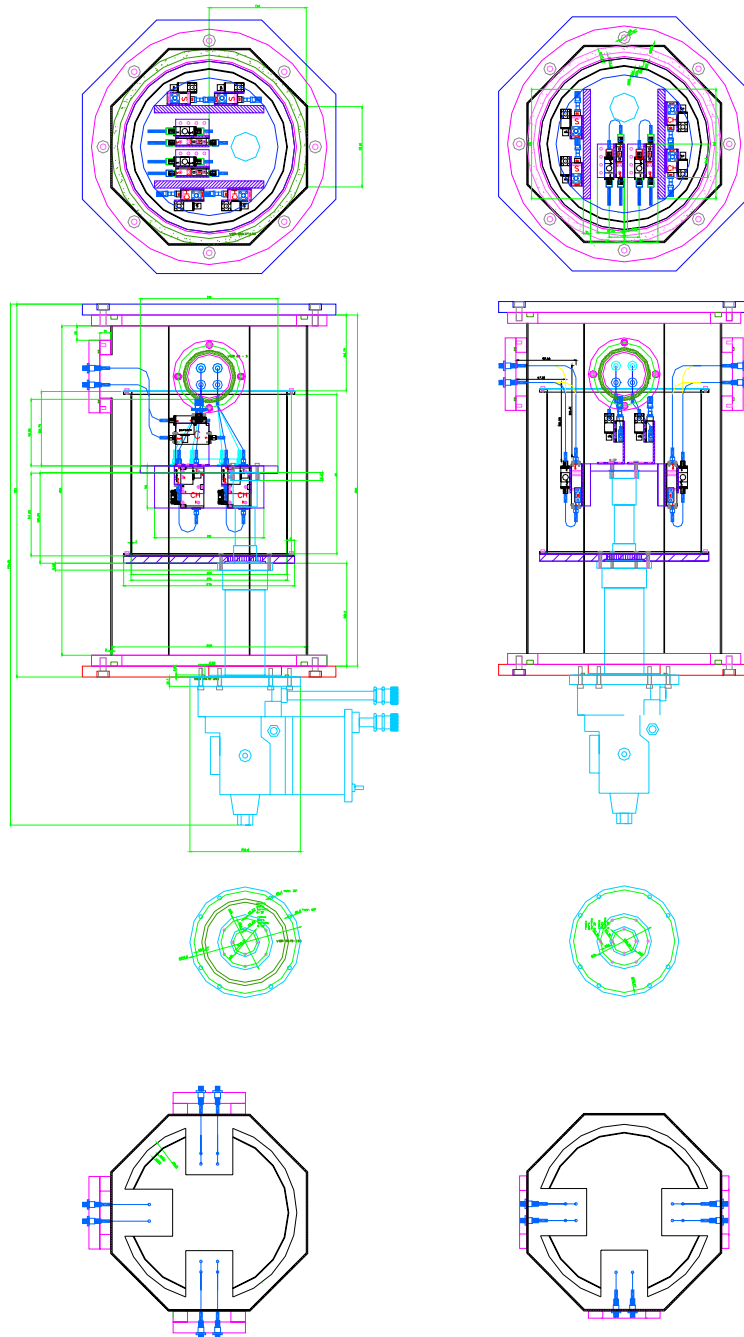


figura 1: Geometría del criostato construido (1)

Criostato de los receptores S/C/CH de la antena ARIES del CAY

TAPA DE ARRIBA - CRIOSTATO S/CH/C

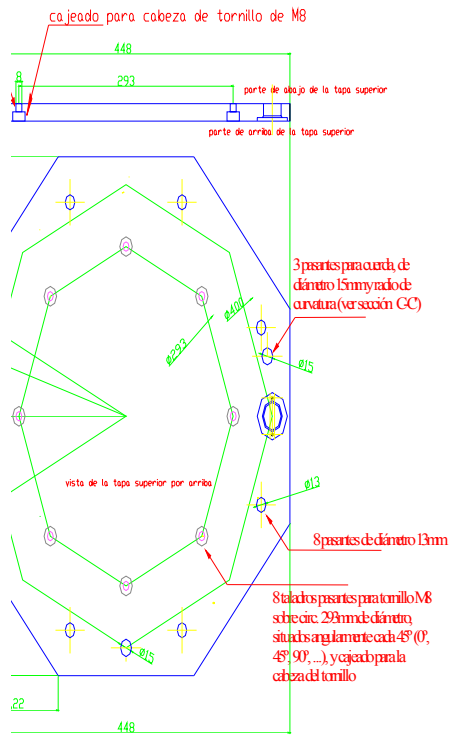


figura 2: Tapa superior del criostato

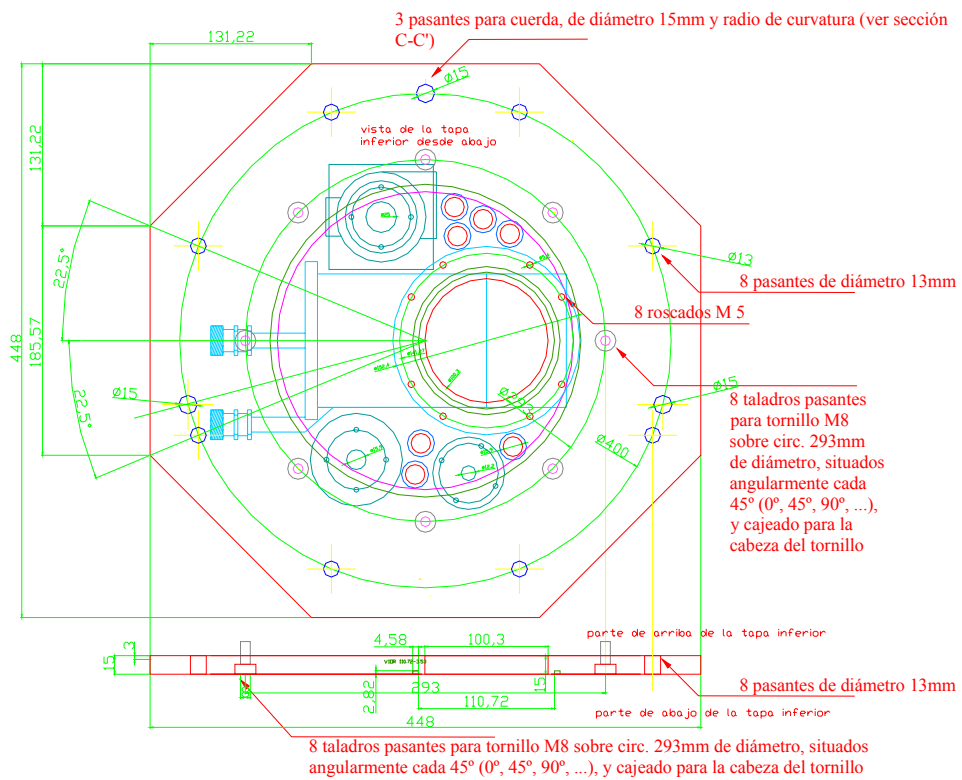


figura 3: Tapa inferior del criostato (v.2)

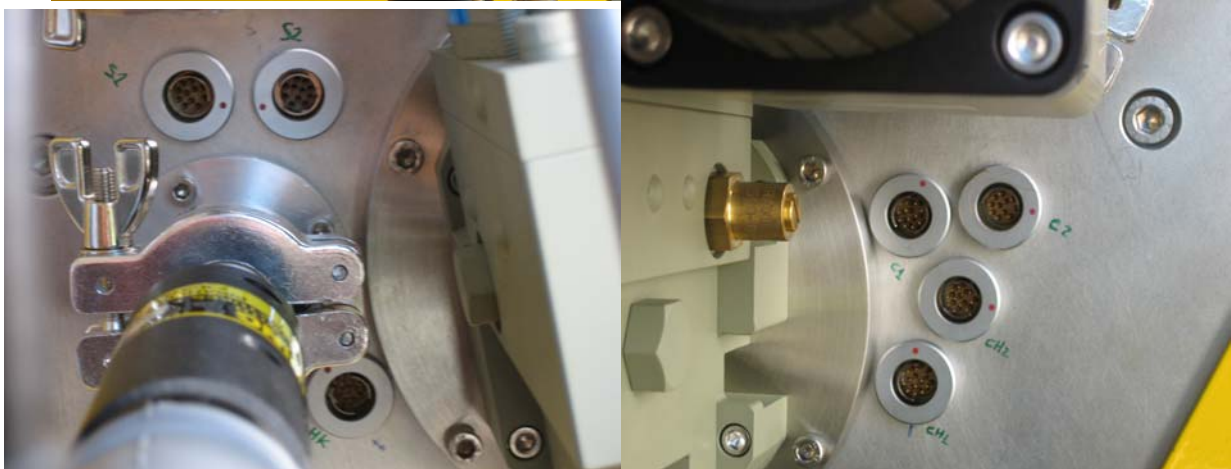
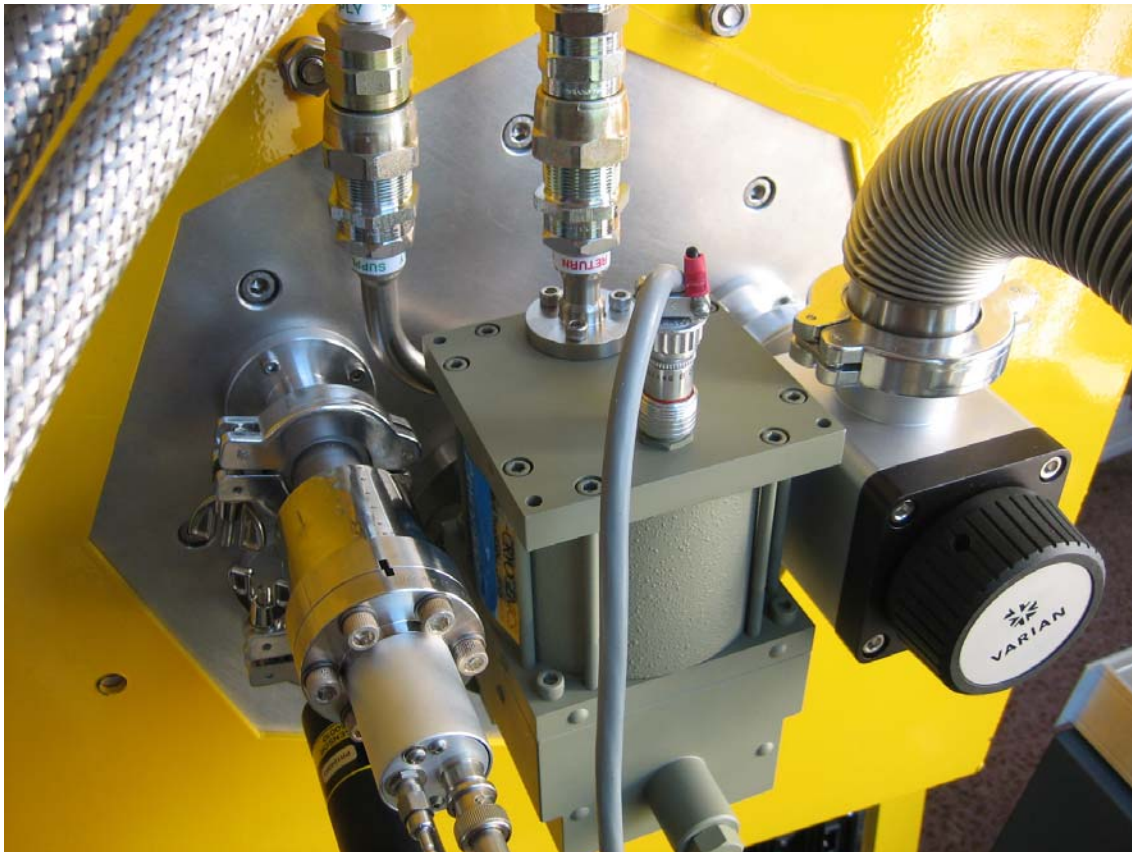


figura 4: Conexiones en la tapa inferior del criostato

2.1 Cableado interior DC.

En la etapa caliente del criostato, existen siete conectores Fischer herméticos:

- Uno (1) de 16 pines (se usan 15 de ellos) empleado para las señales de monitorización y “House-keeping”.
- Seis (6) de 11 pines (se emplean 9 de ellos) correspondientes a las señales de polarización de los amplificadores de bajo ruido presentes en el criostato (3 receptores y doble polarización por receptor). El conector correspondiente a cada una de las dos polarizaciones de cada banda tiene distinta polaridad.

<i>CONECTOR</i>	<i>FUNCIÓN</i>
C1	Polarización LNA banda CH LCP
C2	Polarización LNA banda CH RCP
C3	Polarización LNA banda C LCP
C4	Polarización LNA banda C RCP
C5	Polarización LNA banda S LCP
C6	Polarización LNA banda S RCP
C7	“House-keeping”

Se ha diseñado una pieza de duraluminio que va atornillada a la etapa caliente del criostato que recibe todas estas señales indicadas con anterioridad mediante unos latiguillos con conectores Fischer a la entrada y conectores Hembra MDM de 15 pines en la propia pieza.

El objetivo es realizar una distribución de las señales más eficaz y compacta.

A cada uno de estos conectores MDM (15 pin, hembra) se conectará un conector MDM (15 pin, macho) que llevará las señales necesarias a cada elemento dentro del criostato. Es necesario realizar una transición para pasar del cable DC tradicional al cable criogénico de Cu/Be → se va a efectuar a través de un conector DIN96..

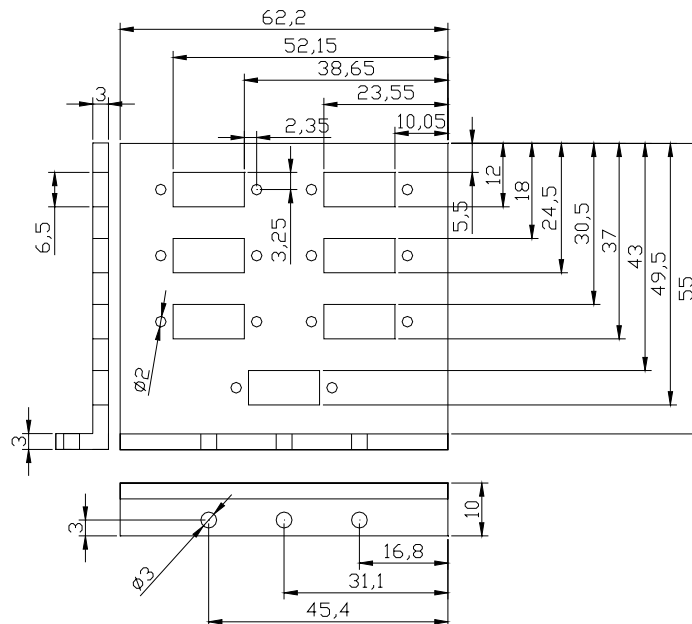


figura 5: Pieza de conectores MDM

La relación entre los pines de los conectores fischer y los conectores MDM se indica en la siguiente tabla.

MDM (15pin)-H	Fischer (11pin)
negro	1
marrón	2
rojo	3
naranja	4
amarillo	5
verde	6
azul	7
violeta	8
gris	9
blanco	10
blanco-negro	11
blanco-marrón	-
blanco-rojo	-
blanco-naranja	-
blanco-amarillo	-

MDM (15pin)-H	Fischer (16pin)
negro	1
marrón	2
rojo	3
naranja	4
amarillo	5
verde	6
azul	7
violeta	8
Gris	9
blanco	10
blanco-negro	11
blanco-marrón	12
blanco-rojo	13
blanco-naranja	14
blanco-amarillo	15

Se indica en las siguientes figuras el pin-out de los conectores fischer empleados (de 11 y de 16 pines).

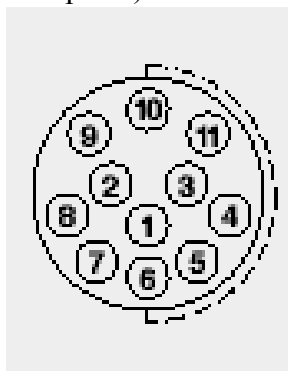


figura 6: Fischer de 11 pines (vista conector), punto rojo arriba

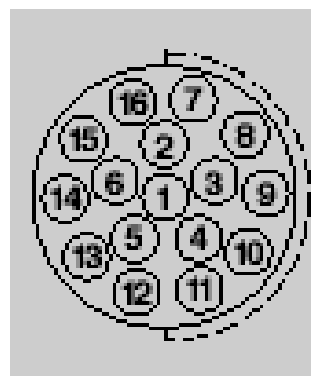


figura 7: Fischer de 16 pines (vista conector), punto rojo arriba

La transición de cable convencional a cable criogénico se efectúa mediante la utilización de un conector DIN96 que recibe por uno de sus extremos las señales procedentes de cada uno de los conectores MDM y en el otro extremo se sueldan los cables criogénicos correspondientes. En la siguiente tabla se muestra el pin-out asociado

Criostato de los receptores S/C/CH de la antena ARIES del CAY

Row a	fischer	Descripción	Row b	fisher	Descripción	Row c	fisher	Descripción
32	C1P1	CH1_GND	32	C1P2	CH1_Vd1	32	C1P3	CH1_Vg1
31	C1P4	CH1_Vd2	31	C1P5	CH1_Vg2	31	C1P6	
30	C1P7		30	C1P8		30	C1P9	
29	C1P10		29	C1P11		29		
28	C2P1	CH2_GND	28	C2P2	CH2_Vd1	28	C2P3	CH2_Vg1
27	C2P4	CH2_Vd2	27	C2P5	CH2_Vg2	27	C2P6	
26	C2P7		26	C2P8		26	C2P9	
25	C2P10		25	C2P11		25		
24	C3P1	C1_GND	24	C3P2	C1_Vd1	24	C3P3	C1_Vg1
23	C3P4	C1_Vd2	23	C3P5	C1_Vg2	23	C3P6	C1_Vd3
22	C3P7	C1_Vg3	22	C3P8		22	C3P9	
21	C3P10		21	C3P11		21		
20	C4P1	C2_GND	20	C4P2	C2_Vd1	20	C4P3	C2_Vg1
19	C4P4	C2_Vd2	19	C4P5	C2_Vg2	19	C4P6	C2_Vd3
18	C4P7	C2_Vg3	18	C4P8		18	C4P9	
17	C4P10		17	C4P11		17		
16	C5P1	S1_GND	16	C5P2	S1_Vd1	16	C5P3	S1_Vg1
15	C5P4	S1_Vd2	15	C5P5	S1_Vg2	15	C5P6	
14	C5P7		14	C5P8		14	C5P9	
13	C5P10		13	C5P11		13		
12	C6P1	S2_GND	12	C6P2	S2_Vd1	12	C6P3	S2_Vg1
11	C6P4	S2_Vd2	11	C6P5	S2_Vg2	11	C6P6	
10	C6P7		10	C6P8		10	C6P9	
9	C6P10		9	C6P11		9		
8			8			8		
7			7			7		
6			6			6		
5	C7P1	t_i	5	C7P2	GND_t_i	5	C7P3	t_c
4	C7P4	GND_t_c	4	C7P5	calef_ON	4	C7P6	
3	C7P7	calef_MON	3	C7P8	regen_ON	3	C7P9	
2	C7P10	regen_MON	2	C7P11	GND_res	2	C7P12	
1	C7P13		1	C7P14		1	C7P15	

Conectores MDM de entrada a los amplificadores. Código de colores

Conector MDM9 CH_band LNA	Señal	color
1	CH_GND	Negro
2		
3	CH_Vd1	Rojo
4		
5	CH_Vg1	Amarillo
6	CH_Vd2	Verde
7		
8	CH_Vg2	violeta
9		

Criostato de los receptores S/C/CH de la antena ARIES del CAY

Conector MDM9 C_band LNA	Señal	Color
1	C_GND	Negro
2	C_Vd1	Marrón
3	C_Vg1	Rojo
4	C_Vd2	Naranja
5	C_Vg2	Amarillo
6	C_Vd3	Verde
7	C_Vg3	Azul
8		
9		

Conector MDM9 S_band LNA	Señal	Color
1	S_GND	Negro
2	S_Vd1	Marrón
3	S_Vg1	Rojo
4	S_Vd2	Naranja
5	S_Vg2	Amarillo
6		
7		
8		
9		

La placa de la unidad de FI denominada “out2cryo” es la encargada de filtrar las señales de polarización de los amplificadores y sacarlas hacia el exterior mediante conectores DB15.

Se han construido 6 cables específicos que poseen en un extremo un conector DB15 (conectado a la unidad de FI) y en el otro extremo un conector fischer (conectado al criostato al conector correspondiente a cada uno de los 6 amplificadores). El pinout de la placa “out2cryo” es el siguiente:

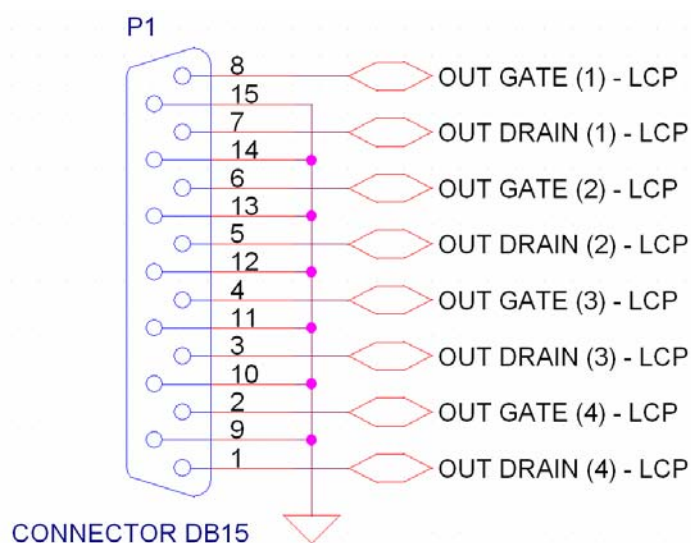


figura 8: pinout del conector DB15 de salida de las señales de polarización de los LNAs

Se han diseñado dos piezas de aluminio para efectuar el enrollamiento de los cables de Fósforo-bronce (una para la etapa caliente y otra para la etapa intermedia). Se indica en la siguiente figura el diseño de ambas piezas.

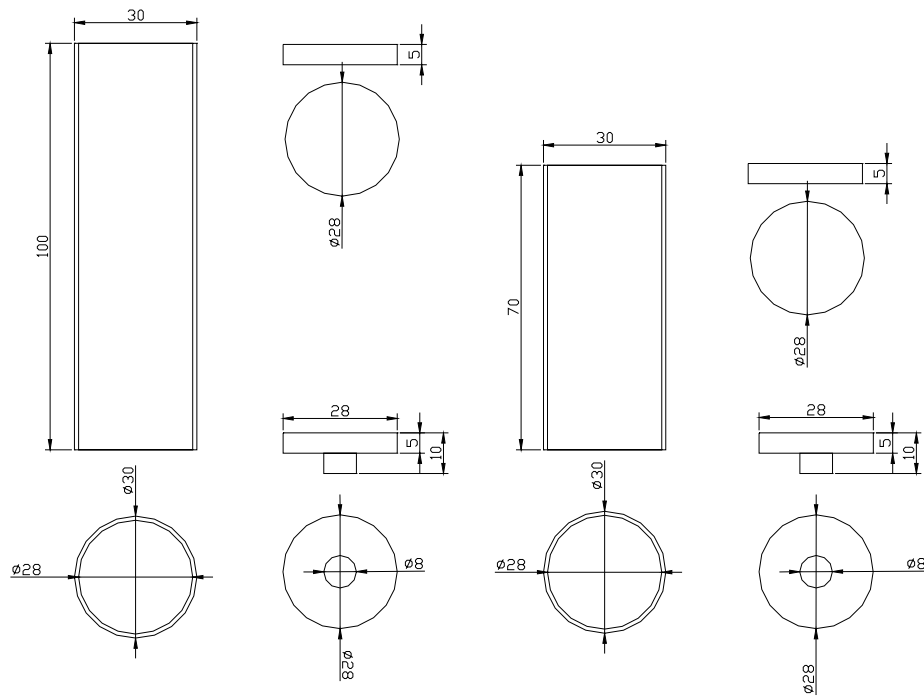


figura 9: Diseño de las piezas de aluminio para los cable de CuBe

En las siguientes fotografías se muestra el sistema de cables DC en la etapa caliente



figura 10: Interconexión entre los conectores fischer y los MDM15

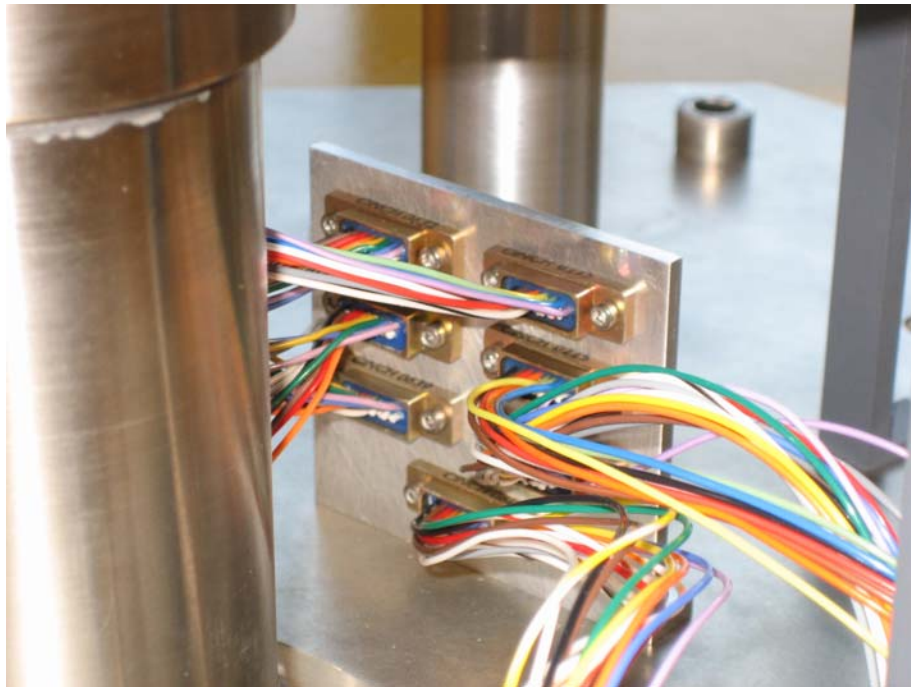


figura 11: Parte trasera de la pieza diseñada como soporte para los conectores MDM

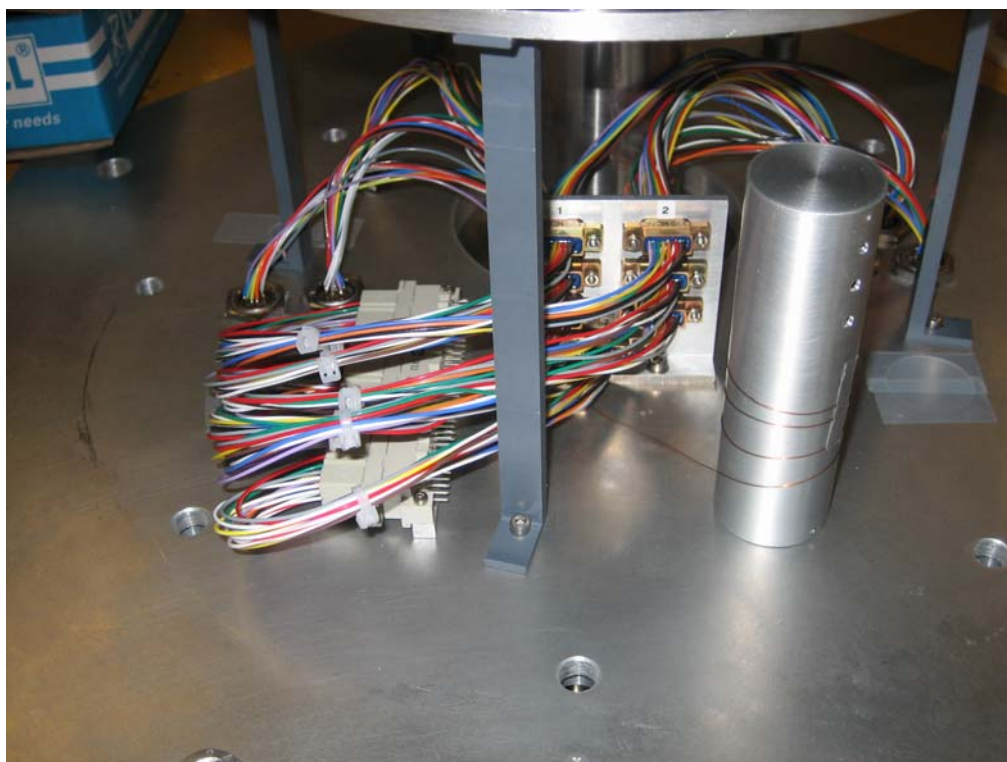


figura 12: Interconexión con el conector DIN96 (transición cable criogénico)

2.1.1 Cableado de polarización de los amplificadores de bajo ruido.

El criostato alberga los amplificadores correspondientes a tres bandas de funcionamiento y para cada banda existen dos polarizaciones. Por lo tanto, existen en el interior del criostato 6 amplificadores.

Las bandas de funcionamiento son las siguientes:

<i>BANDA</i>	<i>Rango de frecuencias del amplificador (GHz)</i>	<i>Rango de frecuencias de interés radio astronómico (GHz)</i>	<i>Utilidad</i>
S	2.2-2.35	2.2-2.37	VLBI
C	4-8	4.56-5.06	VLBI H ₂ CO line
		5.9-6.9	Metanol (CH ₃ OH)
CH	2.4-4.8	3.22-3.39	CH lines (relacionado con la presencia de metano CH ₄)

En las siguientes tablas se muestra el “pin-out” correspondiente a los conectores MDM-9 de polarización de los amplificadores.

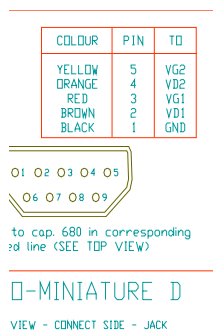


figura 13: conector de polarización amplificador banda S

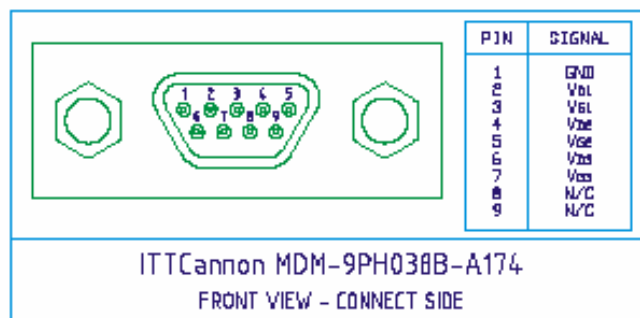


figura 14: conector de polarización amplificador banda C

Criostato de los receptores S/C/CH de la antena ARIES del CAY

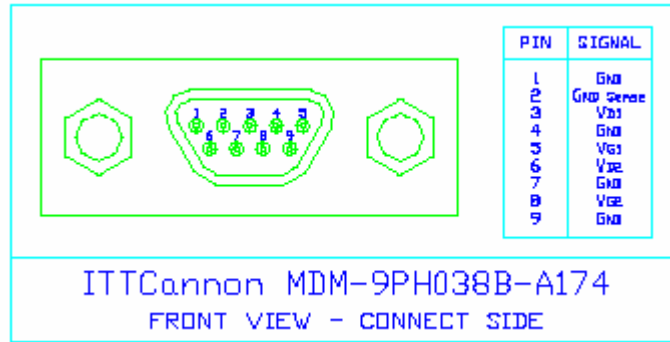


figura 15: conector de polarización amplificador banda CH

2.1.2 Cableado de “house-keeping”.

Existe un conector fisher de 16 pines de entrada al criostato (en la etapa caliente, 300K) que contiene todas las señales de monitorización interna del criostato, alimentación de las resistencias calefactoras y de las resistencias de regeneración de las zeolitas. Este conector fisher está asociado al conector MDM de 15 pines denominado **conector7**.

El número de señales necesarias así como su pin asociado correspondiente se muestra en la siguiente tabla:

MDM (15pin)-H	Fischer (16pin)	Nombre de la señal	Descripción de la señal
negro	1	t_i	Sensor de temperatura de la etapa intermedia
marrón	2	GND_t_i	Masa del sensor de temperatura de la etapa intermedia
rojo	3	t_c	Sensor de temperatura de la etapa fría
naranja	4	GND_t_c	Masa del sensor de temperatura de la etapa fría
amarillo	5	calef_ON	Señal que tras pasar por el termostato activa las resistencias calefactoras
azul	7	calef_mon	Detectar si el termostato asociado a las resistencias calefactoras está activado
violeta	8	regen_ON	Señal que tras pasar por el termostato activa las resistencias regeneradoras de las zeolitas
blanco	10	regen_mon	Detectar si el termostato asociado a las resistencias regeneradoras de las zeolitas está activado
blanco-negro	11	GND_res	Masa de los circuitos de las resistencias y termostatos
blanco-rojo	13		
blanco-naranja	14		
blanco-amarillo	15		
-	16		No disponible

Las resistencias empleadas tienen las siguientes características:

- Resistencias calefactoras: 100Ω , 25W
- Resistencias regeneradoras de las zeolitas: 100Ω, 2.5W.

El cable criogénico empleado para estas señales es el siguiente:

- Lakeshore WQL-36-100 (Quad-lead wire, 36AWG (Ø=0.127mm), 100ft).

Se ha verificado experimentalmente que este cable es capaz de soportar al menos 0.5 amperios sin deteriorarse.

