

**CRIOSTATO DE LOS RECEPTORES
X/Ku DE LA ANTENA ARIES XXI
DEL CAY**

J.A.López Fernández, José Manuel Serna Puente, F.Tercero
J.M.Yagüe, J.A.Abad
C.Almendros, S.Henche, J.Fernández

INFORME TÉCNICO IT – OAN 2008 - 4

ÍNDICE

1	Introducción.....	1
2	Geometría del criostato.....	3
2.1	Cableado interior DC.....	7
2.1.1	Cableado de polarización de los amplificadores de bajo ruido.	13
2.1.2	Cableado de “house-keeping”.	14
2.1.3	Cableado interior de Radiofrecuencia.	19
2.2	Piezas de interconexión entre las distintas etapas.	23
2.3	Etapas exterior (vacuum case).	26
2.4	Etapas intermedia (radiation shield).....	32
2.5	Etapas fría (cold plate).	37
2.5.1	Instalación de los amplificadores.	40
3	Sistemas criogénicos empleados en el criostato del receptor X/Ku.	43
4	Diseño térmico del criostato.	44
4.1	Conducción gaseosa.	44
4.2	Conducción por radiación.....	45
4.2.1	Conducción por radiación en la etapa intermedia.	47
4.2.2	Conducción por radiación en la etapa fría.	48
4.2.3	Resultados de carga por radiación.....	48
4.2.4	MLI (MultiLayer Insulation).....	49
4.3	Conducción por sólidos.	54
4.3.1	Piezas de PVC de interconexión entre etapas.....	54
4.3.2	Cables en el interior del criostato.	55
4.4	Carga térmica disipada en el criostato.....	55
4.5	Carga total en el criostato.	56
4.5.1	Efecto de la transición de vacío sobre la etapa fría del criostato.....	57
	Referencias.....	60
	Fotografías del criostato.....	61
	Anexos.....	64
	Anexo A: Especificaciones de los amplificadores Banda X.....	64
	Anexo B: Especificaciones del cable criogénico Lakeshore.....	64
	Anexo C: Especificaciones de los sensores de T ^a (DT470-B1).....	64
	Anexo D: Especificaciones de los termostatos.....	64
	Anexo E: Especificaciones de la cabeza refrigeradora CTI-350.....	64
	Anexo F: Especificaciones del compresor CTI-8200.....	64
	Anexo G: Especificaciones del cable remirígido UT-085-SS-SS.	64
	Anexo H: Especificaciones del cable remirígido UT-141A-SP.	64

1 Introducción.

En el presente informe se resumen el diseño y las características más importantes del criostato de los receptores de las bandas X y Ku 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 $1.5 \cdot 10^{-5}$ mbar. **El tiempo de enfriado es de aproximadamente 12 horas, mientras que el tiempo de calentamiento es de aproximadamente 9 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.

Se indica a continuación un esquema general del receptor banda X, indicando las conexiones existentes entre el criostato y la unidad de frecuencia intermedia.

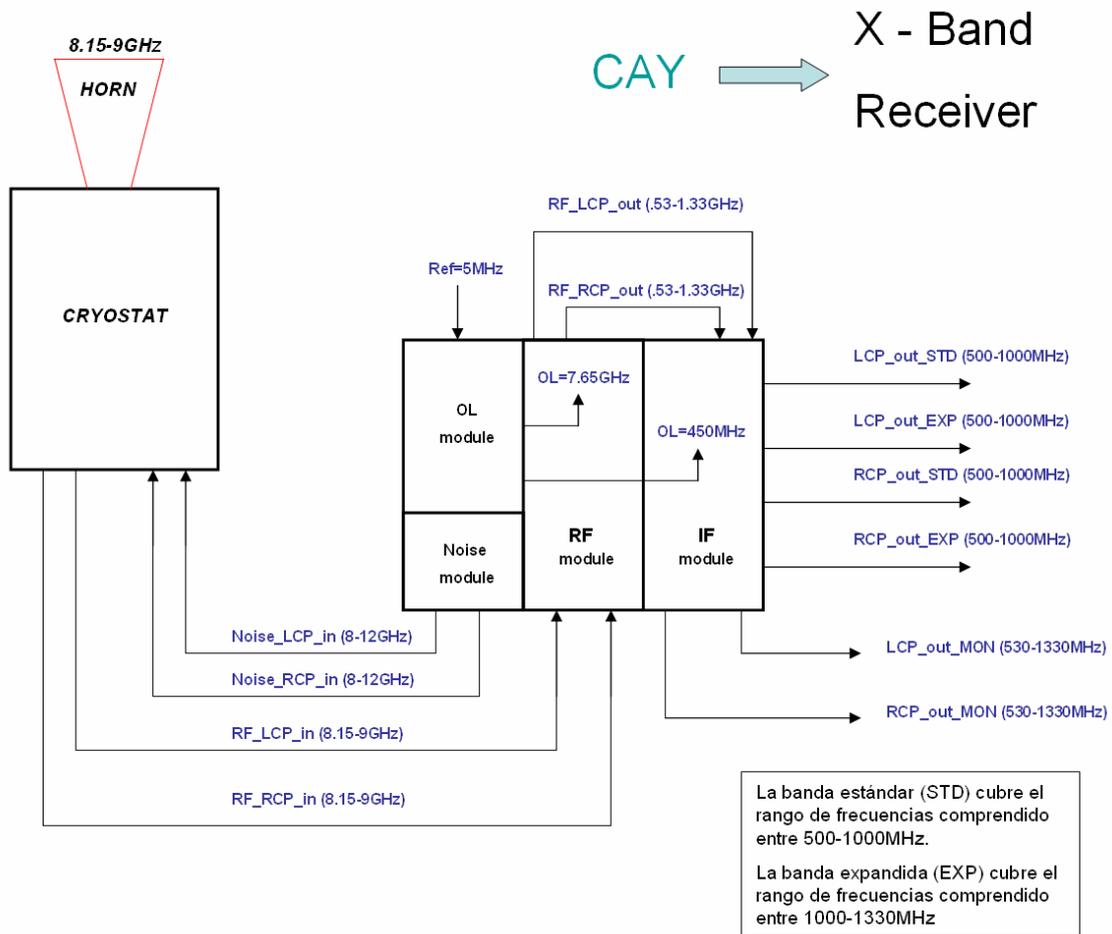


figura 1: Esquema del receptor banda X completo.

2 Geometría del criostato.

En la siguiente figura se muestra la disposición del receptor en la rama M4' de la cabina de receptores.

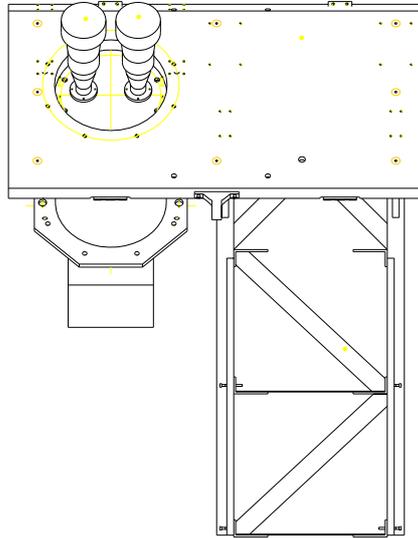


figura 2: Receptor X/Ku en la rama M4'

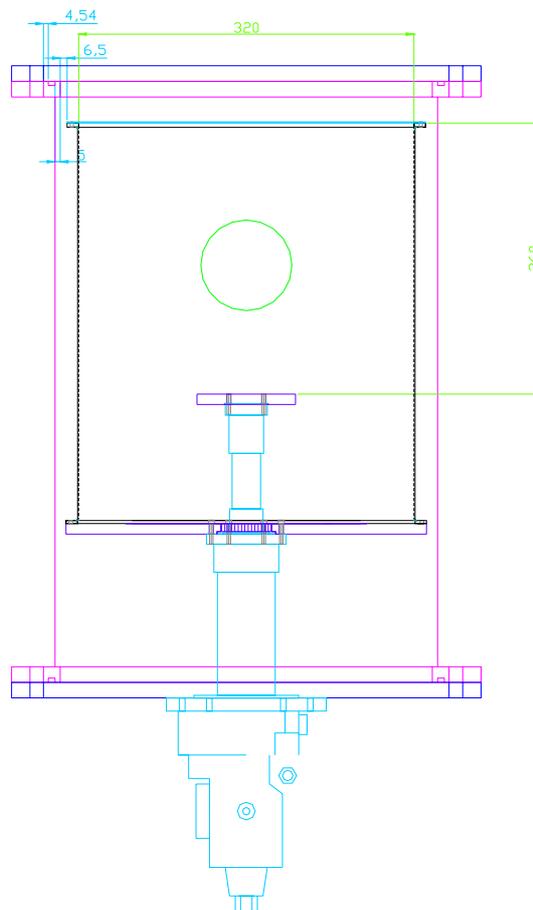


figura 3: Diseño general del receptor X/Ku

Criostato de los receptores X/Ku de la antena ARIES XXI del CAY

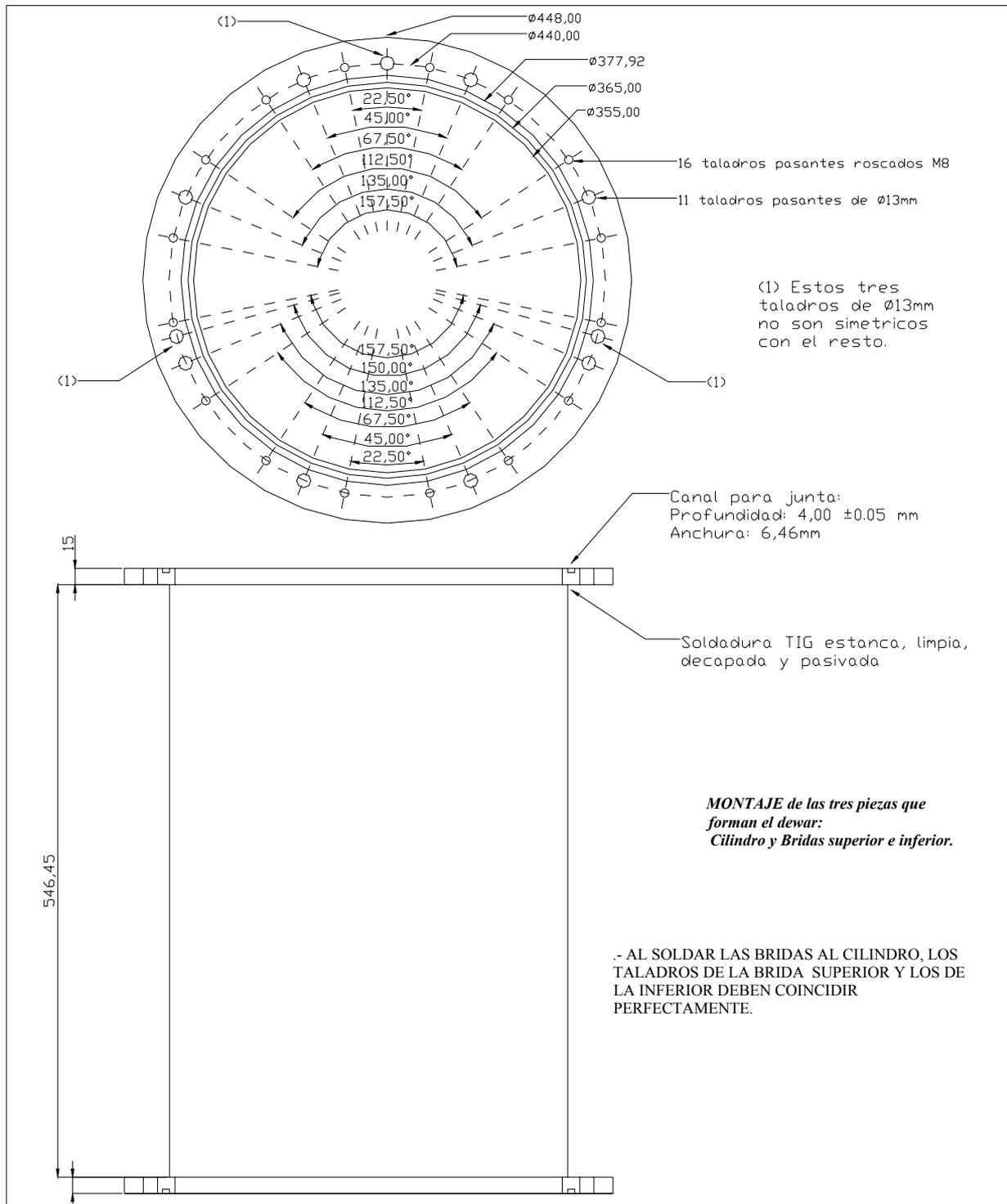
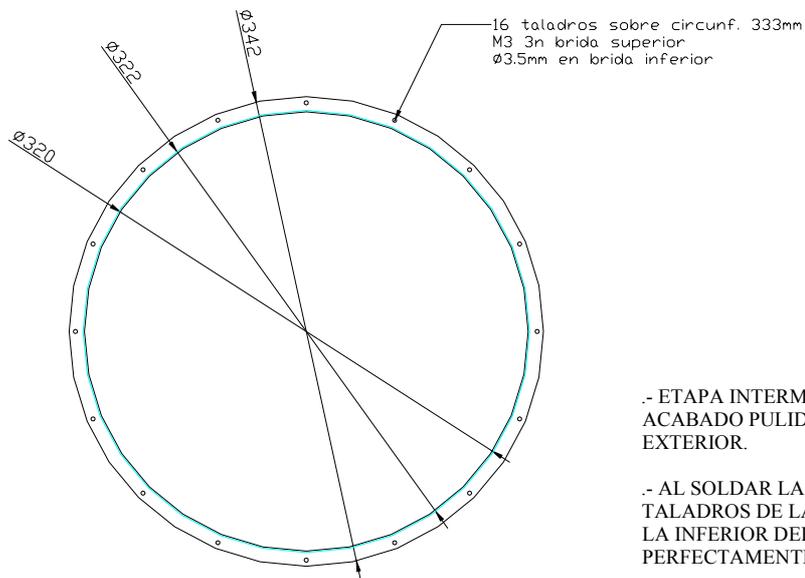
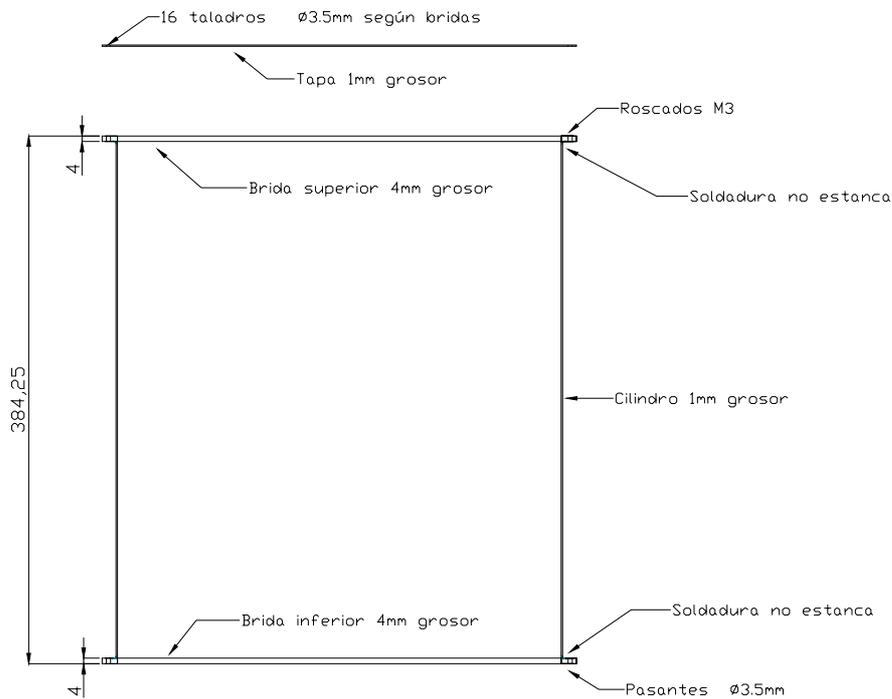


figura 4: Geometría del criostato construido (1-dewar)

Se trata de un cilindro hueco de planta circular, acero AISI-316 de 2mm de grosor, acabado pulido espejo BA en interior y acabado pulido mate en el exterior.