Criostato de los receptores S/C/CH de la antena ARIES del CAY

Así pues, se demuestra que para el caso de las resistencias calefactoras con una corriente de **0.5 amperios** se obtienen los 25 vatios de potencia. En el caso de las resistencia regeneradoras son necesarios **0.158 amperios** para dar los 2.5 vatios

Tanto las resistencias calefactoras como las regeneradoras están colocadas independientemente en paralelo. La tensión necesaria para alcanzar esas corrientes y por lo tanto las potencias máximas es para cada caso:

- **Resistencias calefactoras: 50 voltios**
- **Resistencias regeneradoras: 15.8 voltios**

Asignación de pines en el conector DIN96 de transición a cable criogénico:

MDM (15pin)-H	Fischer (16pin)	Nombre de la señal	DIN 96
negro	1	t_i	5a
marrón	2	GND_t_i	5b
rojo	3	t_c	5c
naranja	4	GND_t_c	4a
amarillo	5	calef_ON	4b
verde	6		4c
azul	7	calef_mon	3a
violeta	8	regen_ON	3b
gris	9		3c
blanco	10	regen_mon	2a
blanco-negro	11	GND_res	2b
blanco-marrón	12		2c
blanco-rojo	13		1a
blanco-naranja	14		1b
blanco-amarillo	15		1c
-	16		

En la siguiente figura se presenta un esquema del conexionado de todas las señales implicadas.

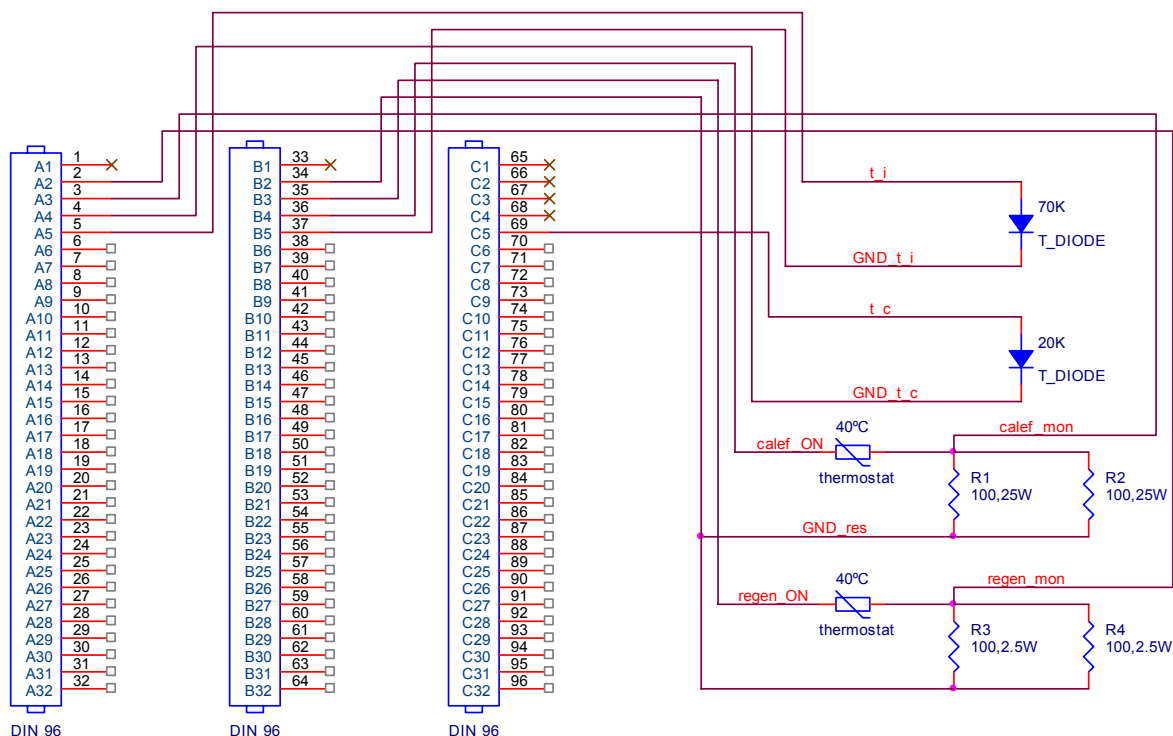


figura 16: Conexionado de las señales de "house-keeping"

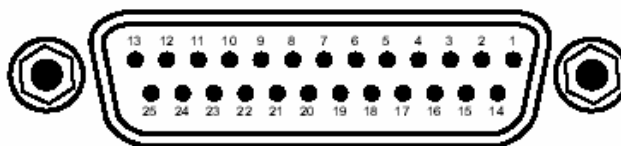
Se indica a continuación la correspondencia de colores entre los conectores fisher del criostato y los hilos de los cables externos al criostato que se han construido (7 cables de 4 metros de longitud, 6 para los amplificadores y 1 para el house-keeping).

CRIOSTATO	CABLE LNA	CRIOSTATO	CABLE H-K
1-negro	Negro	1-negro	Negro
2-marrón	Marón	2-marrón	Marrón
3-rojo	Rojo	3-rojo	Rojo
4-naranja	Naranja	4-naranja	Rosa
5-amarillo	Amarillo	5-amarillo	Amarillo
6-verde	Verde		
7-azul	Azul	7-azul	Azul
		8-violeta	Violeta
		10-blanco	blanco
		11-blanco/negro	Blanco/gris

Todas estas señales de "House-Keeping" se controlan y monitorizan a través de un cable que en un extremo posee un conector "fisher" que va conectado al criostato y en el otro extremo posee:

- Por un lado un conector DB25 que contiene las señales de monitorización de la temperatura de la etapa intermedia y de la etapa fría:
 - Pines 3 y 4: cortocircuitados: etapa intermedia (+).

- Pines 15 y 16: cortocircuitados: etapa intermedia (-).
- Pines 6 y 7: cortocircuitados: etapa fría (+).
- Pines 18 y 19: cortocircuitados: etapa fría (-)



F218-3-3.eps

Input Connector (Inputs 1-4)				Input Connector (Inputs 5-8)			
PIN	DESC.	PIN	DESC.	PIN	DESC.	PIN	DESC.
1	NC			1	NC		
2	S	14	S	2	S	14	S
3	1I+	15	1I-	3	5I+	15	5I-
4	1V+	16	1V-	4	5V+	16	5V-
5	S	17	S	5	S	17	S
6	2I+	18	2I-	6	6I+	18	6I-
7	2V+	19	2V-	7	6V+	19	6V-
8	S	20	S	8	S	20	S
9	3I+	21	3I-	9	7I+	21	7I-
10	3V+	22	3V-	10	7V+	22	7V-
11	S	23	S	11	S	23	S
12	4I+	24	4I-	12	8I+	24	8I-
13	4V+	25	4V-	13	8V+	25	8V-

figura 17: Pinout del conector DB25 del lector de temperaturas LakeShore modelo 218

- *Se conectan tres conectores “bananas” que son los encargados de alimentar las resistencias calefactoras y regeneradoras:*
 - *Banana roja: GND*
 - *Banana negra: activar resistencias regeneradoras.*
 - *Banana amarilla: activar resistencias calefactoras.*
- *Existen otros dos punto de acceso:*
 - *Rojo: monitorizar estado de las resistencias regeneradoras.*
 - *Amarillo: monitorizar estado de las resistencias calefactoras.*

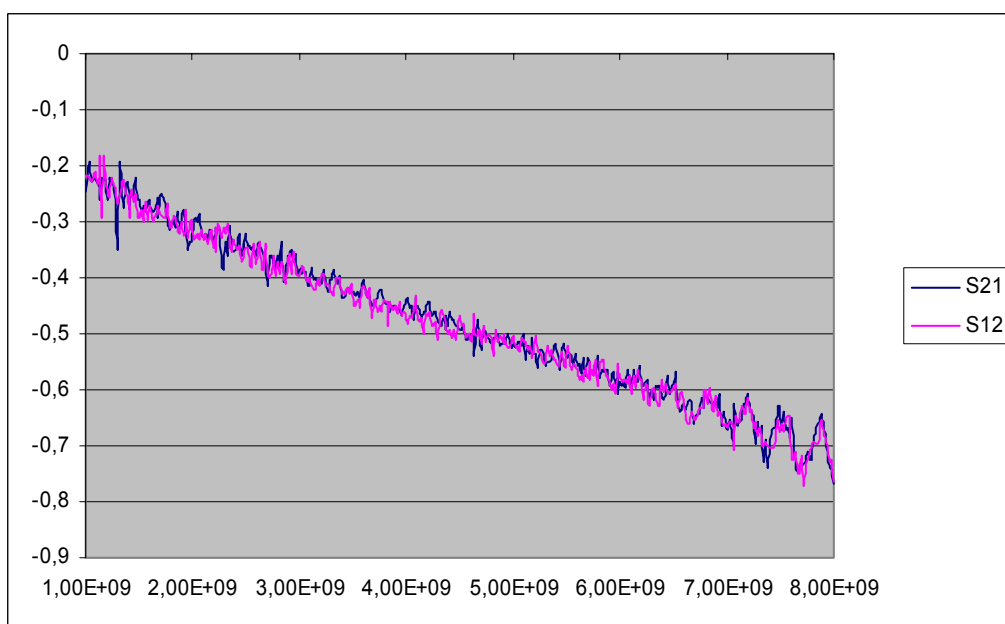
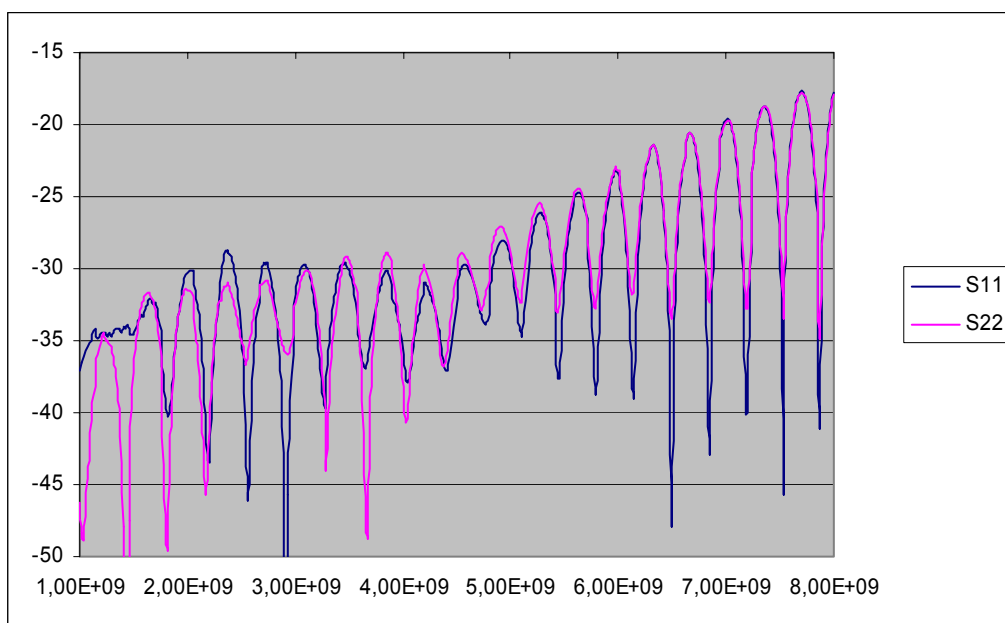
2.1.3 Cableado interior de Radiofrecuencia.

- Parámetros del analizador vectorial de redes:

Rango de frecuencias	1-8 GHz
Puerto 1	-20dBm
Puerto 2	-20dBm
Average	ON
Calibración	C:\USER\CAL\C190607
	Transición SMA (f-f) en ambos puertos

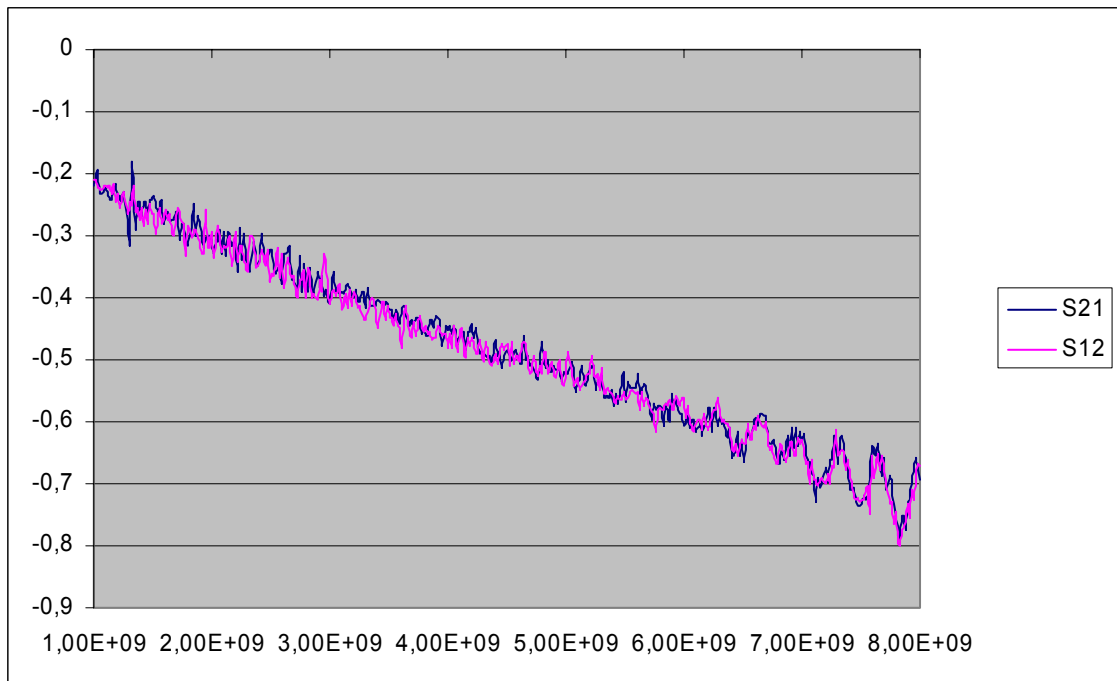
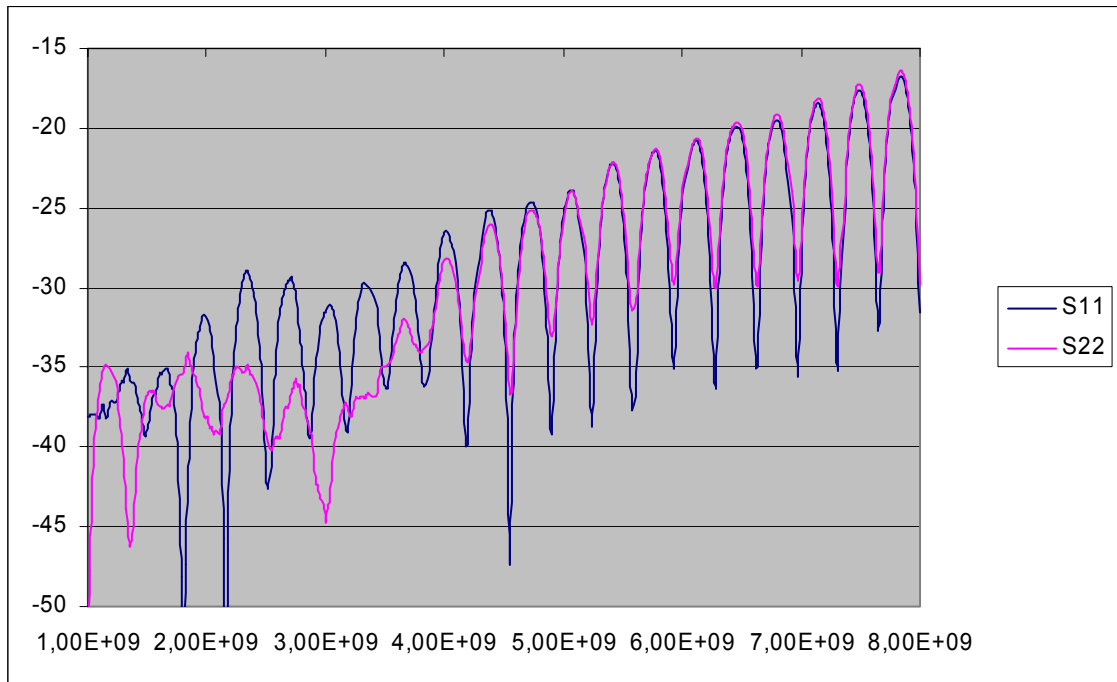
CABLES DE ENTRADA (UT-085-SP)

- S1:

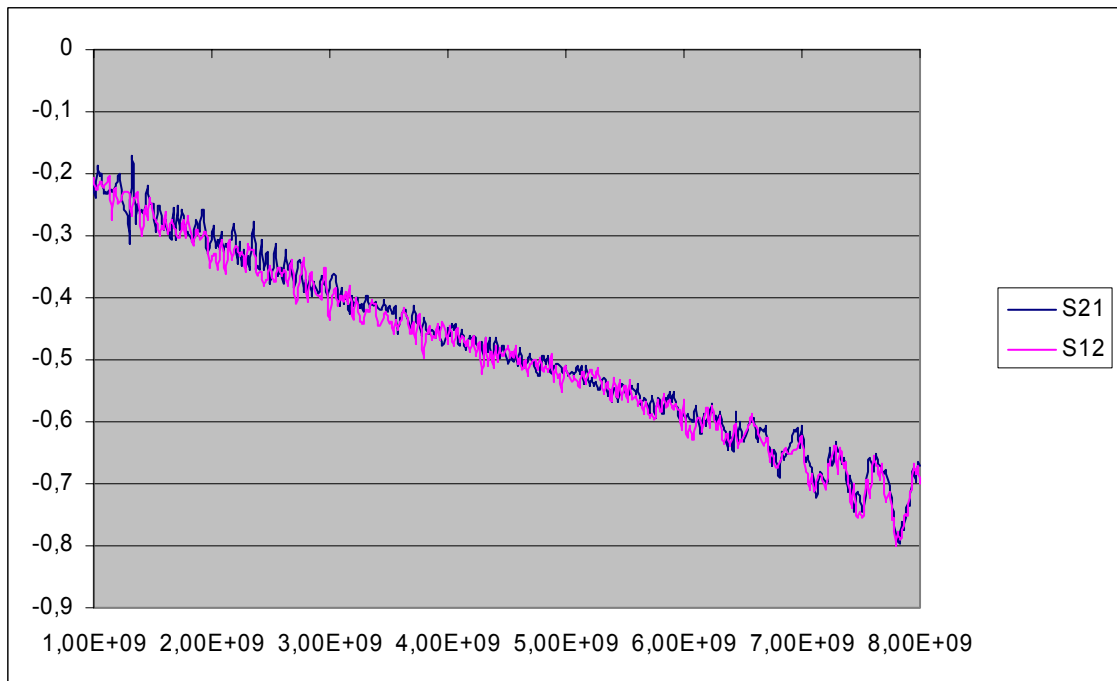
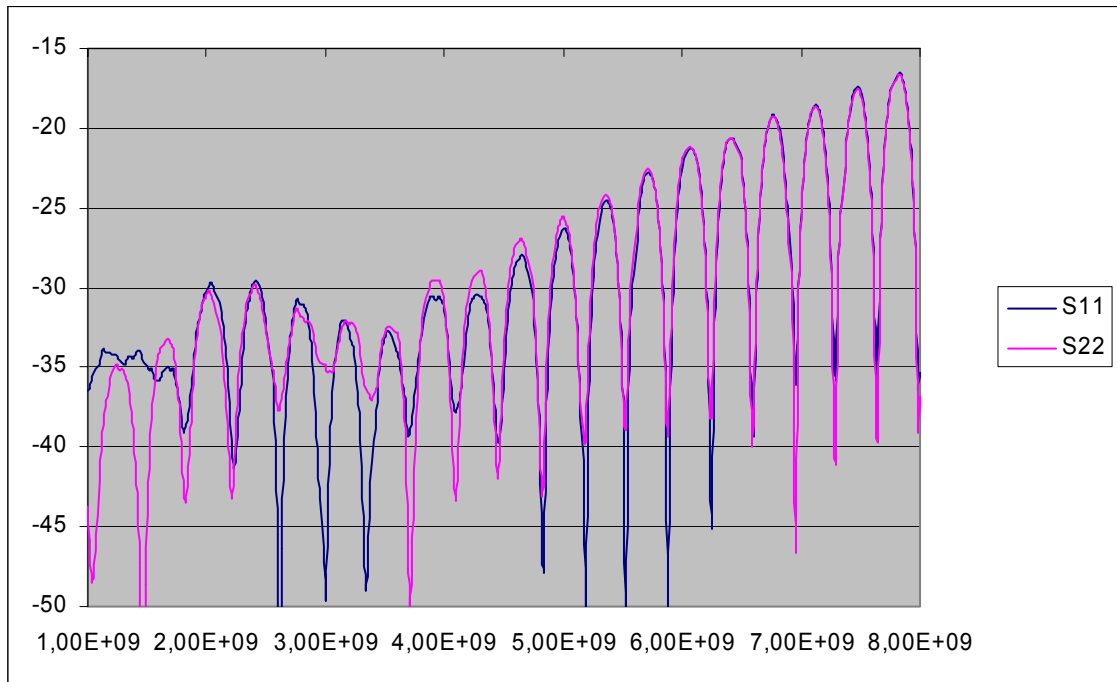


Criostato de los receptores S/C/CH de la antena ARIES del CAY

- S2:

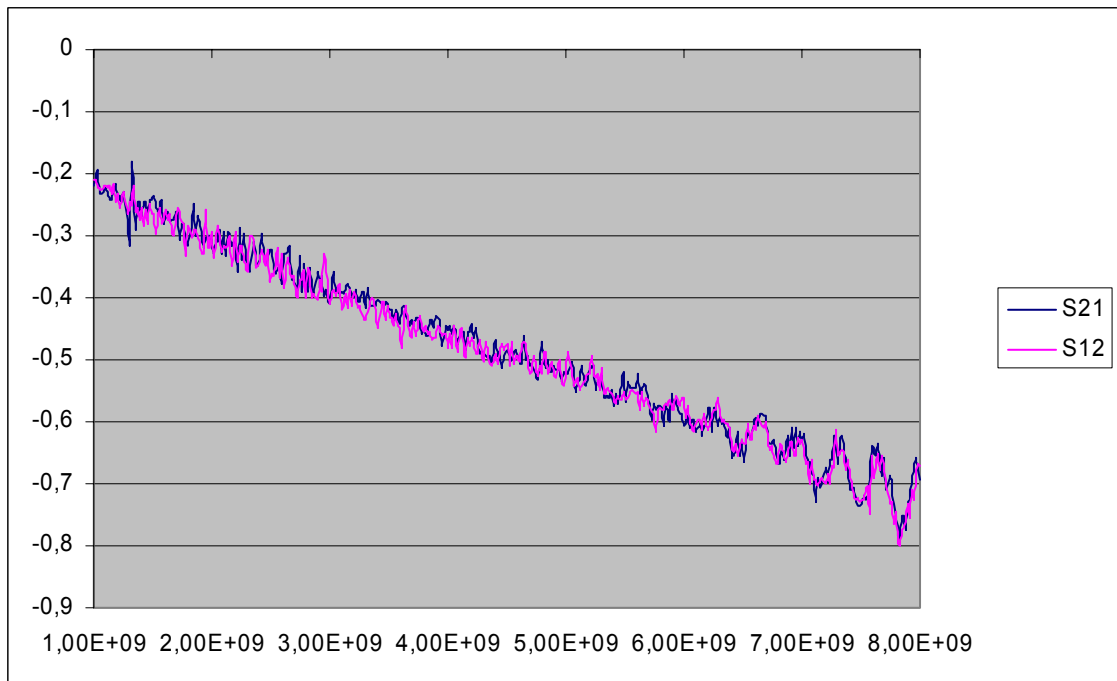
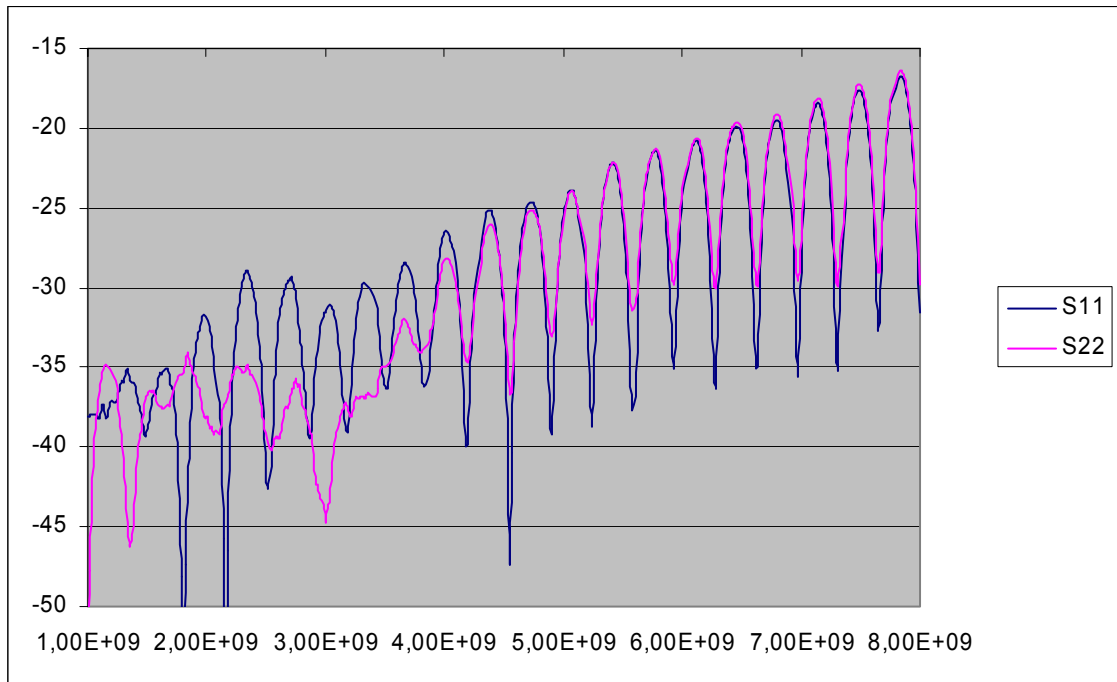


- CH1:



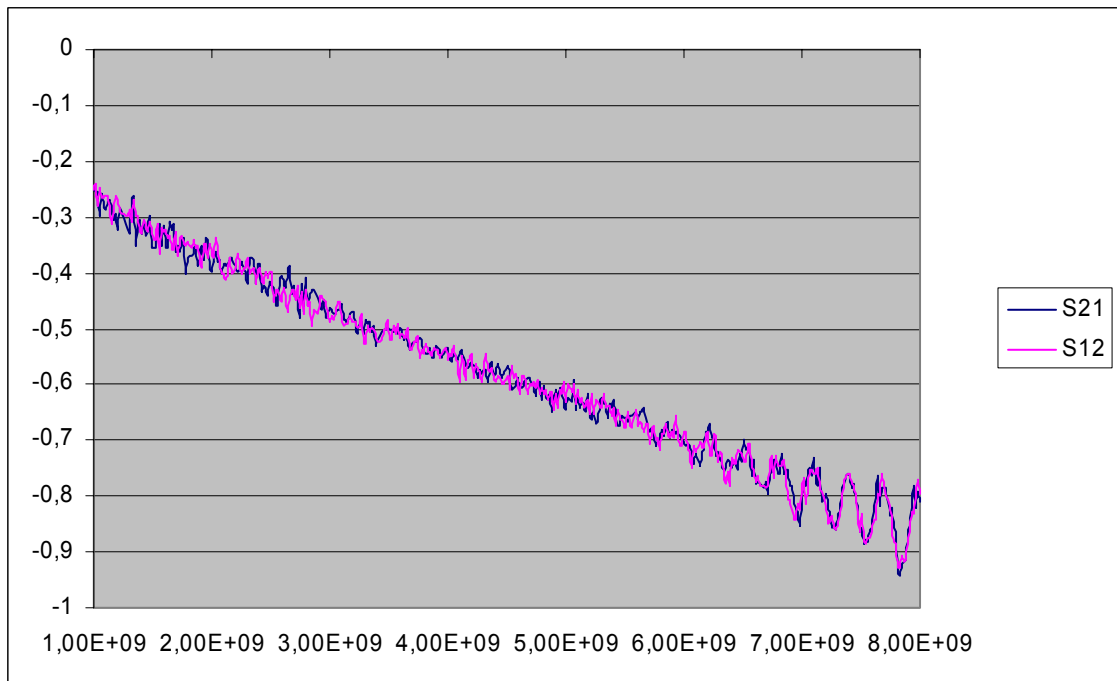
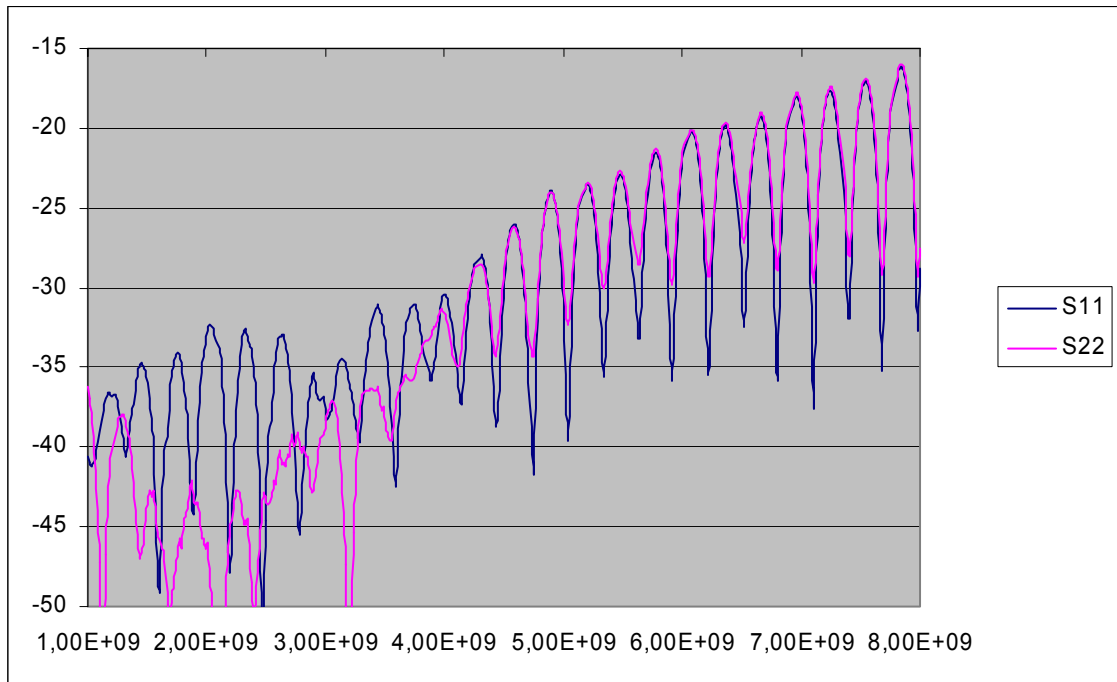
Criostato de los receptores S/C/CH de la antena ARIES del CAY

- CH2:



Criostato de los receptores S/C/CH de la antena ARIES del CAY

- C1:



- C2:

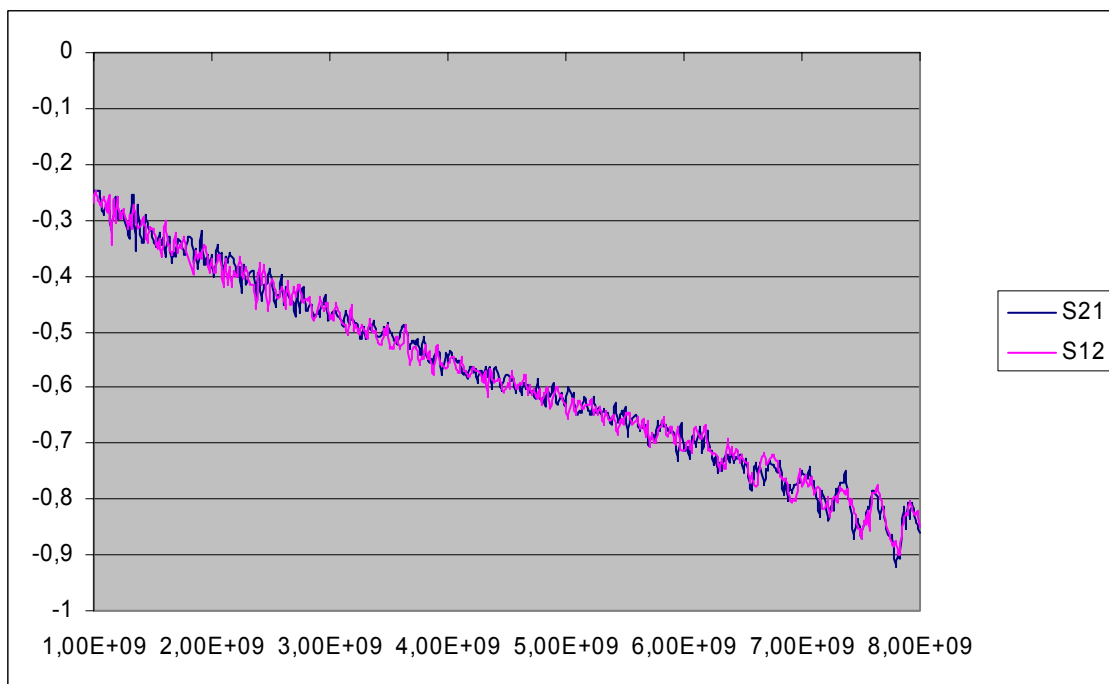
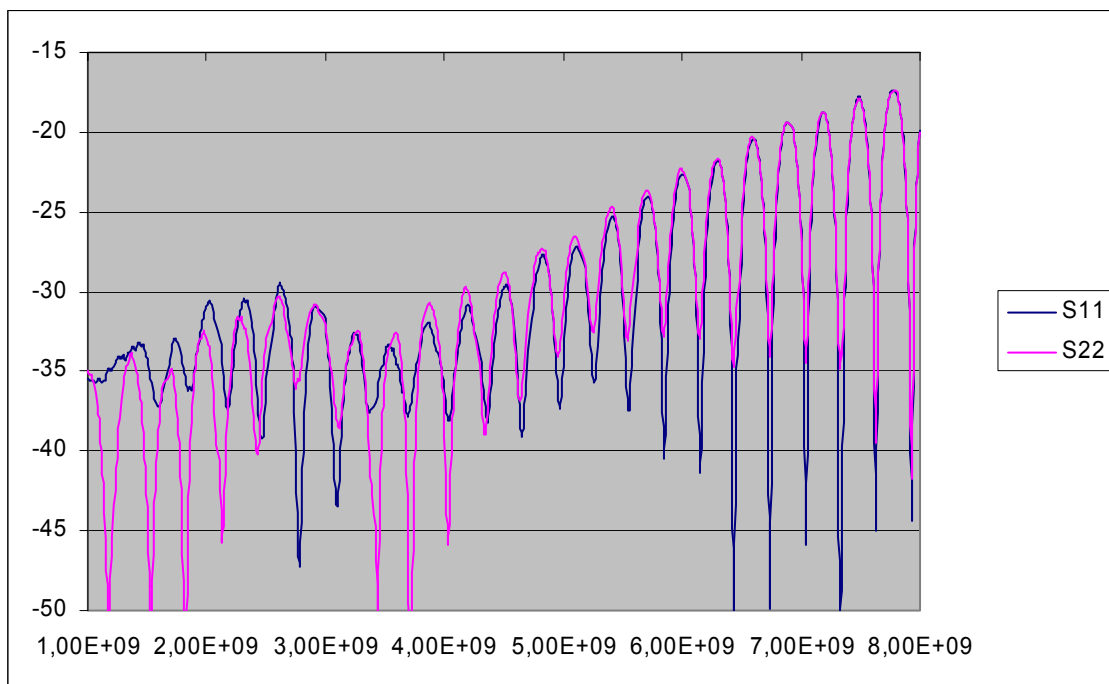
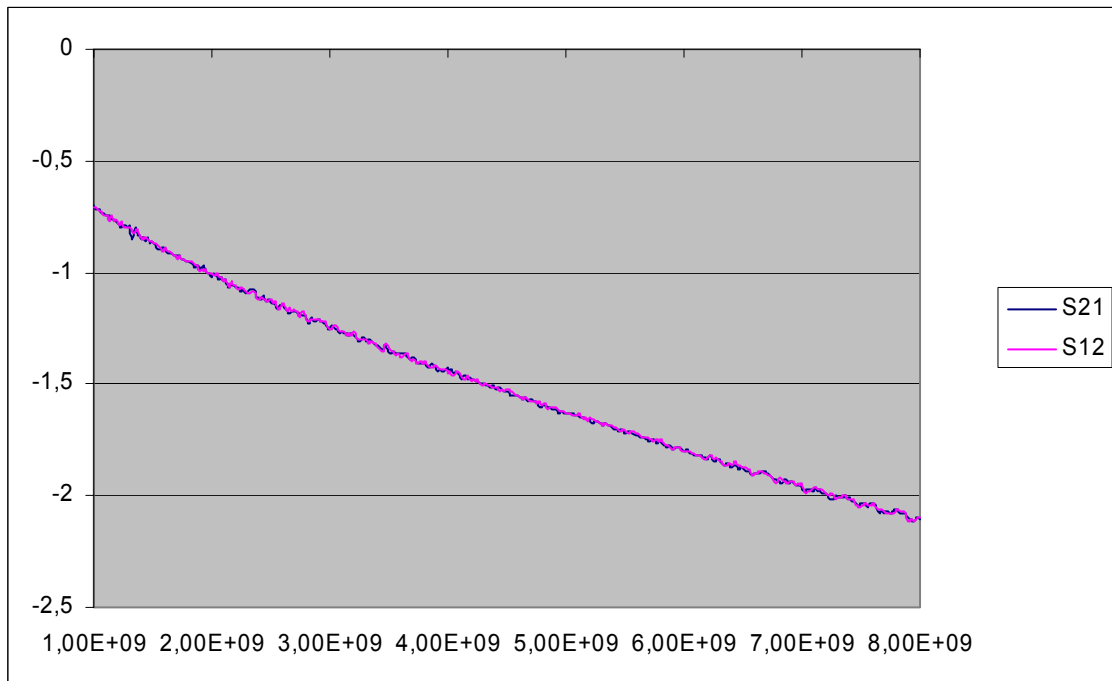
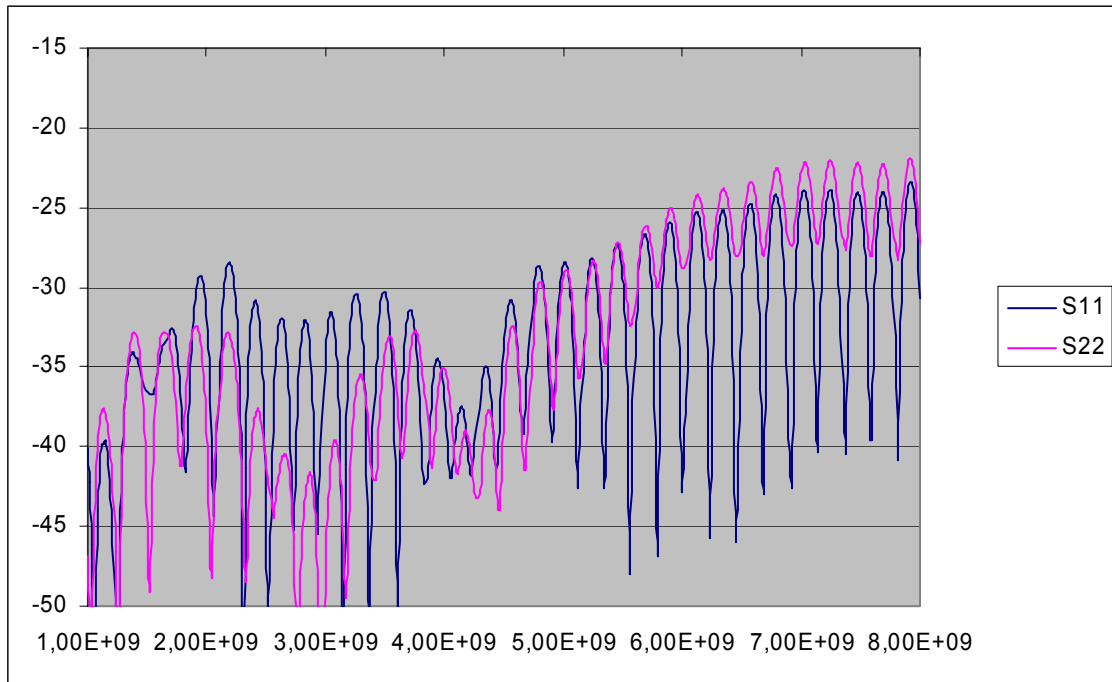


Tabla resumen de los cables de entrada

NOMBRE	Longitud (mm)	F ₁ (GHz)	F ₂ (GHz)	F ₃ (GHz)	F ₄ (GHz)	At(dB) ₁₋₂	At(dB) ₃₋₄
S1	310	2.2	2.37			0.34	
S2	320	2.2	2.37			0.34	
CH1	300	3.22	3.39			0.4	
CH2	320	3.22	3.39			0.4	
C1	360	4.56	5.06	5.9	6.9	0.6	0.68-0.78
C2	350	4.56	5.06	5.9	6.9	0.61	0.67-0.78

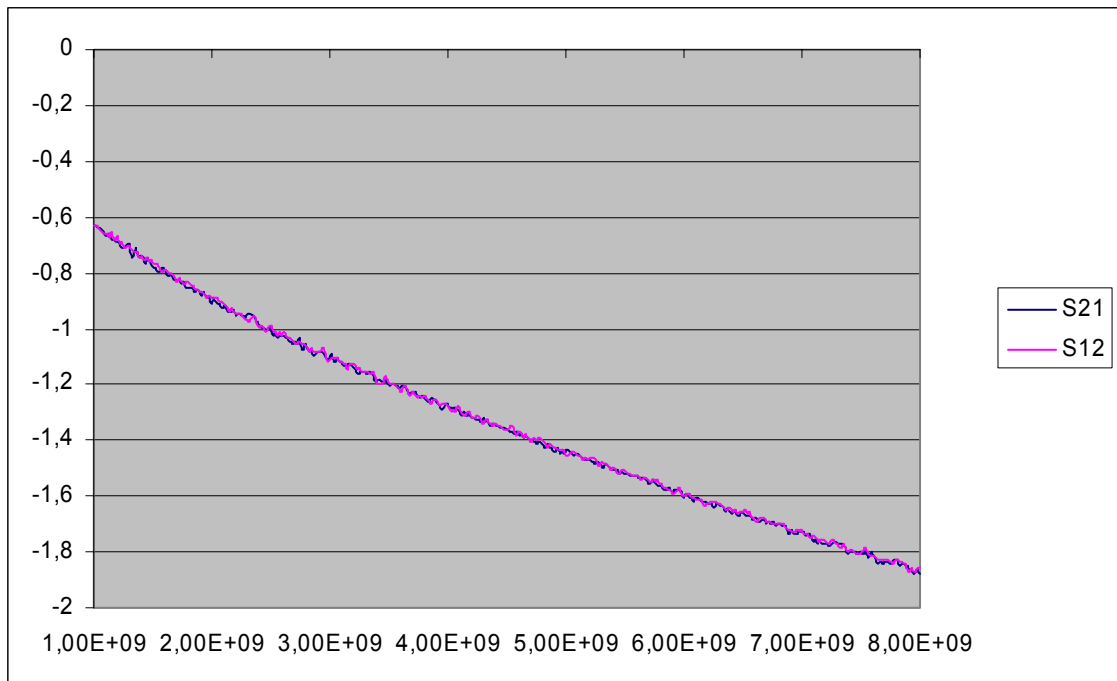
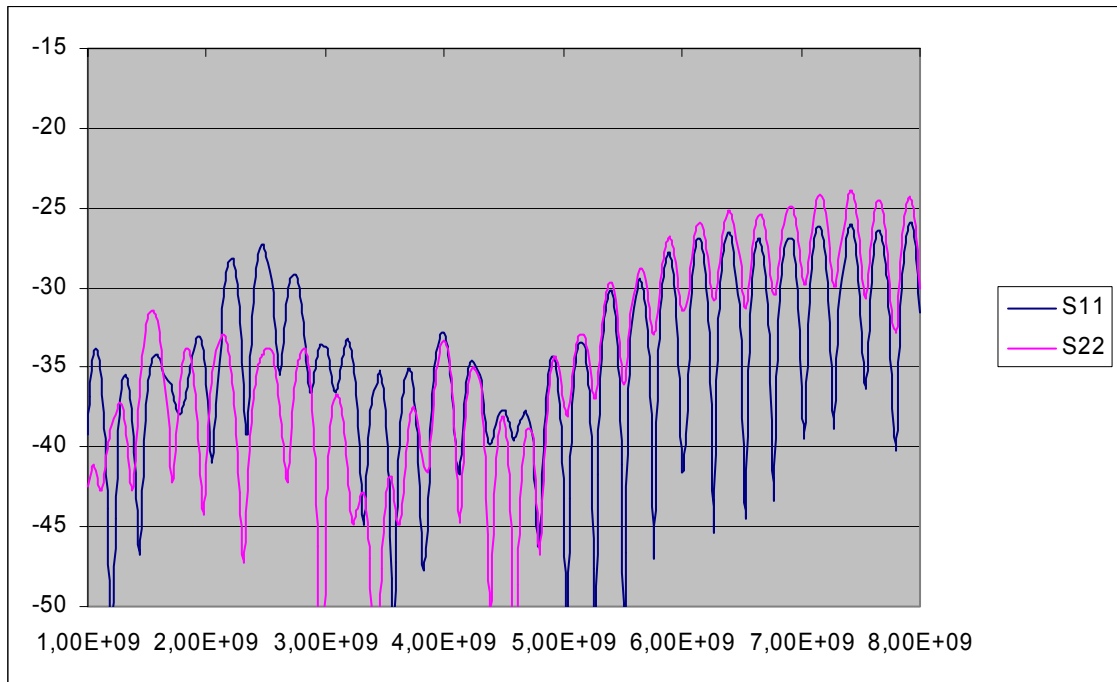
CABLES DE SALIDA (UT-085-SS)

- S1:

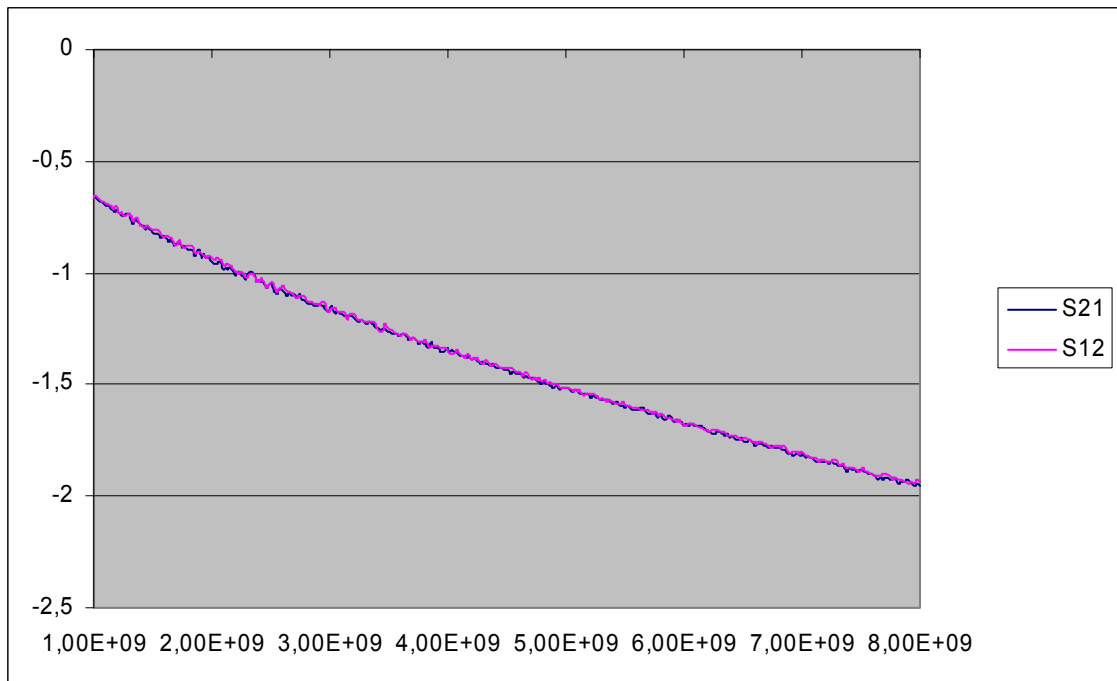
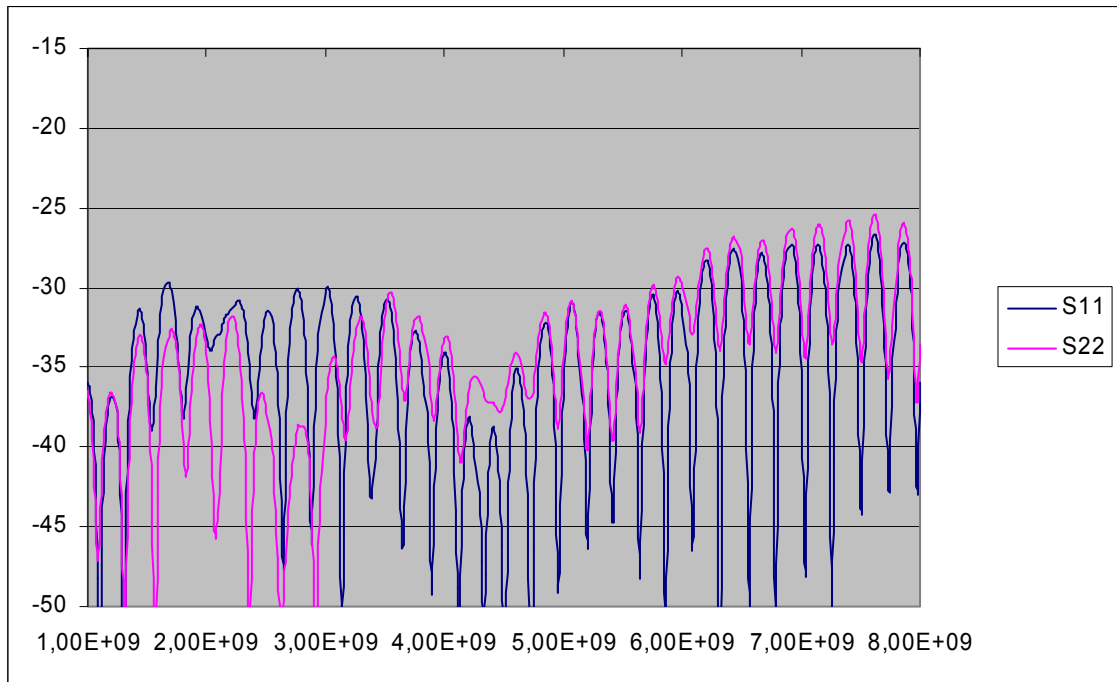


Criostato de los receptores S/C/CH de la antena ARIES del CAY

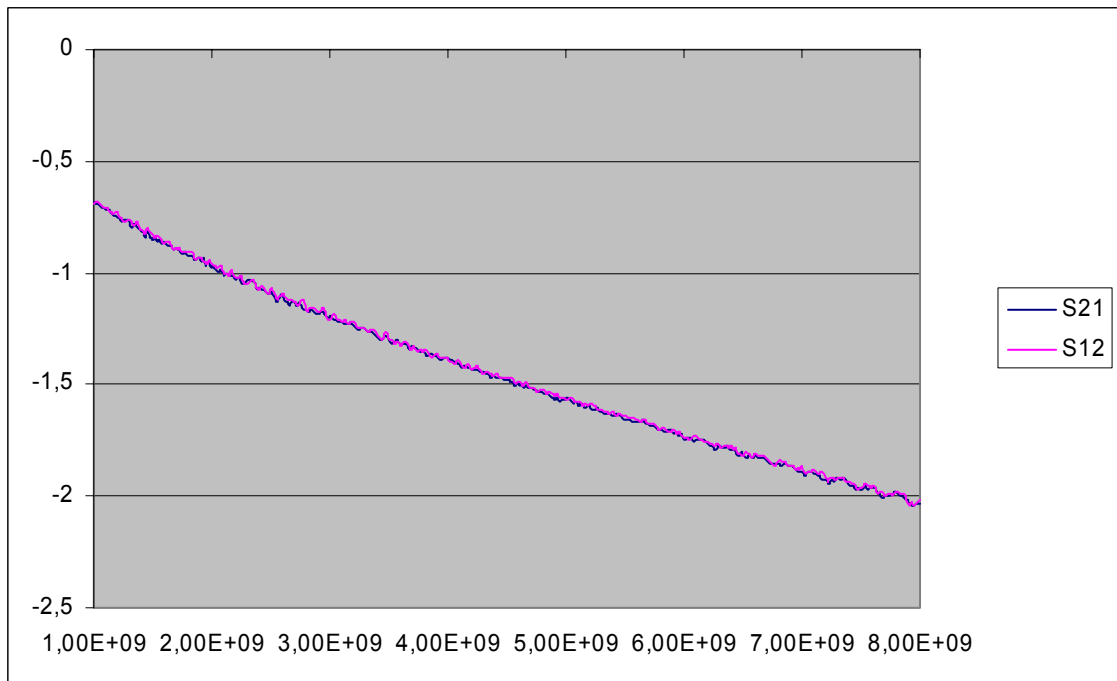
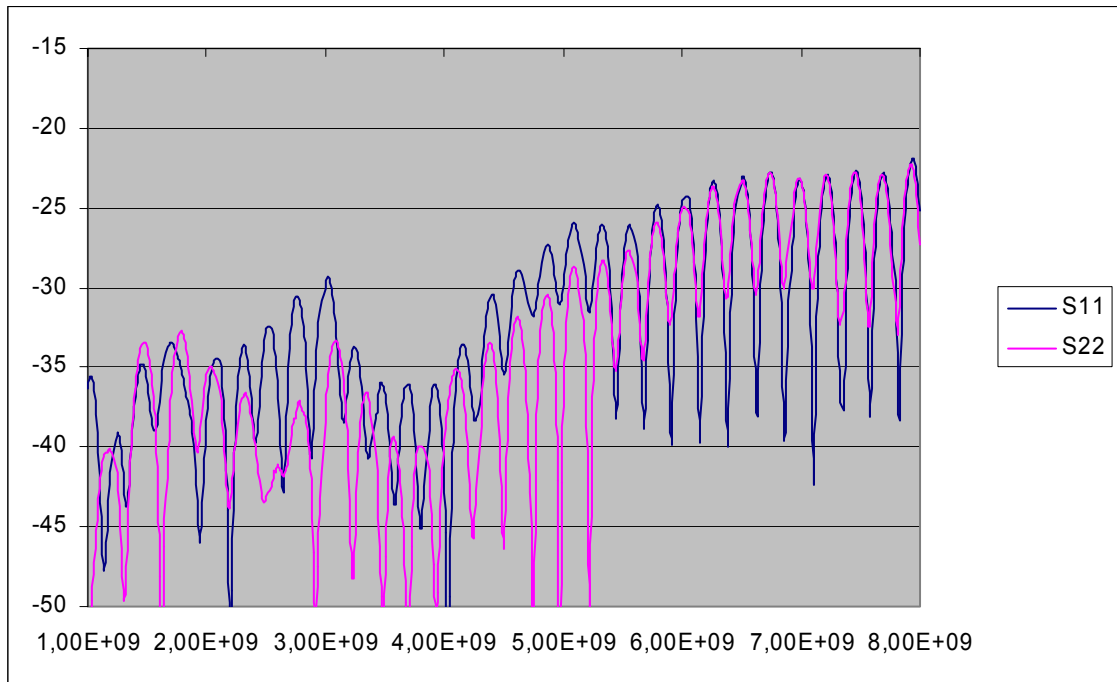
- S2:



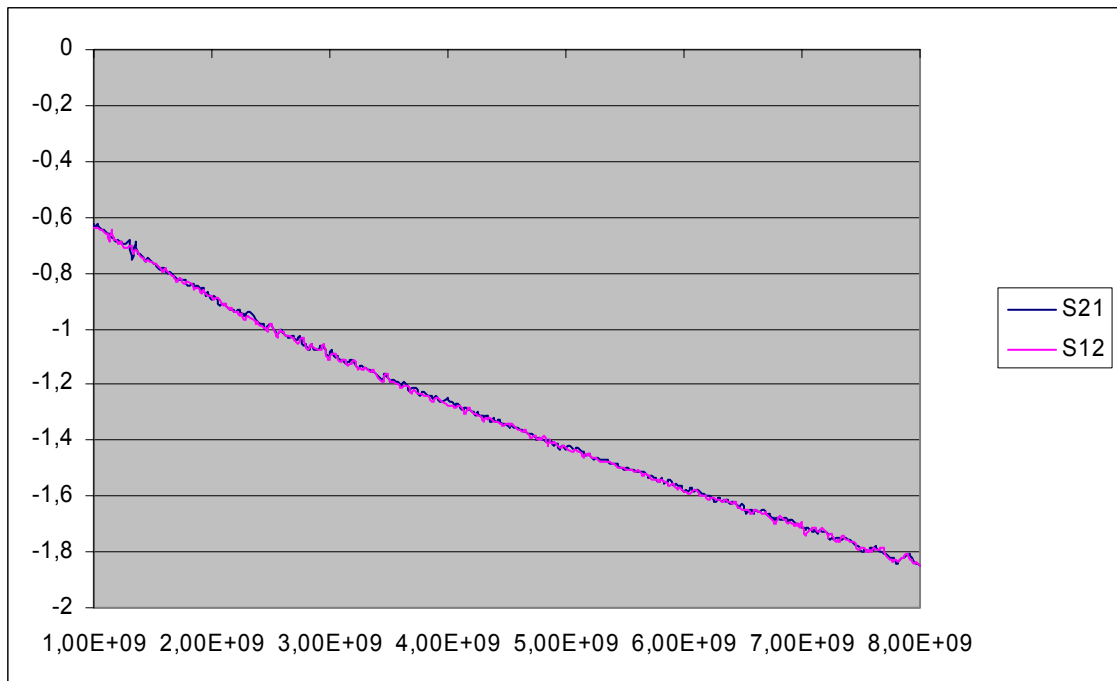
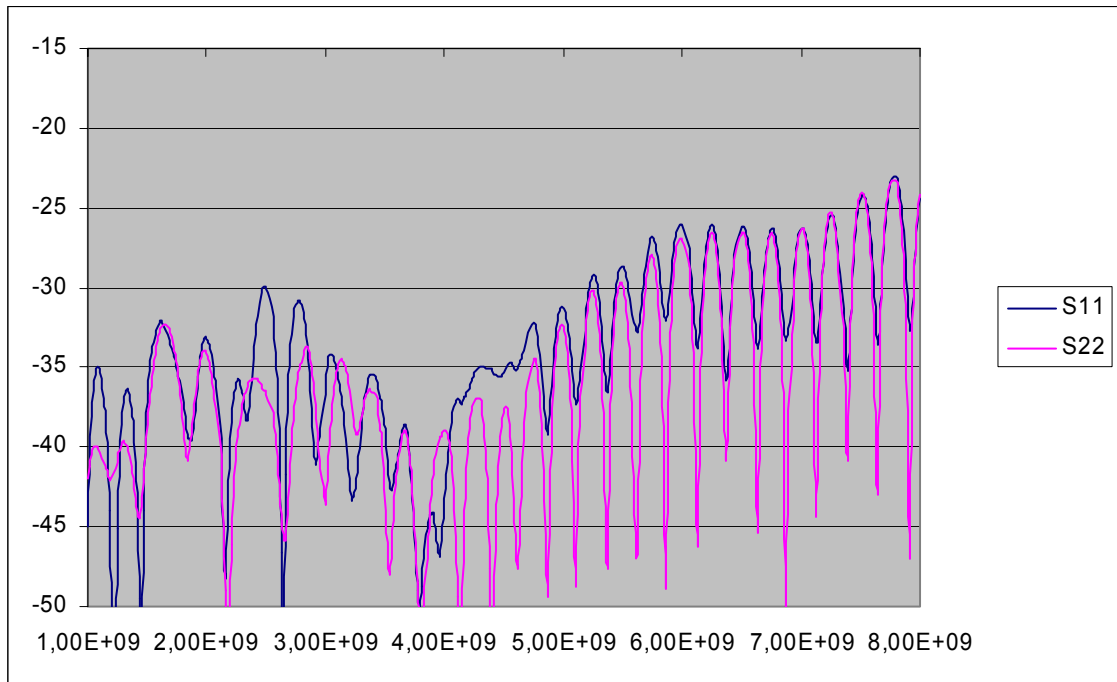
- CH1:



- CH2:

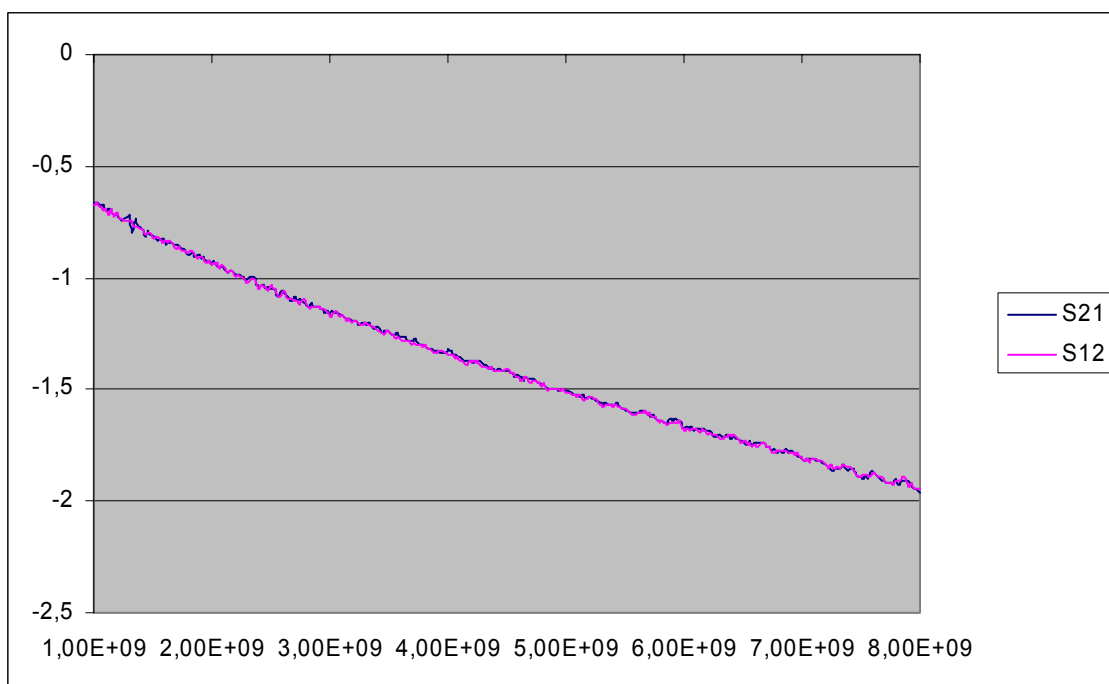
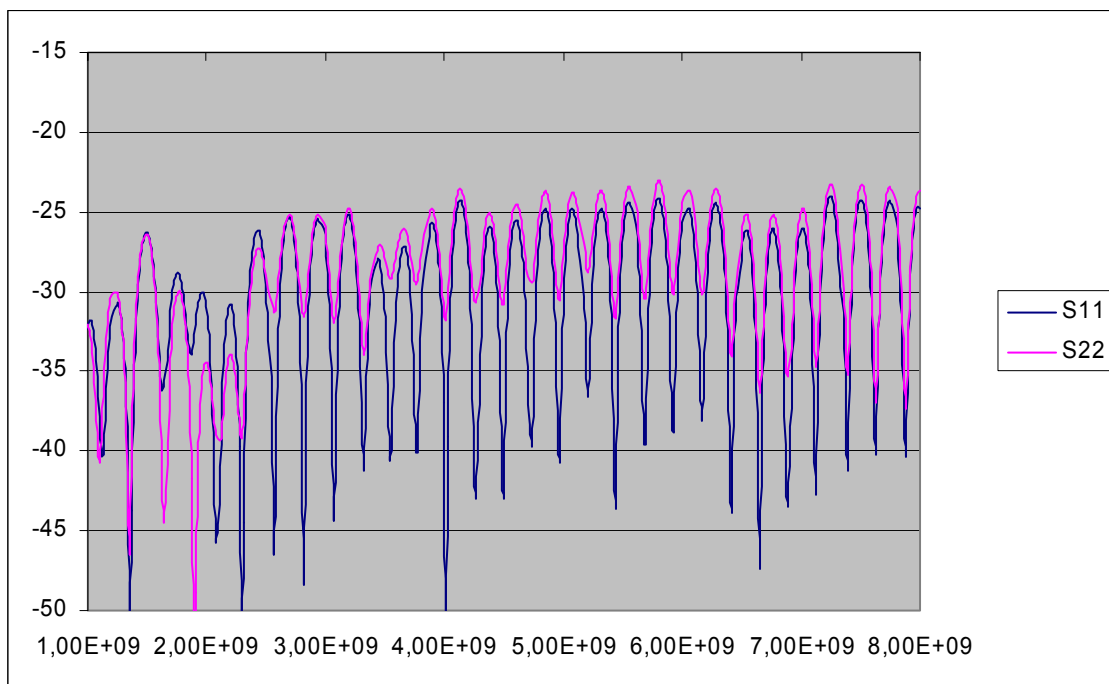


- C1:



Criostato de los receptores S/C/CH de la antena ARIES del CAY

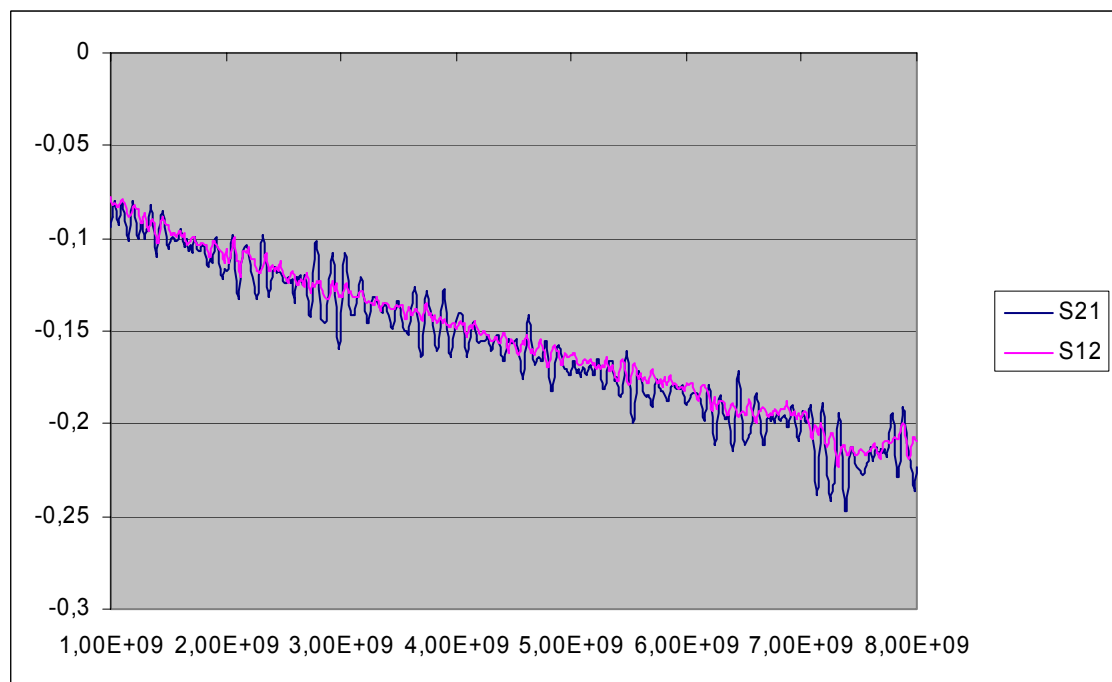
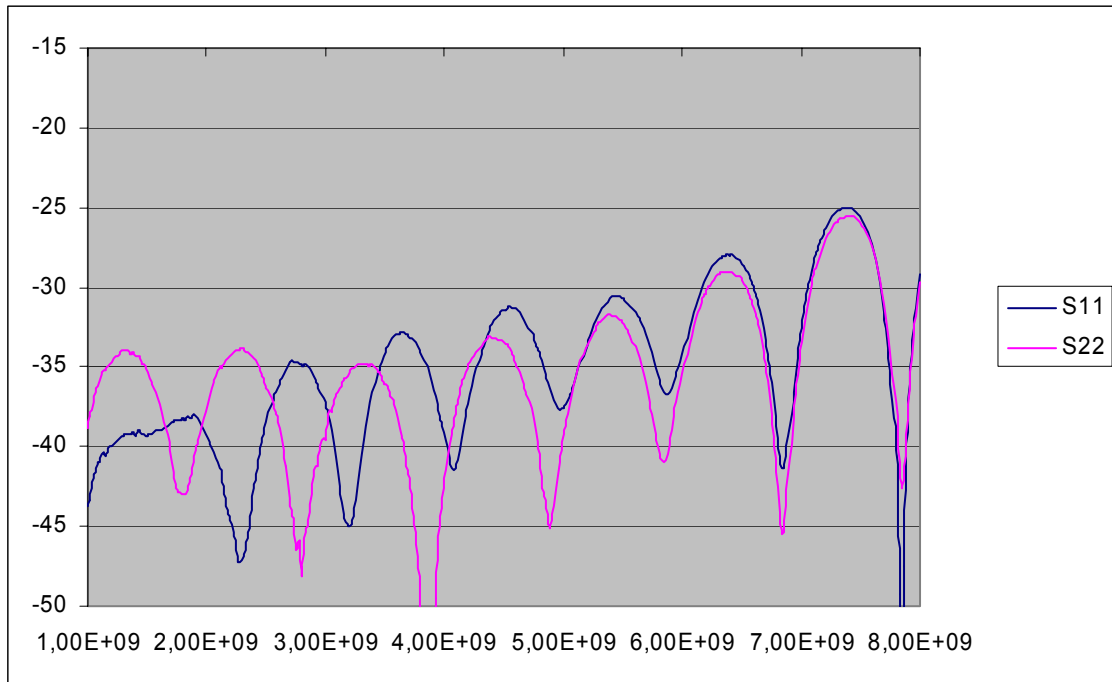
- C2:



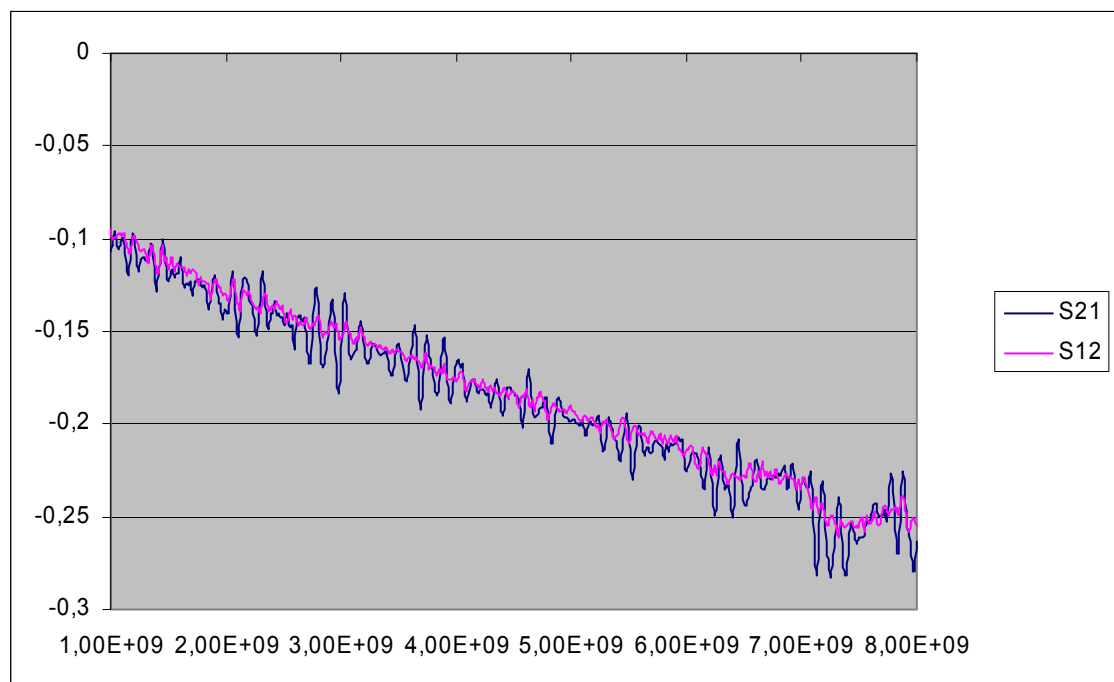
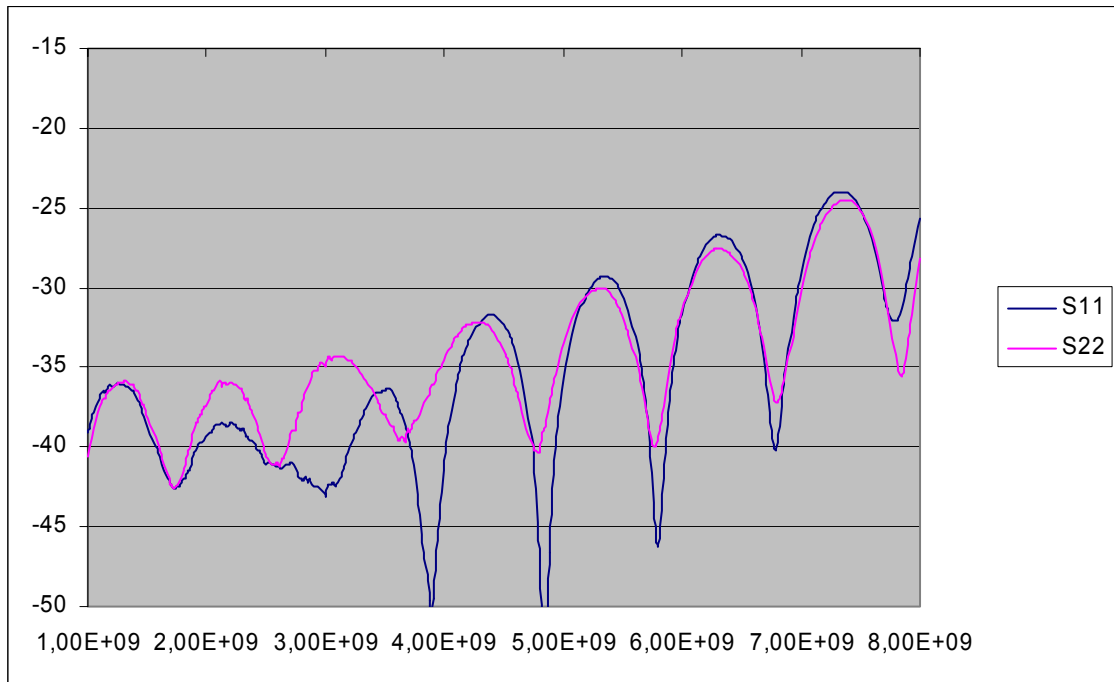
NOMBRE	Longitud (mm)	F ₁ (GHz)	F ₂ (GHz)	F ₃ (GHz)	F ₄ (GHz)	At(dB) ₁₋₂	At(dB) ₃₋₄
S1	480	2.2	2.37			1.1	
S2	430	2.2	2.37			0.95	
CH1	460	3.22	3.39			1.2	
CH2	460	3.22	3.39			1.2	
C1	410	4.56	5.06	5.9	6.9	1.4	1.5-1.7
C2	430	4.56	5.06	5.9	6.9	1.4	1.6-1.8

CABLES DE ENTRADA ENTRE AISLADOR Y LNA EN BANDA C(UT-141-SP)

- C1:



- C2:



2.2 Piezas de interconexión entre las distintas etapas.

Con el objetivo de que el desmontaje del criostato sea más sencillo cuando quiera cambiarse la cabeza refrigeradora, se han diseñado unas piezas de **PVC** que conectan la etapa fría con la etapa intermedia y la etapa intermedia con la etapa caliente.

Las características más importantes del material empleado se indican en la siguiente tabla.

Nombre	PVC (PolyVinyl Chloride) Polímero termoplástico
Densidad	1380 Kg/m ³
Temperatura de fusión	212°C
Coefficiente de transferencia de calor	0.16W/(m*K)
Coefficiente de expansión lineal	8*10 ⁻⁵ /K
Outgassing	9*10 ⁻⁷ torr liters/(cm ² *sg)

En las siguientes figuras se muestra el diseño de las piezas.

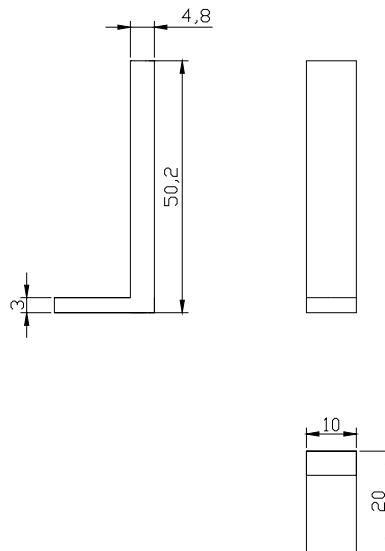


figura 18: Piezas de interconexión entre la etapa fría y la intermedia

Criostato de los receptores S/C/CH de la antena ARIES del CAY

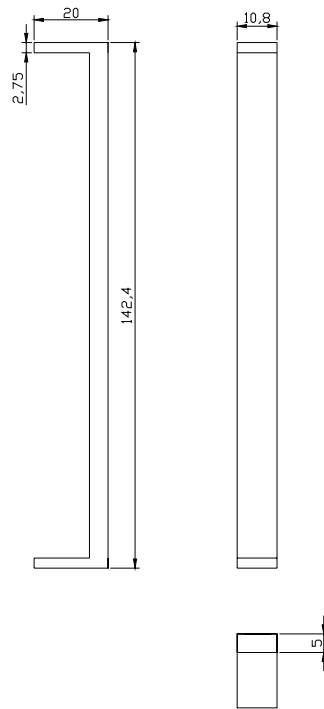


figura 19: Piezas de interconexión entre la etapa intermedia y la caliente

El cálculo de la carga térmica por conducción en sólidos se realiza en el capítulo correspondiente al estudio térmico del sistema.



figura 20: Piezas de PVC que interconectan las etapas caliente, intermedia y fría.

2.3 Etapa exterior (vacuum case).

Se diferencian tres partes: el prisma octogonal exterior, la tapa superior y la tapa inferior.

El prisma octogonal exterior, ha sido hecho en acero inoxidable AISI-316. Consta de tres piezas, dos bridas y el prisma, 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 325mm(\varnothing_{ext}), 241mm(\varnothing_{int}) x 15 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 prisma octogonal 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 450mm de largo y 295mm de diámetro exterior.

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 379 mm. 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 tres salidas para vacío, una para bombeo y otras dos para medida de la presión. Finalmente hay siete taladros de 16 mm de diámetro para los conectores herméticos DC multipolo de Fischer (6 para los amplificadores y otro para los sensores, resistencias...)

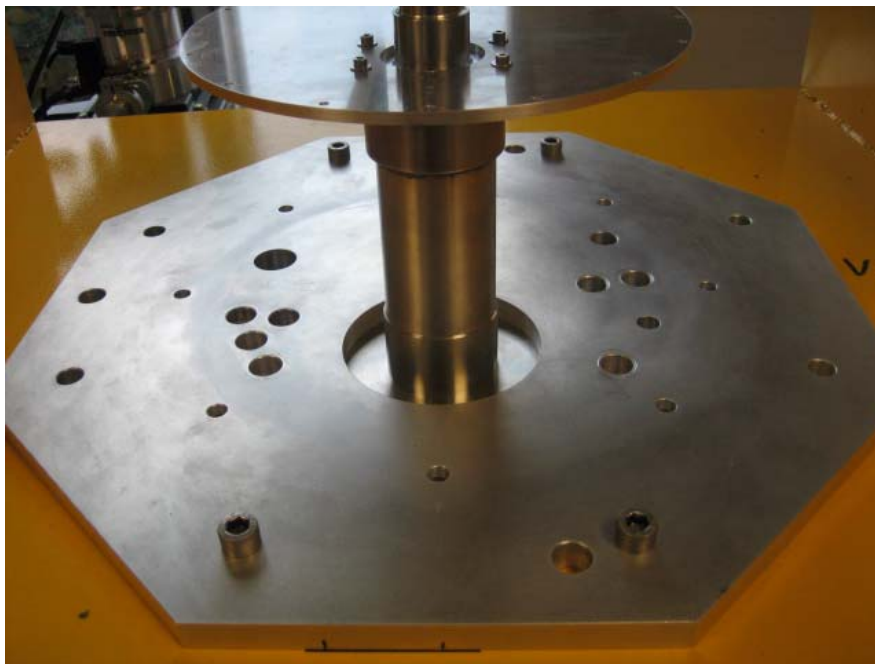


figura 21: tapa inferior del criostato

Criostato de los receptores S/C/CH de la antena ARIES del CAY

En las paredes del prisma octogonal se encuentran situadas las salidas y entradas al criostato mediante conectores SMA. El criostato alberga los amplificadores para tres bandas de trabajo (S, C y CH) y para dos polarizaciones. En total se dispone de 12 conectores SMA (6 de entrada al criostato y 6 de salida).

En la siguiente figura se muestra su disposición.

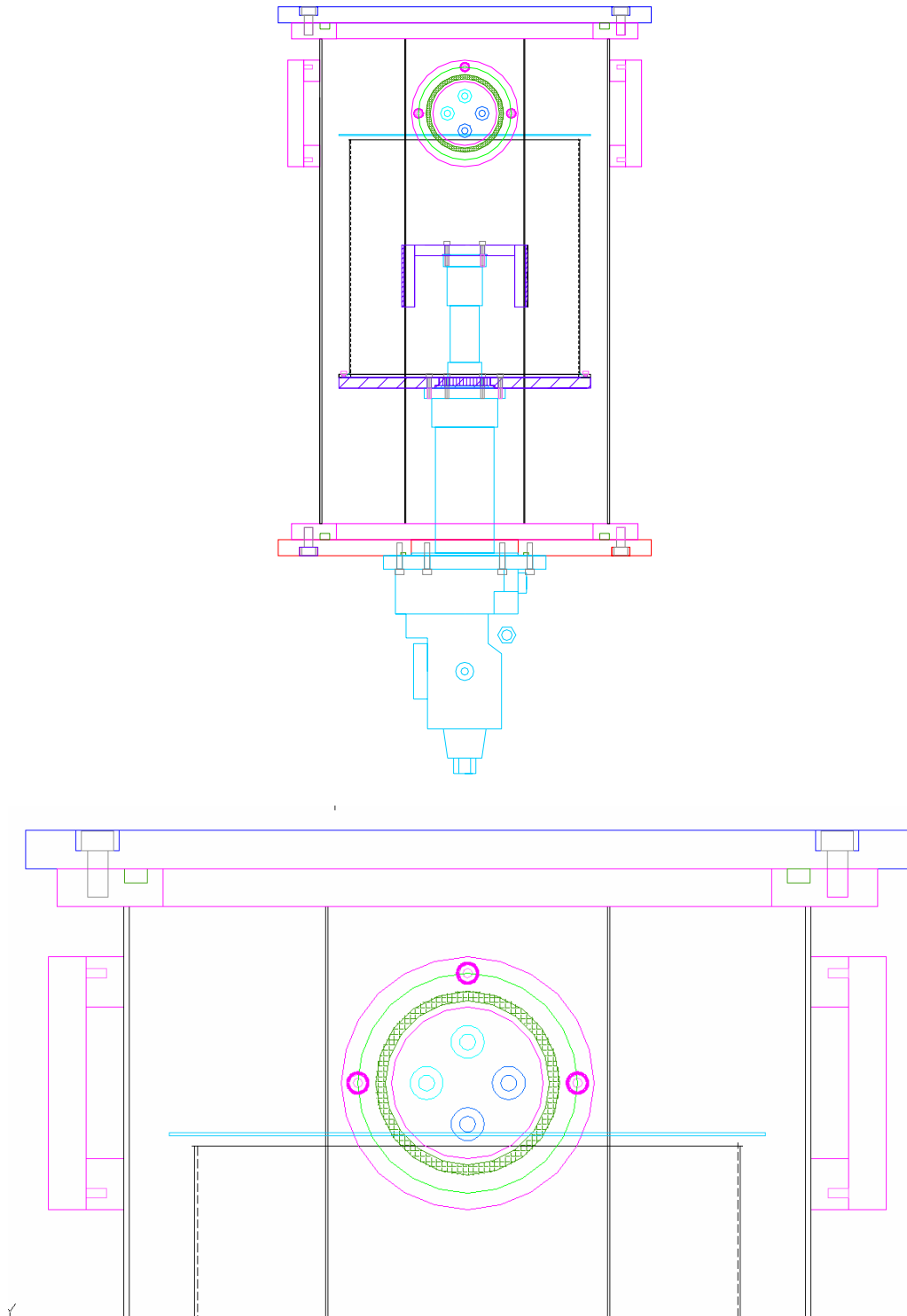


figura 22: Juntas de entrada y salida al criostato

Criostato de los receptores S/C/CH de la antena ARIES del CAY

Como puede apreciarse, las bridas que contienen los conectores SMA se encuentran situadas en tres de las caras del prisma octogonal exterior. Cada una de ellas contiene 4 conectores SMA (entrada y salida para dos polarizaciones).



figura 23: Vista frontal del vacuum case

Cada una de las tres juntas de vacío corresponde a uno de los receptores (S-C-CH): centro (C), izquierda (S) y derecha (CH). Su diámetro es de 100mm y el espesor es de 15mm. Están elaboradas en duraluminio. Se atornillan al vacuum case mediante 8 tornillos roscados de métrica 5. La separación entre conectores SMA es de 30.4mm.

2.4 Etapa intermedia (radiation shield).

Se diferencian 6 partes: el cilindro, el superaislamiento, la placa intermedia, la bomba criogénica intermedia, la resistencia calefactora y el sensor de temperatura.

El cilindro intermedio está elaborado de acero inoxidable de 1mm de grosor, tiene una longitud total de 226 mm y el diámetro externo es de 236 mm (diámetro interior de 216mm). El cilindro se sujeta a la etapa intermedia mediante 16 tornillos M3.

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 contiene uno de los cilindros sobre los que se enrolla el cable criogénico de DC. Está construída en duraluminio con un espesor de 5mm y su diámetro es de 236mm.

La bomba criogénica es un recipiente de 30 x 15 x 48 mm relleno de zeolitas. La masa aproximada de éstas es de 9,5 gramos (valores en torno a los 10 gramos hacen que la vida operativa teórica de la bomba sea de 10 años, ref.12), 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 ohmios y 2.5W. El sensor de temperatura es un diodo D470-B1 de Lakeshore. La resistencia calefactora es de 25W y 100ohmios. Tanto el circuito de regeneración como el de calentamiento incluyen termostatos protectores de 40 ° ±3° C.

El cableado DC se realiza con cable criogénico de fósforo-bronce de Lakeshore Cryogenics, con aproximadamente 1500mm de longitud total.



figura 24: placa intermedia



figura 25:etapa intermedia

Tal y como se ha comentado con anterioridad, la etapa intermedia está elaborada de acero inoxidable, cuya conductividad térmica no es muy buena. Para solventar este problema y mejorar la conductividad térmica se ha optado por la siguiente solución:

- Se han elaborado 8 piezas formadas por una malla metálica estañada de 218 mm de longitud a la cual se han soldado en sus extremos unas piezas de cobre de 1mm de espesor cuyo diseño se muestra en la fotografía.

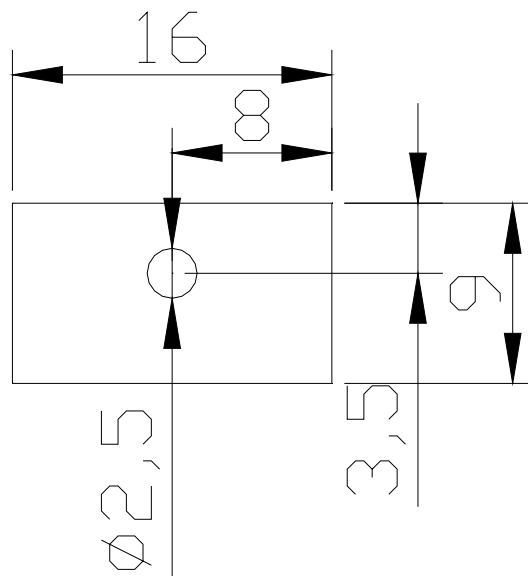


figura 26: Piezas de cobre empleadas en la etapa intermedia

- Estas piezas se atornillan de forma equidistante a la parte superior e inferior de la etapa intermedia.
- Posteriormente, mediante cinta adhesiva de aluminio, se consigue que el contacto térmico de la malla estañada con la superficie de la etapa intermedia sea lo mejor posible y que las mallas queden en contacto

Criostato de los receptores S/C/CH de la antena ARIES del CAY

con la superficie de acero inoxidable para facilitar después la instalación del superaislamiento.

En las siguientes fotografías aparece el aspecto final de la etapa intermedia antes de instalar sobre ella el super aislamiento (MLI).

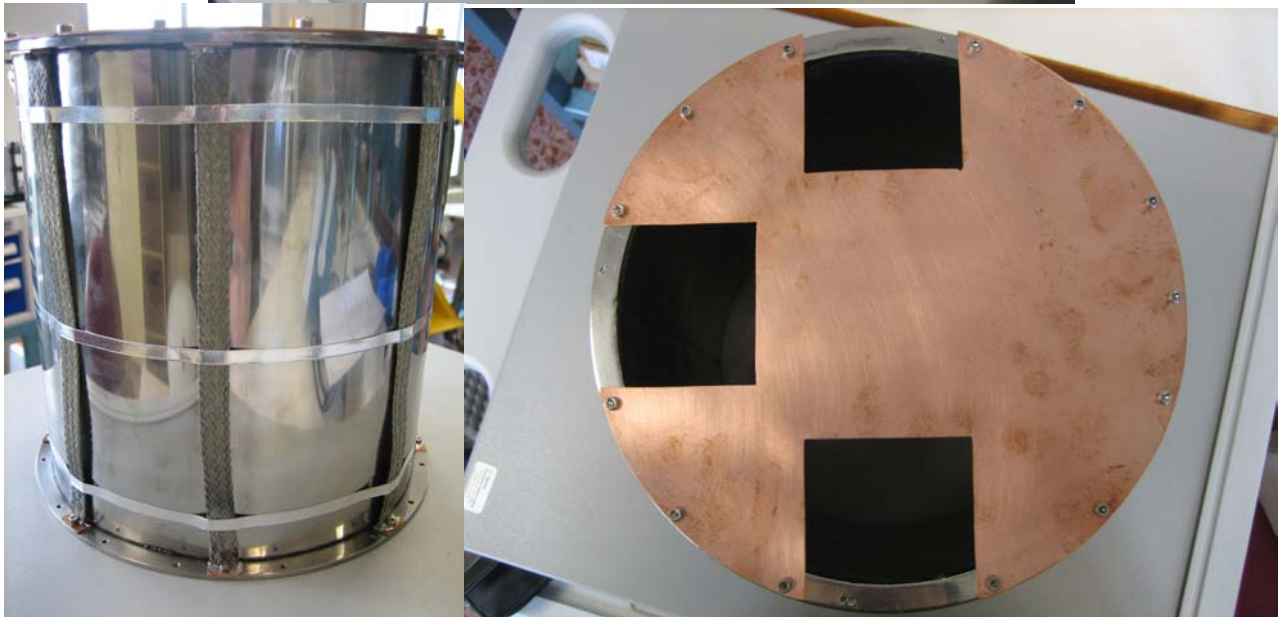


figura 27: Aspecto de la parte exterior de la etapa intermedia

Criostato de los receptores S/C/CH de la antena ARIES del CAY

En la siguiente fotografía se muestra el aspecto final tras instalar el superaislamiento. Se han colocado **8 capas de MLI**.



figura 28: superaislamiento en la etapa intermedia

2.5 Etapa fría (cold plate).

La etapa fría está constituida por la placa fría, la bomba criogénica fría, la resistencia calefactora, el sensor de temperatura, los termostatos para las resistencias calefactoras y regeneradoras de las zeolitas 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 aluminio de los amplificadores.

La bomba criogénica es un recipiente de 30 x 15 x 40 mm relleno de zeolitas. La masa aproximada de éstas es de 8 gramos, lo que equivale a unas 1800 bolas de zeolitas de 2 milímetros de diámetro. La superficie total de estas zeolitas es aproximadamente 230 cm². La bomba criogénica incluye una resistencia de regeneración de 100 ohmios y 2.5 Watios.

El sensor de temperatura es un diodo D470-B1 de Lakeshore. La resistencia calefactora es de 25 W y 100 ohmios. Tanto el circuito de regeneración como el de calentamiento incluyen termostatos protectores de 40 ° ± 3° C.

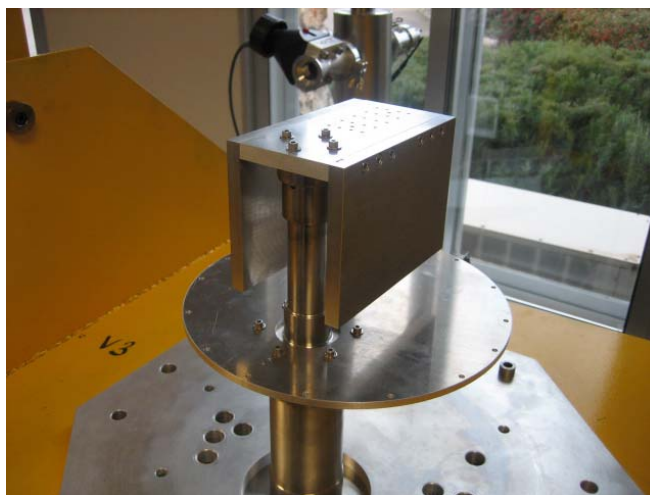


figura 29: placa fría

Las dimensiones de las placas de duraluminio sobre las que se situarán los amplificadores son (dimesiones de la placa fría):

- Laterales: 100x140 (espesor de 10mm)
- Superior: 64x140 (espesor de 10mm)

Sobre la placa superior se han diseñado dos soportes de duraluminio para colocar los amplificadores banda C (para más detalles consultar apartado siguiente).

En la siguiente figura se muestra el diseño básico de la etapa fría.

Criostato de los receptores S/C/CH de la antena ARIES del CAY

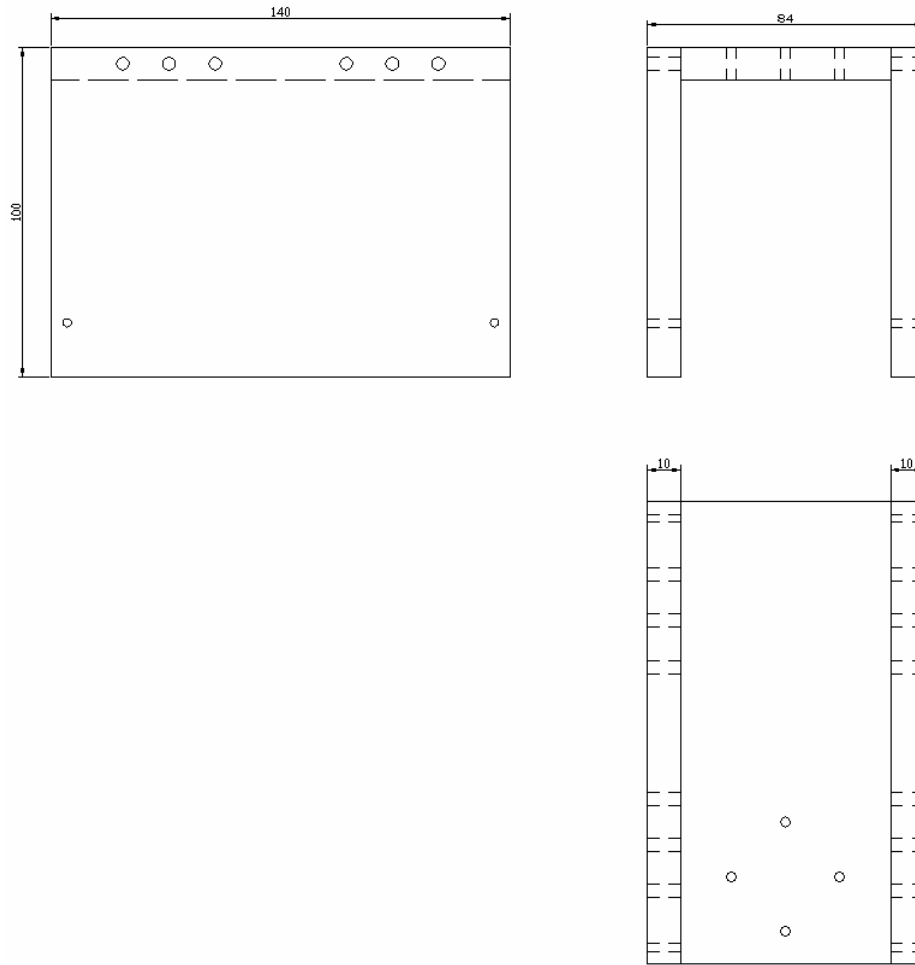


figura 30: diseño de la etapa fría

2.5.1 Instalación de los amplificadores.

Los números de serie de los amplificadores instalados son los siguientes:

- CH1-LCP: 8827-n03
- CH2-RCP: 8827-n08
- C1-LCP: YCA-2030 (aislador 120)
- C2-RCP: YCA-2032 (aislador 121)
- S1-LCP: TSA-1004
- S2-RCP: TSA-1002

2.5.1.1 Amplificadores banda C (4-8GHz).

Los amplificadores banda C están instalados en el soporte diseñado para tal efecto en la etapa fría del criostato. Se trata de dos amplificadores, cada uno de ellos relacionado con una de las polarizaciones del receptor.

En la siguiente figura se muestra el soporte diseñado para los amplificadores.

En el anexo correspondiente (A) pueden consultarse las especificaciones técnicas de estos amplificadores.

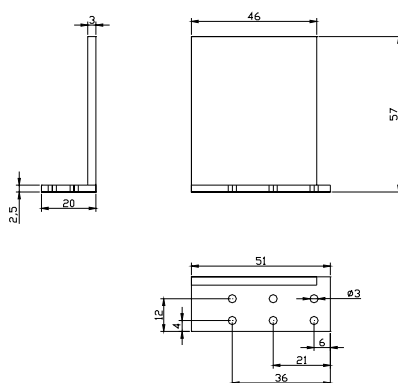


figura 31: piezas de soporte de los amplificadores banda C a la etapa fría del criostato

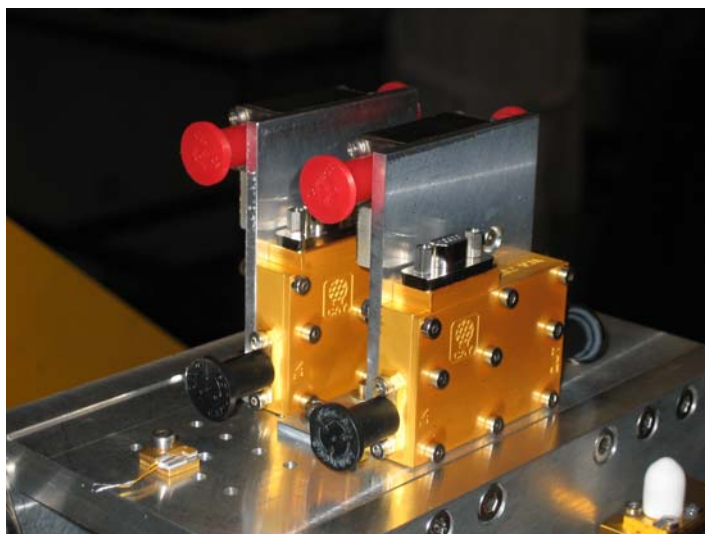


figura 32: Amplificadores banda C instalados en el criostato

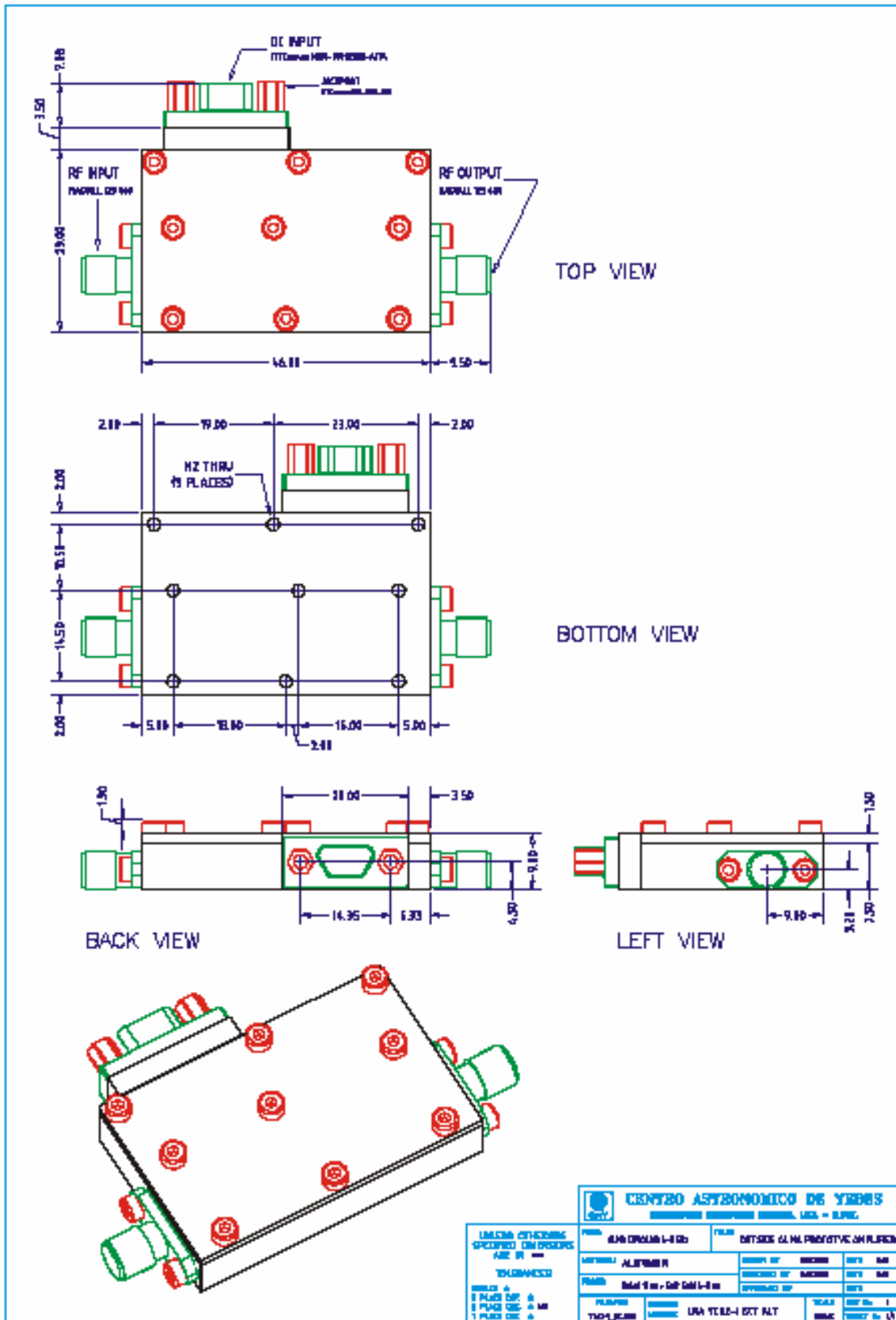


figura 33: dimensiones externas del amplificador banda C

Los amplificadores llevan asociado un aislador Pamtech a la entrada (Ref.11).