Criostato de los receptores X/Ku de la antena ARIES XXI del CAY

**MONTAJE de las cuatro piezas que forman la Etapa Intermedia:
Tapa, Cilindro y Bridas superior e inferior.**



- ETAPA INTERMEDIA EN ACERO AISI-316,
ACABADO PULIDO ESPEJO BA EN INTERIOR Y
EXTERIOR.

- AL SOLDAR LAS BRIDAS AL CILINDRO, LOS
TALADROS DE LA BRIDA SUPERIOR Y LOS DE
LA INFERIOR DEBEN COINCIDIR
PERFECTAMENTE (IMAGEN ESPECULAR).

figura 5: Etapa intermedia del criostato

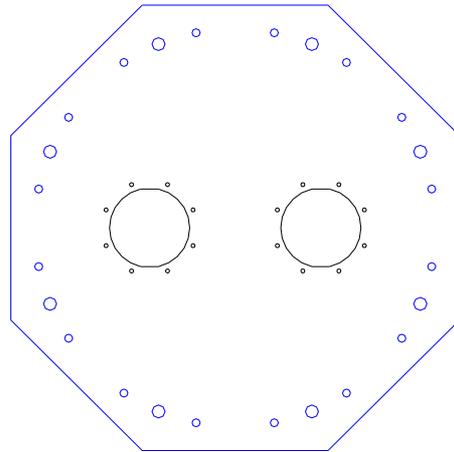
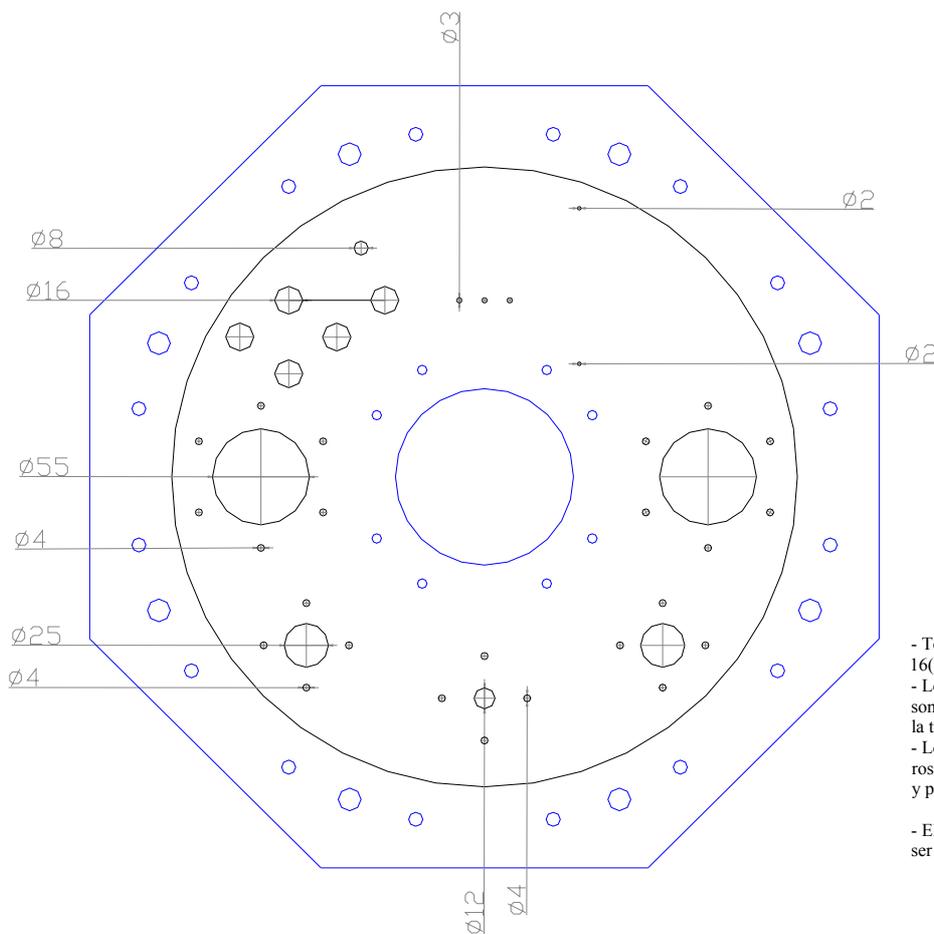


figura 6: Tapa superior del criostato



- Todos los taladros de diámetro 55(2), 25(2), 16(5) y 12(1) mm son pasantes.
- Los taladros de diámetro 8(1), 3(3) y 2(2)mm son roscados por la parte superior de la tapa. Profundidad 7mm.
- Los taladros de diámetro 4mm(24) son roscados por la parte inferior de la tapa y profundidad 7 mm.
- El acabado de la tapa por la parte superior debe ser pulido.

figura 7: Tapa inferior del criostato

2.1 Cableado interior DC.

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

- Uno (1) de 16 pines (se usan 15 de ellos) empleado para las señales de monitorización y “House-keeping”.
- Cautro (4) de 11 pines (se emplean 9 de ellos) correspondientes a las señales de polarización de los amplificadores de bajo ruido presentes en el criostato (2 receptores y doble polarización por receptor). El conector asociado a cada una de las polarizaciones, tiene polaridad diferente.

<i>CONECTOR</i>	<i>FUNCIÓN</i>
C1	Polarización LNA banda X LCP
C2	Polarización LNA banda X RCP
C3	Polarización LNA banda Ku LCP
C4	Polarización LNA banda Ku RCP
C5	“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 macho 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, macho) se conectará un conector MDM (15 pin, hembra) que llevará las señales necesarias a cada elemento dentro del criostato. Es necesario realizar una transición para pasar del cable DC tradicional al cable de Cu/Be de 0.127mm de diámetro → se va a efectuar a través de un conector DIN96..

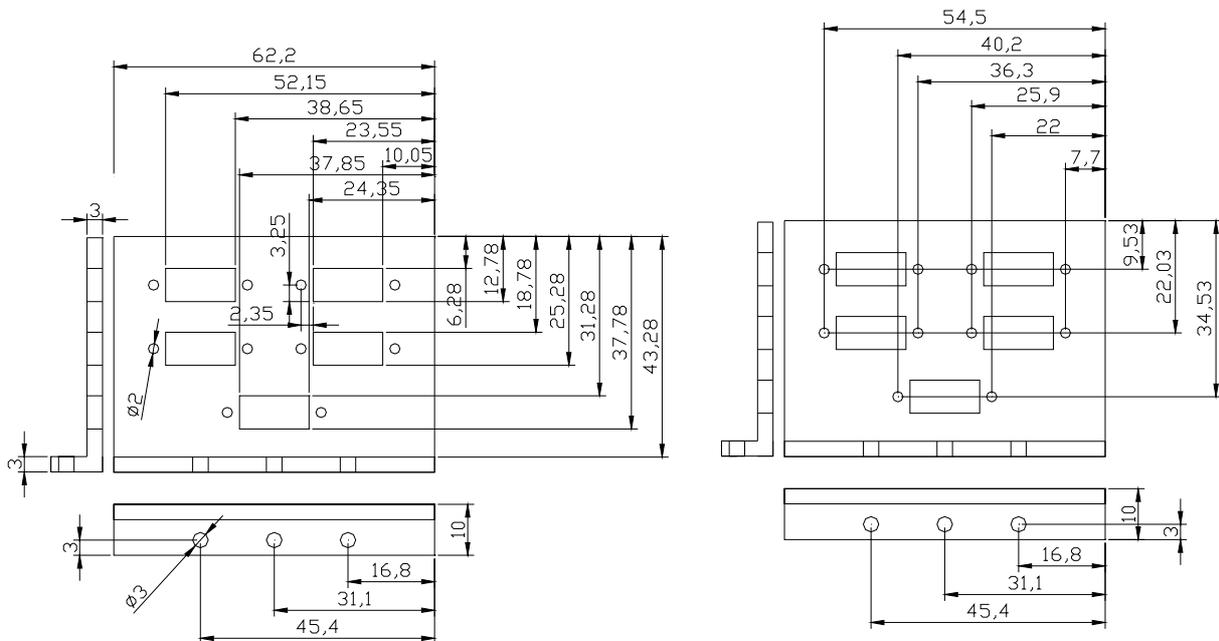


figura 8: Pieza de conectores MDM

La relación entre los pines de los conectores ficher 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).

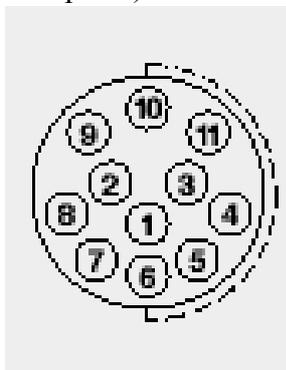


figura 9: Fischer de 11 pines (vista conector), punto rojo arriba

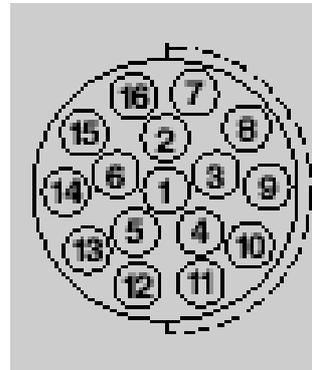


figura 10: Fischer de 16 pines (vista conector), punto rojo arriba

La transición de cable convencional a cable de diámetro 0.127mm 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 X/Ku de la antena ARIES XXI del CAY

Row a	fisher	Descripción	Row b	fisher	Descripción	Row c	fisher	Descripción
32	C1P1	X1-Vd1	32	C1P2	X1-Vg1	32	C1P3	X1-GND
31	C1P4	X1-Vd2	31	C1P5	X1-Vg2	31	C1P6	X1-LED
30	C1P7	X1-Vd3	30	C1P8	X1-Vg3	30	C1P9	
29	C1P10		29	C1P11		29		
28	C2P1	X2-Vd1	28	C2P2	X2-Vg1	28	C2P3	X2-GND
27	C2P4	X2-Vd2	27	C2P5	X2-Vg2	27	C2P6	X2-LED
26	C2P7	X2-Vd3	26	C2P8	X2-Vg3	26	C2P9	
25	C2P10		25	C2P11		25		
24	C3P1	K1-Vd1	24	C3P2	K1-Vg1	24	C3P3	K1-GND
23	C3P4	K1-Vd2	23	C3P5	K1-Vg2	23	C3P6	K1-LED
22	C3P7	K1-Vd3	22	C3P8	K1-Vg3	22	C3P9	
21	C3P10		21	C3P11		21		
20	C4P1	K2-Vd1	20	C4P2	K2-Vg1	20	C4P3	K2-GND
19	C4P4	K2-Vd2	19	C4P5	K2-Vg2	19	C4P6	K2-LED
18	C4P7	K2-Vd3	18	C4P8	K2-Vg3	18	C4P9	
17	C4P10		17	C4P11		17		
16								
15								
14								
13	C5P1	t_i	13	C5P2	GND_t_i	13	C5P3	t_c
12	C5P4	GND_t_c	13	C5P5	calef_ON	12	C5P6	t_h
11	C5P7	calef_MON	11	C5P8	regen_ON	11	C5P9	GND_t_h
10	C5P10	regen_MON	10	C5P11	GND_res	10	C5P12	
9	C5P13		9	C5P14		9	C5P15	

Conectores MDM de entrada a los amplificadores. Código de colores

Conector MDM9 X_band LNA	Señal	color
1	X_GND	Negro
2	X_Vd1	Marrón
3	X_Vg1	Rojo
4	X_Vd2	Naranja
5	X_Vg2	Amarillo
6	X_Vd3	Verde
7	X_Vg3	Azul
8		Violeta
9	led_on	Gris

Conector MDM9 K band LNA	Señal	color
1	K_GND	Negro
2	K_Vd1	Marrón
3	K_Vg1	Rojo
4	K_Vd2	Naranja
5	K_Vg2	Amarillo
6	K_Vd3	Verde
7	K_Vg3	Azul
8		Violeta
9	Led_on	Gris

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 4 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 4 amplificadores). El pinout de la placa “out2cryo” es el siguiente:

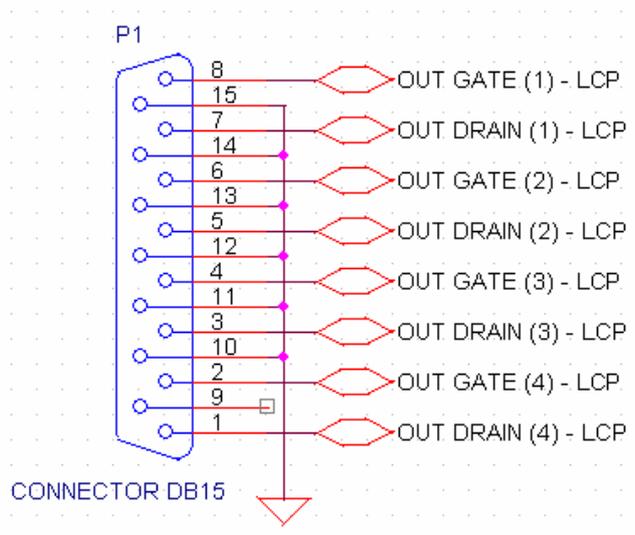


figura 11: pinout del conector DB15 de salida de las señales de polarización de los LNAs

Desde el pin 9 se activan los diodos led de los amplificadores.

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.

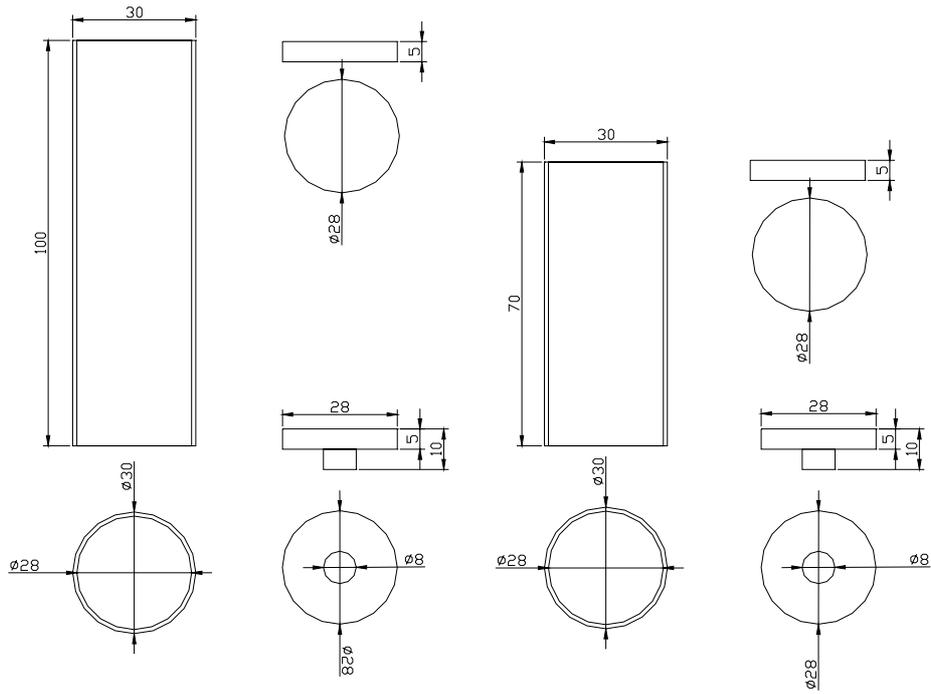


figura 12: Diseño de las piezas de aluminio para enrollar los cables de CuBe ($\varnothing=0.127\text{mm}$)