2.5.1.2 Amplificadores banda CH (2.4-4.8 GHz).

Los amplificadores banda CH están instalados en el soporte diseñado para tal efecto en la etapa fría del criostato. Se trata de dos amplificadores, cada uno de ellos relacionado con una de las polarizaciones del receptor.

En el anexo correspondiente (A) pueden consultarse las especificaciones técnicas de estos amplificadores.

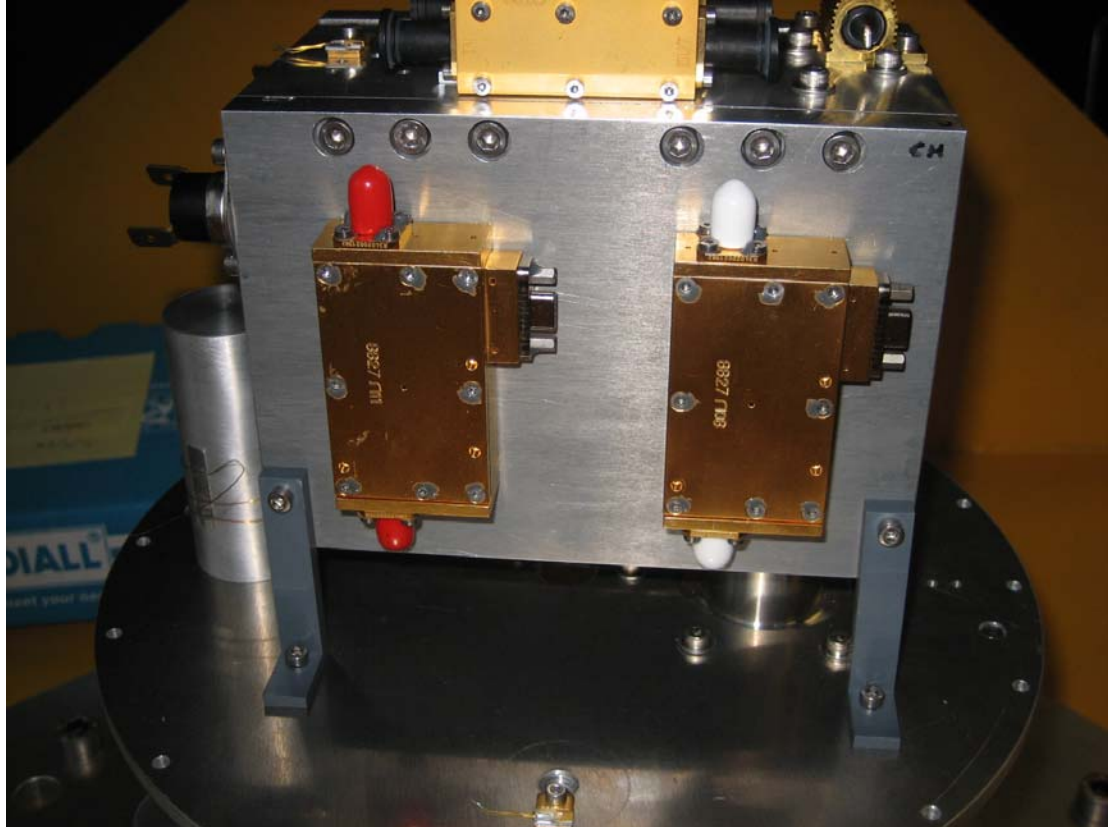


figura 34: amplificadores banda CH instalados en el criostato

2.5.1.3 Amplificadores banda S (2.2-2.37 GHz).

Los amplificadores banda S están instalados en el soporte diseñado para tal efecto en la etapa fría del criostato. Se trata de dos amplificadores, cada uno de ellos relacionado con una de las polarizaciones del receptor.

En el anexo correspondiente (A) pueden consultarse las especificaciones técnicas de estos amplificadores.

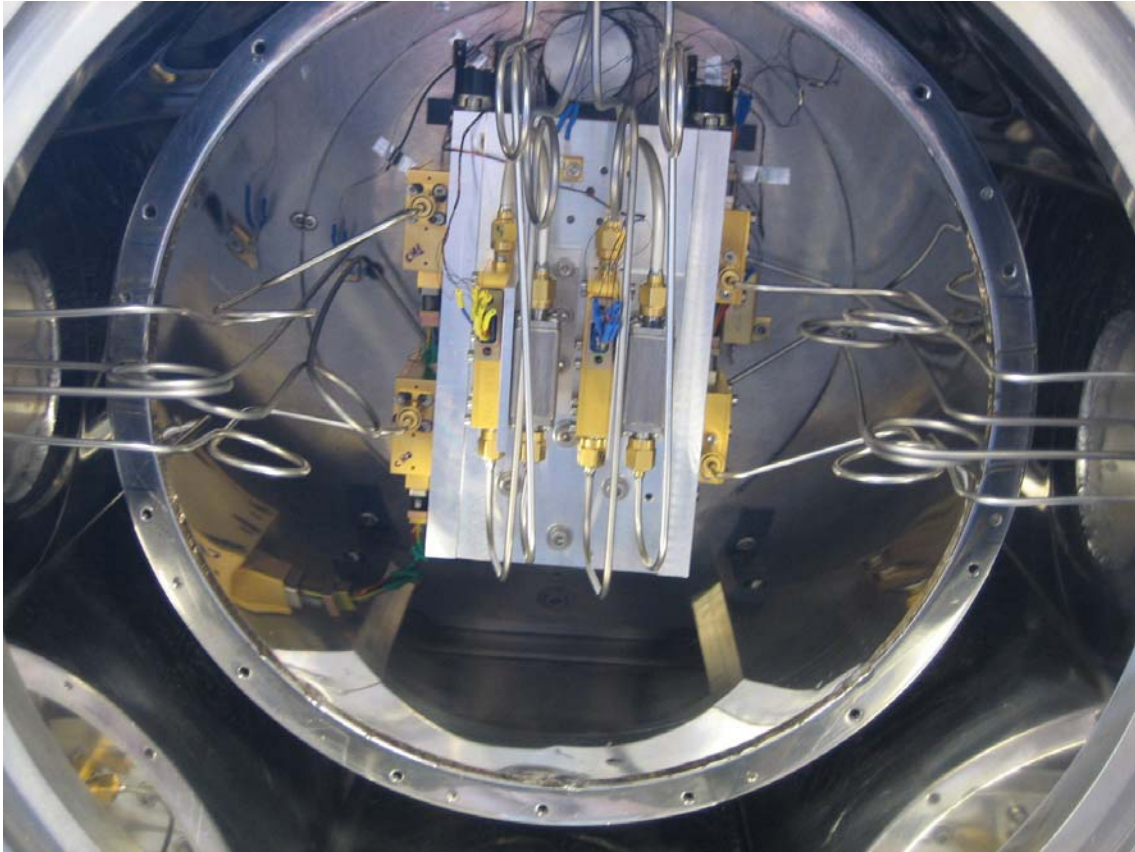


figura 35: amplificadores banda S instalados en el criostato. Se aprecian también los amplificadores de las banda C y CH y el cableado de Radiofrecuencia.

3 Sistemas criogénicos.

Las señales de interés radioastronómico son muy débiles y los receptores han de ser diseñados para poder detectarlas. Esta consideración implica necesariamente un diseño de receptores empleando una tecnología basada en sistemas criogénicos. Esto es, sistemas capaces de enfriar el receptor hasta temperaturas del orden de doscientos cincuenta grados bajo cero.

Las temperaturas criogénicas se consiguen en los criostatos. Estos constan de dos partes: el dewar y el refrigerador criogénico. Los componentes del sistema a enfriar se introducen en un recipiente en el que se hace el vacío, el dewar, con lo que se anula totalmente la convección, se reduce la conducción a niveles muy bajos y además elimina la condensación de gases sobre las superficies frías de los componentes electrónicos delicados.

Existen diferentes tipos de criostatos, siendo el refrigerador criogénico el que establece la diferencia. Cuando se emplean ciclos térmicos por bombeo de gases, Helio, se llaman criostatos de ciclo cerrado. Mientras que cuando se emplean fluidos criogénicos del tipo He líquido o Nitrógeno líquido se les denomina de ciclo abierto. Cuando se usan ambos métodos simultáneamente se habla de criostatos híbridos.

Los criostatos de ciclo cerrado se diseñan por lo general para trabajar a temperaturas de 20K, aunque bajo diseños especiales pueden conseguirse 4K. Los criostatos de ciclo abierto emplean nitrógeno líquido, 77K, que puede ser la etapa fría o la etapa intermedia de un criostato donde la etapa fría se consigue con He líquido, 4K. Los criostatos híbridos emplean una etapa intermedia realizada con tecnología de criostato de ciclo cerrado y una etapa fría de He líquido. En cualquiera de los tres casos puede existir aún una etapa ultra fría, para la cual se emplea He-3 y se consiguen temperaturas de 0.5K.

3.1 Vacío.

Degree of Vacuum	Pressure Range (Pa)
Low	$10^5 > P > 3.3 \times 10^3$
Medium	$3.3 \times 10^3 \geq P > 10^{-1}$
High	$10^{-1} \geq P > 10^{-4}$
Very high	$10^{-4} \geq P > 10^{-7}$
Ultrahigh	$10^{-7} \geq P > 10^{-10}$
Extreme ultrahigh	$10^{-10} > P$

figura 36: División de rangos de presión en sistemas de vacío. (ref9. pg4)



figura 37: Sistema de vacío de Alcatel empleado. Bomba rotatoria y turbomolecular

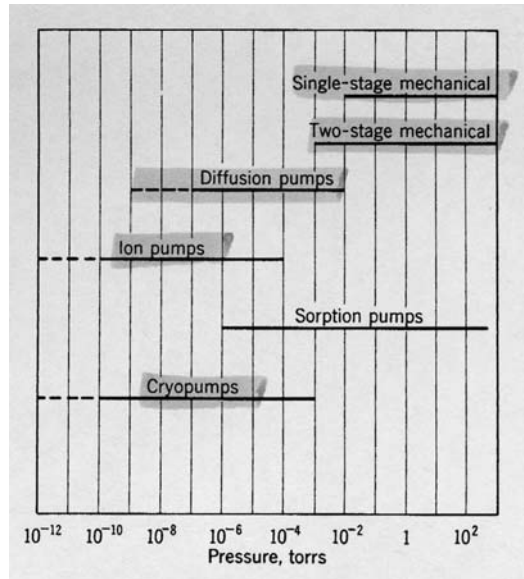


figura 38: Diferentes bombas de vacío y presiones conseguidas

3.2 Frío.

El refrigerador criogénico más utilizado es la cabeza refrigeradora, “**cold-Head**”. Consiste en dos etapas refrigeradoras en cascada que emplean el ciclo de Gifford-McMahon. Este es un proceso análogo al que emplean los frigoríficos comunes. Un fluido a una temperatura inicial es comprimido, el calor de compresión se extrae mediante intercambiadores de calor refrigerados por aire, y el fluido es expandido para producir frío por debajo de la temperatura inicial. En nuestros criostatos, el fluido es Helio, que se mantiene fluido a la temperatura de interés, entre 10 y 20K, y los intercambiadores deberán ser muy eficientes.

Todos los sistemas criogénicos de este tipo necesitan un compresor refrigerado por aire o agua y lubricado con aceite. Este suministra Helio gas de una pureza del 99.999% a temperatura ambiente con una presión de 17 atmósferas. En la “cold head” se realizan los ciclos de compresión y expansión mientras que en el compresor se encuentran los intercambiadores.

La capacidad refrigeradora de una “cold-Head” se especifica en vatios mediante curvas que relacionan la potencia de refrigeración en las dos etapas, fría e intermedia. Un refrigerador como el CTI-350C genera típicamente 4 vatios a 50K y 1.5 vatios a 20K.

Los criostatos constan pues de un refrigerador, generalmente una cabeza refrigeradora tipo CTI, con una entrada y una salida de Helio gas. Este refrigerador está conectado mecánicamente a un dewar que consta de tres etapas. La primera etapa es el recipiente o “vacuum case” generalmente construido en acero o duraluminio. La segunda etapa es la intermedia o “radiation shield” y se encarga de reducir la carga por radiación hacia la tercera etapa conocida como la etapa fría. La etapa intermedia no es más que una cubierta para esta última.

En criostatos del tipo híbrido existe un depósito para albergar el fluido criogénico. Por lo tanto debe existir una entrada en la “vacuum case” para su relleno. Así mismo debe haber también una salida para la expulsión de gases. Además de una salida para el vaciado del criostato.

Cooler type	Temperature range	Cooling power range	Advantages	Disadvantages
Joule-Thomson expansion (open cycle)	300 → 80 K	100 mW/1W	Simple, compact, no moving parts	Poor efficiency, limited autonomy (one shot), susceptibility to gas purity
Gifford-McMahon	300 → 30 K 300 → 6 K	5 W/200 W 1 W/20 W	Simple, robust, reliable	Poor efficiency, induced vibrations
Single stage/two stages Gifford-McMahon and Joule-Thomson	300 → 2.5 K	100 mW/5 W	Extend the temperature range of the G-M cooler	Poor efficiency, induced vibrations, susceptibility to gas purity
Stirling	300 → 50 K	100 mW/5 W	Compact, good efficiency	Sensitivity to mechanical load on the cold finger, induced vibrations
Pulse-tube	May replace G-M and Stirling	Coolers in the near future	Compact, robust, no moving parts, reliable	Efficiency may be slightly lower than Stirling
Adsorption cooler	≈100 → 0.1 K	μW/few W	Compact, no moving parts, "unlimited" lifetime, fully passive	Limited autonomy, poor efficiency

figura 39: Sistemas refrigeradores. (ref9. pg313)

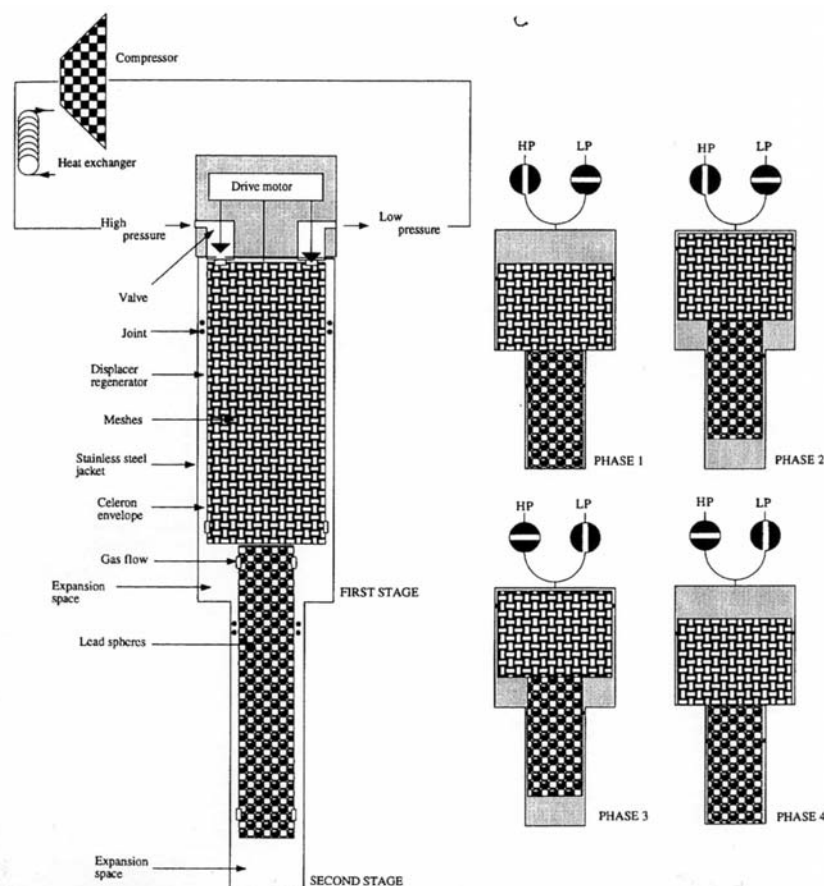


Figure 7-3 Schematic operation of a Gifford-McMahon cooler.

figura 40: Ciclo Gifford-McMahon. (ref9. pg291)

Criostato de los receptores S/C/CH de la antena ARIES del CAY

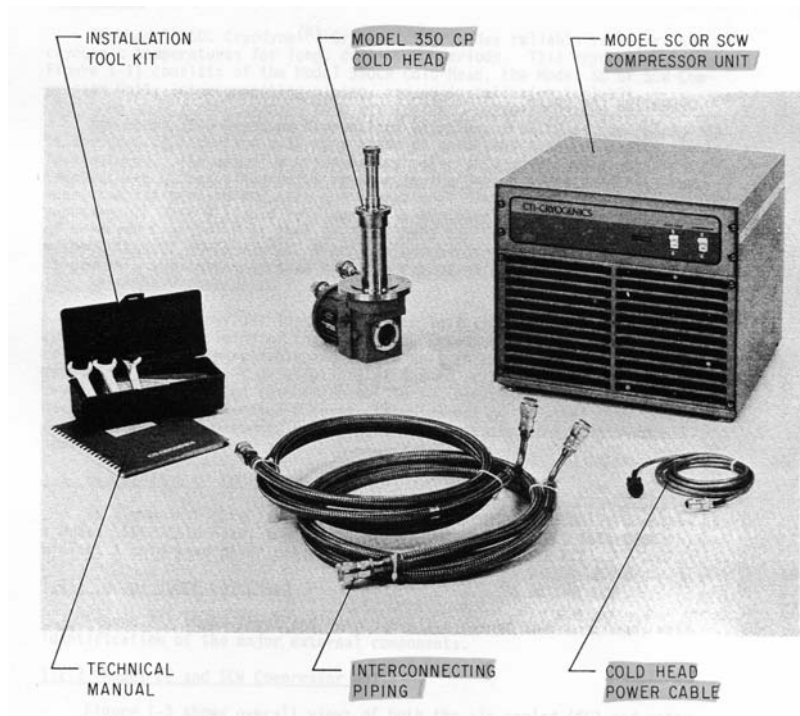
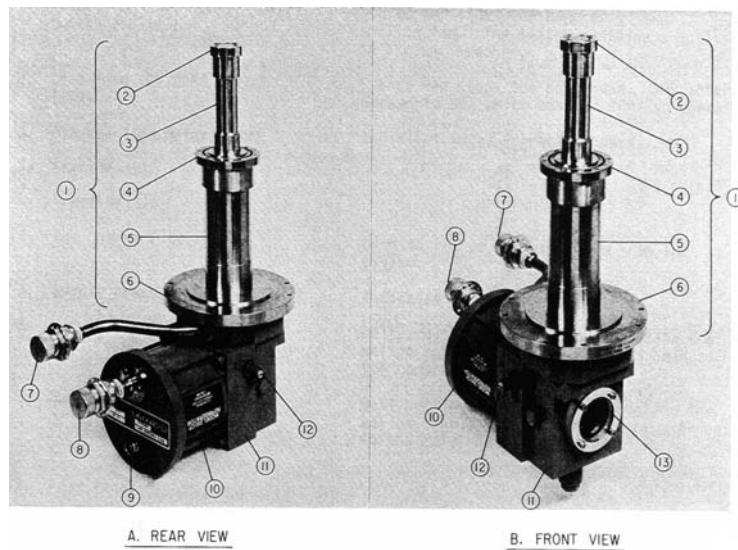


figura 41: Sistema refrigerador: compresor, cabeza refrigeradora y componentes. (ref 10)



1. Cylinder
2. Second-Stage Cold Station
3. Second-Stage Cylinder
4. First-Stage Cold Station
5. First-Stage Cylinder
6. Top Flange
7. Helium-Gas Supply Connector (with dust cap)
8. Helium-Gas Return Connector (with dust cap)
9. Electrical Power Connector
10. Drive Motor
11. Crankcase (houses the drive mechanism)
12. Pressure Relief Valve
13. Sight Glass

figura 42: Cabeza refrigeradora CTI-350. (ref 10)

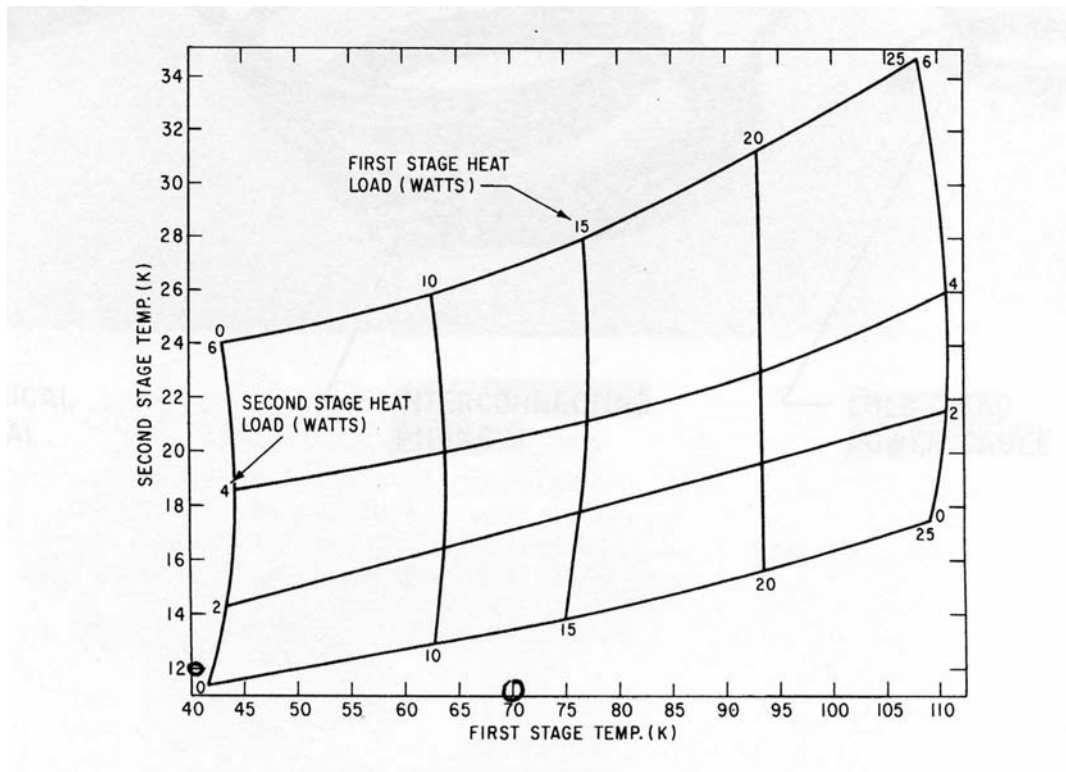


figura 43: Capacidad refrigeradora de la cabeza CTI-350. (ref 10)

3.2.1 Refrigerador Gifford-McMahon

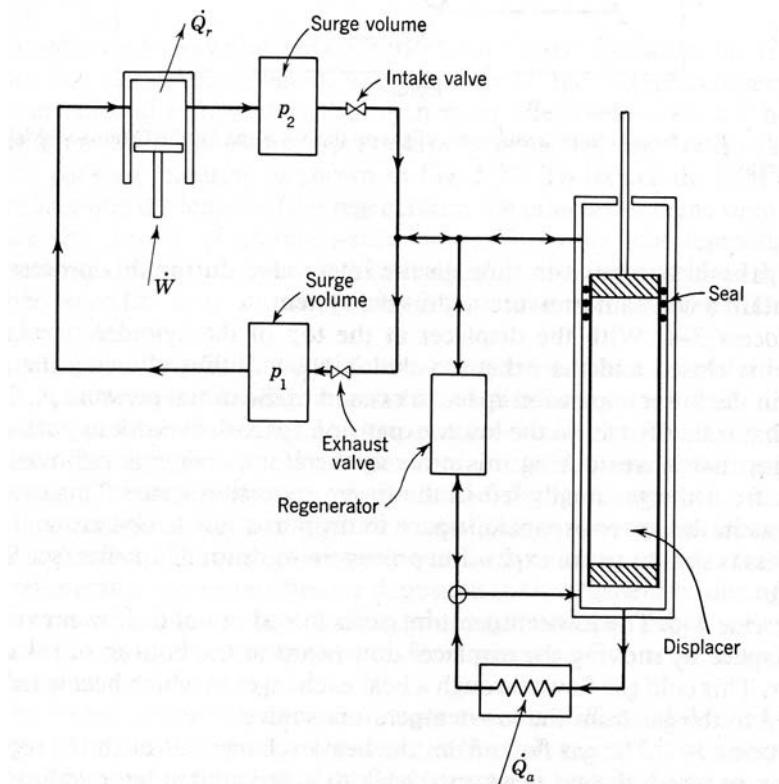


figura 44: Esquema del refrigerador Gifford-McMahon

Un esquema del refrigerador Gifford-McMahon se muestra en la figura anterior. Este sistema está formado por los siguientes elementos:

- Compresor.
- Cilindro cerrado por ambos extremos.
- Un pistón dentro del cilindro.
- Regenerador.

El pistón sirve para mover el gas desde un espacio a otro y el trabajo neto sería nulo en el caso ideal de caída de presión cero en el regenerador.

La secuencia de funcionamiento de este tipo de refrigerador es la siguiente:

- a) Paso 1 – 2: Con el pistón en el fondo del cilindro, se abre la válvula de entrada y la presión dentro del espacio superior aumenta desde un valor P_1 hasta otro P_2 . El volumen en el espacio inferior es prácticamente nulo ya que el pistón está en su posición inferior.
- b) Paso 2 – 3: Con la válvula de entrada todavía abierta y la válvula de escape cerrada, el pistón se mueve hasta su posición superior. Mediante esta acción, el gas que se encontraba en la parte superior se desplaza hasta la parte inferior a través del regenerador. Debido a que el gas es enfriado al pasar a través del regenerador, su volumen disminuye por lo que el gas puede ser arrastrado a través de la válvula de entrada durante este proceso para mantener constante la presión dentro del sistema.
- c) Paso 3 – 4: Con el pistón en la parte superior del cilindro, se cierra la válvula de entrada y se abre la válvula de escape, lo que permite que el gas del espacio exterior del cilindro se expanda hasta alcanzar la presión P_1 . El gas que finalmente se encuentra en la parte inferior del cilindro empuja hacia fuera el gas que se escapa durante este proceso. El gas que se encuentra en el fondo del cilindro baja su temperatura.
- d) Paso 4 – 5: El gas a baja temperatura es forzado a salir de la parte inferior del cilindro moviendo el pistón hasta el fondo. Este gas frío fluye a través de un intercambiador de calor en el que el gas absorbe el calor de la región que quiere refrigerarse.
- e) Paso 5 – 1: El gas fluye desde el intercambiador de calor a través del regenerador, en el cual el gas se calienta de nuevo hasta una temperatura cercana a la ambiente.

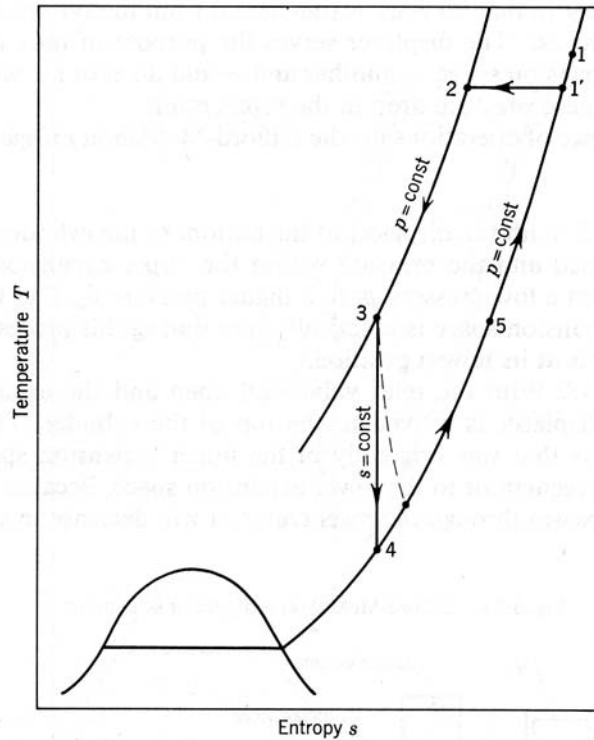


figura 45: Traza de una unidad de masa de gas en el plano T-s en un refrigerador Gifford-McMahon

Hay varios factores que contribuyen a una pérdida de la efectividad de este sistema entre las que se incluyen la ineficiencia del regenerador, conducción térmica en el pistón y su carcasa y volumen finito dentro del regenerador. ($\approx 59\%$ de eficiencia).

En este sistema el REGENERADOR es un elemento fundamental y crítico. Para que el refrigerador sea eficiente, la efectividad del regenerador debe ser del 98% o mejor. Se emplean como elementos de empaquetado del regenerador pantallas de cobre perforado. Para reducir la conducción de calor a lo largo de la longitud del regenerador, se separan las pantallas perforadas por un lazo de hilo de acero inoxidable. (Para muy bajas temperaturas se emplea plomo en lugar de cobre).

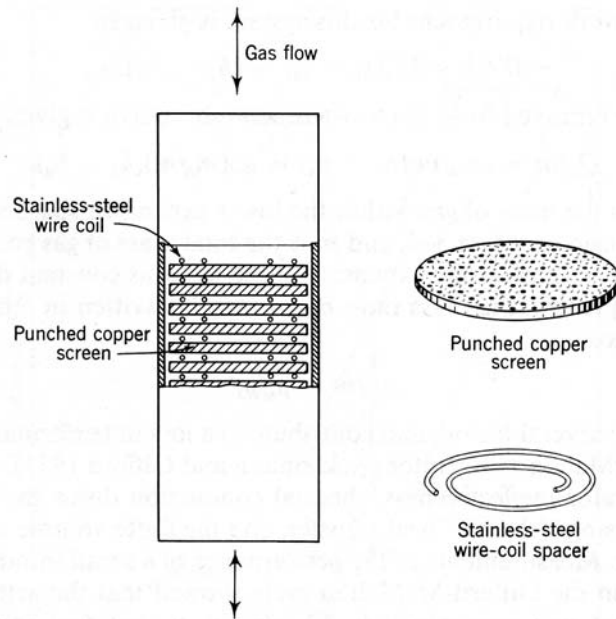


figura 46: Esquema de un regenerador

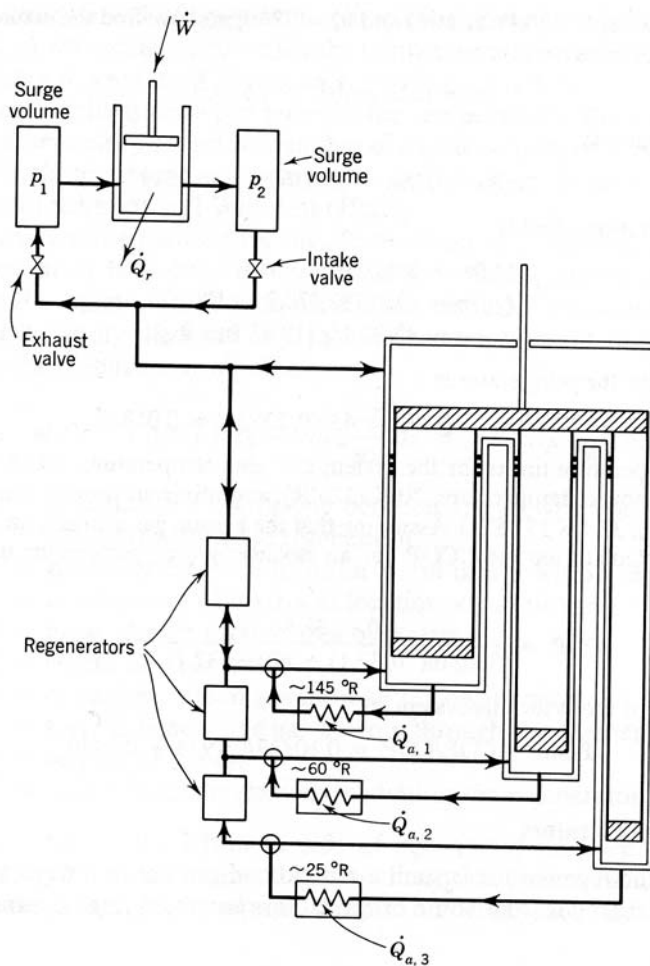


figura 47: Refrigerador Gifford McMahon de tres etapas. Los tres pistones se mueven mediante el mismo actuador. Con este refrigerador se pueden conseguir tres niveles distintos de refrigeración.