Criostato de los receptores X/Ku de la antena ARIES XXI del CAY

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

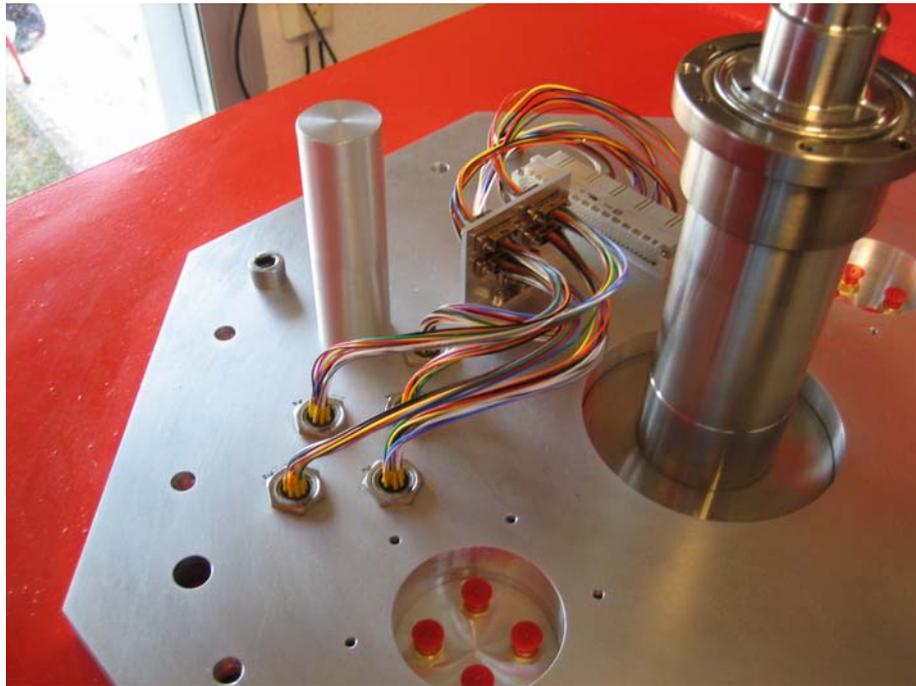


figura 13: Interconexión entre los conectores fischer y los MDM15



figura 14: Interconexión con el conector DIN96 (transición cable criogénico)

2.1.1 Cableado de polarización de los amplificadores de bajo ruido.

El criostato está preparado para albergar los amplificadores correspondientes a dos bandas de funcionamiento y para cada banda existen dos polarizaciones. Por lo tanto, pueden llegar a existir en el interior del criostato 4 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>
X	8.1 - 9	8.1 - 9	VLBI
Ku			

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

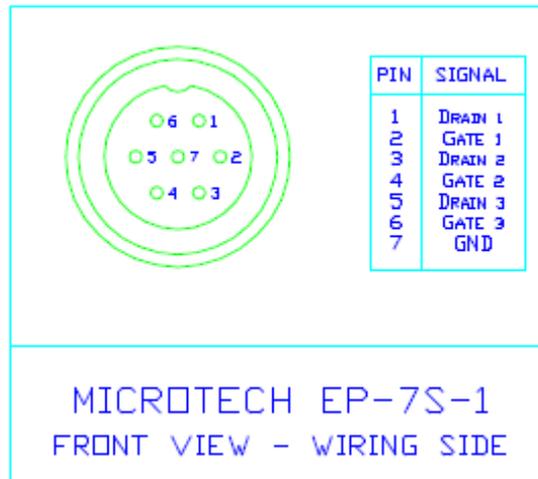


figura 15: conector de polarización amplificador banda X (3 etapas)

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 **conector 5**.

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
verde	6	t_h	Sensor de temperatura de la etapa caliente
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
gris	9	GND_t_h	Masa del sensor de temperatura de la etapa caliente
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-marrón	12		
blanco-rojo	13		
blanco-naranja	14		
blanco-amarillo	15		

Las resistencias empleadas tienen las siguientes características:

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

El cable empleado para estas señales es el siguiente:

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

Criostato de los receptores X/Ku de la antena ARIES XXI del CAY

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

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 resistencias 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	13a
marrón	2	GND_t_i	13b
rojo	3	t_c	13c
naranja	4	GND_t_c	12a
amarillo	5	calef_ON	12b
verde	6	t_h	12c
azul	7	calef_mon	11a
violeta	8	regen_ON	11b
gris	9	GND_t_h	11c
blanco	10	regen_mon	10a
blanco-negro	11	GND_res	10b
blanco-marrón	12		
blanco-rojo	13		
blanco-naranja	14		
blanco-amarillo	15		
-	16		

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

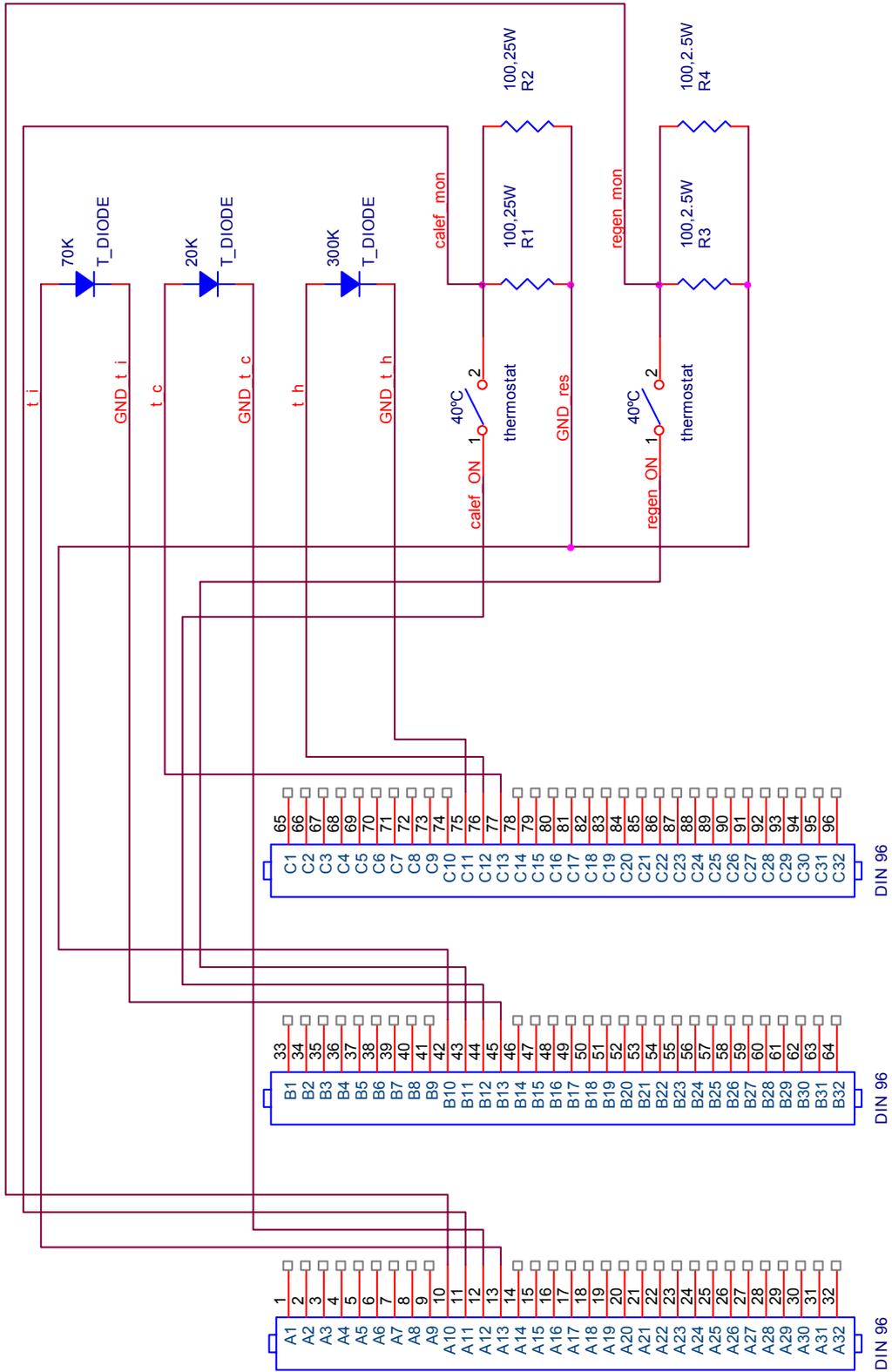


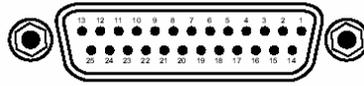
figura 16: Conexionado de las señales de “house-keeping”

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 (5 cables de 4 metros de longitud, 4 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		6-verde	Verde
7-azul	Azul		7-azul	Azul
8-violeta	Violeta		8-violeta	Violeta
9-gris	Gris		9-gris	Gris
			10-blanco	blanco
			11-blanco/negro	Blanco/gris
			12-blanco/marron	
			13-blanco/rojo	
			14-blanco/naranja	
			15-blanc/amarillo	

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 (-)
 - Pines 9 y 10: cortocircuitados: etapa caliente (+).
 - Pines 21 y 22: cortocircuitados: etapa caliente (-).



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 de las zeolitas:*
 - *Banana roja: GND*
 - *Banana negra: activar resistencias regeneradoras.*
 - *Banana amarila: 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	7-10 GHz
Puerto 1	-20dBm
Puerto 2	-20dBm
Average	ON
Calibración	
	Transición SMA (f-f) en ambos puertos

CABLES DE ENTRADA (UT-141-SP) (Polarizador – entrada al LNA)

- X1_in : (l=210mm)LCP.

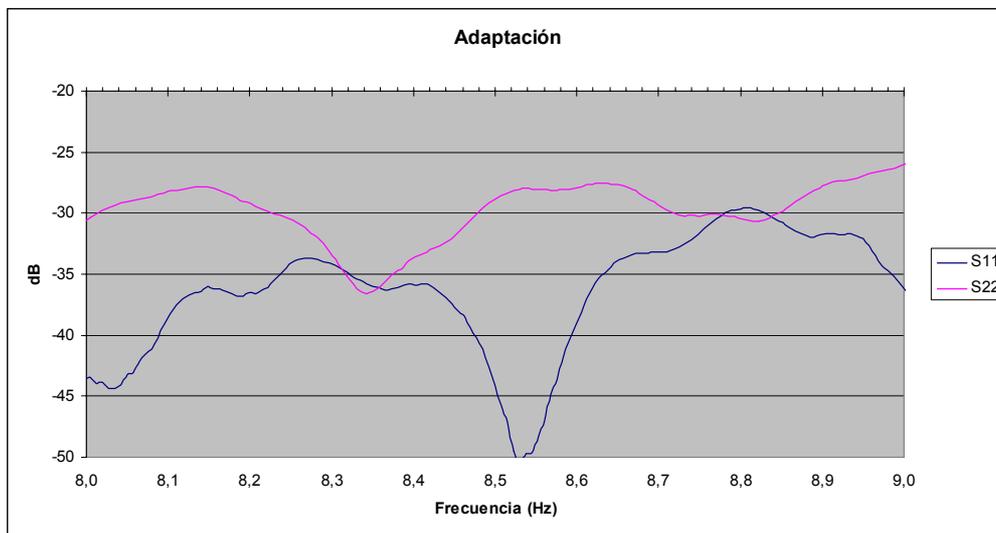


figura 18: Adaptación (dB)

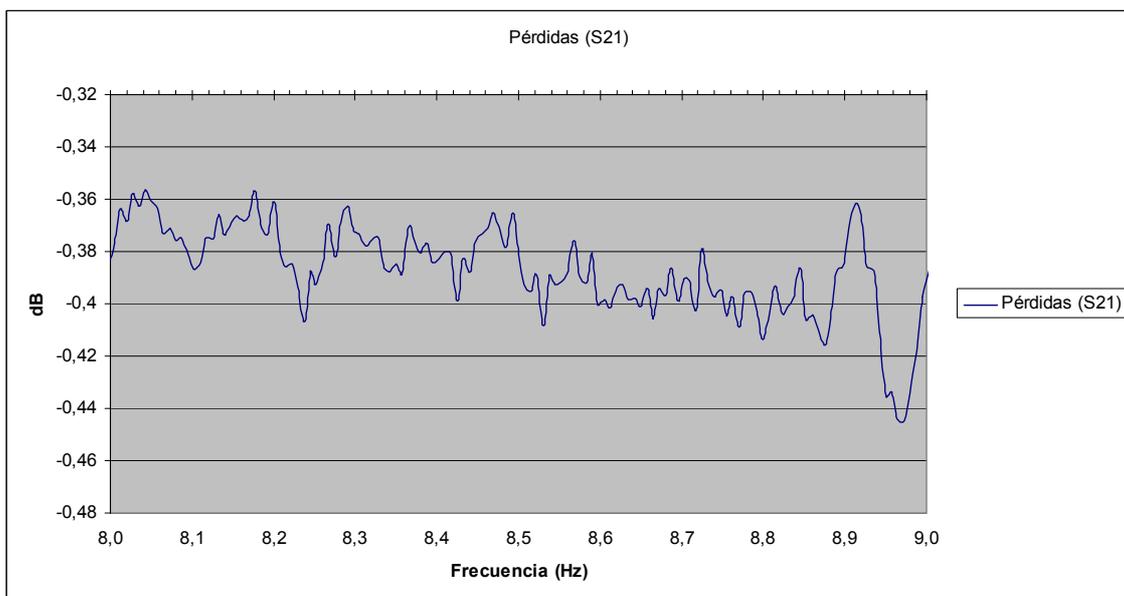


figura 19: Pérdidas (S21)

- X2_in: (l=210mm)RCP

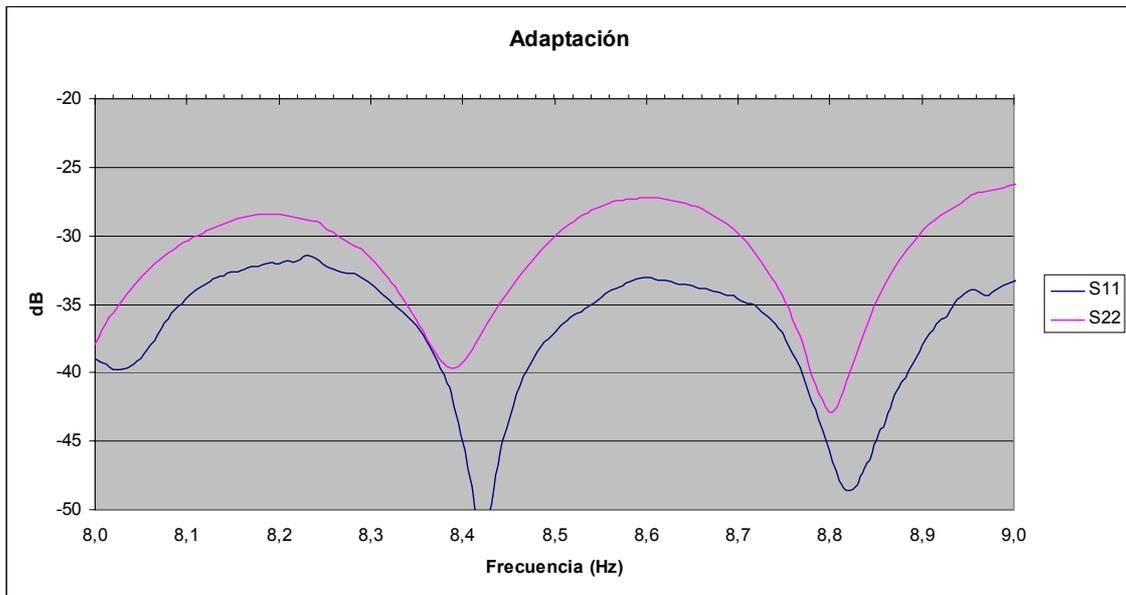


figura 20: Adaptación (dB)

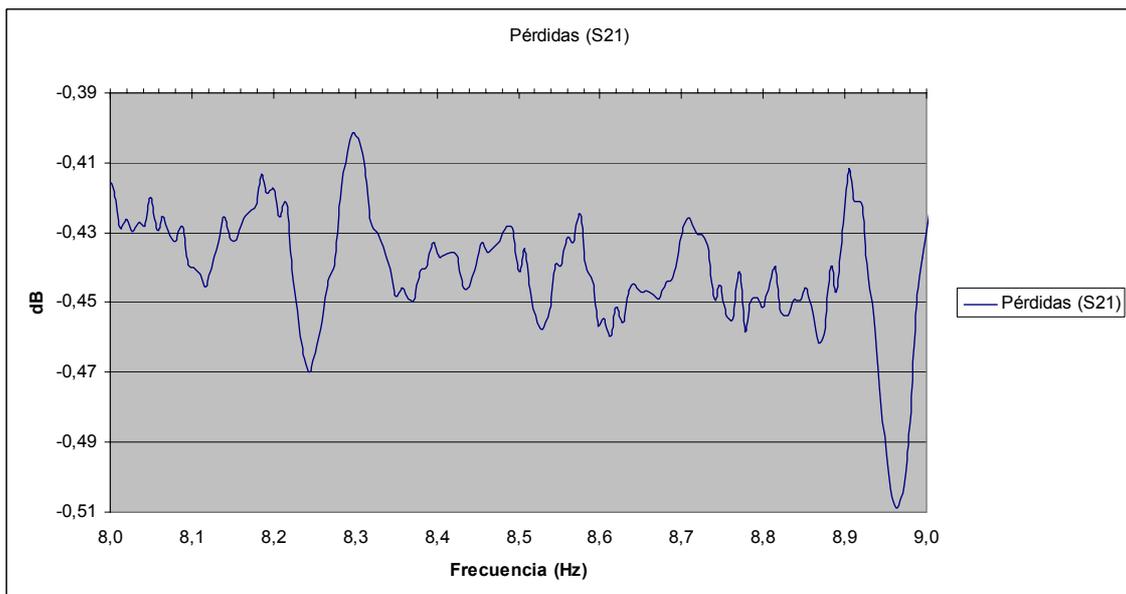


figura 21: Pérdidas (S21)