Una gran ventaja de los sistemas Gifford McMahon es la sencillez con la que se puede adaptar a multi-etapa. Empleando He gas se puede lograr refrigeración a tres niveles de temperatura distintos sólo con un ligero incremento de la complejidad del sistema. Todas las válvulas en el sistema multi-etapa funcionan a temperatura ambiente y los tres pistones se mueven mediante un único actuador

3.3 Aspectos prácticos.

3.3.1 Medida de la presión.

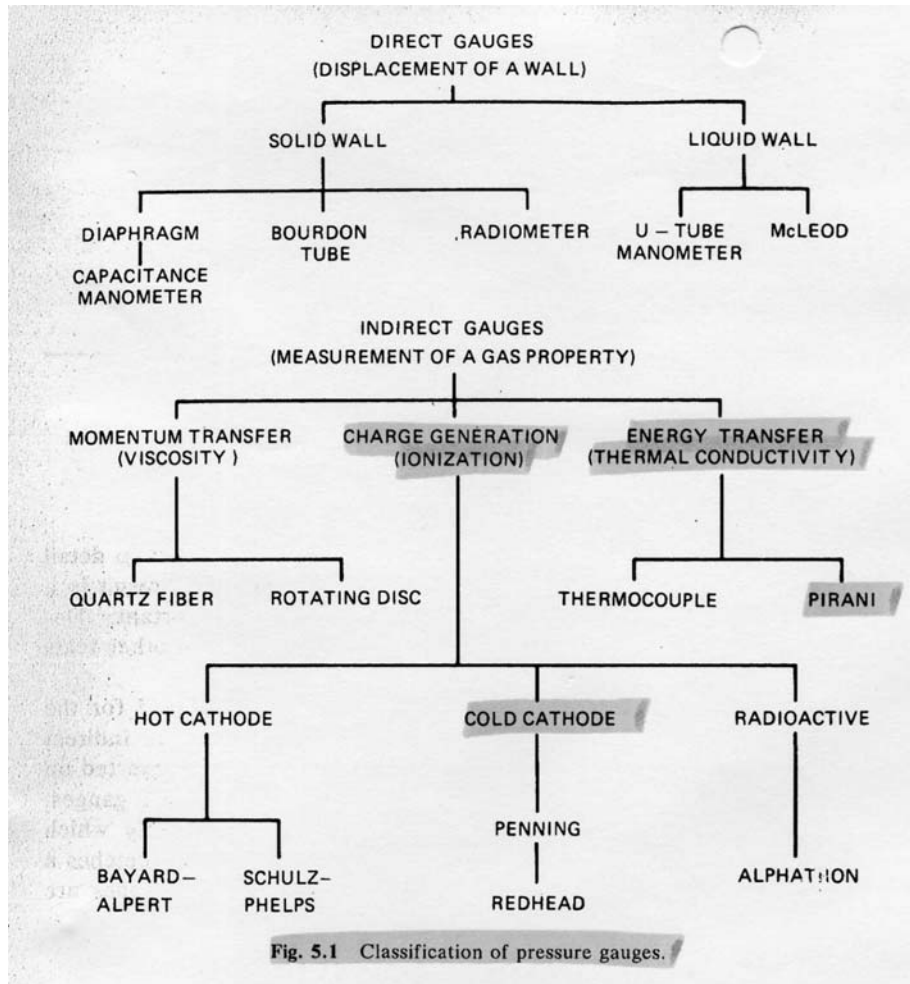


Figura 48: Clasificación de los sensores de presión según su tipo. (ref8. pg76)

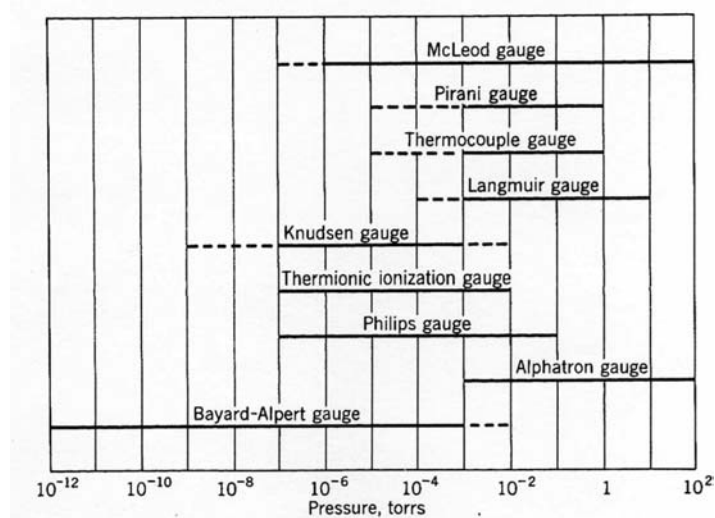


figura 49: Sensores de presión y rango de utilización. (ref8. pg77)

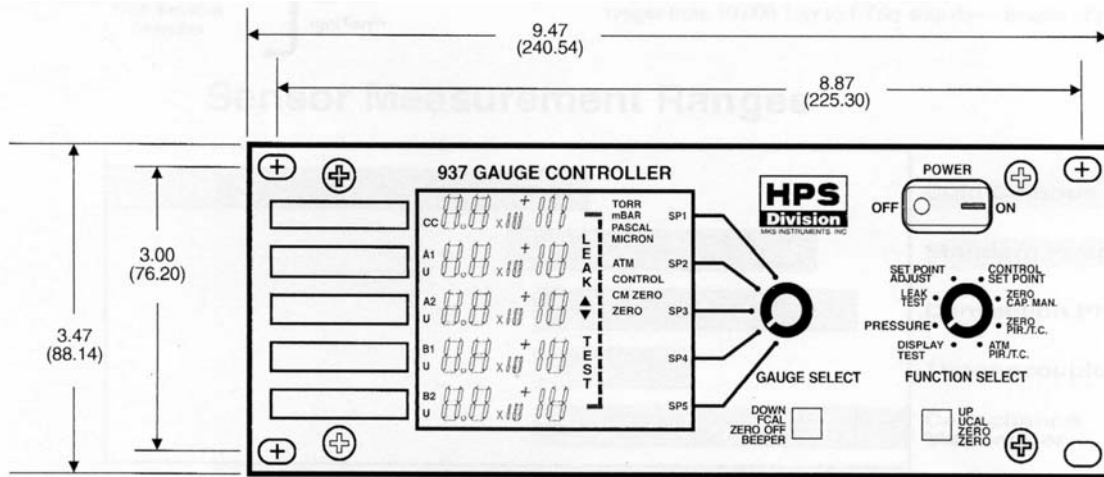


figura 50: Equipo controlador de sensores de presión, modelo 937

3.3.2 Medida de la temperatura.

Table 4-6 Overview of cryogenic temperature sensors

Sensor	Measurement technique	Range [K]	Sensitivity	Stability	Size	Magneto-resistance	Radiation effect	Cost [\$]
Carbon	Resistance	0.01-300	Good	Poor	Moderate	Moderate	-	0.1
Carbon-glass	Resistance	1.4-325	Very high	Moderate	Moderate	Moderate	-	195
Capacitance	Capacitance	0.2-250	Moderate	Poor	Moderate	None	-	300
Cernox	Resistance	0.3-325	Good	Good	Small to moderate	Small	Low	125
CLTS	Resistance	4-300	Very low	Good	Large	-	Small	-
CMN	Susceptibility	0.001-10	-	-	-	<0.02 T	-	DIY
GaAs or GaAlAs diode	Voltage	1.4-475	Low	Good	Moderate	Moderate	-	-
Germanium	Resistance	0.05-100	Good to low	Very good	Moderate	Large	-	150-2000
³ He melting curve	Pressure	0.001-0.32	-	-	-	Small	-	DIY
Mössbauer	Gamma detector	0.002-0.02	-	-	-	-	-	DIY
NMR	NMR	μK-mK	-	Moderate	Very large	Moderate	-	DIY
Noise	Voltage (SQUID)	μK-300	-	Moderate	-	-	-	DIY
Nuclear orientation	Gamma detector	0.004-4	-	Moderate	-	Small	-	680
Platinum	Resistance	10-800	Low to good	Very good	Moderate	Large	Small	75
Rhodium-iron	Resistance	0.1-600	Low to good	Very good	Small to large	Large	Small	360
Ruthenium oxide	Resistance	0.05-20	Good to low	Moderate	Moderate	Small	-	90
Si diode	Voltage	1.4-475	Low	Moderate	Moderate	Very large	Large	100
Superconducting fixed points	Susceptibility	0.015-7	-	Very good	Moderate	Zero field required	-	3500
Thermistor	Resistance	77-300	Very high	Good	Small	Small	-	-
Thermocouple, Au-Fe	Voltage	2-300	Low	Moderate	Small	Moderate	-	10

figura 51: Sensores de temperatura. (ref 9. pg217)

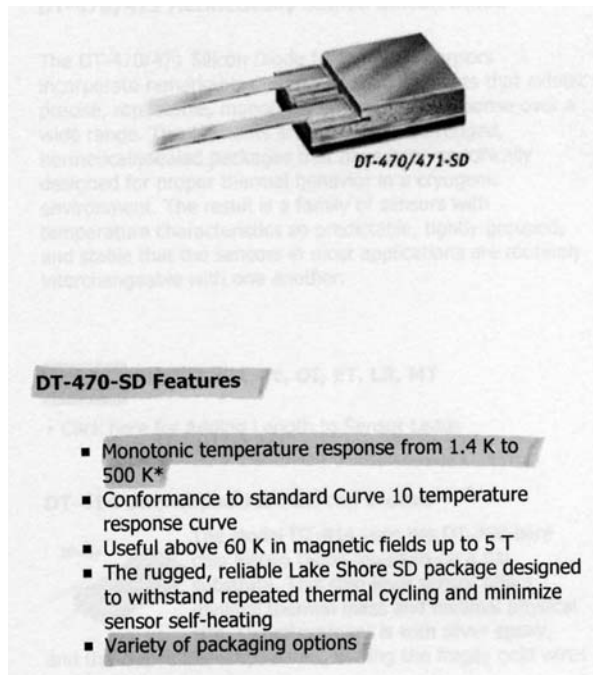


figura 52: Sensores de temperatura (diodo de silicio)

3.3.3 Comportamiento de los materiales.

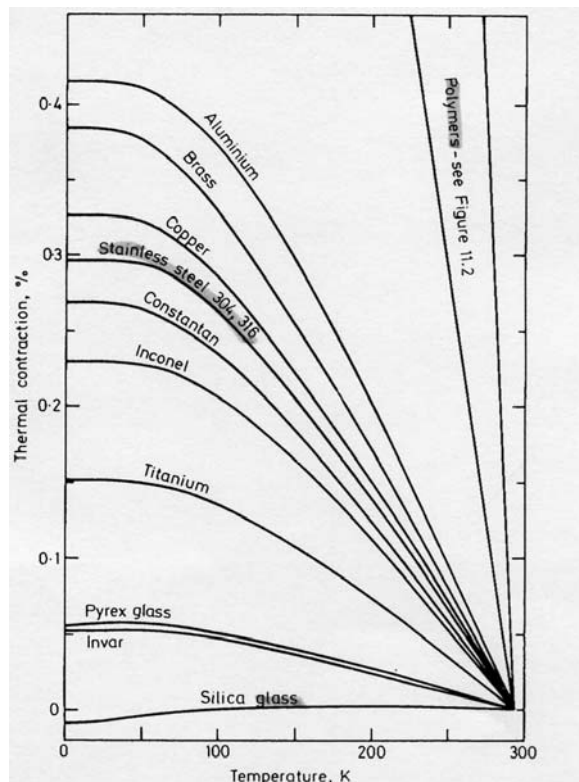


figura 53: Contracción térmica (1). (ref 8. pg98)

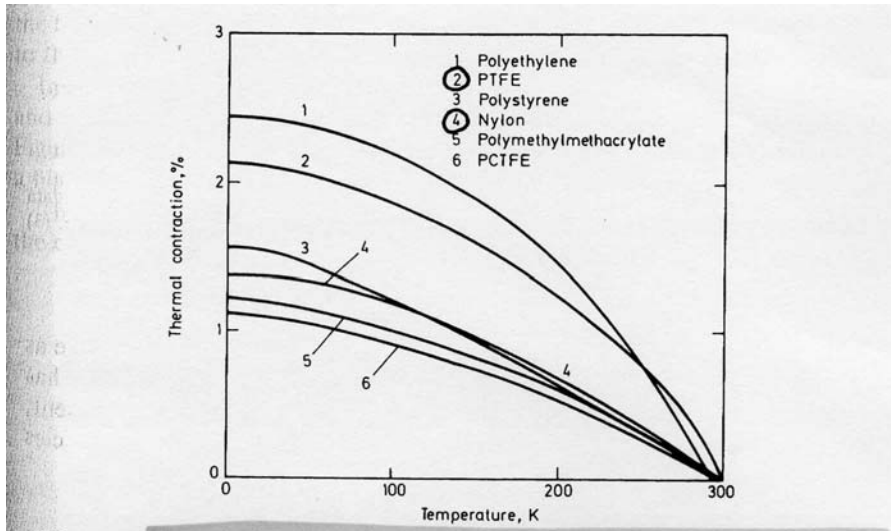


figura 54: Contracción térmica (2)

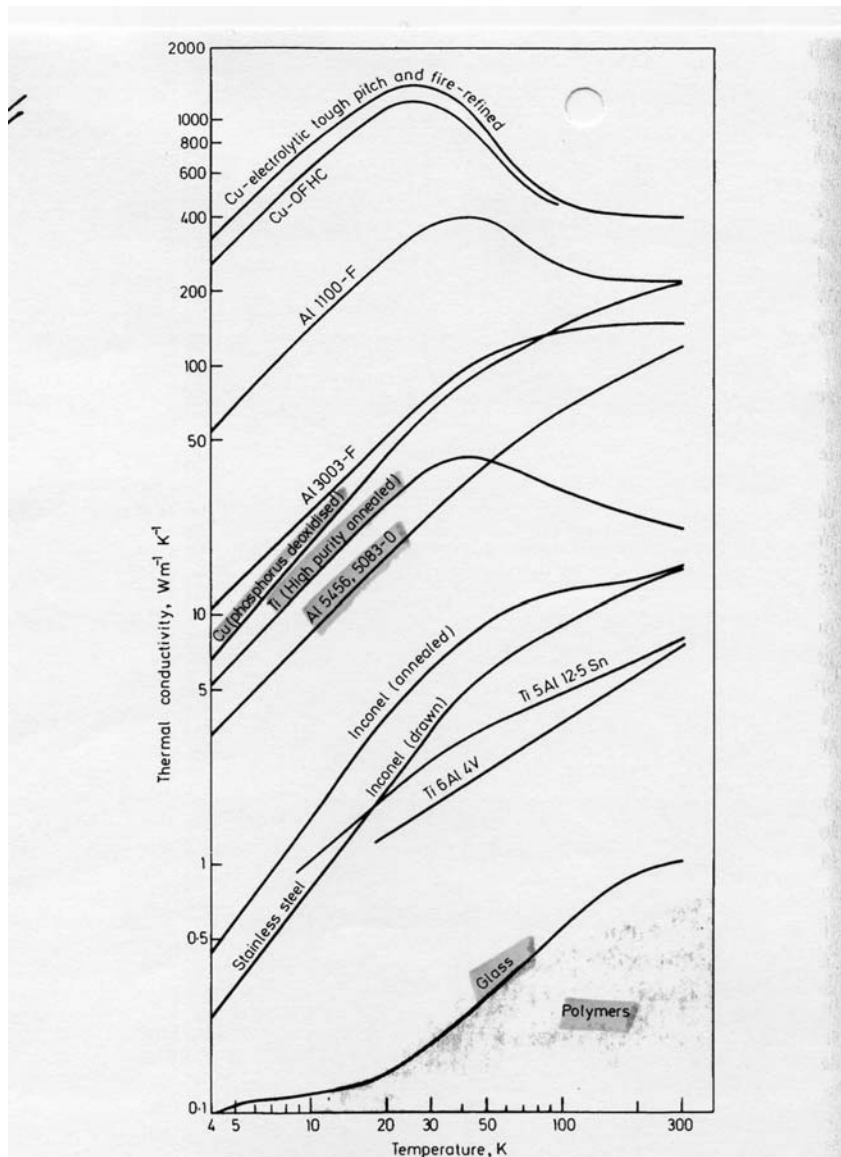


figura 55: Conductividad térmica de distintos materiales. (ref8. pg102)

Table 2-2 Thermal conductivity (k_t , W/m-K) and thermal conductivity integral (K , W/m) for selected materials

Temperature (K)	Aluminum (6063-T5)		Beryllium copper		Steel ^{a.c.e.r.} (C1020)		Stainless steel (304) ^{a.c.e.r.}		Monel (drawn)		Teflon		Glass	
	k_t	K	k_t	K	k_t	K	k_t	K	k_t	K	k_t	K	k_t	K
4.2	34	0	1.9	0	3.0	0	0.24	0	0.43	0	0.046	0.0	0.097	0.00
10	86	360	4.8	19	11.5	43	0.77	2.9	1.74	6	0.096	0.44	0.120	0.68
20	170	1,650	10.6	95	24.0	222	1.95	16.3	4.30	36	0.141	1.64	0.146	2.00
30	230	3,650	16.2	229	32.0	502	3.30	42.4	6.90	93	0.174	3.23	0.190	3.68
40	270	6,200	21.0	415	38.6	867	4.70	82.4	9.00	173	0.193	5.08	0.24	5.86
50	280	8,950	26.1	650	47.6	1,310	5.80	135	10.95	273	0.208	7.16	0.29	8.46
60	270	11,700	30.0	930	53.6	1,810	6.80	198	12.09	368	0.219	9.36	0.34	11.5
70	248	14,300	33.7	1,250	57.5	2,360	7.60	270	13.06	513	0.228	11.6	0.39	15.1
80	230	16,700	37.0	1,600	60.0	2,950	8.26	349	13.90	647	0.235	13.9	0.44	19.4
90	222	19,000	40.1	1,990	61.8	3,550	8.86	436	14.63	791	0.241	16.3	0.50	24.0
100	216	21,100	43.0	2,400	62.9	4,170	9.40	528	15.27	940	0.245	18.7	0.55	29.2
120	207	25,300	48.4	3,300	64.1	5,450	10.36	726	16.26	1,260	0.251	23.7	0.64	40.8
140	201	29,300	53.3	4,320	64.6	6,750	11.17	939	17.34	1,590	0.255	28.7	0.73	54.2
160	200	33,300	57.6	5,440	64.8	8,050	11.86	1,170	18.25	1,950	0.257	33.8	0.79	74.4
180	200	37,300	61.5	6,640	64.9	9,350	12.47	1,410	19.02	2,320	0.258	39.0	0.85	85.8
200	200	41,300	65.0	7,910	65.0	10,700	13.00	1,660	19.69	2,710	0.259	44.2	0.90	103.0
250	200	51,300	72.4	11,300	65.0	13,900	14.07	2,340	21.02	3,730	0.260	57.2	0.98	150.0
300	200	61,300	78.5	15,000	65.0	17,200	14.90	3,060	22.0	4,800	0.260	70.2	1.02	199.0

Source: Stewart and Johnson 1961.

figura 56: Conductividad térmica e integral. (ref 3. pg46)

Material	Emissivity	Temp., K	Reference
3M black paint (80 μ m thick) on copper substrate	0.892	4.2	[a]
	0.896	20	[a]
	0.910	77	[a]
	0.935	300	[a]
Aluminum, polished (2024-T6) (33 μ in roughness)	0.018	4.2	[a]
	0.018	20	[a]
	0.023	77	[a]
	0.050	300	[a]
Cooper, polished (41 μ in roughness)	0.054	4.2	[a]
	0.055	20	[a]
	0.070	77	[a]
	0.100	300	[a]
304 Stainless steel, polished (27 μ in roughness) 0.636 mm	0.078	4.2	[a]
	0.087	20	[a]
	0.13	77	[a]
	0.17	300	[a]
Aluminum, mechanical polish	0.058	4.2	[b]
Aluminum, mechanical polish	0.10	77	[b]
Aluminum, oxide layer	0.074	4.2	[b]
Aluminum, oxide layer	0.49	77	[b]
Copper, as received	0.062	4.2	[b]
Copper, as received	0.12	77	[b]
304 Stainless steel, mechanical polish	0.074	4.2	[b]
304 Stainless steel, mechanical polish	0.12	77	[b]
304 Stainless steel, mechanical polish	0.16	300	[b]
304 Stainless steel, as received	0.12	4.2	[b]
304 Stainless steel, as received	0.34	77	[b]
Aluminum coating (79 nm thick) on 6 μ m polyester film	0.021	307	[c]
Aluminum coating (38 nm thick) on both sides of Mylar film	0.025	307	[c]
Copper coating (68 nm thick) on 6 μ m polyester film	0.013	307	[c]
Silver coating (76 nm thick) on 6 μ m polyester film	0.0133	307	[c]

References:

[a] Hawks and Cottingham, 1971.

[b] Obert et al., 1982.

[c] Ruccia and Hinckley, 1967.

figura 57: Emisividad. (ref 3. pg222)

3.4 Sistemas criogénicos empleados en el criostato del receptor S/C/CH.

En este receptor se emplean los siguientes elementos.

- Cabeza refrigeradora CTI-Cryogenics modelo 350. Capacidad refrigeradora (5W a 12 K y 20W a 77K)
- Compresor CTI modelo 8200. Basado en el ciclo de expansión de He gas Gifford-McMahon (2 etapas). Refrigerado por aire.

Entre ambos sistemas existen las siguientes conexiones:

- El compresor se alimenta a 220V y 50Hz.
- Cable de alimentación entre el compresor y la cabeza refrigeradora. Cables de 1mm de sección. Pin-out (1-B y D; 2-C; 3-E; GND-F).
- Tubos de Helio (He gas Supply; He gas Return).

Para más información, consultar los anexos correspondientes (G, H).

4 Diseño térmico del criostato.

Consiste en determinar las cargas térmicas que se producen en el criostato, con el fin de determinar cuál debe ser la capacidad refrigeradora de la cabeza criogénica. Como se ha comentado en un apartado anterior, las cargas térmicas pueden ser de cuatro tipos:

- Carga por conducción gaseosa.
- Carga por sólidos.
- Carga por radiación.
- Carga disipada en el propio criostato.

Al hacer el vacío dentro del criostato se consigue:

- Eliminar la carga por convección gaseosa.
- Reducir la carga por conducción gaseosa (gas residual tras hacer el vacío). Se emplean además como ya se ha comentado con anterioridad trampas de vacío a base de zeolitas que capturan las moléculas aisladas que puedan existir.

El efecto dominante en la carga es la radiación de la superficie caliente a la fría y la conducción por sólidos (cables que conectan dos etapas a diferentes temperaturas).

A la hora de efectuar los cálculos es imprescindible tener claro como efectuar la conversión entre diferentes unidades de presión.

$$1Pa = 7.5 \cdot 10^{-3} torr$$

$$1torr = 1.33mbar$$

4.1 Conducción gaseosa.

La conducción gaseosa entre dos placas a diferente temperatura es proporcional a la presión y a la diferencia de temperatura entre ambas placas. Para los niveles de vacío que se consiguen en los criostatos, de 10^{-2} a 10^{-6} mbar, el recorrido libre medio de las moléculas del gas es igual o superior que la máxima dimensión del recipiente. Si por simplicidad se supone que la conducción de calor en el gas se realiza entre dos placas paralelas de superficie A , el valor de la potencia disipada es:

$$W_{gas} \approx K_1 \cdot A \cdot a_0 \cdot P \cdot (T_2 - T_1)$$

donde W_{gas} es en vatios, T_2 y T_1 son las temperaturas del área caliente y fría respectivamente, P es la presión (Pa), a_0 es el llamado coeficiente de acomodación y K_1 es una constante dependiente del gas (para aire se puede aproximar a 1.2). A es el área de la etapa fría. (ref 3. pg248).

El coeficiente de acomodación está relacionado con el grado de aproximación de las moléculas al equilibrio térmico. (Ref3. pg250). En los cálculos efectuados en este informe se supone el caso peor. El caso peor es aquel en el que $a_0=1$.

$$a_0 = \frac{\text{actual_energy_transfer}}{\text{max_imum_possible_energy_transfer}}$$

En criostatos de ciclo cerrado a 20K es necesario bombear por debajo de 10^{-3} mbar. En criostatos híbridos a 4K se necesitan 10^{-5} mbar.

Se reduce linealmente al mejorar el vacío (disminuir la presión) y para materiales más desengrasados y pulidos (menor a_0).

El principal mecanismo de transferencia de calor en un gas es la transferencia de energía cinética de las moléculas con mucha velocidad a las de menos velocidad. Esta transferencia de energía sucede en las colisiones entre moléculas. Para reducir las colisiones hay que conseguir que el “mean time path” (λ) entre las moléculas de gas sea mayor que las dimensiones del criostato. (ref 2.pg129).

Resultados aproximados porque es difícil conocer el valor de la constante de acomodación (que es el grado de aproximación de las moléculas al equilibrio térmico con las superficies colindantes). Su valor depende de la combinación tipo de gas-tipo de superficie y de la temperatura de la superficie. El límite superior para este parámetro es 1 pero en diseño de criostatos se ha visto que una buena elección es $a_0=0.5$. (ref1.pg250).

- Cálculo de la etapa caliente a la etapa intermedia: cálculo para superficies paralelas a T1 y T2.
- Cálculo de la etapa intermedia a la etapa fría: cálculo para superficies paralelas a T2 y T3.

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

Etapa	Area (m ²)	Temperatura (K)	Presión (mbar)	Presión (Pa)	K ₁	a ₀	W _{gas} (W)
Intermedia	0.149	70	10^{-2}	1	1.2	1	41.1
Fría	0.045	15	10^{-2}	1	1.2	1	2.97
Intermedia	0.149	70	10^{-3}	0.1	1.2	1	4.1
Fría	0.045	15	10^{-3}	0.1	1.2	1	0.297
Intermedia	0.149	70	10^{-4}	0.01	1.2	1	0.41
Fría	0.045	15	10^{-4}	0.01	1.2	1	0.0297
Intermedia	0.149	70	10^{-5}	0.001	1.2	1	0.041
Fría	0.045	15	10^{-5}	0.001	1.2	1	$2.9 \cdot 10^{-3}$

La capacidad refrigeradora de la cabeza CTI 350CP para obtener temperaturas del orden de 70K para la etapa intermedia y 15K para la etapa fría es de aproximadamente 6W y 1W respectivamente. **Es conveniente reducir la presión dentro del criostato por debajo de 10^{-4} mbar.**

4.2 Conducción por radiación.

El flujo neto de calor, W_{rad} , entre un cuerpo de superficie exterior A_1 con temperatura T_1 totalmente rodeado por otro de superficie interna A_2 y temperatura T_2 es:

$$W_{rad} = F_e \cdot FF \cdot \sigma \cdot A_1 \cdot (T_2^4 - T_1^4)$$

donde σ es la constante de Stefan, $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ y el factor F_e es adimensional y viene dado por:

$$F_e = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_2 + \left(\frac{A_1}{A_2}\right) \cdot (1 - \varepsilon_2) \cdot \varepsilon_1}$$

siendo ε_1 y ε_2 las emisividades de las superficies 1 y 2. Es el factor de emisividad para el caso de dos superficies cilíndricas concéntricas. (Ref3. pg230)

FF es el factor de configuración que depende directamente de la geometría. Cuando dos superficies intercambian energía, energía radiada desde la primera superficie puede no ser interceptada por la segunda superficie. El factor de configuración se define como la fracción de energía que es radiada desde la superficie 1 y que es interceptada por la superficie 2. Si toda la energía radiada es interceptada, este factor vale 1. (ref3. pg225).

Emisividades:

Material	4.2K	20K	77K	300K
Aluminio (2024-T6)	0.018	0.018	0.023	0.050
Cobre pulido	0.054	0.055	0.07	0.1
Acero inoxidable (304)	0.055	0.087	0.07	0.1

De aquí se obtiene que es conveniente emplear materiales de baja emisividad, 0.1 para el duraluminio. También es una importante conclusión emplear una etapa intermedia entre la que está a temperatura ambiente y la fría. Puesto que la dependencia con la temperatura es muy fuerte.

Por lo tanto, los factores que influyen en la conducción por radiación son:

- Geometría de las dos superficies.
- Temperatura de las superficies.
- Emisividad de las superficies a la temperatura a la que se encuentran. La emisividad de las superficies depende mucho de las condiciones en que se encuentre la superficie del material (si hay óxido en la superficie, la calidad del pulido, etc) En la página 222, tabla 5-2, ref3 se presenta una tabla de emisividades para distintos materiales.

El factor de configuración de la radiación tiene en cuenta la geometría, esto es, la cantidad de energía que partiendo de la superficie radiante, es interceptada por la superficie receptora: habitualmente este valor se aproxima modelando la situación según geometrías fáciles de calcular, por ejemplo: modelo de cilindros concéntricos infinitos, modelo de placas paralelas infinitas, cuerpo pequeño encerrado en una superficie mucho mayor. (ref1.pg230).

4.2.1 Conducción por radiación en la etapa intermedia.

4.2.1.1 Modelo de cilindros concéntricos.

R1= radio (m) del cilindro interior (etapa intermedia).

R2= radio (m) del cilindro exterior (etapa caliente).

L= altura (m).

A2= área de la etapa fría.

$$x = \frac{L}{R_1}; y = \frac{R_2}{R_1}$$

$$z_1 = x^2 + y^2 - 1; z_2 = x^2 - y^2 + 1$$

$$z_3 = \left[(z_1 + 2)^2 - 4y^2 \right]^{1/2} \cdot \left[\cos\left(\frac{z_2}{z_1 \cdot y}\right) \right]^{-1} + z_2 \cdot \left[\sin\left(\frac{1}{y}\right) \right]^{-1} - \frac{\pi \cdot z_1}{2}$$

$$FF = 1 - \frac{1}{\pi} \left[\left(\cos\left(\frac{z_2}{z_1}\right) \right)^{-1} - \frac{z_3}{2x} \right]$$

$$W_R = FF \cdot F_e \cdot \sigma \cdot A_2 \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

4.2.1.2 Modelo de placas paralelas.

R1= radio (m) del cilindro interior (etapa intermedia).

R2= radio (m) del cilindro exterior (etapa caliente).

s= separación entre las placas.

AT= área de la etapa más fría.

$$x = 1 + \frac{s^2 + R_2^2}{R_1^2}$$

$$FF_{12} = \frac{1}{2} \cdot \left[x - \left[x^2 - 4 \cdot \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 \right]^{1/2} \right]$$

Como R1 es distinto a R2 \rightarrow $FF_{21} = \frac{\pi \cdot R_1^2 \cdot FF_{12}}{\pi \cdot R_2^2}$

$$Fe_{inv} = \frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1; Fe = \frac{1}{Fe_{inv}}$$

- a) Radiación entre la etapa superior de la etapa caliente y la tapa superior de la intermedia:

$$W_{RTS} = FF_{21} \cdot Fe \cdot \sigma \cdot AT \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

Tener en cuenta que FF cambia con la separación entre las placas.

- b) Radiación entre la etapa inferior de la etapa caliente y la tapa inferior de la intermedia:

$$W_{RTI} = FF_{21} \cdot Fe \cdot \sigma \cdot AT \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

Tener en cuenta que FF cambia con la separación entre las placas.

4.2.1.3 Conducción por radiación total en la etapa intermedia.

$$W_{RT} = W_R + W_{RTS} + W_{RTI}$$

4.2.2 Conducción por radiación en la etapa fría.

- Etapa intermedia: formada por s1(tapa superior), s2(tapa inferior) y s3(cilindro).
- Etapa fría: formada por s4(placa paralela rectangular) y cuatro soportes rectangulares. Necesario calcular el área total

Se puede aplicar el modelo de un cuerpo pequeño encerrado en otro de superficie mucho mayor, y el modelo de placas paralelas.

4.2.3 Resultados de carga por radiación.

En nuestro caso la etapa exterior es de acero, la etapa intermedia es de acero y la etapa fría de duraluminio.

Por lo tanto, la carga térmica por radiación se resume en la tabla siguiente (sin tener en cuenta el superaislamiento):

Etapa	A₁(m²) Etapa caliente	A₂(m²) Etapa intermedia	A₃(m²) Etapa fría	F	W_{rad}(W)
Intermedia (70K)	0.404	0.149	0.045	1.315	9
Fría (15K)	0.404	0.149	0.045		8*10⁻³

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

4.2.4 MLI (MultiLayer Insulation)

Los aislamientos multicapa, MLI, consisten en capas alternas de material altamente reflectante separadas por un espaciador de baja conductividad térmica. El material reflectante puede ser lámina de aluminio, lámina de cobre o mylar aluminizado. Para el espaciador se emplean láminas de fibra de vidrio o nylon. También puede conseguirse una baja conductividad sin emplear láminas separadoras si las láminas reflectantes presentan una superficie rizada. De esta manera las láminas del superaislamiento tan solo se tocan en puntos discretos, manteniendo así una baja conductividad térmica entre capas.

Los MLI se emplean para reducir la carga térmica por radiación entre la etapa a temperatura ambiente “vacuum case” y la etapa intermedia “radiation shield” de un criostato. Los factores de reducción de esta carga para un MLI de 10 capas pueden ser entre 5 y 8 veces. Siendo así los que presentan un mejor comportamiento. Otras ventajas son su bajo peso y su estabilidad. Entre los inconvenientes se encuentra su alto coste, la dificultad de aplicación a formas complicadas, la conducción lateral y el alto grado de vacío necesario para que funcionen correctamente ($<10^{-4}$ mbar).

Las láminas de MLI utilizadas en nuestro desarrollo son NRC-2. Consisten en una película de material aislante muy ligero (mylar: polyester film) de unas 6 micras de espesor con aluminio de alta reflectividad depositado en ambas caras y de aspecto rizado. La reflectividad del NRC-2 de 0.03.

La transferencia de calor por radiación es directamente proporcional a la emisividad de las capas empleadas entre la superficie caliente y la fría e inversamente proporcional al número de capas. La conducción por sólidos se reduce empleando el material de baja conductividad entre capas o logrando que el contacto entre capas sea mínimo. Finalmente, consiguiendo un buen vacío entre las capas del superaislamiento se elimina el efecto de convección y se logra reducir en gran medida la conducción gaseosa debida a las moléculas libres.

El punto crítico en el diseño del MLI es la selección del número de capas empleado y la densidad por unidad de espesor. Si las capas se comprimen demasiado, se produce un incremento en la conducción por sólidos que pesa más que la disminución lograda en la conducción por radiación.