CABLES DE ENTRADA (UT-085-SS) (Noise, PhaseCal)

- Noise_1: (l=770mm)LCP
- Noise_2: (l=790mm)RCP

CABLES DE SALIDA (UT-085-SS) (Salida del LNA – Salida del criostato)

- X1_out: (l=600mm)LCP
- X2_out: (l=600mm)RCP

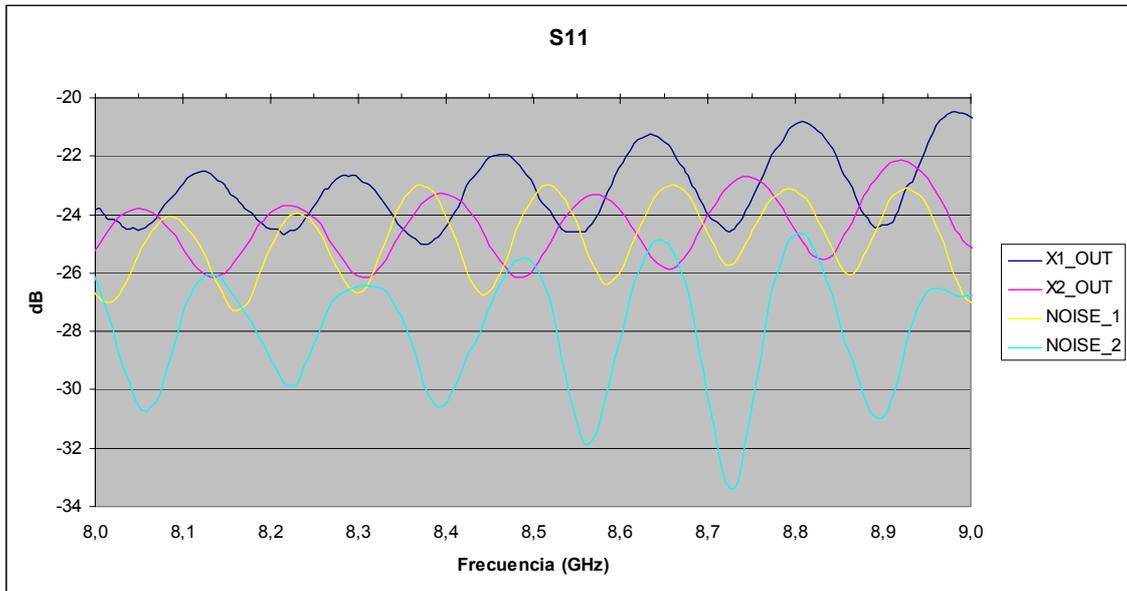


figura 22: Adaptación (dB)

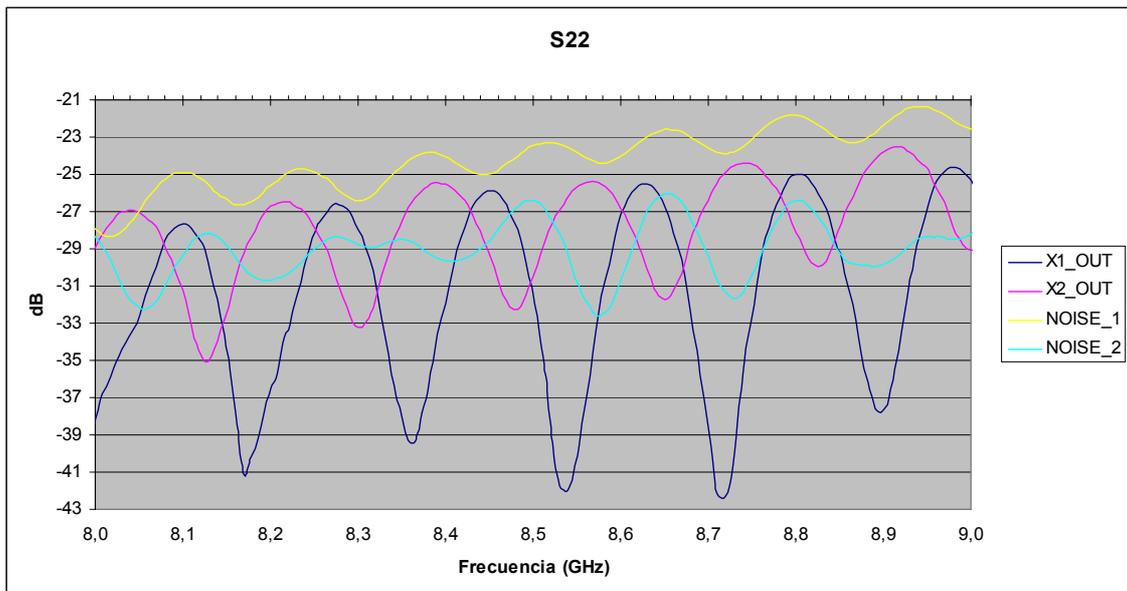


figura 23: Adaptación (dB)

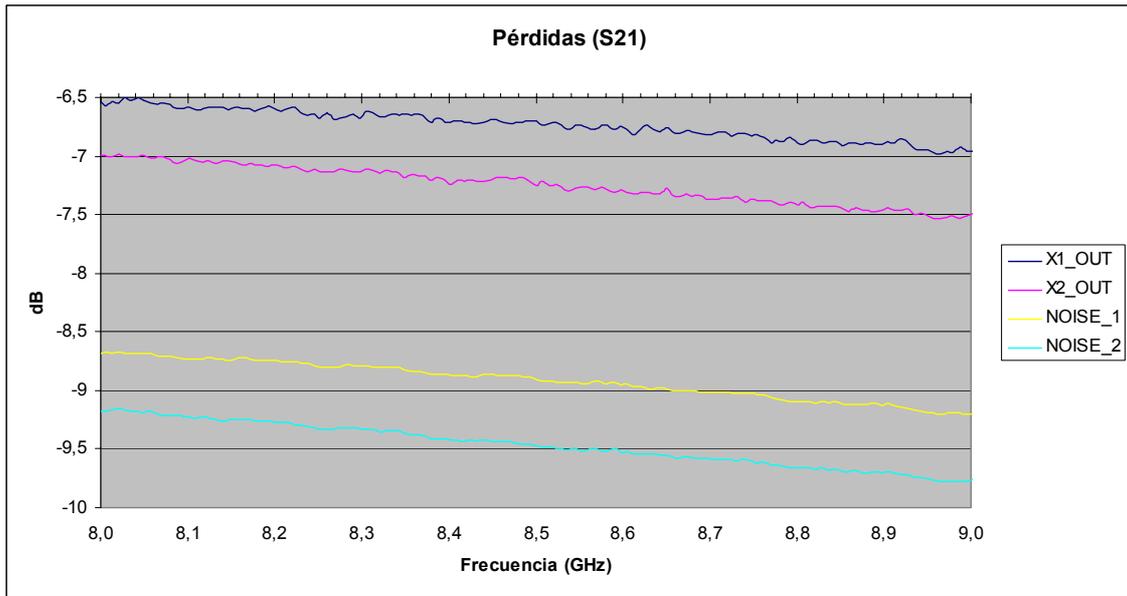


figura 24: Pérdidas (dB)

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.

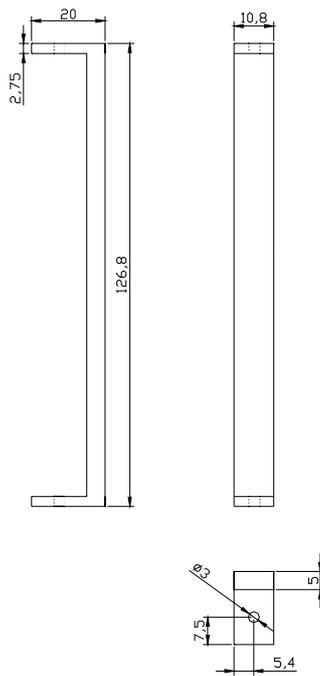


figura 25: Piezas de interconexión entre la etapa fría y la intermedia

Criostato de los receptores X/Ku de la antena ARIES XXI del CAY

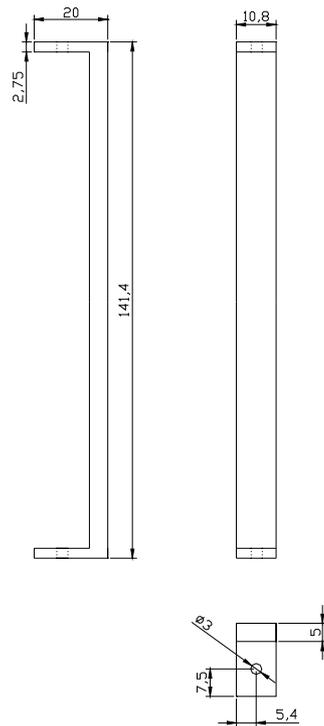


figura 26: Piezas de interconexión entre la etapa intermedia y la caliente

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

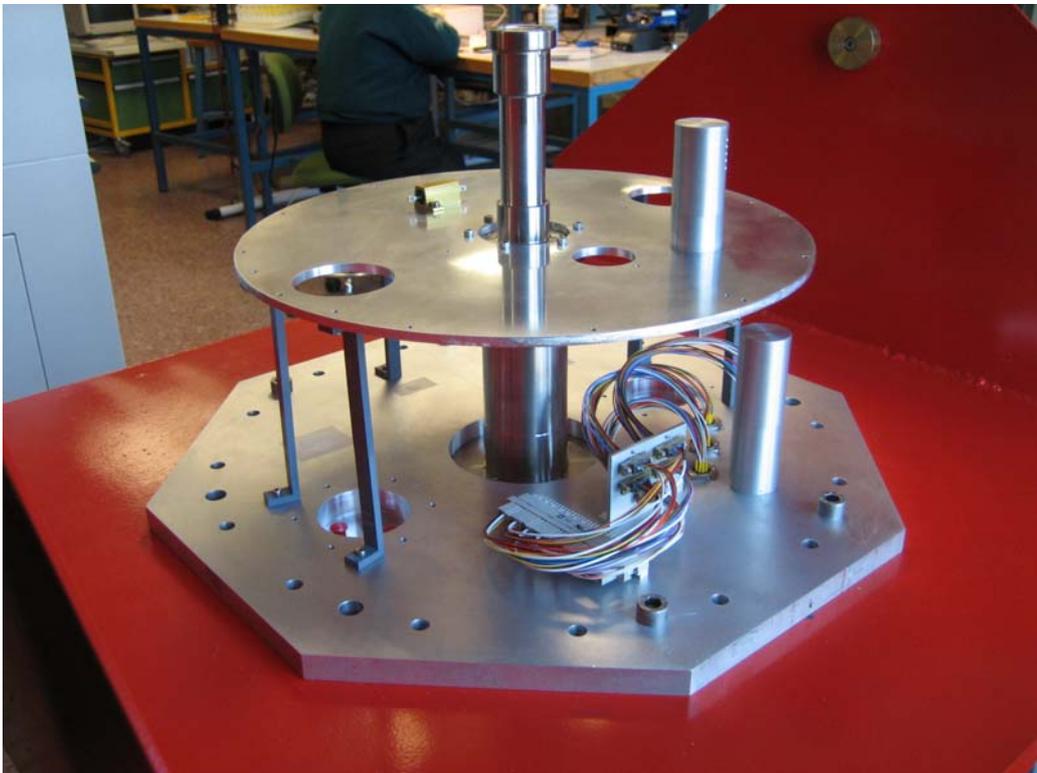


figura 27: Piezas de PVC que interconectan las etapas caliente e intermedia.

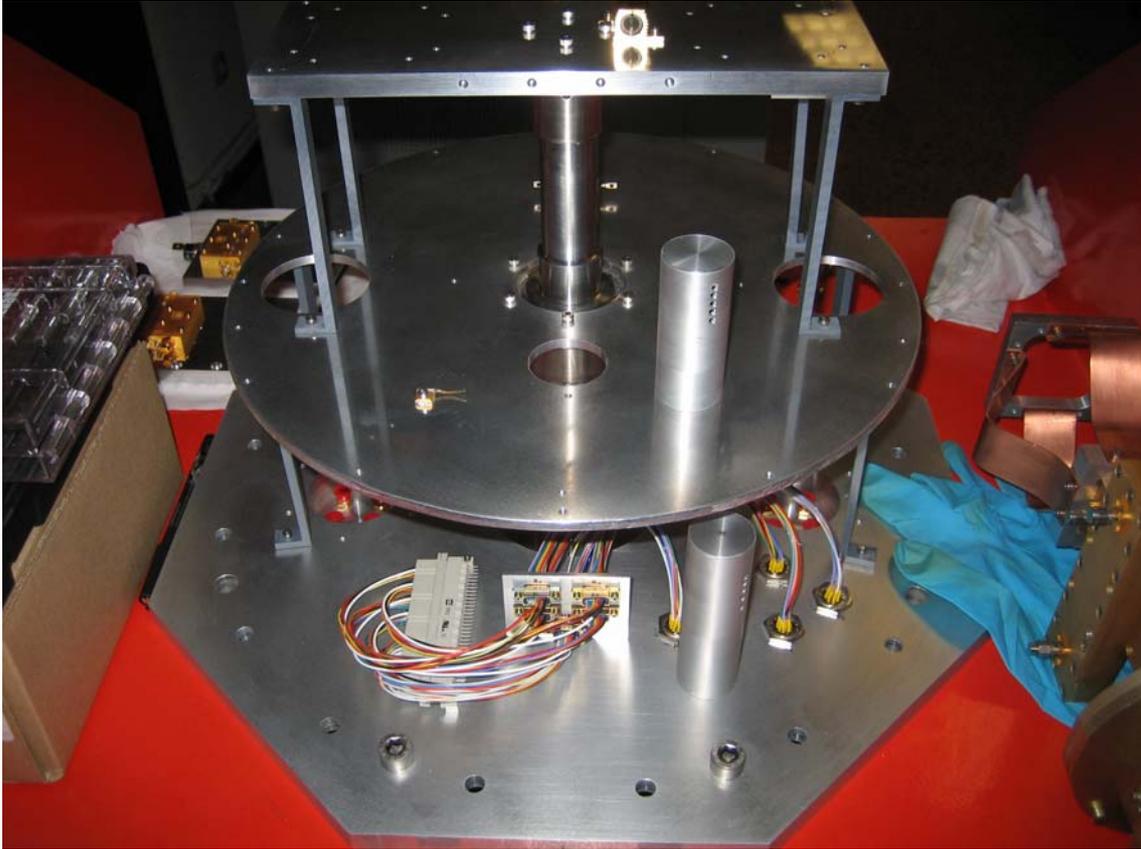


figura 28: Piezas de PVC que interconectan las etapas fría e intermedia

2.3 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 448mm(\varnothing_{ext}), 355mm(\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 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 546mm de largo y 365mm 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 484,91 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. Se dispone de cinco taladros de 16 mm de diámetro para los conectores herméticos DC multipolo de Fischer (4 para los amplificadores y otro para los sensores, resistencias...). Finalmente, esta tapa posee dos aberturas para instalar las bridas de los conectores SMA, una para la banda X y otra para la banda K.