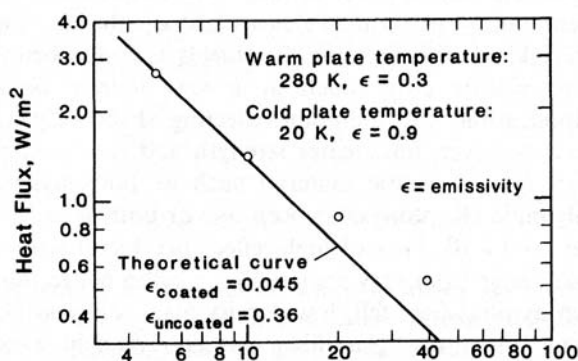


figura 58: Efecto del número de capas sobre el flujo de calor neto

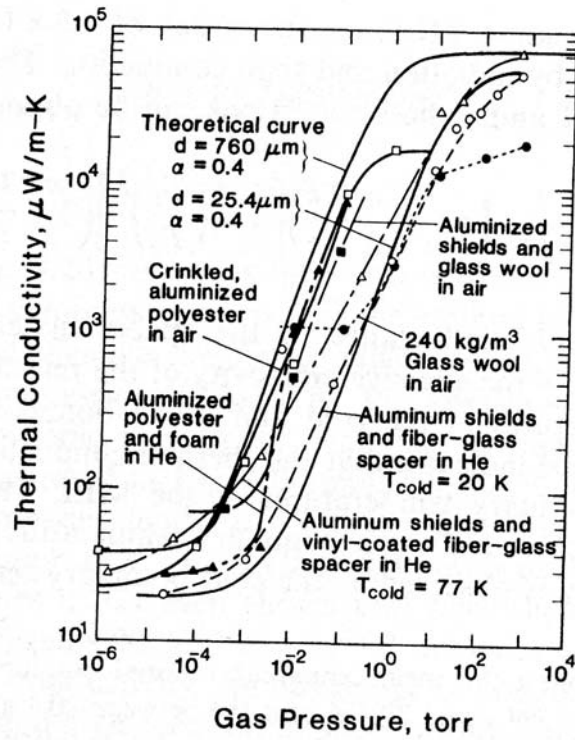


figura 59: Efecto de la presión sobre la conductividad del MLI

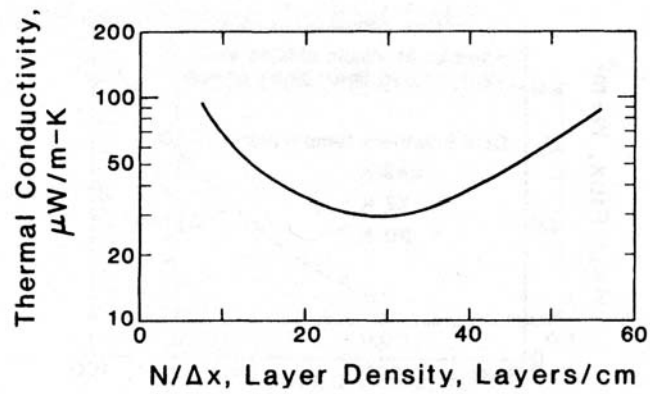


figura 60: Variación de la conductividad térmica en función de la densidad de capas

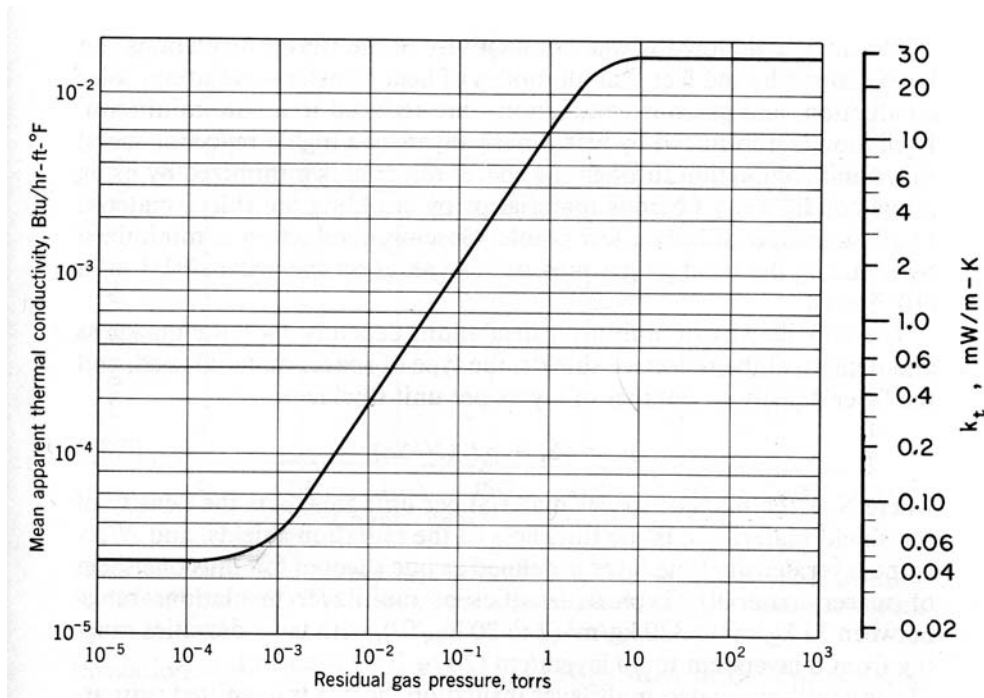


figura 61: Variación de la conductividad térmica media aparente en función de la presión para un MLI típico. La densidad es de 24 capas/cm y las temperaturas 300 y 90.5K

Table 7.17. Thermal conductivity for multilayer insulations for boundary temperatures of 300 K (80°F) and 77.4 K (-321°F) with residual gas pressures of 1.3 mPa (10⁻⁵ torr)

Insulation	Layer Density		Thermal Conductivity	
	layer/cm	layer/in.	μW/m-K	Btu/hr-ft-°F
0.006-mm aluminum foil + 0.15-mm Fiberglass paper	20	50	37	2.1 × 10 ⁻⁵
0.006-mm aluminum foil + 2-mm mesh rayon net	10	25	78	4.5 × 10 ⁻⁵
0.006-mm aluminum foil + 2-mm mesh nylon net	11	28	34	2.0 × 10 ⁻⁵
NRC-2 crinkled aluminized Mylar film 0.006 mm	35	89	42	2.4 × 10 ⁻⁵
Dimplar dimpled + smooth Mylar film	8	20	42	2.4 × 10 ⁻⁵
0.0087-mm aluminum foil + carbon-loaded glass-fiber paper ^a	30	76	14	0.85 × 10 ⁻⁵

^aResidual gas pressure = 0.4 mPa = 3 × 10⁻⁶ torr

figura 62: Conductividad térmica para MLI entre 300 y 77.4K y una presión residual entre capas de 1.3mPa (10⁻⁵ torr).

Para que el superaislamiento sea efectivo la presión debe ser inferior a 10mPa (7.5*10⁻⁵Torr ≈ 10⁻⁴mbar).

La conductividad térmica del NRC-2 crinkled aluminized mylar film 6μm para una densidad de 35 capas/cm es de 42μW/m*K.

Bajo estas condiciones de baja presión el calor es transferido principalmente por radiación y conducción por sólidos. La conductividad térmica aparente del MLI viene dada por la siguiente expresión:

$$Ka = \frac{1}{N/\Delta x} \cdot \left[h_s + \left(\frac{\sigma \cdot e \cdot T_2^3}{2 - e} \right) \cdot \left[1 + \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^2 \right] \cdot \left(1 + \frac{T_1}{T_2} \right) \right]$$

donde h_s es la conductancia sólida del material espaciador, σ es la constante de Stefan-Boltzmann, e es la emisividad efectiva de las capas reflectoras y T_1 , T_2 son las temperaturas fría y caliente.

Si se aumenta el número de capas por unidad de espesor (densidad), se reduce la transferencia de calor por radiación y la conductividad térmica aparente del MLI debería reducirse hasta un determinado punto. Si el aislamiento se comprime demasiado, la conducción por sólidos empieza a aumentar hasta el punto de que aumenta el valor de K_a . Este efecto puede observarse en la figura 60.

En el interior del superaislamiento (entre capas) se producen varios fenómenos que hay que tener en cuenta:

- La presión es peor que la alcanzada en el resto de volumen en el que se ha hecho el vacío. La presión en el interior del aislamiento puede llegar a ser dos órdenes de magnitud superior a la presión exterior del MLI.
- Se producen contactos entre capas de superaislamiento.
- “Outgassing” de las láminas introduce cantidades significativas de gas en el aislamiento.

Debido a estos fenómenos existe un límite que hace que la carga por radiación pueda disminuirse como máximo al valor dado por:

$$W_{MLI} = (T_2 - T_1) \cdot K(\delta) \cdot \frac{S}{L}$$

haciendo la suposición de que la carga térmica que se produce por el superaislamiento es sólo por conducción.

El límite teórico conseguido por el MLI sería:

$$W \rightarrow \frac{W}{N - 1}$$

donde N es el número de capas de superaislamiento.

T_2 es la temperatura de la etapa caliente, T_1 la temperatura de la etapa fría, K es la conductividad térmica para una determinada densidad de capas δ , S la superficie y L la longitud.

Ejemplo en nuestro caso:

$T_2=300K$, $T_1=70K$, $K(\delta)\approx 0.65mW/m \cdot K$, $S=0.149m^2$, $L=5mm$: $\rightarrow W=4,5W$

4.3 Conducción por sólidos.

La potencia transferida por conducción por sólidos, W_{cond} , a través de la superficie A perpendicular a la dirección de propagación puede estimarse para una barra de superficie uniforme A y longitud total l por:

$$W_{cond} = \frac{A}{l} \cdot \lambda \cdot (T_2 - T_1)$$

donde λ es la conductividad promedio del material entre las dos temperaturas T_2 y T_1 .

En los criostatos se emplean cables coaxiales de acero y cobre, siendo los primeros los que tienen menor conductividad térmica. Para las conexiones DC se emplean cables de sección muy fina de Cu-Be.

La conductividad térmica en los metales, a baja temperatura, varía mucho con la pureza física o química del metal. (ref5).

El cálculo se efectúa mediante la aproximación usada en pg 133 del Ref 2, que consiste en calcular una conductividad térmica (llamada λ) media, λ_m que es la integral de la cond.térmica en un intervalo de temperatura dividido por el intervalo de temperatura. Los datos del libro son $\lambda_m^{Cu} = 410 \text{ W/m K}$ para $T_2 = 300 \text{ K}$ y $T_1 = 77 \text{ K}$; (ref2). $\lambda_m^{Cu} = 980 \text{ W/m K}$ para $T_2 = 77 \text{ K}$ y $T_1 = 4 \text{ K}$. De esta forma se obtiene una estimación para distintas temperaturas dentro del intervalo, siempre que la variación con la temperatura de la cond.térmica en el material sea suave.

Material	$\Lambda(\text{W/m}^*\text{K})$ 300K-75K	$\Lambda(\text{W/m}^*\text{K})$ 77K-15K
COBRE	410	970
ACERO	12	5
Cu-Be	50	20

4.3.1 Piezas de PVC de interconexión entre etapas.

Pieza	material	λ (w/m* K)	Longitud (mm)	Sección (mm ²)	W_{cond} (mw)	W_{cond_T} (mw)
Caliente-intermedia (300-70K)	PVC	0.16	142.4	54	13.95	55.8
Intermedia-fría (70-20K)	PVC	0.16	50.2	48	7.65	30.6

Se emplean 4 piezas de cada una para interconectar físicamente las etapas (se pretende que la conexión térmica sea lo peor posible).

4.3.2 Cables en el interior del criostato.

El criostato contiene elementos de tres bandas distintas (S-C-CH).

En este criostato, entre atapas a diferentes temperaturas, disponemos de cables para señales RF (coaxiales UT-085) y cables de DC (“Phosphor bronce” de Lakeshore Cryogenics). En la tabla siguiente se estima la carga térmica por conducción por sólidos a partir de los datos de conductividades térmicas indicadas en el apartado anterior.

Función	Cable	Øext (mm)	Øint (mm)	Longitud 300-75K (mm)	Longitud 75-15K (mm)	W_{300-75K} (W)	W_{75-15K} (W)
Entrada banda S LCP	UT-085-SP Cu	2.197 (1.58mm ²)	0.511 (0.2mm ²)	155	155	1.065	0.68
Salida banda S LCP	UT-085-SS Cu/Acero	2.197 (1.58mm ²)	0.511 (0.2mm ²)	240	240	0.097	0.052
Entrada banda S RCP	UT-085-SP Cu	2.197 (1.58mm ²)	0.511 (0.2mm ²)	160	160	1.032	0.658
Salida banda S RCP	UT-085-SS Cu/Acero	2.197 (1.58mm ²)	0.511 (0.2mm ²)	215	215	0.109	0.058
Entrada banda C LCP	UT-085-SP Cu	2.197 (1.58mm ²)	0.511 (0.2mm ²)	180	180	0.917	0.584
Salida banda C LCP	UT-085-SS Cu/Acero	2.197 (1.58mm ²)	0.511 (0.2mm ²)	205	205	0.114	0.061
Entrada banda C RCP	UT-085-SP Cu	2.197 (1.58mm ²)	0.511 (0.2mm ²)	175	175	0.944	0.601
Salida banda C RCP	UT-085-SS Cu/Acero	2.197 (1.58mm ²)	0.511 (0.2mm ²)	215	215	0.109	0.058
Entrada banda CH LCP	UT-085-SP Cu	2.197 (1.58mm ²)	0.511 (0.2mm ²)	150	150	1.1	0.7
Salida banda CH LCP	UT-085-SS Cu/Acero	2.197 (1.58mm ²)	0.511 (0.2mm ²)	230	230	0.102	0.054
Entrada banda CH RCP	UT-085-SP Cu	2.197 (1.58mm ²)	0.511 (0.2mm ²)	160	160	1.03	0.658
Salida banda CH RCP	UT-085-SS Cu/Acero	2.197 (1.58mm ²)	0.511 (0.2mm ²)	230	230	0.102	0.054
Polarización Y sensores	Phosphor bronze	0.127 (AWG36)	-	750	750	7.6*10⁻³	8.1*10⁻⁴
TOTAL	-	-	-	-	-	6.73	4.2

4.4 Carga térmica disipada en el criostato.

Es la debida principalmente a la potencia disipada en los amplificadores.

El criostato alberga 6 amplificadores HEMT, para las banda S-C-CH y dos polarizaciones por banda. Carga térmica sobre la etapa fría.

Banda	Polarización	Wamp (mW)
S	LCP	5
S	RCP	5
C (4-8GHz)	LCP	9
C (4-8GHz)	RCP	9
CH (2.4-4.8GHz)	LCP	5
CH (2.4-4.8GHz)	RCP	5
Total		38

4.5 Carga total en el criostato.

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

P=10^{-6} mbar	Etapa 15K	Etapa 70K
Gas	0.29mW	0.004W
Radiación	8mW	6W
Sólidos	4.2W	4,5W
Disipada	38mW	0
TOTAL	≈4.25W	≈10,5W

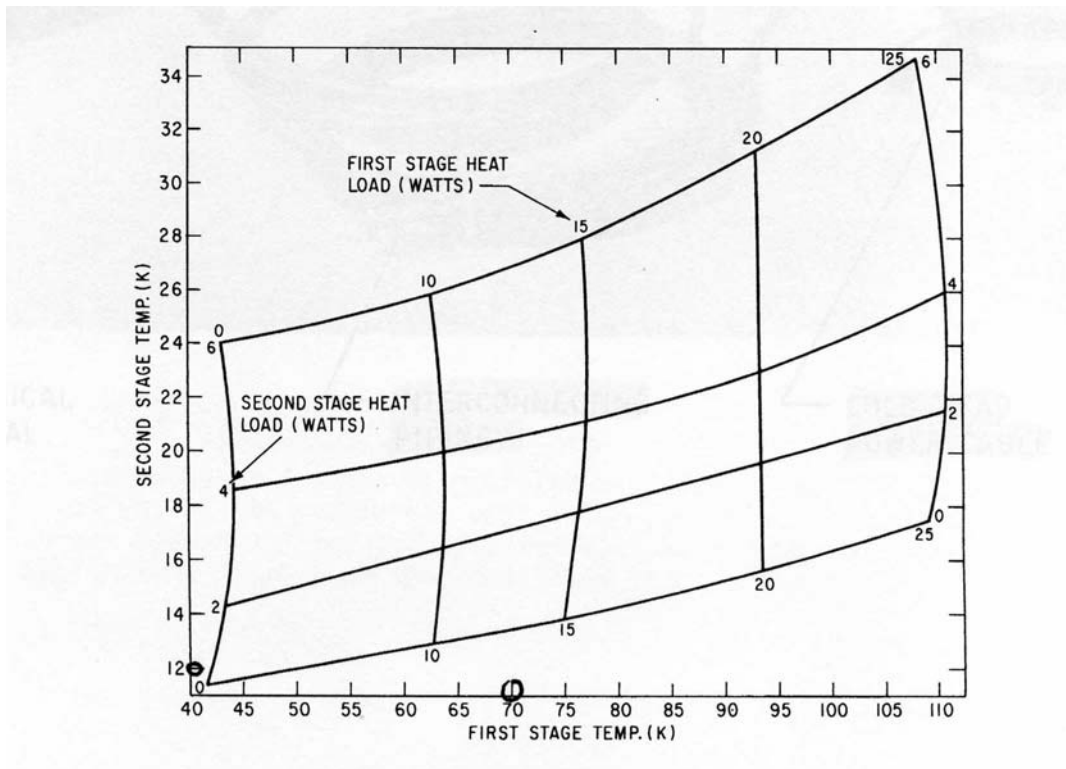


figura 63: Capacidad refrigeradora de la cabeza CTI-350

Si llevamos los resultados obtenidos a la gráfica, se obtienen las siguientes temperaturas:

$$\begin{aligned} T_{int} &= 65\text{K} \\ T_{cold} &= 18\text{K} \end{aligned}$$

El resultado real obtenido en el criostato es:

$$\begin{aligned} T_{int} &= 62\text{K} \\ T_{cold} &= 18\text{K} \end{aligned}$$

5 Medidas efectuadas en el receptor S/C/CH.

Se presentan en este capítulo todas las pruebas efectuadas en el criostato del Receptor S/C/CH.

- S C CH V1

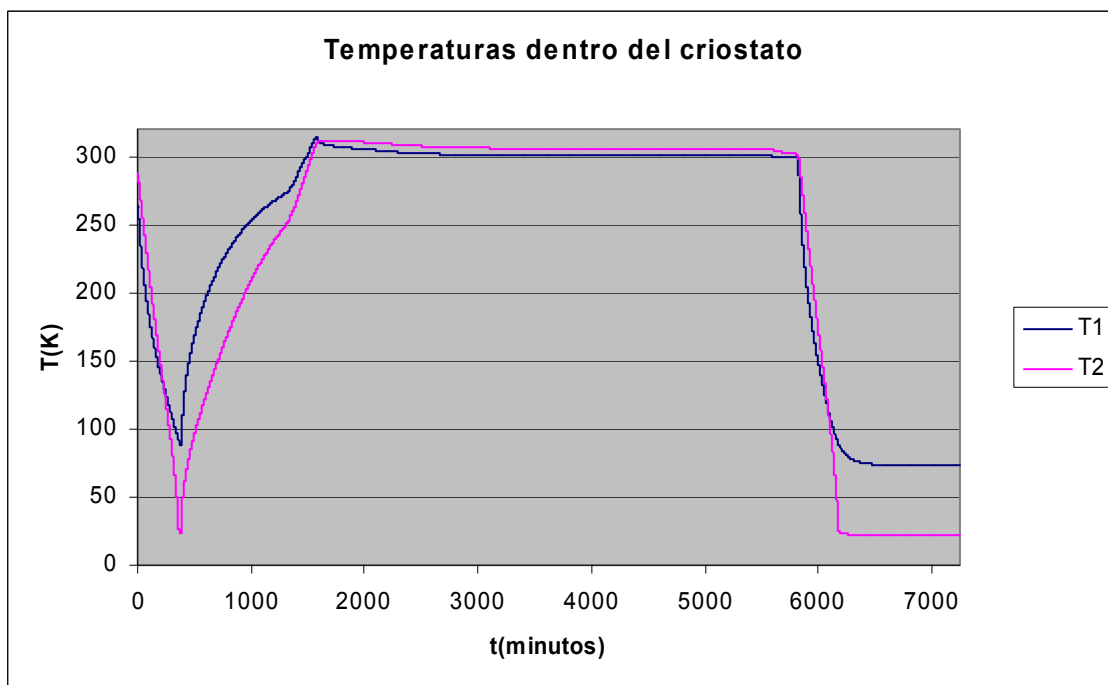


figura 64: Evolución de la temperatura en la etapa intermedia y en la etapa fría

Como puede apreciarse, se activó el compresor y la cabeza refrigeradora y en un primer intento las temperaturas conseguidas en cada una de las dos etapas fueron:

$$T_{INT}=88,3K$$

$$T_{COLD}=23,9K$$

Estos valores implican una carga de cada una de las etapas de 18 W en la etapa intermedia y 5W en la etapa fría.

Posteriormente se procedió a vaciar en frío, para lograr un mejor vacío en el interior del criostato. Se activaron también las resistencias calefactoras y regeneradoras de las zeolitas ($V_{CAL}=35V,428mA$; $V_{REG}=10V,95mA$). Una vez que el criostato está a Tamb se vuelve de nuevo a hacer el frío en su interior. En ese momento se tiene una presión de $8E-05mbar$. Se alcanzan los siguientes valores de temperaturas

$$T_{INT}=73,6K$$

$$T_{COLD}=21,5K$$

$$P_{CC}=5.5*10^{-7}mbar$$

El tiempo de enfriado (pasar de 298K a 21,7 K) es de 667 minutos (11 horas y 7 minutos)

- S C CH V2

En este caso lo que se hace es, una vez que el criostato está frío, se activan las resistencias calefactoras ($V_{CAL}=35V, 437mA$) para ver como evoluciona la temperatura en las dos etapas interiores.

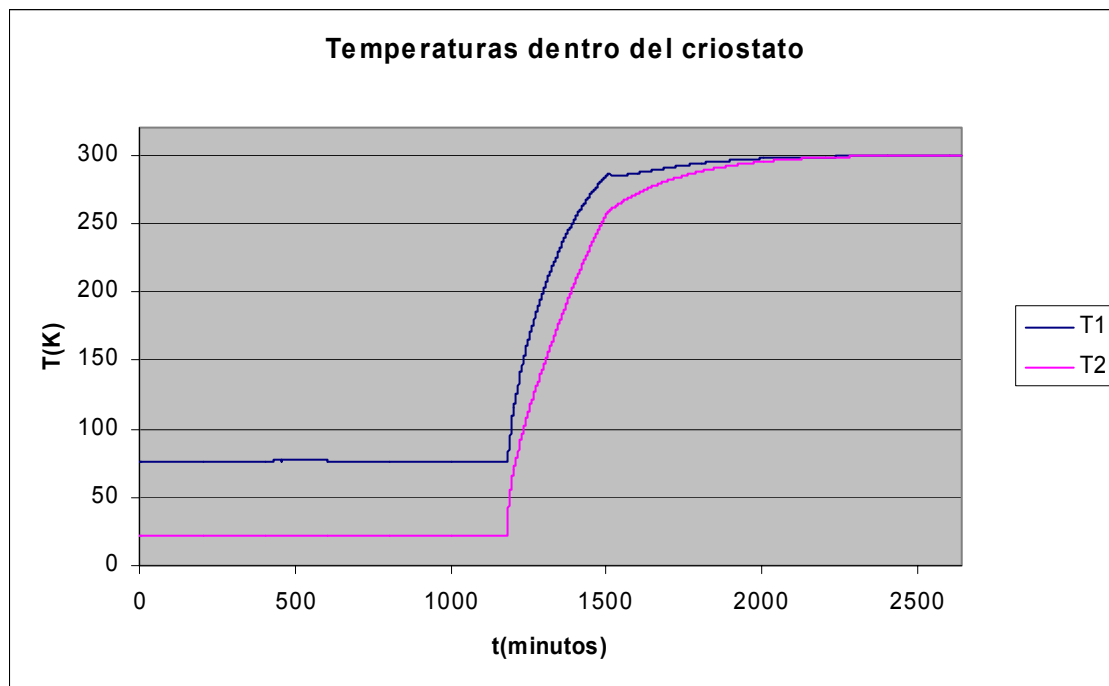


figura 65: calentamiento del criostato hasta T_{AMB}

Bajo estas condiciones, tras el paso de 1000 minutos \approx 16 horas y 40 minutos, se alcanza en ambas etapas la temperatura de 298K.

- S C CH V3

El siguiente paso que se realiza en el criostato es abrir la válvula de vacío para volver a tener en el interior presión ambiental. Una vez que se ha conseguido, se abre el criostato con el fin de **rehacer el superaislamiento para tratar de reducir la carga por radiación en la etapa intermedia. Además, los cables de alimentación de la etapa caliente se recubren de aluminio para reducir su emisividad. Otra operación importante es que se recubre de aluminio adhesivo la parte inferior de la etapa intermedia que no estaba pulida. Se cubren en parte los huecos que quedan abiertos en la tapa superior de la etapa intermedia (paso e los cables semirígidos de RF) con aluminio.**

Una vez efectuadas estas operaciones, se vuelve a cerrar el criostato, se hace el vacío, se encienden las resistencias calefactoras y regeneradoras de las zeolitas y tras \approx 66 horas vaciando se enciende el compresor y la cabeza refrigeradora. En ese momento la presión dentro del criostato es de $1 \cdot 10^{-4}$ mbar.

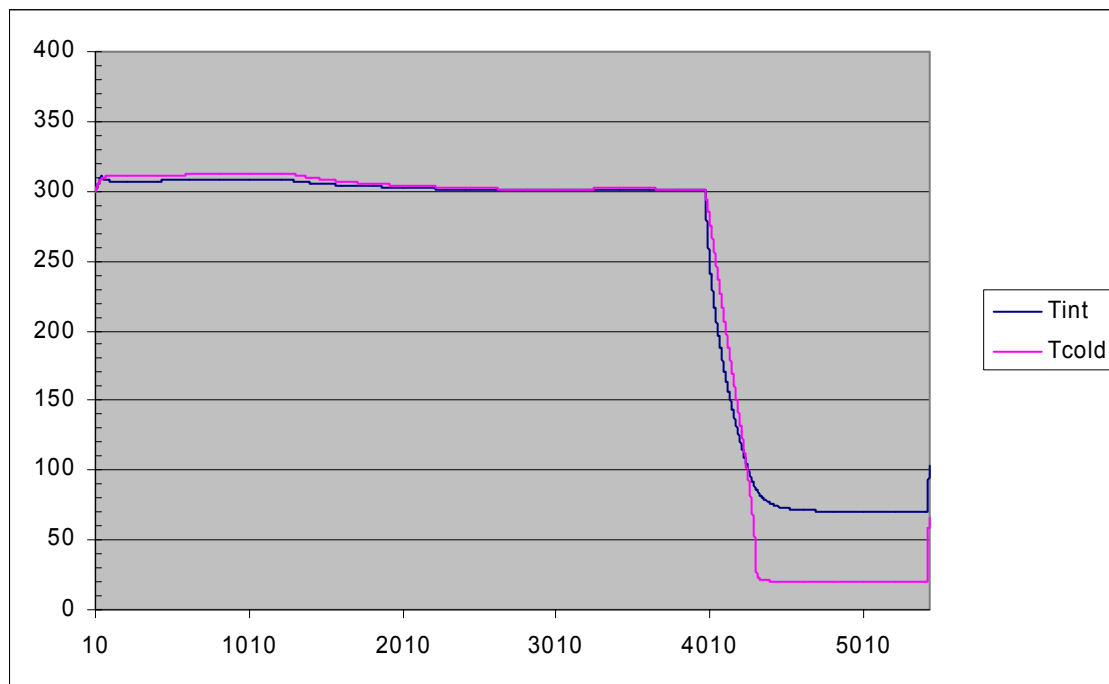


figura 66: Evolución de la temperatura en la etapa intermedia y en la etapa fría

Los valores de temperatura y de presión alcanzados en este caso son los siguientes:

$$\begin{aligned} T_{INT} &= 69,8\text{K} \\ T_{COLD} &= 19,6\text{K} \\ P_{CC} &= 4,6 \cdot 10^{-7} \text{ mbar} \end{aligned}$$

Estas temperaturas alcanzadas se corresponden con una carga en la etapa intermedia de 13 W y en la etapa fría de 4W.

El tiempo de enfriado (pasar de 298K a 20,1K) es de 522 minutos (8 horas y 42 minutos).

Posteriormente, se vuelven a activar las resistencias calefactoras y regeneradoras de las zeolitas ($V_{CAL}=35\text{V}, 450\text{mA}$; $V_{REG}=10\text{V}, 97\text{mA}$).

- S C CH V4

A continuación se hace el frío en el criostato y se deja en estas condiciones durante un periodo de 13 días. Se monitoriza también la temperatura ambiente existente en el laboratorio.

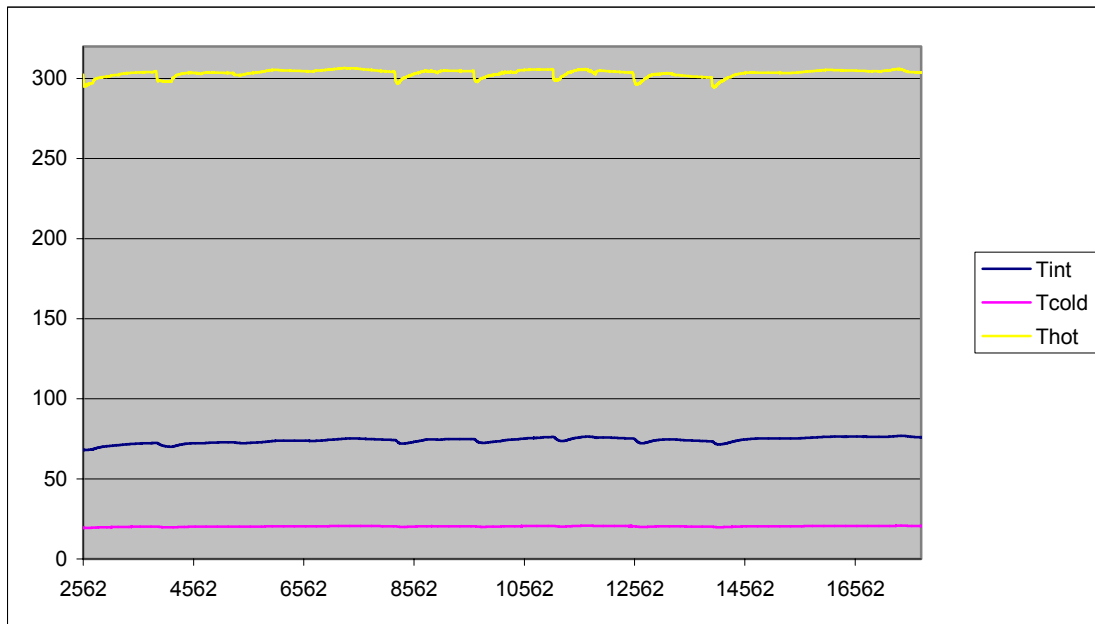


figura 67: Monitorización de las temperaturas durante un periodo de 13 días

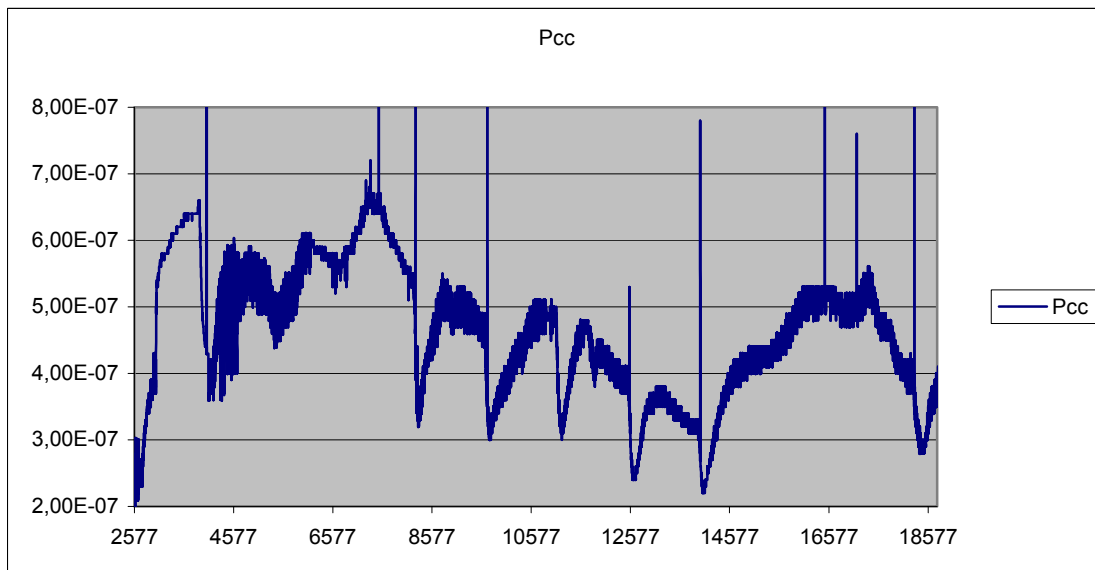


figura 68: Monitorización de la presión durante un periodo de 13 días

Se aprecia claramente cómo los cambios de la temperatura ambiente en el laboratorio afectan a la temperatura de la etapa intermedia y de la etapa fría dentro del criostato. La presión también se ve ligeramente afectada.