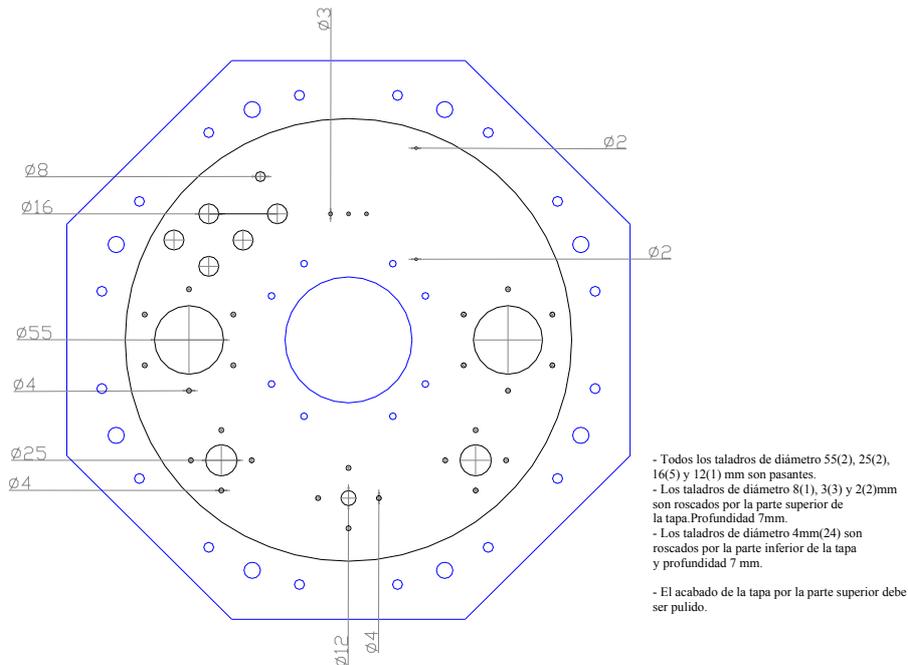


figura 29: tapa inferior del criostato

Criostato de los receptores X/Ku de la antena ARIES XXI del CAY

El criostato puede albergar los amplificadores para dos bandas de trabajo (X y Ka) y para dos polarizaciones. En total se dispone de 8 conectores SMA (4 de entrada al criostato y 4 de salida).

En la siguiente figura se muestra el diseño de estas bridas.

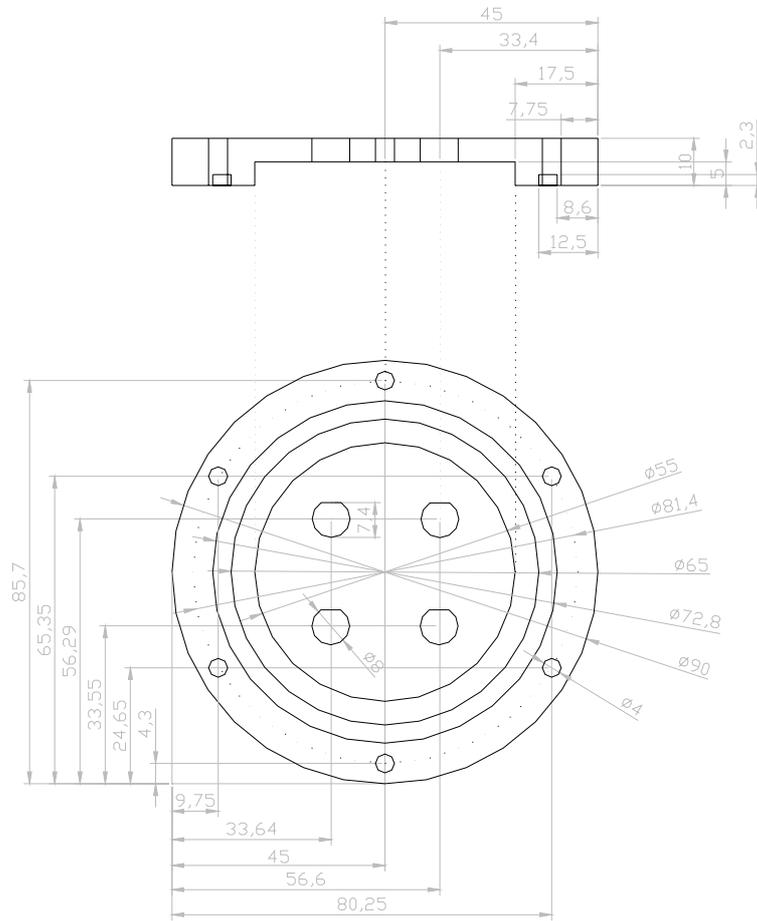


figura 30: bridas de entrada y salida al criostato

Criostato de los receptores X/Ku de la antena ARIES XXI del CAY

Como puede apreciarse, las bridas que contienen los conectores SMA se encuentran situadas en la tapa inferior del dewar. Cada una de ellas contiene 4 conectores SMA (entrada y salida para dos polarizaciones).

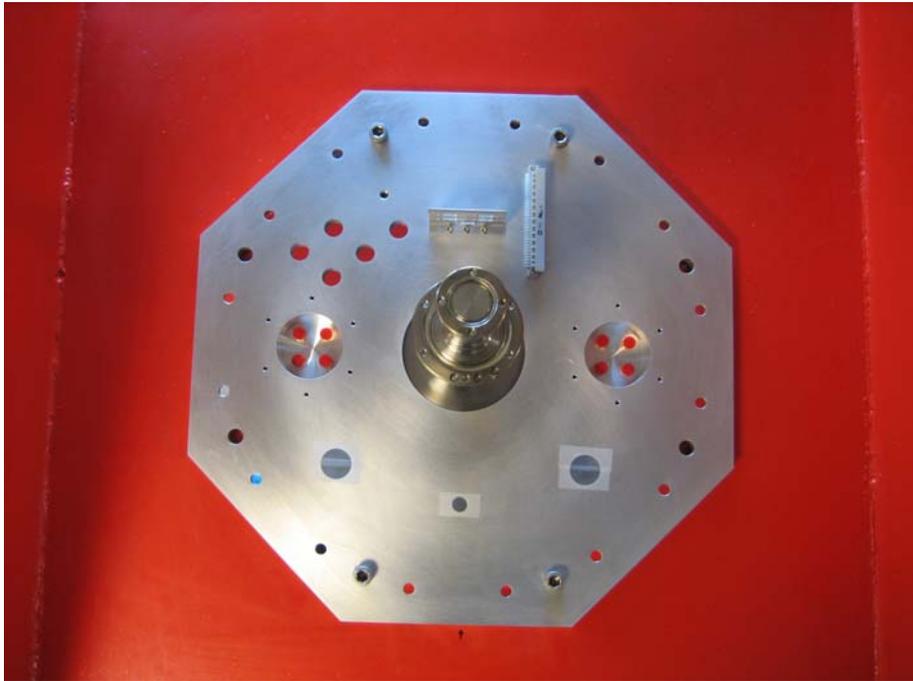


figura 31: Vista de la tapa inferior del dewar

Cada una de las juntas de vacío corresponde a uno de los receptores (K-Ku). Su diámetro es de 90mm y el espesor es de 15mm. Están elaboradas en duraluminio. Se atornillan al vacuum case mediante 8 tornillos roscados de métrica 5.

La tapa superior del dewar posee dos aberturas para instalar las transiciones entre las bocinas (exterior del criostato a temperatura ambiente) y el polarizador (interior del criostato en la etapa fría).

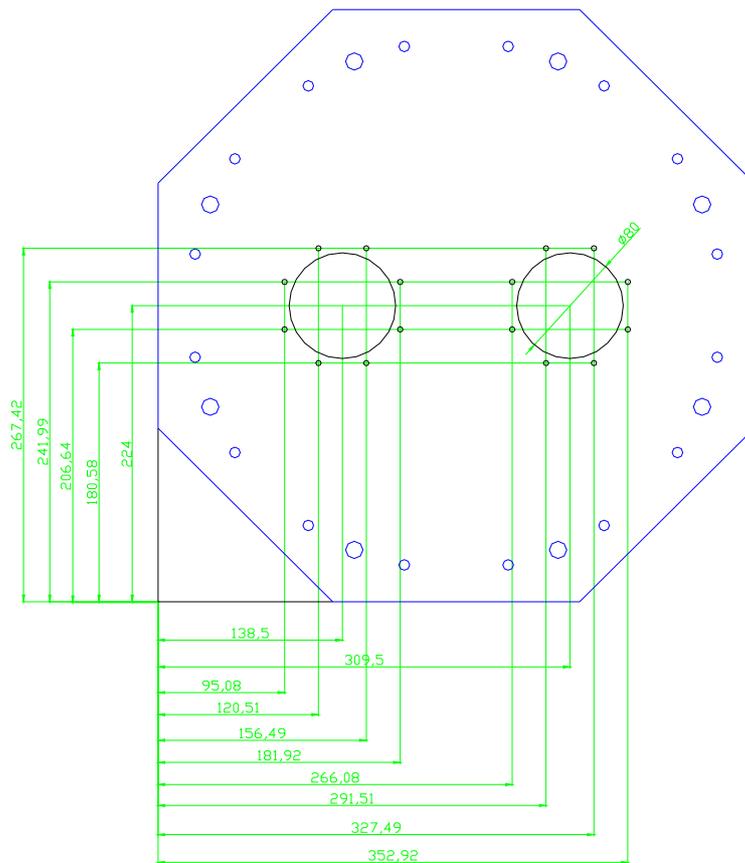


figura 32: Diseño de la tapa superior del criostato

En un primer diseño, sólo se va a instalar dentro del criostato los elementos correspondientes al receptor banda X (aunque todo va a quedar preparado para introducir en cualquier momento los dispositivos de banda Ku).

Se ha diseñado una brida de vacío para la abertura de la tapa superior correspondiente a la banda Ku.

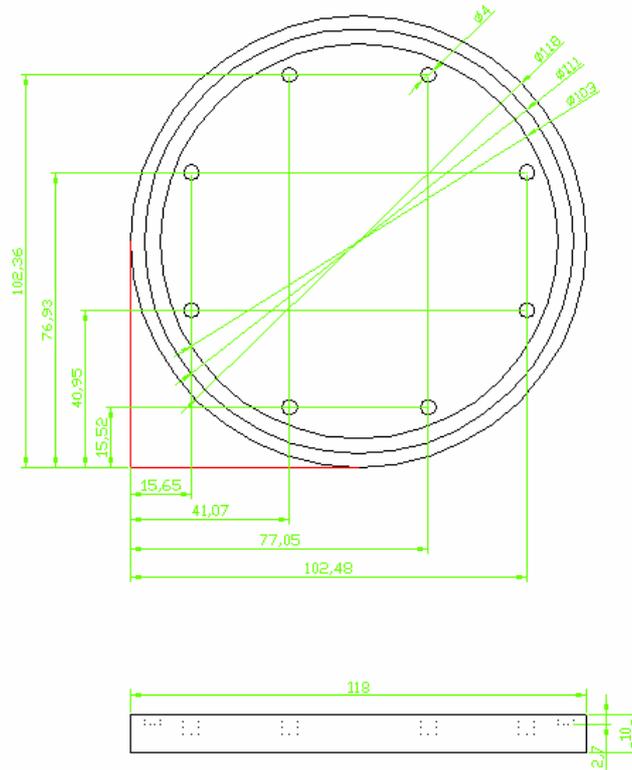


figura 33: brida ciega para la banda Ku

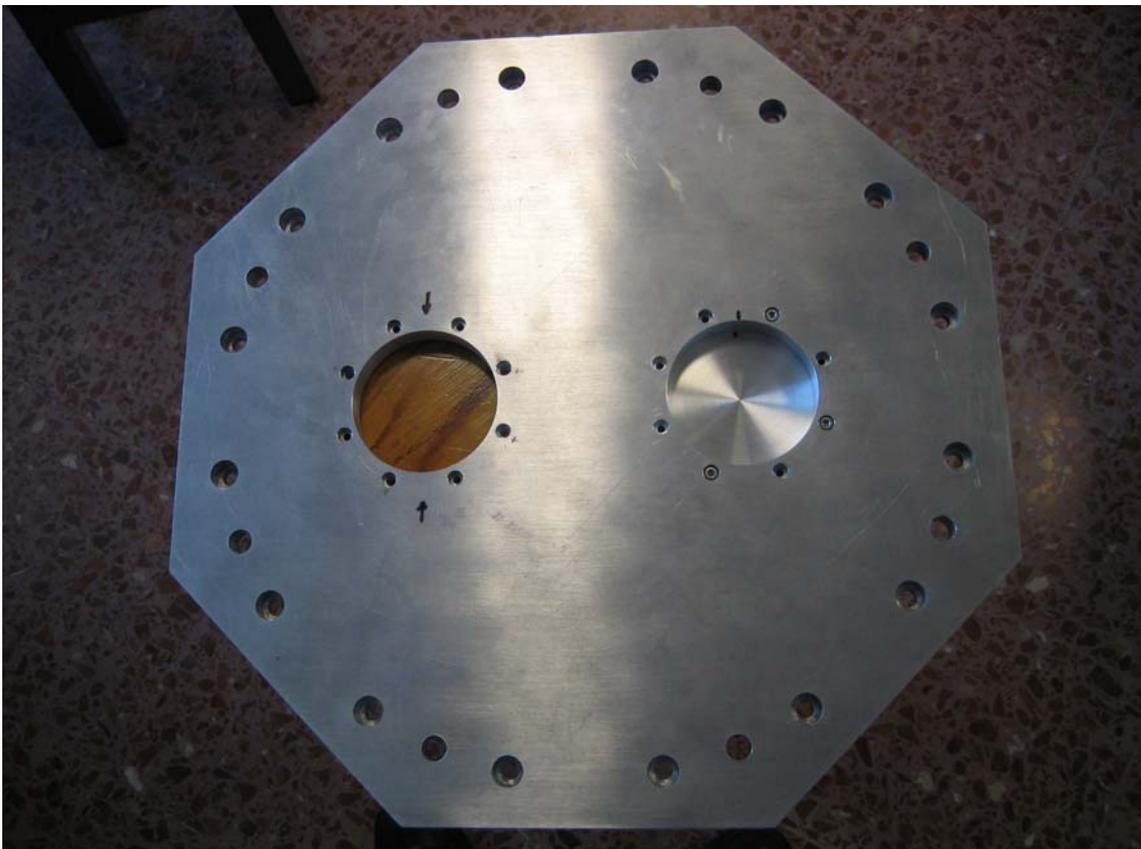


figura 34: Tapa superior del receptor banda X



figura 35: Vista exterior del receptor

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 375 mm y el diámetro externo es de 342 mm (diámetro interior de 320mm). El cilindro se sujeta a la etapa intermedia mediante 12 tornillos M4.

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 342mm.

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.

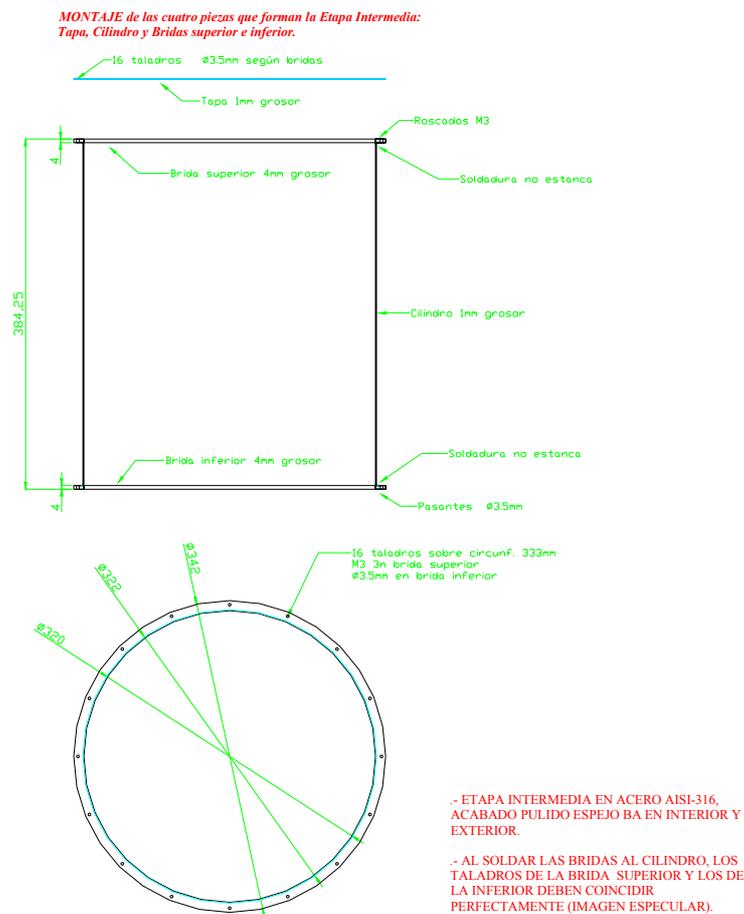


figura 36: Diseño del radiation shield



figura 37: fotografía de la placa intermedia



figura 38: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 12 piezas formadas por una malla metálica estañada de 375 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.