Criostato de los receptores S/C/CH de la antena ARIES del CAY

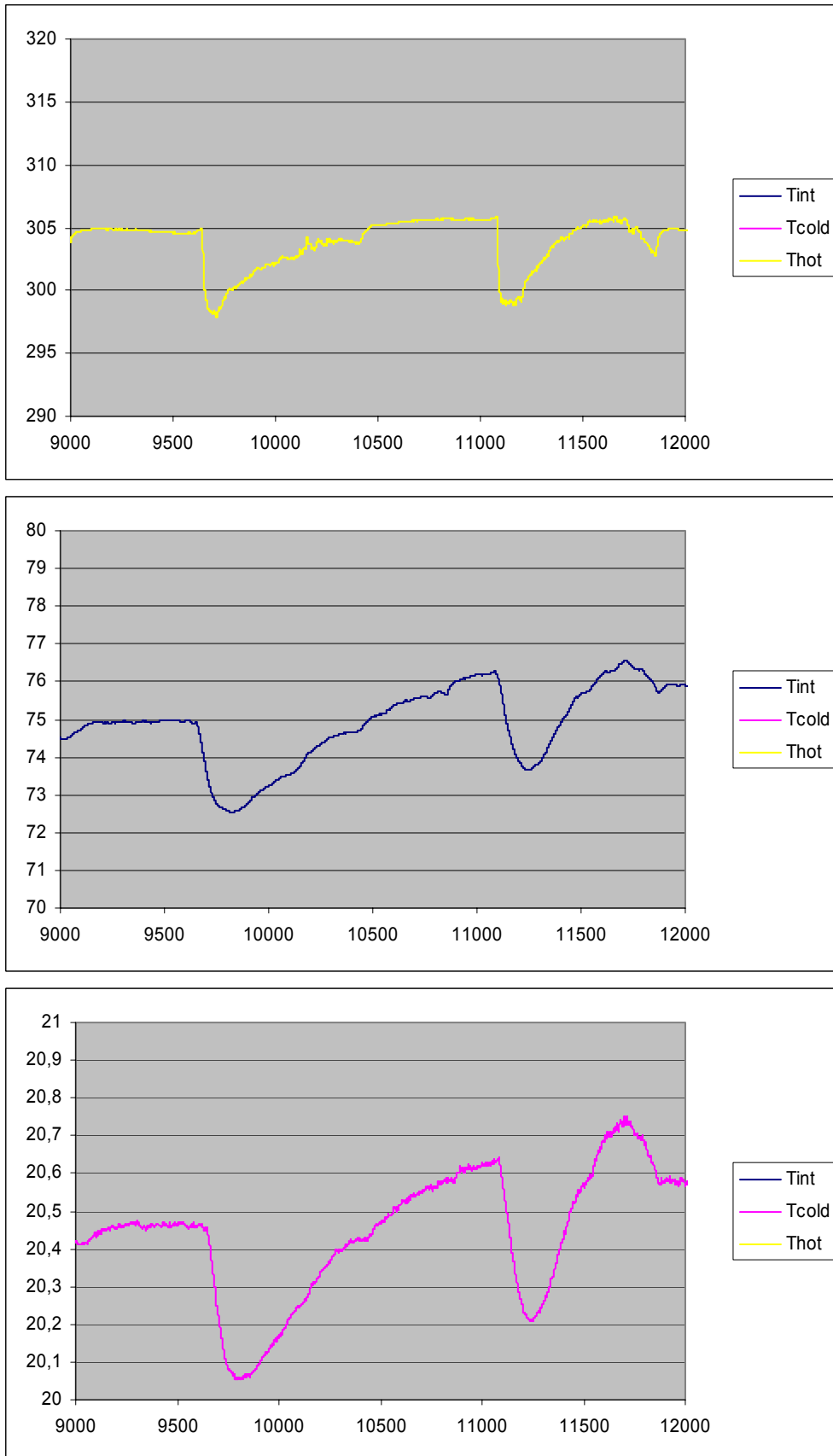


figura 69: Ciclo térmico del criostato S/C/CH

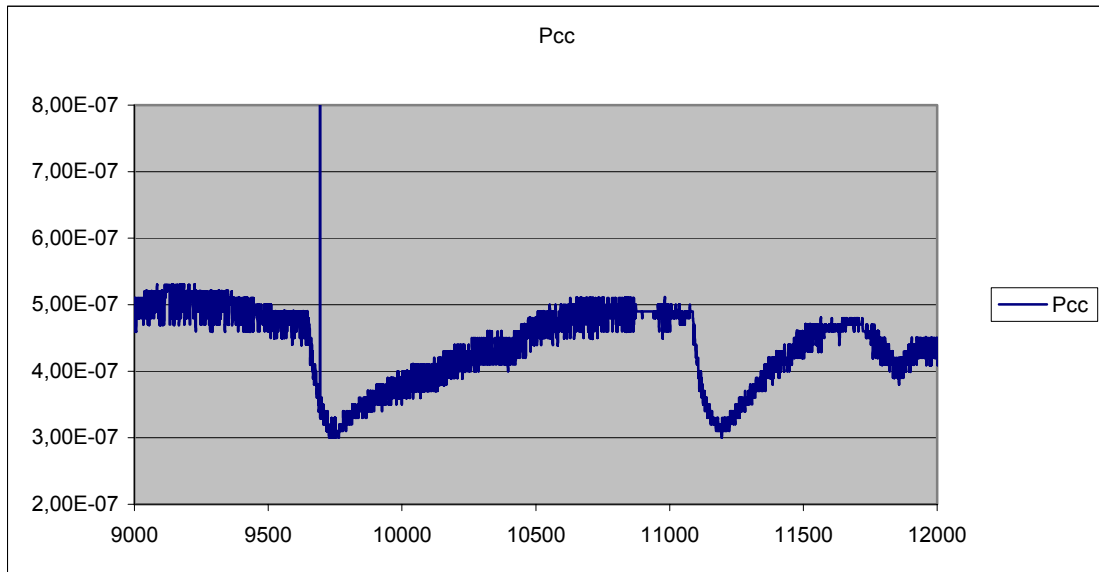


figura 70: Efecto de la variación de la temperatura ambiente sobre la presión interna del criostato

El ciclo térmico del criostato es de 90 minutos

Ciclo térmico → tiempo que transcurre desde que una variación de un parámetro externo (temperatura ambiente) afecta al interior del criostato.

- S C CH V4 vacuum broken:

En un determinado momento, se abre la válvula de vacío del criostato, por lo que su interior pasa inmediatamente de una presión del orden de 10^{-7} mbar a presión ambiental. Este acontecimiento afecta a la temperatura y a la presión tal y como muestran las gráficas.

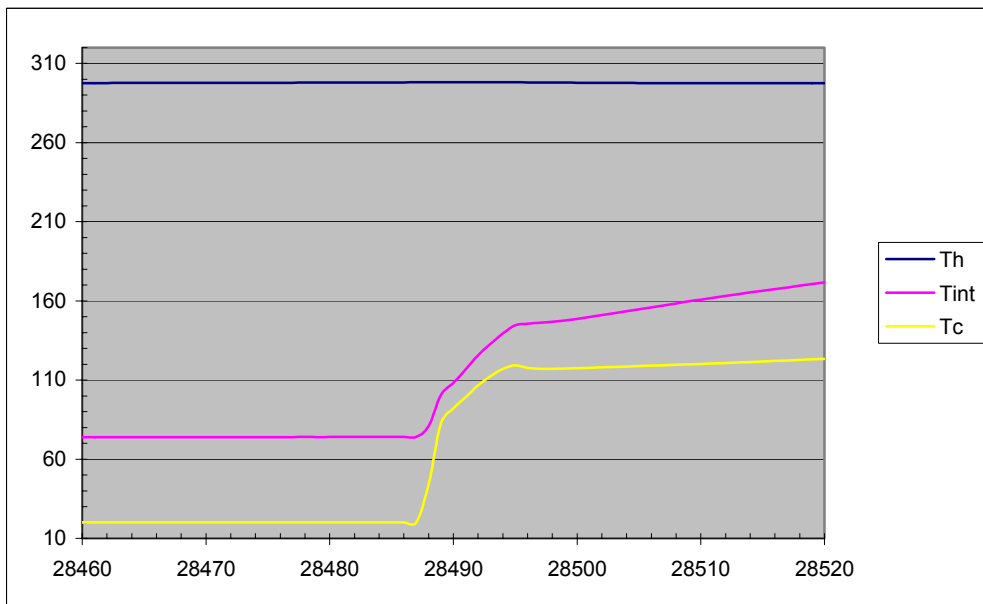


figura 71: válvula de vacío del criostato abierta

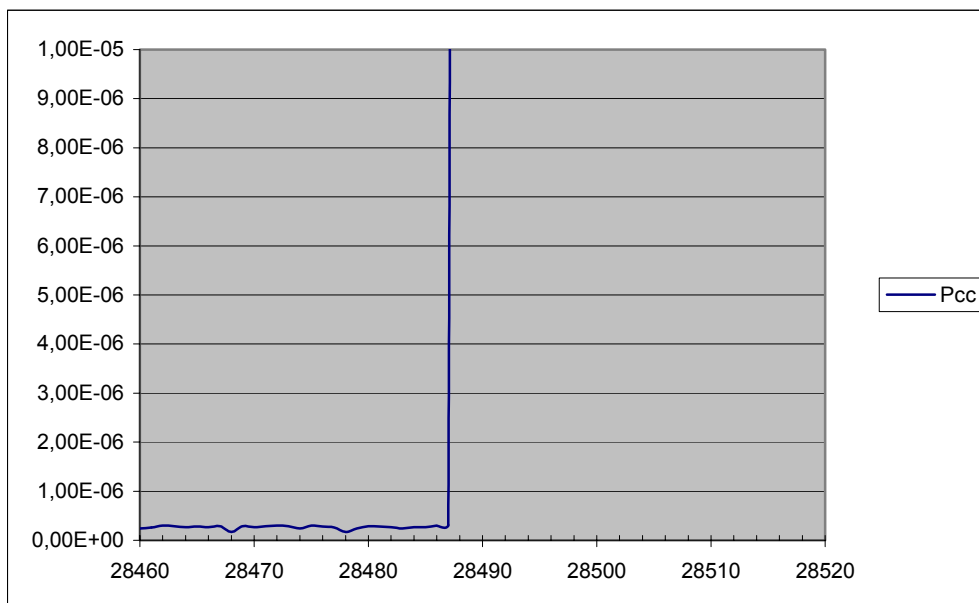


figura 72: válvula de vacío del criostato abierta

Se deja que el interior del criostato se caliente de forma natural

Se procede a abrir el criostato para verificar si se ha producido algún daño debido al brusco aumento de presión en el interior (existencia de hielo o agua, efecto sobre el superaislamiento...).

Se comprueba que el MLI está deteriorado. No existe ni agua ni hielo en el interior. Se produce una ligera condensación de vapor de agua debido a que la temperatura del laboratorio es superior a la existente en la etapa intermedia y en la etapa fría.

Reparación del superaislamiento.

Limpieza del interior del criostato.

Reparación del conector correspondiente a C1_{OUT}. Soldadura rota.

De nuevo se cierra el criostato, se activan las resistencias calefactoras y regeneradoras ($V_{CAL}=35V,462mA$; $V_{REG}=10V,84mA$) y se comienza a realizar el vacío.

Cuando el vacío en el interior del criostato es de $1.1 \cdot 10^{-4}$ mbar, se empieza a hacer el frío (encender el compresor y la cabeza refrigeradora)

Los valores finales alcanzados son los siguientes:

$$\begin{aligned} T_{INT} &= 68,96K \\ T_{COLD} &= 19,8K \\ T_{AMB} &= 295,4K \\ P_{CC} &= 4,2 \cdot 10^{-7} \text{ mbar} \end{aligned}$$

El tiempo de enfriado (pasar de 298K a 21K) es de 453 minutos (7 horas y 33 minutos).

- **S C CH V6:**

En este caso se mantiene el criostato funcionando ininterrumpidamente durante 34000 minutos=566.67 horas=23 días y 14 horas.

Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes gráficas.

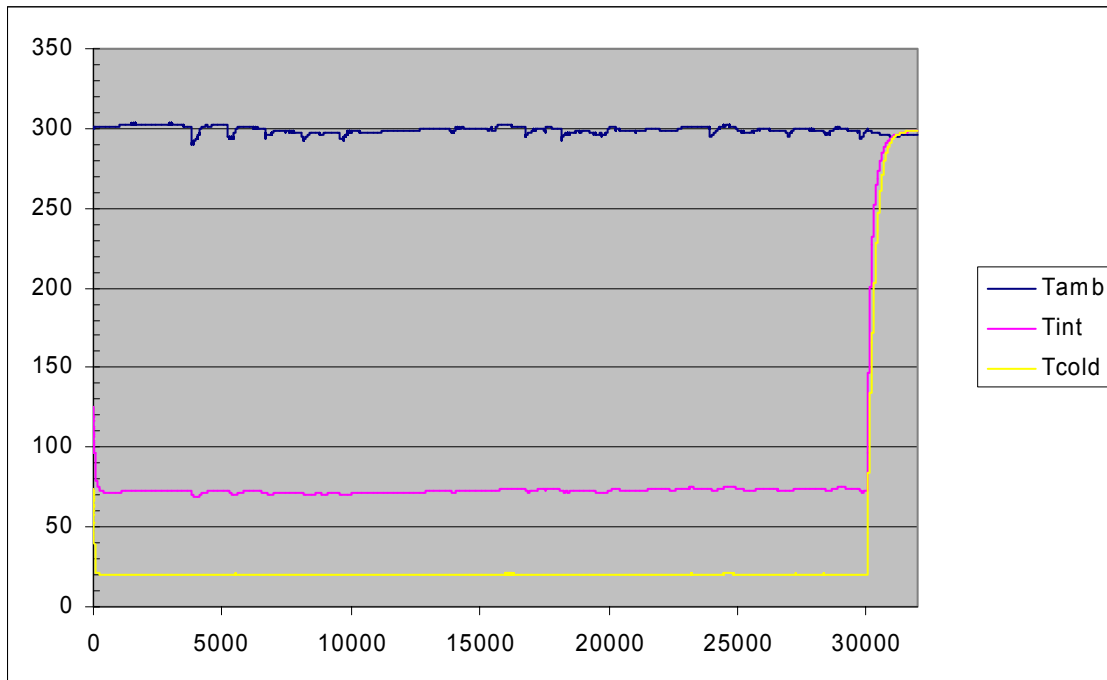


figura 73: Evolución de la temperatura en el criostato

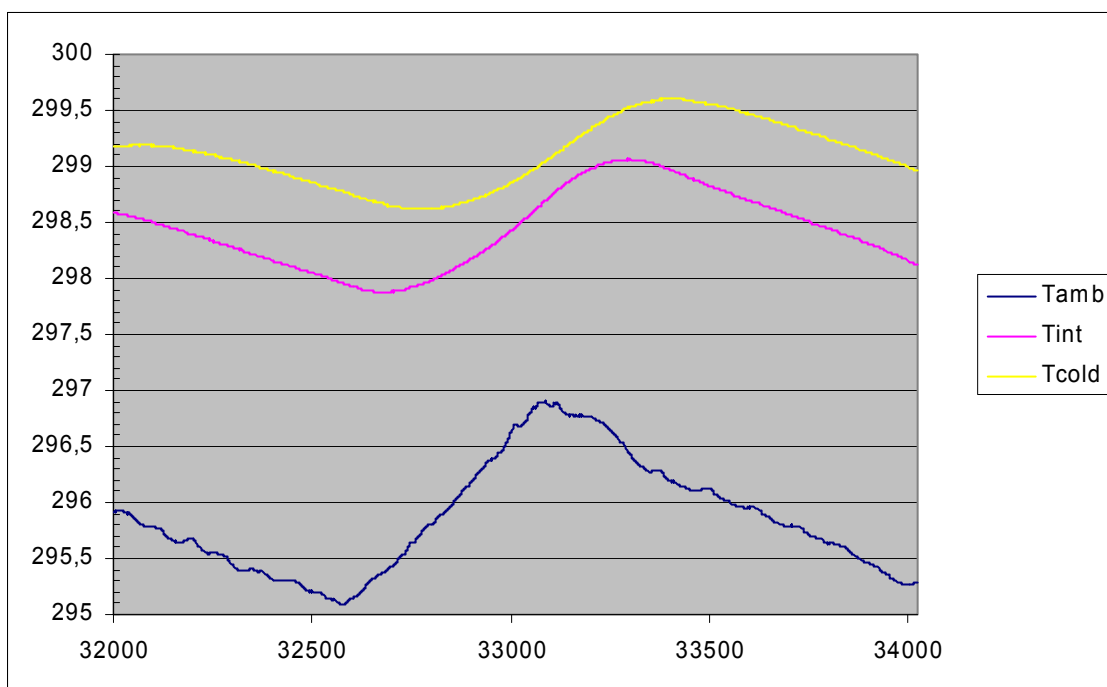


figura 74: Evolución de las temperaturas en el criostato

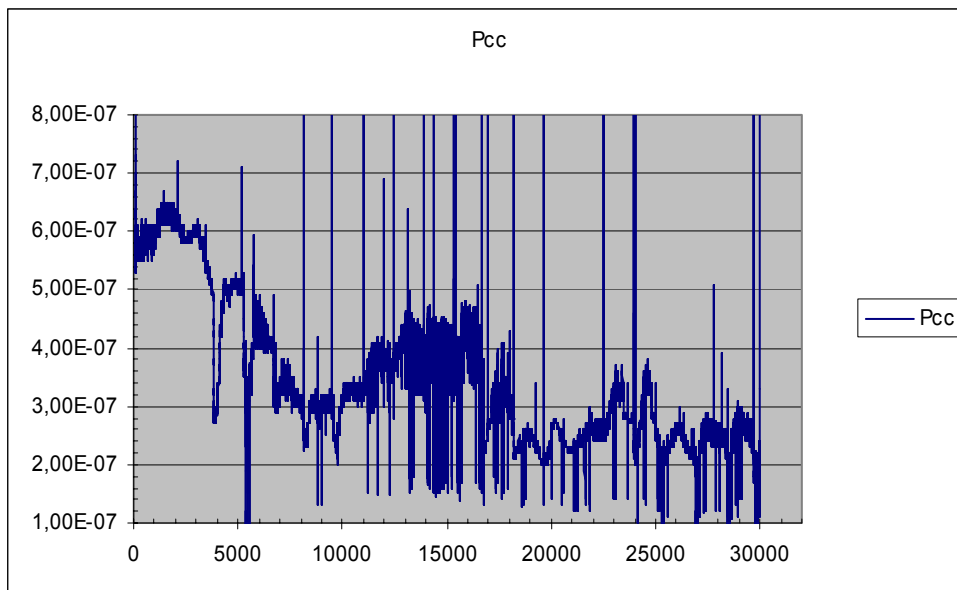


figura 75: Evolución de la presión en el interior del criostato

Las temperaturas medias obtenidas durante este ciclo son las siguientes:

$$T_{AMB} = 300K$$

$$T_{INT} = 71K$$

$$T_{COLD} = 20K$$

En cuanto a la presión alcanzada en el interior del criostato, se observa que durante todo el tiempo en el que se está haciendo el frío, la presión se encuentra comprendida en el siguiente margen:

$$2 \cdot 10^{-7} < P < 6.5 \cdot 10^{-7}$$

Se calcula cuál es el tiempo de calentamiento del criostato sin activar las resistencias regeneradoras de las zeolitas ni tampoco las resistencias calefactoras:

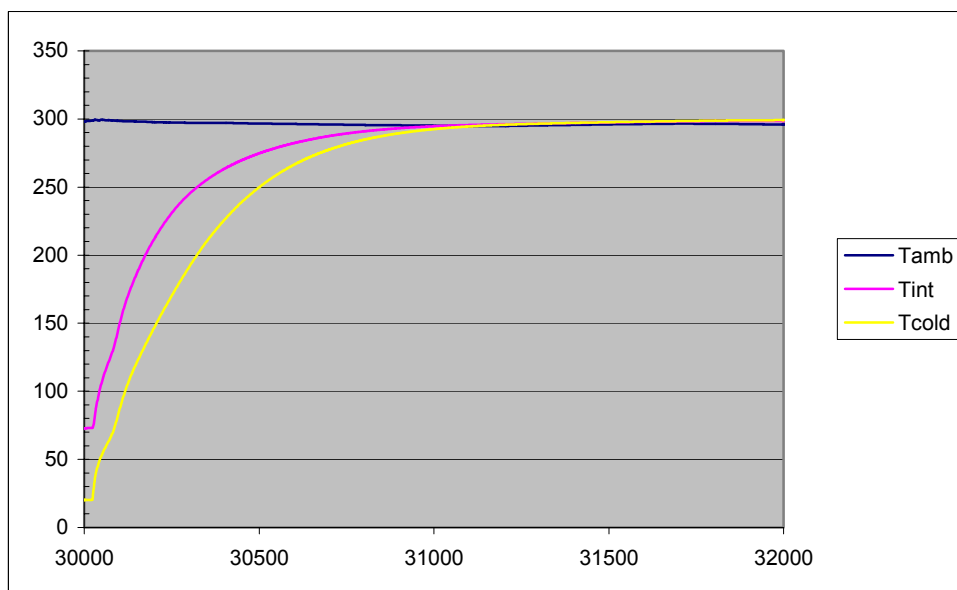


figura 76: Tiempo de calentamiento del criostato

Criostato de los receptores S/C/CH de la antena ARIES del CAY

La cabeza refrigeradora y el compresor se apagan en el minuto 30023 de funcionamiento y se alcanza la temperatura ambiente en el minuto 31150. Así pues, el tiempo de calentamiento es de 1127 minutos = **18 horas y 47 minutos**.

La temperatura de la etapa intermedia se encuentra comprendida en el margen de temperaturas: $69 < T_{INT} < 75.2 \rightarrow \Delta T_{INT} = 6.2K$

La temperatura de la etapa fría se encuentra comprendida en el margen de temperaturas: $19,8 < T_{COLD} < 20,7 \rightarrow \Delta T_{COLD} = 0.9K$

La temperatura ambiente se encuentra comprendida en el margen de temperaturas: $290 < T_{AMB} < 303 \rightarrow \Delta T_{AMB} = 13K$.

Referencias

- Ref 1. "Criostato del receptor de 22 GHz del CAY". Informe técnico del CAY 2005-12.
- Ref 2. "Criostato del receptor S/X de VLBI del CAY". Informe técnico el CAY 1994-6
- Ref 3. "Cryogenic Heat Transfer". Randall F.Barron. Taylor and Francis, 1999.
- Ref 4. "Cryogenic Systems". Randall F.Barron. Oxford Science publications, 1985.
- Ref 5. "Experimental Techniques in Low-Temperature Physics". Guy K. White.
- Ref 6. "Guidelines for the design of cryogenic systems". NRAO.
- Ref 7. "*Cryogenic Process Engineering.*" Klaus D. Timmerhaus, Thomas M. Flynn.
- Ref 8. "Cryogenic engineering". Hands.
- Ref 9. "Handbook of cryogenic engineering". Weidend.
- Ref 10. "CTI-Cryogenics cryodyne refrigeration systems"
- Ref 11. "Measurement of cryogenic performance of 4-8 GHz Pamtech isolators S/N 117-120". Technical Report CAY.2000-3
- Ref 12. "Cryogenic design of the Deep Space Network Large Array Low-Noise amplifier system". IPN Progress report 42-157. May, 2004. Communications Ground Systems Section.

Fotografías del criostato



figura 77



figura 78



figura 79

Criostato de los receptores S/C/CH de la antena ARIES del CAY



figura 80

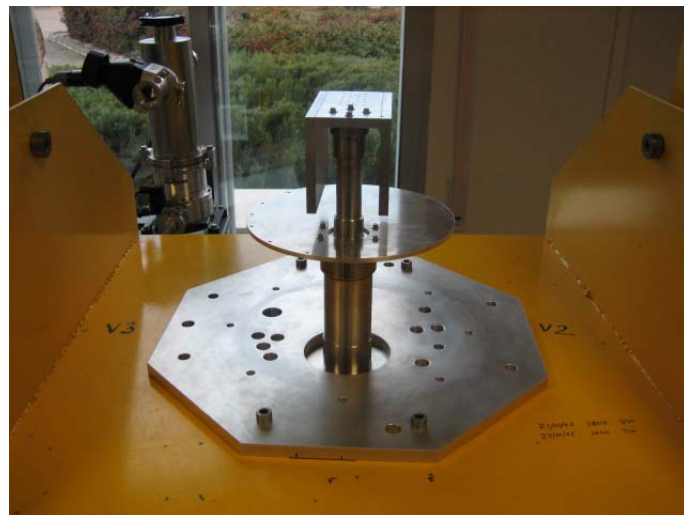


figura 81



figura 82: Montaje de los cables de radiofrecuencia que interconectan la entrada al receptor con la entrada a los LNA's y la salida de los LNA's con la salida del receptor



figura 83: Malla estañada que interconecta los cables de RF con la etapa intermedia

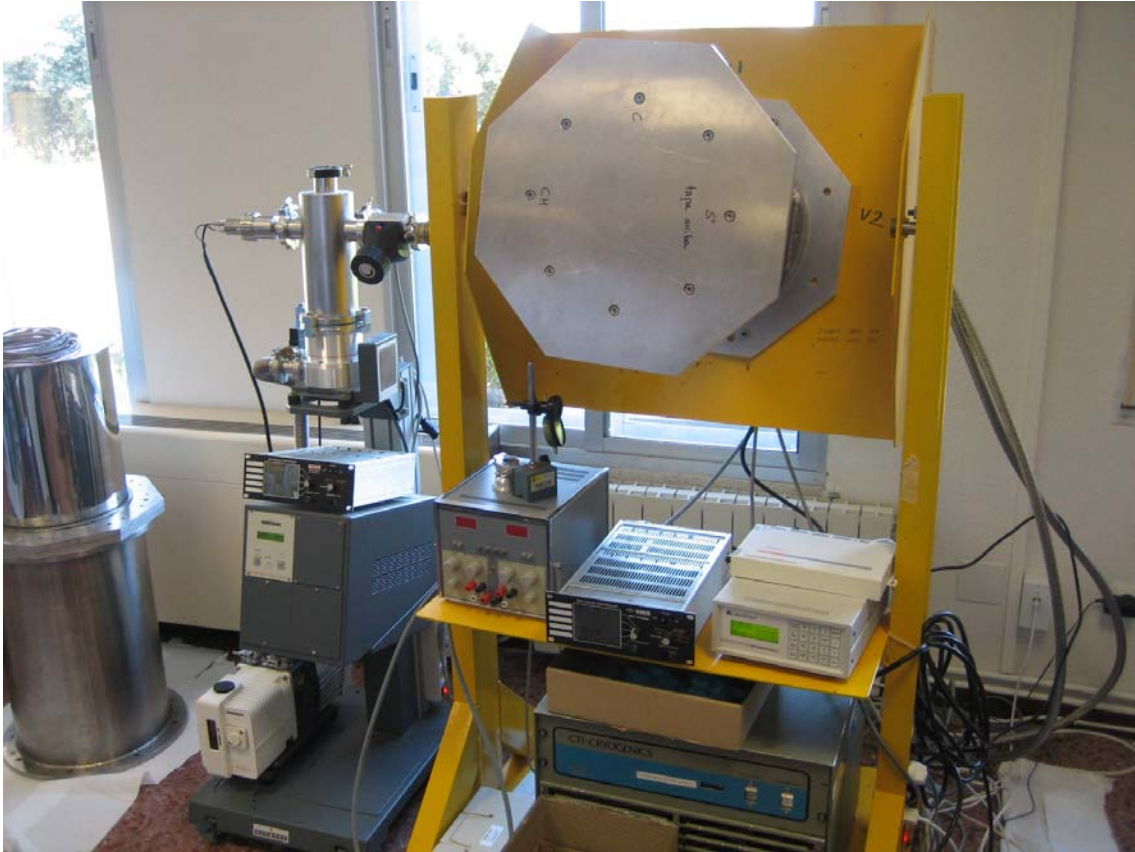


figura 84: Receptor S/C/CH cerrado y efectuando sus primeras medidas

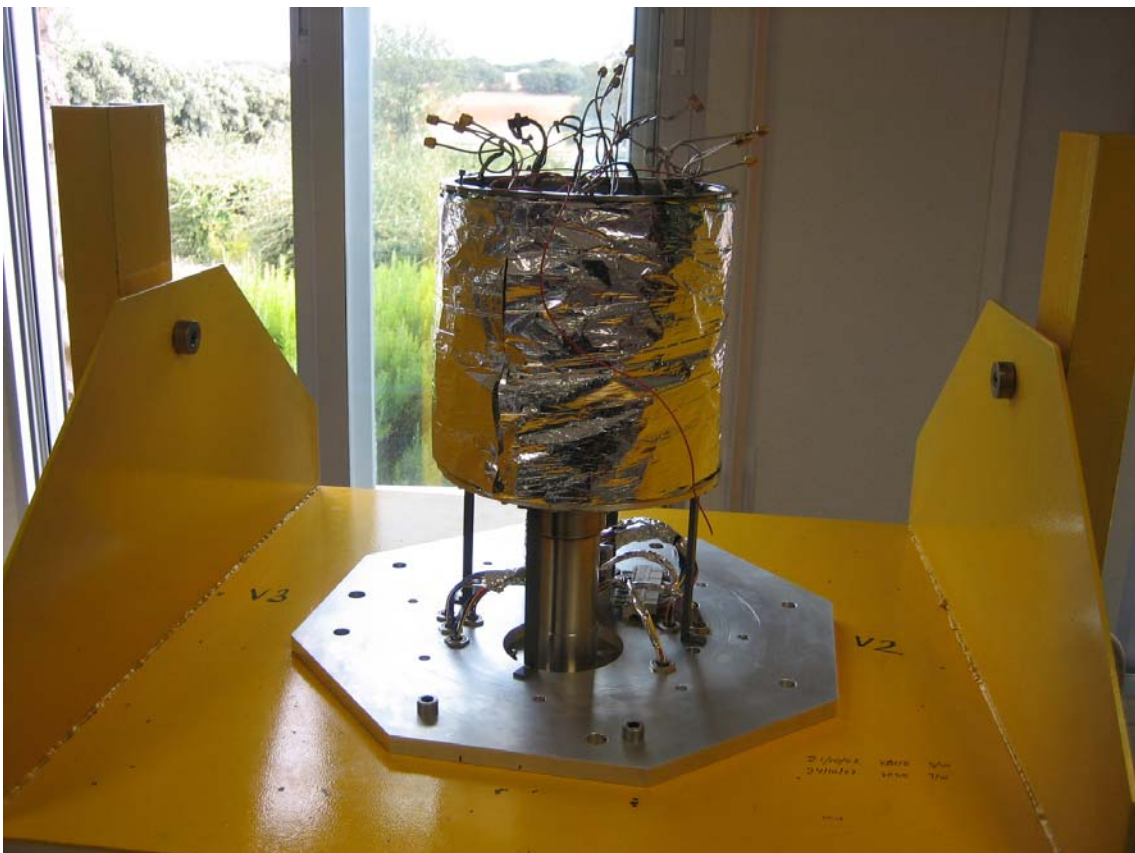


figura 85: Vista de la etapa intermedia del criostato

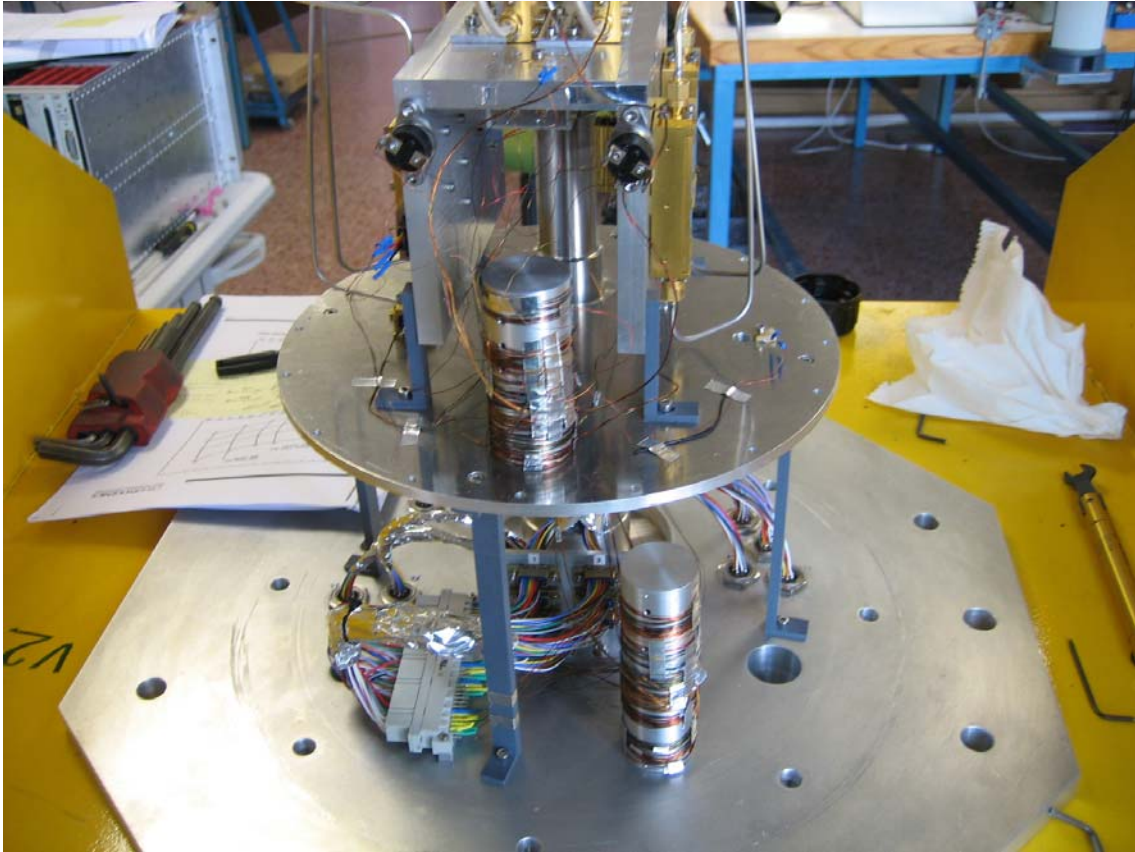


figura 86: Cableado DC

Anexos

Anexo A: Especificaciones de los LNAs

Anexo B: Especificaciones del cable criogénico Lakeshore

Anexo C: Especificaciones de los sensores de T^a (DT470-B1)

Anexo D: Especificaciones de los termostatos

Anexo E: Especificaciones de la cabeza refrigeradora CTI-350

Anexo F: Especificaciones del compresor CTI-8200

Anexo G: Especificaciones del cable remirígido UT-085-SP.

Anexo H: Especificaciones del cable remirígido UT-085-SS.