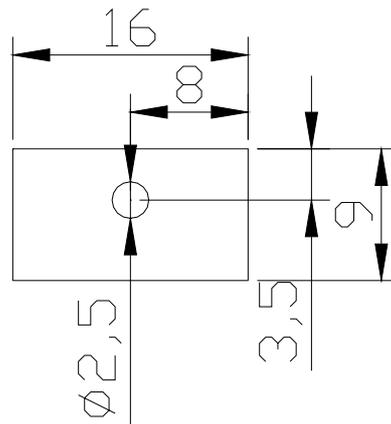


figura 39: Piezas de cobre empleadas en la etapa intermedia

- 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 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 superaislamiento (MLI).



figura 40: Aspecto de la parte exterior de la etapa intermedia



figura 41: MLI instalado en el cilindro exterior de la etapa intermedia

Se ha recubierto de 7 láminas de mylar aluminizado la cara inferior de la etapa intermedia. El aspecto final se muestra en la siguiente figura.

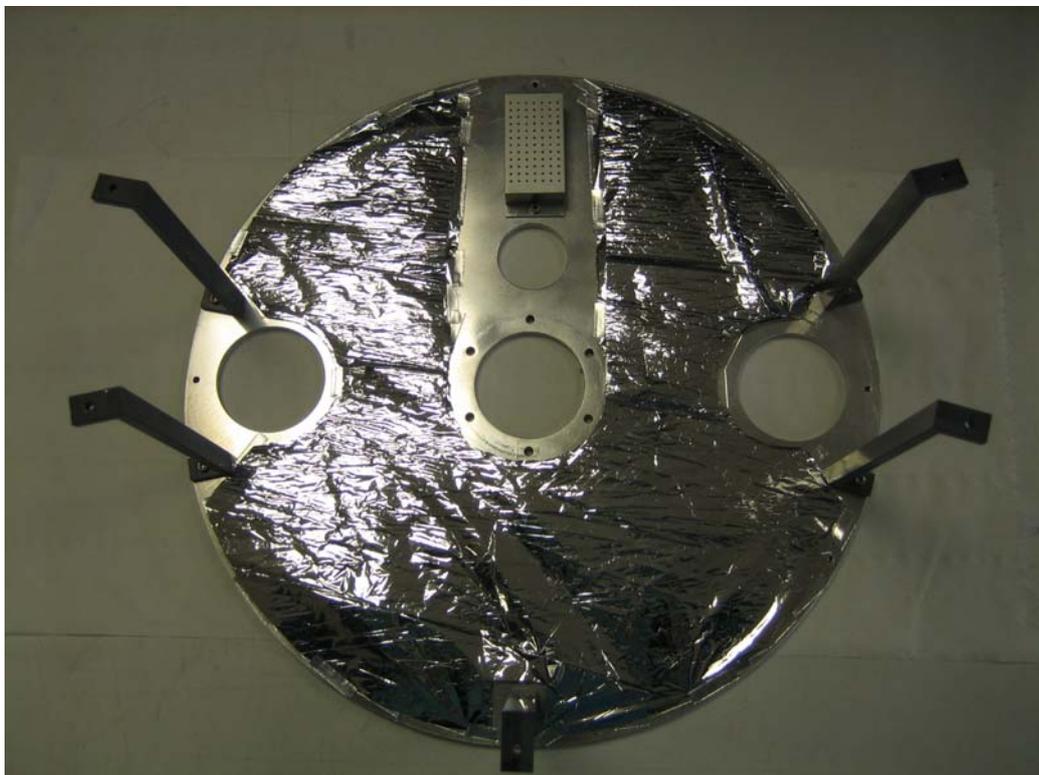


figura 42: MLI en la cara inferior de la etapa intermedia

Criostato de los receptores X/Ku de la antena ARIES XXI del CAY

También se han instalado 7 capas de Mylar aluminizado tanto en la parte superior como en la posterior de la tapa superior de la etapa intermedia.



figura 43: MLI en la etapa superior de la etapa intermedia (7 capas)

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.

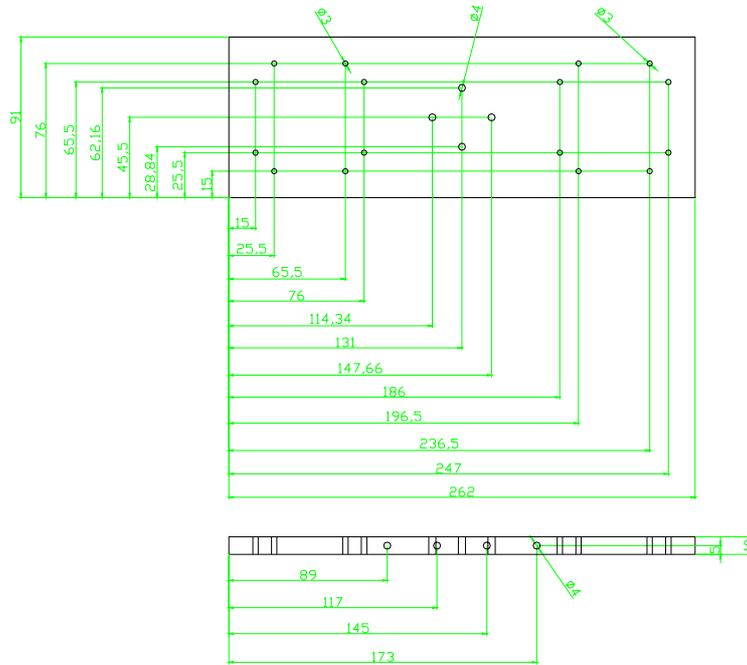


figura 44: Diseño de la placa fría

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

Criostato de los receptores X/Ku de la antena ARIES XXI del CAY

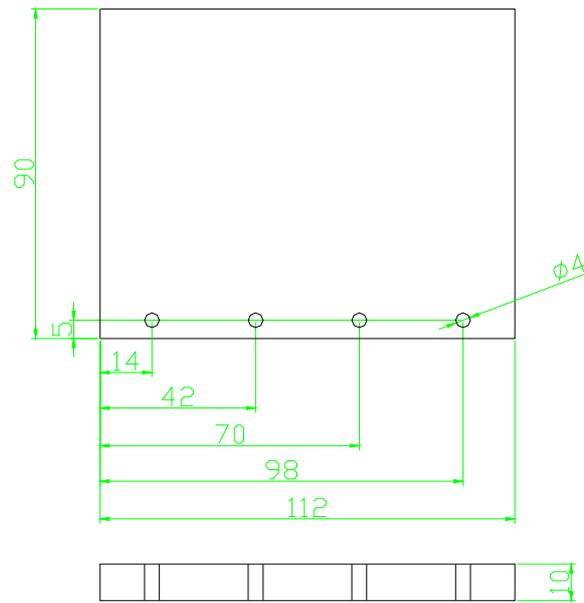


figura 45: diseño de los soportes de los amplificadores

Se muestra en la siguiente figura el aspecto final de la etapa fría integrada en el criostato con todos los elementos instalados:

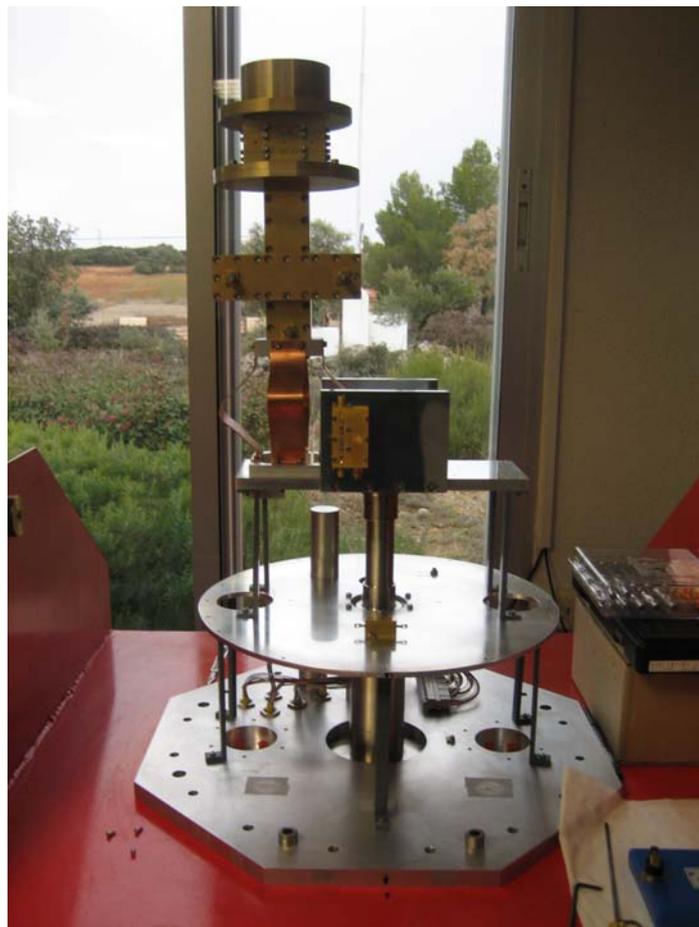


figura 46: Etapa fría del criostato del receptor banda X/K

Como puede apreciarse en la fotografía anterior, se ha diseñado una pieza mecánica para interconectar el polarizador, acoplador direccional y transición de vacío a la etapa fría del receptor. Esta pieza está formada por una base de aluminio que hace contacto directamente con la etapa fría, 4 piezas de cobre (muy buen conductor térmico) que proporcionan cierto grado de flexibilidad al diseño y otra pieza de aluminio que está acoplada directamente al polarizador banda X. En todos los puntos de unión se ha colocado Indio para tener un muy buen contacto térmico.

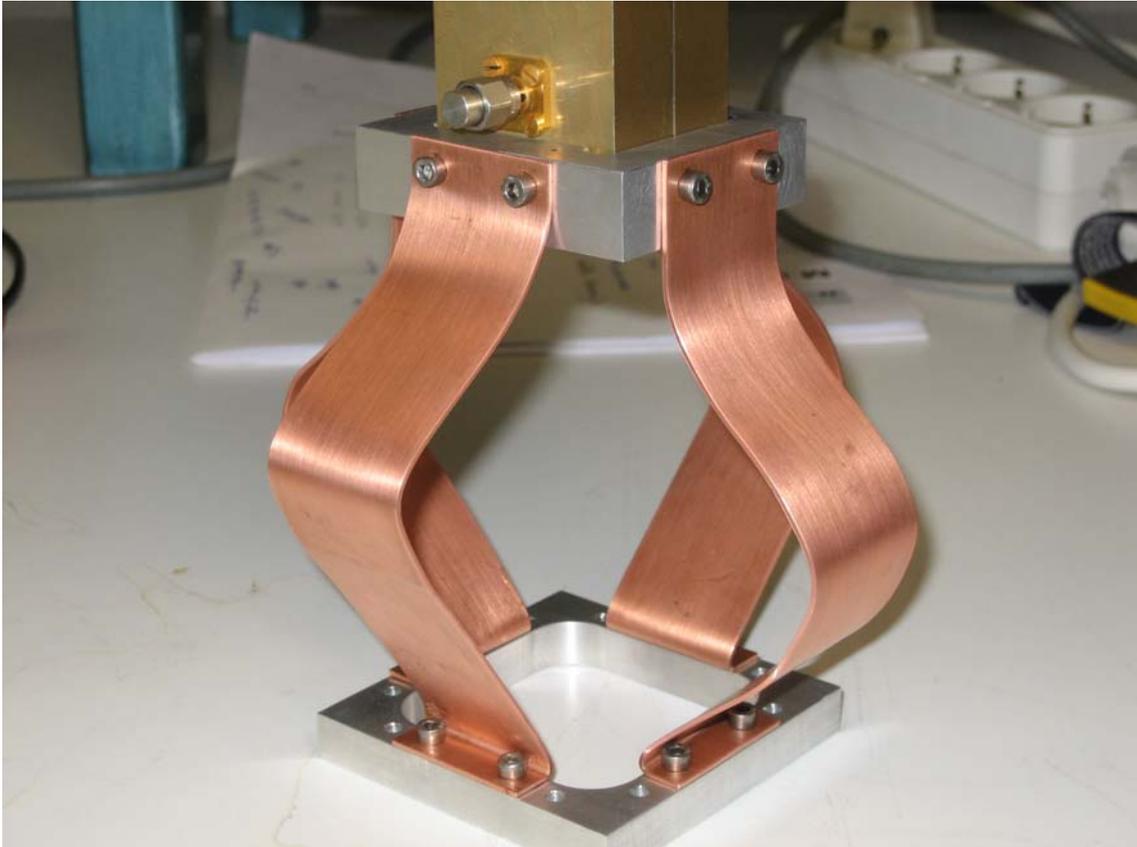


figura 47: Estructura de interconexión del polarizador a la etapa fría

2.5.1 Instalación de los amplificadores.

2.5.1.1 Amplificadores banda X (8-9 GHz).

Los amplificadores banda X 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 A pueden consultarse las especificaciones técnicas de estos amplificadores.

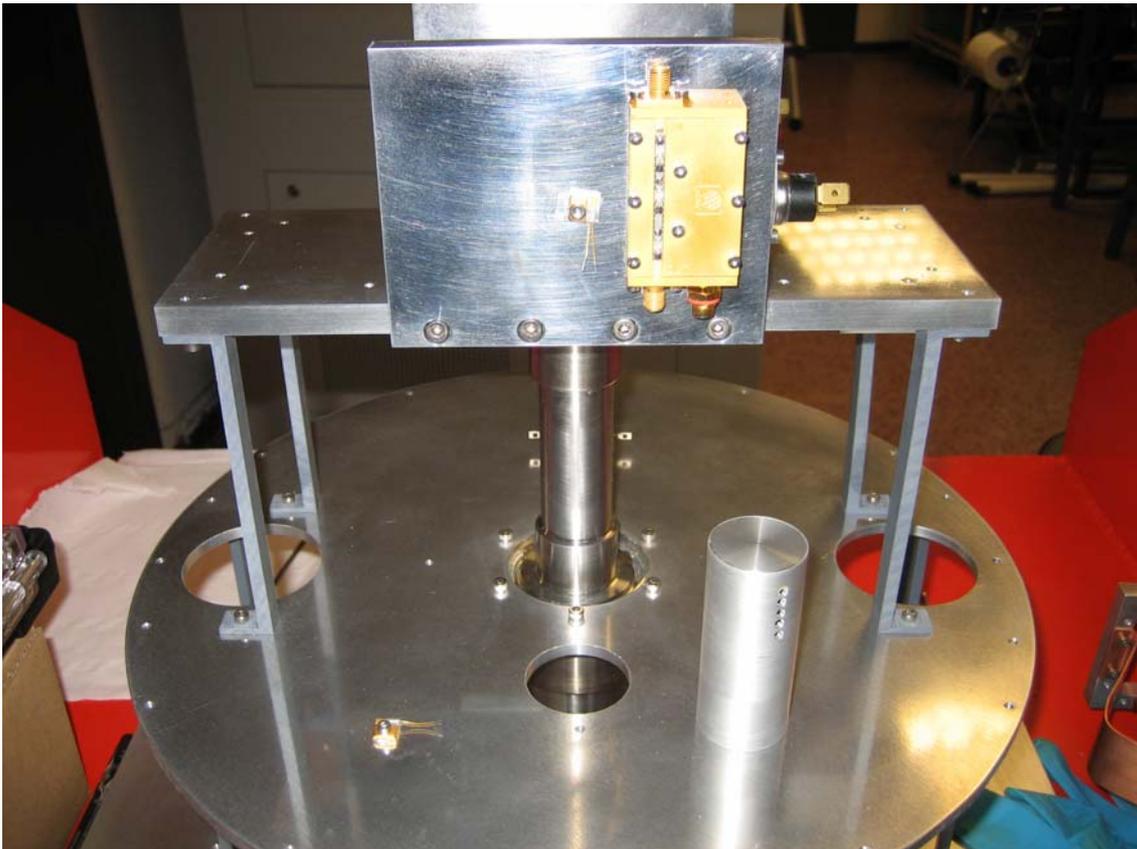


figura 48: Amplificadores banda X instalados en el criostato

Criostato de los receptores X/Ku de la antena ARIES XXI del CAY

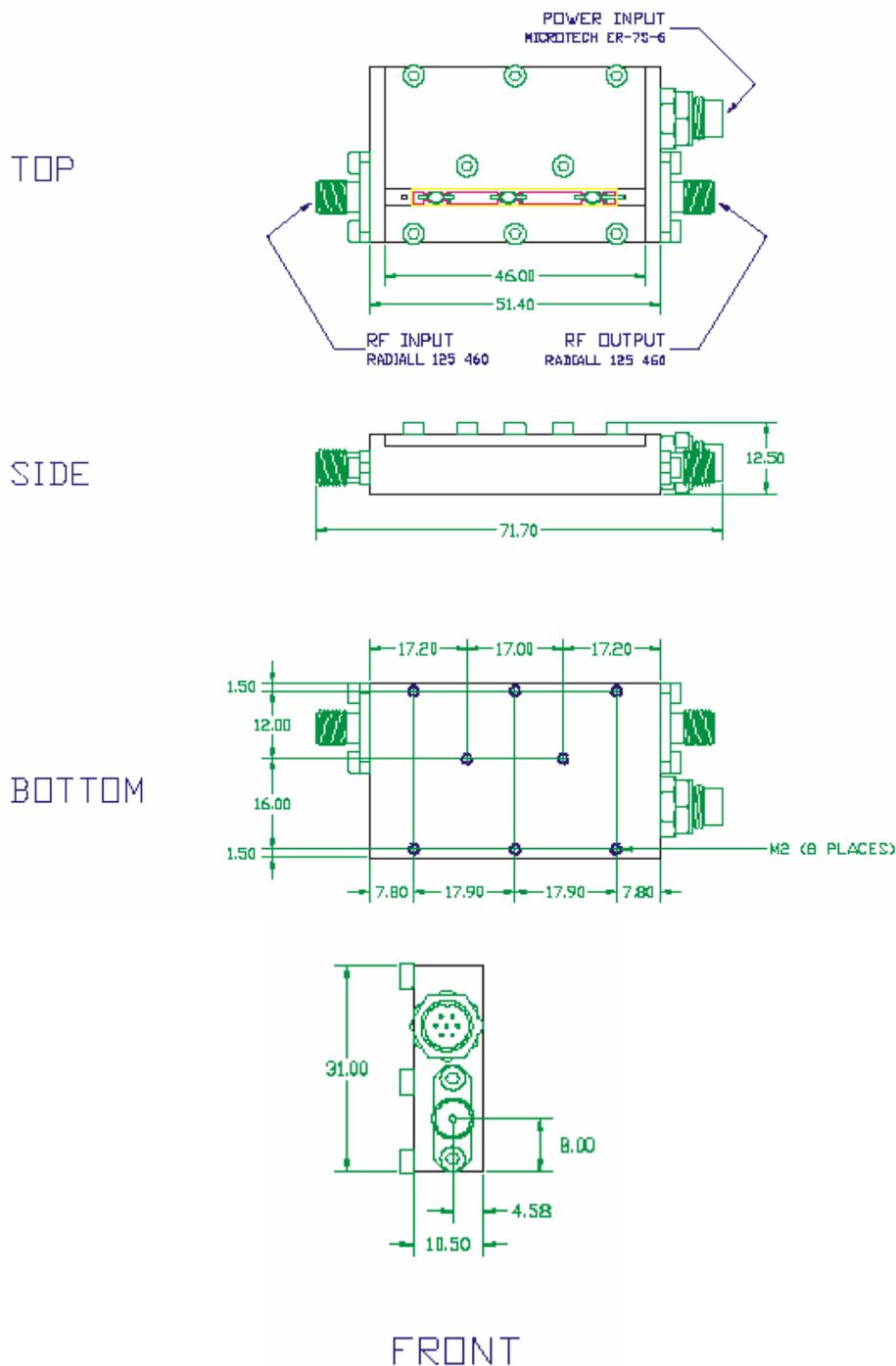


figura 49: Dimensiones del amplificador banda X

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

- **YXW-1010: LCP ("1")**
- **YXW-1008: junto al sensor de t^a de la etapa fría. RCP ("2")**

Las dimensiones de los cables de interconexión entre amplificadores y la salida/entrada del criostato son las siguientes

Criostato de los receptores X/Ku de la antena ARIES XXI del CAY

Cable	Longitud total (mm)	Longitud a la etapa intermedia (mm) (300-77)	Longitud a la etapa fría (mm) (77-20)	Tipo de cable
X1_out (LCP)	600	365	235	085-SS-SS
X2_out (RCP)	600	365	235	085-SS-SS
X1_in (LCP)	210			141A-SP
X2_in (RCP)	210			141A-SP
Noise_1 (LCP)	770	365	405	085-SS-SS
Noise_2 (RCP)	790	365	425	085-SS-SS



figura 50: conexión de los cables semi-rígidos a la etapa intermedia

3 Sistemas criogénicos empleados en el criostato del receptor X/Ku.

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}
Intermedia	0.39	70	10^{-2}	1	1.2	1	107.7
Fría	0.024	15	10^{-2}	1	1.2	1	1.58
Intermedia	0.39	70	10^{-3}	0.1	1.2	1	10.8
Fría	0.024	15	10^{-3}	0.1	1.2	1	0.16
Intermedia	0.39	70	10^{-4}	0.01	1.2	1	1.1
Fría	0.024	15	10^{-4}	0.01	1.2	1	0.016
Intermedia	0.39	70	10^{-5}	0.001	1.2	1	0.11
Fría	0.024	15	10^{-5}	0.001	1.2	1	0.0016

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 20W y 5W respectivamente. Es conveniente reducir la presión dentro del criostato por debajo de 10^{-5} 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)	0.078	0.087	0.13	0.17

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). (0.16m)

R2= radio (m) del cilindro exterior (etapa caliente). (0,182m)

L= altura (m). (0.576m)

A2= área de la etapa fría. (0.39m²).

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

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

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

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

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

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 (43,37mm entre las tapas superiores y 142,2mm entre las tapas inferiores).

AT= área de la etapa más fría. (0.08m²)

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

$$FF12 = \frac{1}{2} \cdot \left[x - \left[x^2 - 4 \cdot \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 \right]^{1/2} \right]$$

Como R1 es distinto a R2 → $FF21 = \frac{\pi \cdot R_1^2 \cdot FF12}{\pi \cdot R_2^2}$

$$Feinv = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1; Fe = \frac{1}{Feinv}$$

- 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 dos 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. Se obtiene un resultado despreciable en comparación con la radiación entre la etapa caliente y la intermedia (7mW).

4.2.3 Resultados de carga por radiación.

En nuestro caso la etapa exterior es de acero y la etapa intermedia es de acero. La etapa fría está fabricada en duraluminio.

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

Etapa	A ₁ (m ²)	A ₂ (m ²)	ε ₁ (300k)	ε ₂ (70k)	W _{rad} (W)
Intermedia (70K)	0.660	0.39	0.17	0.13	23.02
Fría (15K)	0.39	0.024	0.05	0.02	0.007

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.

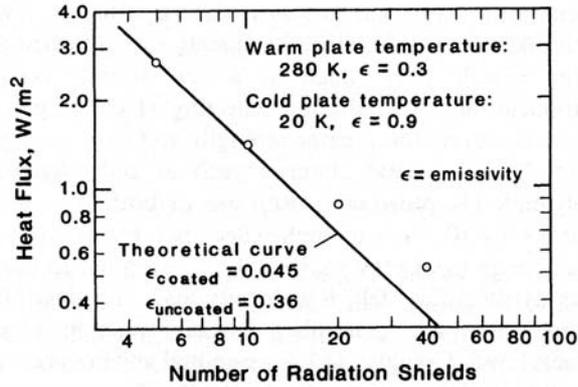


figura 51: Efecto del número de capas sobre el flujo de calor neto

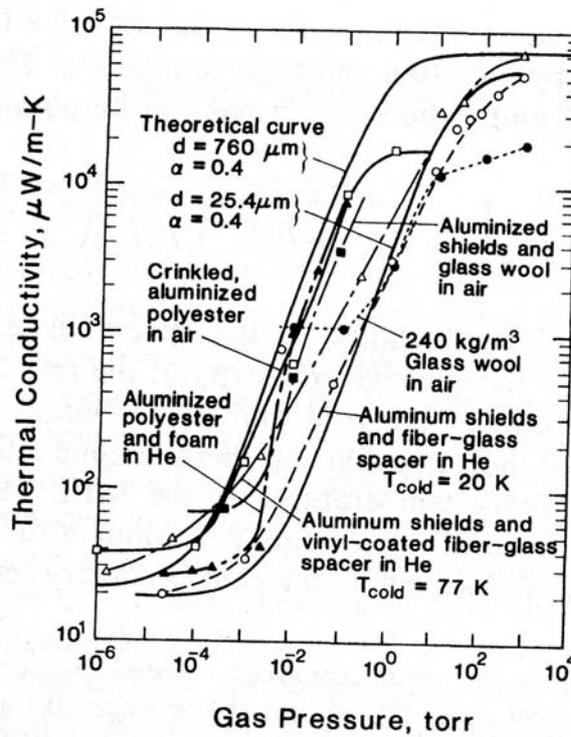


figura 52: Efecto de la presión sobre la conductividad del MLI

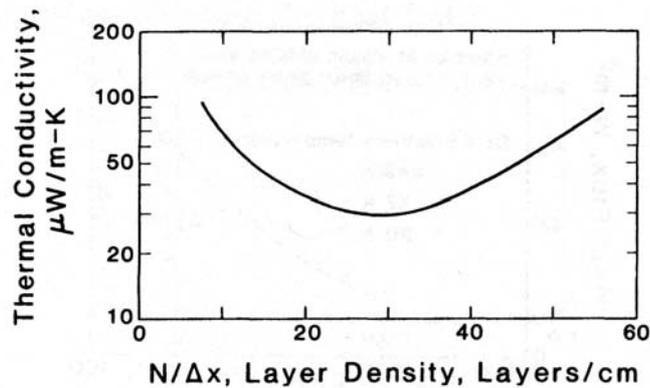


figura 53: Variación de la conductividad térmica en función de la densidad de capas

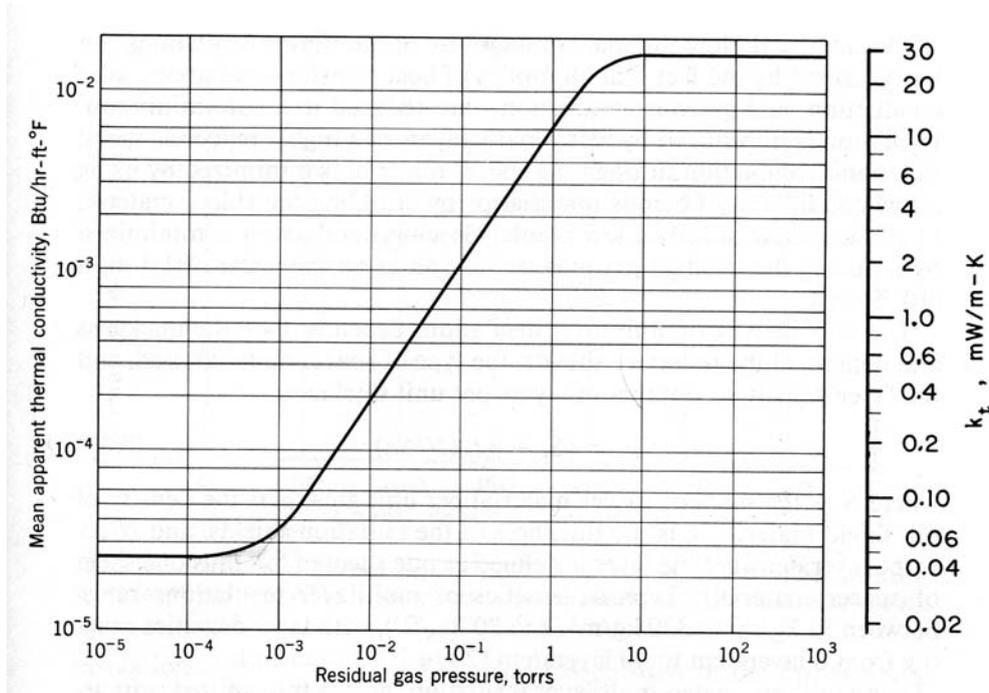


figura 54: Variación de la conductividad térmica media aparente en función de la presión para un MLI típico. La densidad es de 24 capas/cm y las temperaturas 300 y 90.5K

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 55: 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 39.

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.

En nuestro caso en particular:

$T_2=300K$, $T_1=70K$, $K(\delta)\approx 0.65mW/m \cdot K$, $S=0.39m^2$, $L=5mm$: $\rightarrow W=11.7W$

K(δ) obtenido mediante la figura 54.

En resumen se obtiene la siguiente carga por radiación con el MLI:

Etapa	Q_{rad} (W)
Intermedia(70K)	<i>11,7</i>
Fría (15K)	<i>0.007</i>

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 $\lambda_{mCu} = 410 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ para $T_2 = 300 \text{ K}$ y $T_1 = 77 \text{ K}$; (ref2).

$\lambda_{mCu} = 980 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 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	$\Lambda(\text{W/m} \cdot \text{K})$ 300K-75K	$\Lambda(\text{W/m} \cdot \text{K})$ 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	141.4	54	13.85	69.25 (5 piezas)
Intermedia-fría (70-20K)	PVC	0.16	121	54	3.57	14.3 (4 piezas)

Se emplean 5 *piezas* en la etapa intermedia y 4 piezas para conectar la etapa fría a la intermedia (se pretende que la conexión térmica sea lo peor posible).

4.3.2 Cables en el interior del criostato.

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} (mW)	W _{75-15K} (mW)
Entrada banda X LCP	Cobre (141A-SP)	3.58	0.91	-	-		
Salida banda X LCP	Acero (085-SS-SS)	2.197	0.511	365	235	13	4.5
Entrada banda X RCP	Cobre (141A-SP)	3.58	0.91	-	-		
Salida banda X RCP	Acero (085-SS-SS)	2.197	0.511	365	235	13	4.5
Entrada ruido LCP	Acero (085-SS-SS)	2.197	0.511	365	405	13	2.6
Entrada ruido RCP	Acero (085-SS-SS)	2.197	0.511	365	425	13	2.5
Polarización Y sensores	Cu-Be (30 cables)		0.127	500	500	8.74uW	0.76uW
TOTAL	-	-	-	-	-	52	14.1

El número total de cables de “house-keeping” empleados en el interior del criostato es de 30.

Los cables de entrada conectan la salida del polarizador (20K) con la entrada del amplificador (20K). La longitud, para cada una de las dos polarizaciones es de 210mm.

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.

Banda	Polarización	Wamp (mW)
X	LCP (1)	20.4
X	RCP (2)	35
Total		55.4

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^{-3} mbar y 10^{-6} mbar.

P=10^{-5} mbar	Etapa 15K	Etapa 70K
Gas	1.6mW	0.11W
Radiación	7mW	11.7W
Sólidos	28.4mW	121.25mW
Disipada	55.4mW	-
TOTAL	92.4mW	11,93W

Teniendo en cuenta que los valores finales de temperatura conseguidos dentro del criostato instalado en la cabina de receptores son los siguientes:

Tint = 65K

Tcold = 16K

A partir de estos resultados y la gráfica que nos indica la capacidad refrigeradora de la cabeza CTI-350, podemos extraer la carga en vatios que está soportando la etapa intermedia y la etapa fría.

Qint = 11 W

Qcold = 2 W

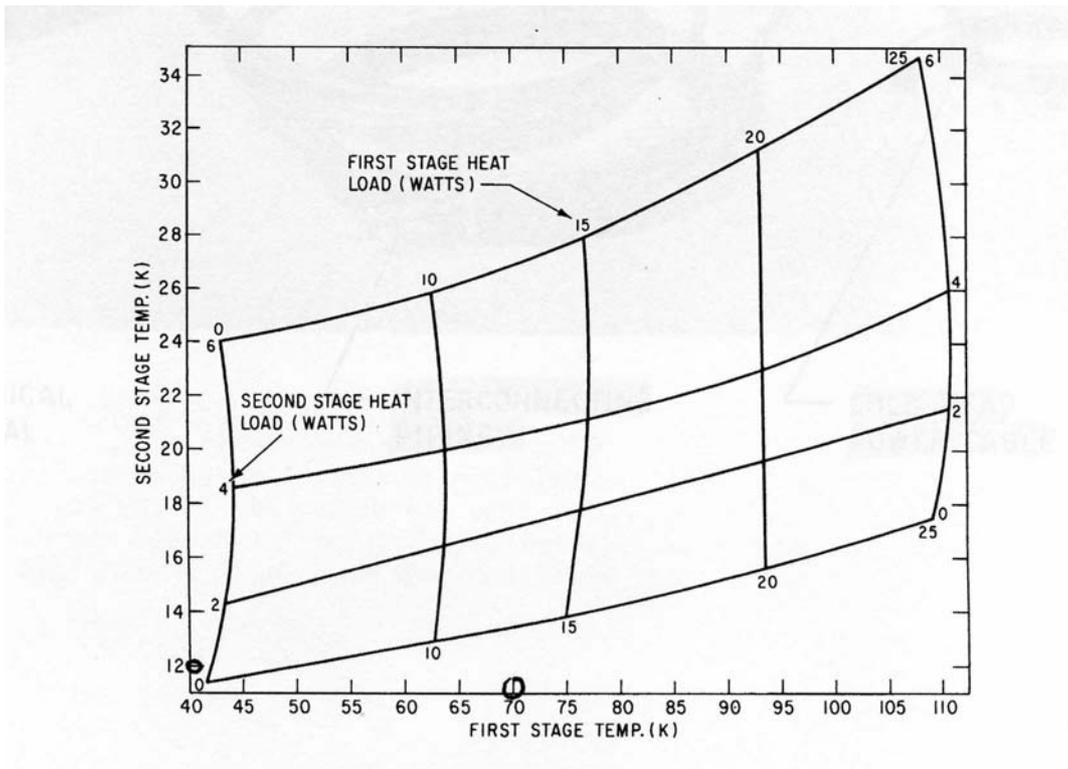


figura 56: Capacidad refrigeradora de la cabeza CTI-350

4.5.1 Efecto de la transición de vacío sobre la etapa fría del criostato.

La transición se realiza mediante un “gap” de aire entre el tramo de guía a temperatura ambiente y el tramo de guía a temperatura criogénica.

El alineamiento y sujeción se asegura mediante el uso de un soporte que consta de cuatro placas de fibra de vidrio

Cuando la entrada del criostato es en guía de onda, la carga térmica, por radiación y por conducción, que soportan las etapas frías puede ser excesiva. En ese caso, la capacidad refrigeradora del criostato puede ser insuficiente para enfriar dicha carga.

La carga por conducción entre dos etapas entre las cuales existe una diferencia de temperatura ΔT puede calcularse, como ya se ha comentado en apartados anteriores:

$$W_{COND} = \lambda \cdot \frac{A}{L} \cdot \Delta T$$

Las cabezas refrigeradoras como la CTI-350 tienen una capacidad refrigeradora limitada, que es insuficiente frente a esta carga.

Una solución para reducir esta potencia consiste en realizar un “gap” de aire entre la brida fría y la brida a temperatura ambiente. De esta forma, la carga por conducción es teóricamente nula.

En este caso, la carga por radiación entre las bridas puede calcularse mediante la siguiente fórmula.

$$W_{RAD} = A \cdot \sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4) \cdot \epsilon / 2$$

donde ϵ es la emisividad de las bridas, $A_{1,2}$ son las superficies de dichas bridas que se encuentran a temperaturas $T_{1,2}$ y σ es la constante de Boltzman. En nuestro caso se obtiene:

A_1	A_2	T_1	T_2	ϵ	W_{RAD}
0.0049 m ²	0.0049m ²	20K	300K	0.03	34mW

Se observa que la carga total por radiación es de 34mW, que es una carga despreciable frente a la potencia de refrigeración de la cabeza refrigeradora CTI-350.

Este montaje presenta dos serios inconvenientes de tipo mecánico para su uso en sistemas criogénicos. Debido a las diferentes contracciones que experimentan las piezas que soportan las guías, un tramo de la guía se encuentra a temperatura criogénica (15K) y el otro se encuentra aproximadamente a temperatura ambiente (300K), puede producirse un desalineamiento, o bien un acercamiento o alejamiento de las bridas. Esto provocará pérdidas de radiofrecuencia que pueden ser excesivamente importantes para un sistema que ha de funcionar con la menor temperatura de ruido posible.

Por ello, se hace necesario el uso de un soporte que mantenga esta distancia y el alineamiento del sistema a cualquier temperatura. Este no de atenuar la señal de radiofrecuencia, ser lo suficientemente rígido como para aguantar los diferentes esfuerzos de tensión a que son sometidos los dos tramos de guía, y debe tener una conductividad térmica muy baja.

En la siguiente figura se muestra el diseño de los soportes de fibra de vidrio empleados:

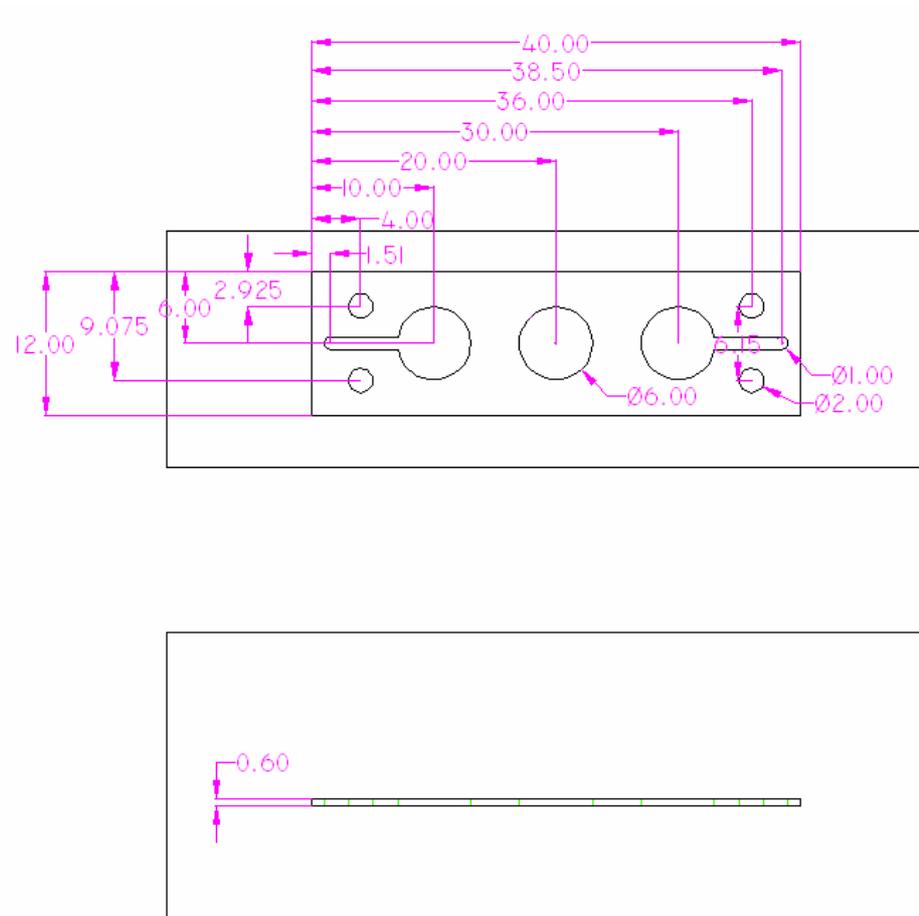


figura 57:Soportes de fibra de vidrio en la transición de vacío

Se ha elegido un soporte hecho en fibra de vidrio por la baja conductividad térmica a temperatura criogénica de este material y por su rigidez. Consta de cuatro láminas de fibra de vidrio de 12mm de ancho por 40mm de largo y un espesor de 0.6mm.

Para disminuir la conductividad térmica del soporte se han realizado tres taladros de 6mm de diámetro. Estos taladros pretenden reducir el área transversal de contacto entre las bridas. Las placas se fijan a las bridas de las guías de onda mediante cuatro tornillos. Una arandela plana es situada entre la lámina de fibra y la brida para reducir la superficie de contacto. Los tornillos llevan arandelas planas y tipo “grover” para dar mayor rigidez al soporte a temperaturas criogénicas, ya que estos tornillos se verán sometidos a diferentes contracciones por parte de la fibra de vidrio y del aluminio al enfriarse.

Se realiza una ranura entre los taladros de los tornillos de fijación a las bridas. De esta manera el camino térmico entre las bridas es mayor y por tanto la conductancia térmica (inversamente proporcional a la longitud) disminuye.

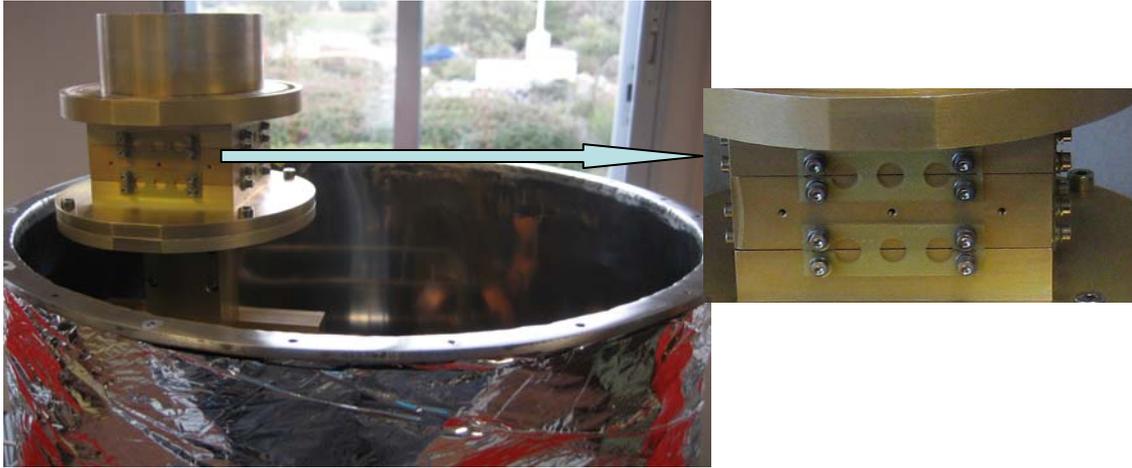


figura 58: fibras de vidrio empleadas en la transición de vacío

En el informe técnico N°1-1994: “Entrada en guía WR-112 del criostato de VLBI” se efectuaba un estudio para determinar el valor de la conductividad térmica debida a la estructura de fibra de vidrio que se emplea de nuevo en el presente receptor.

Para el caso de emplear un soporte con 4 fibras de vidrio modificadas tal y como se ha indicado con anterioridad, se obtiene una conductancia térmica de 2.1mW/K. En este caso la carga térmica originada en la etapa fría de la cabeza refrigeradora es de 674mW.

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

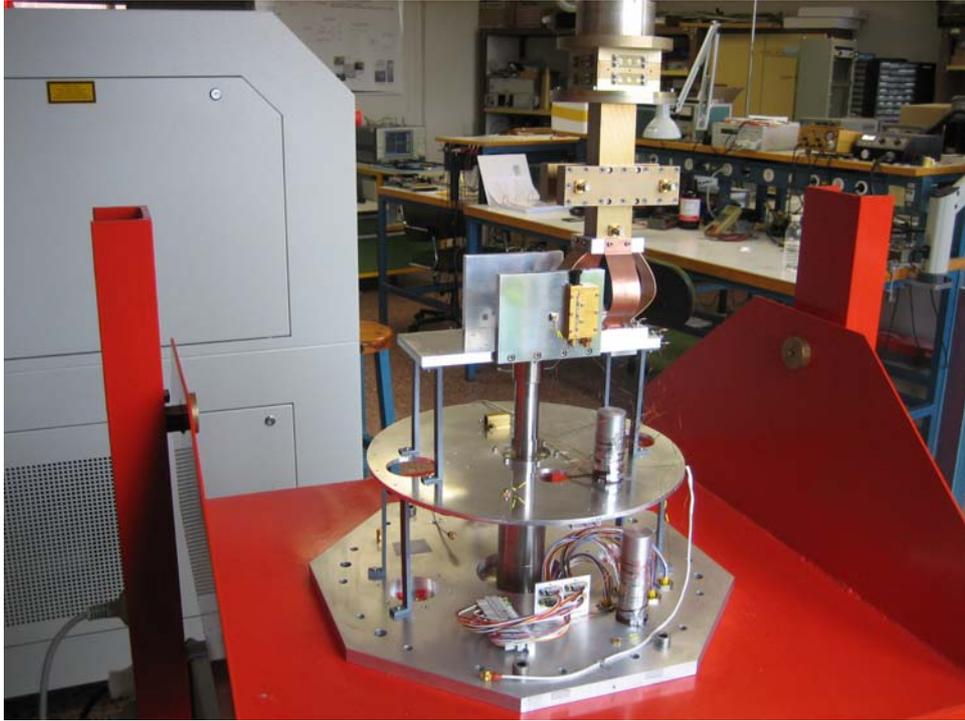


figura 59: Interior del criostato

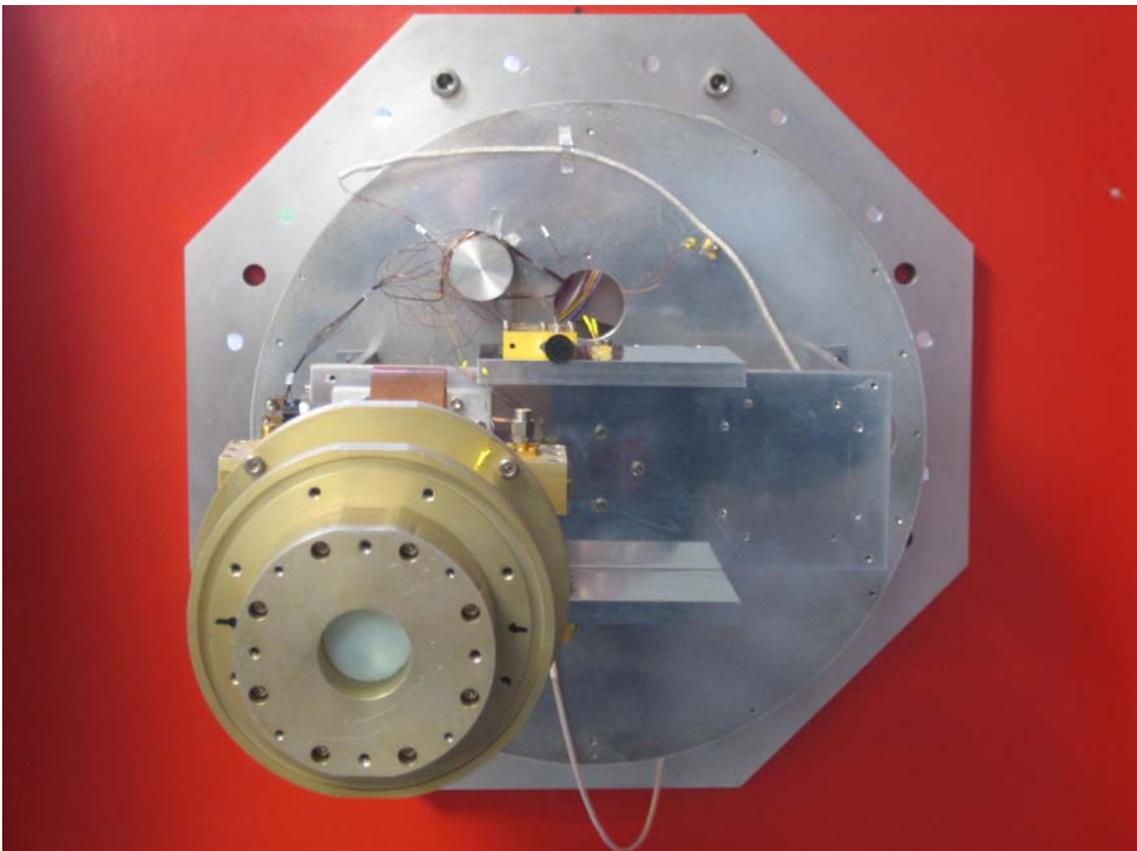


figura 60: Vista superior



figura 61: MLI en la etapa intermedia



figura 62: Receptor banda X en el laboratorio



figura 63: Receptor instalado en la rama M4' de la antena ARIES XXI

Anexos

Anexo A: Especificaciones de los amplificadores Banda X

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-SS-SS.

Anexo H: Especificaciones del cable remirígido UT-141A-SP.