

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



*Trabajo Fin de Grado*

**SISTEMA CRIOGÉNICO PARA  
RECEPTORES DE MICROONDAS DE ALTA  
SENSIBILIDAD**

(Cryogenic system for high sensitivity  
microwave receivers)

Para acceder al Título de

***Graduado en  
Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación***

Autor: Pablo Ibáñez Campo

Septiembre - 2023



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACION

## **GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN**

**CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO**

**Realizado por: Pablo Ibáñez Campo**

**Director del TFG: Luisa María de la Fuente Rodríguez**

**Título:** “Sistema criogénico para receptores de microondas de alta sensibilidad”

**Title:** “Cryogenic system for high sensitivity microwave receivers”

**Presentado a examen el día: 14 de septiembre de 2023**

para acceder al Título de

## **GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN**

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Luis Muñoz Gutiérrez

Secretario (Apellidos, Nombre): Beatriz Aja Abelán

Vocal (Apellidos, Nombre): María Sandra Robla Gómez

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de: .....

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del TFG  
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Grado Nº  
(a asignar por Secretaría)

## Agradecimientos

*A toda mi familia, por la educación que he recibido, por haber sabido guiarme en los momentos que más lo he necesitado y por darme todo lo que me ha hecho falta para llegar a ser la persona que hoy en día soy.*

## Resumen

Los receptores de radioastronomía han ido mejorando con el tiempo su sensibilidad para captar las ténues señales procedentes del Universo. Los detectores de inductancia cinética (KIDs) son un tipo de detectores empleados con tal propósito y están basados en la superconductividad, con una sensibilidad muy alta, requiriendo temperaturas criogénicas para su funcionamiento. Fruto de tal desarrollo nace la necesidad de poner en marcha sistemas criogénicos para la caracterización del funcionamiento de tales dispositivos. A lo largo de este proyecto, se llevará a cabo la caracterización completa de un sistema para la medida de KIDs, empleando para ello el nuevo criostato del Departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad de Cantabria. Se caracterizarán todos los componentes, tales como cables, atenuadores, DC Blocks y un amplificador de bajo ruido (LNA) criogénico. Adicionalmente, se llevará a cabo el diseño, fabricación y caracterización de un atenuador para baja frecuencia que permita disponer de dicho sistema para caracterizar con precisión cualquier otro dispositivo que funcione a temperaturas criogénicas o de bajo ruido (típicamente amplificadores de bajo ruido).

## Abstract

Radioastronomy receivers have improved their sensitivity over time in order to detect the faint signals coming from the Universe. Kinetic inductance detectors (KIDs) are a type of detectors used for that purpose and they are based on the superconductivity, requiring cryogenic temperatures for their operation. As a result of that development, appears the necessity of set in motion cryogenic systems with the aim to characterize the performance of that kind of devices.

Along the project, the completely characterization of the KIDs-measuring system will be done, including the different components such cables, attenuators, DC Blocks and a cryogenic low noise amplifier (LNA). Additionally, the design, fabrication and measuring of an attenuator for low frequencies will be carried out, in order to make the system available for the accurate characterization of any device that works at cryogenic temperatures or that requires low noise conditions (typically Low Noise Amplifiers).

## Palabras clave

- Receptor
- Microondas
- Criogenia
- Temperatura
- Ruido
- KID
- Amplificador
- LNA
- DUT
- Figura de ruido
- Temperatura equivalente de ruido
- SNR
- Cold attenuator
- Atenuador
- Sistema criogénico
- Criostato

# Índice de contenidos

<b>1. Introducción</b>	<b>6</b>
1.1. ¿Por qué sistemas criogénicos de medida?	6
1.2. Conceptos básicos sobre el ruido en dispositivos electrónicos	8
<b>2. Técnicas de caracterización de dispositivos a temperaturas criogénicas</b>	<b>10</b>
2.1. Medida de ruido. Método del Y	10
2.2. Método del Atenuador frío (“Cold Attenuator”)	11
2.3. Caracterización de detectores de inductancia cinética (KIDs)	12
<b>3. Descripción del sistema criogénico de medida</b>	<b>13</b>
<b>4. Caracterización de los cables de acceso</b>	<b>15</b>
4.1. Descripción de los cables	15
4.2. Medidas a temperatura ambiente	16
4.3. Medidas a temperatura criogénica	21
<b>5. Otros elementos: LNA, DC Blocks y atenuadores</b>	<b>23</b>
5.1. LNA	23
5.1.1. Medidas a temperatura ambiente	24
5.1.2. Medidas a temperatura criogénica	26
5.2. DC Blocks	27
5.3. Atenuadores comerciales	28
<b>6. Diseño de un atenuador para medidas en criogenia</b>	<b>30</b>
<b>7. Caracterización del atenuador</b>	<b>33</b>
<b>8. Conclusiones</b>	<b>38</b>
<b>9. Líneas de futuro</b>	<b>38</b>
<b>10. Referencias y bibliografía</b>	<b>39</b>

## Índice de figuras

1.	Mapa de calor de las fluctuaciones en los niveles de temperatura del CMB obtenido durante 9 años por la misión WMAP de la NASA [2]	6
2.	Variación de la frecuencia de resonancia y la fase en el $S_{21}$ de un KID [4]	7
3.	Ejemplo de sistema multietapa	9
4.	Relación lineal de ruido en un DUT de 2 puertos	10
5.	Esquema del método del "Cold attenuator"	11
6.	Esquema del setup para la caracterización de un KID	12
7.	Compresor de helio del criostato	13
8.	Vista interna de sistema	14
9.	Montaje de entrada y salida del criostato	16
10.	Cable C702-113-101P	17
11.	Cable C702-113-102P	17
12.	Cable C702-113-103P (1)	17
13.	Cable C702-113-103P (2)	18
14.	Cable C-KPKJ-UT085CFORM 60MM	18
15.	Cable C-KPKP-UT085CFORM 60MM	18
16.	Cable C-KPKJ-UT085CFORM 80MM	19
17.	Cable C-KPKP-UT085CFORM 80MM	19
18.	Cable C-KPKJ-UT085CFORM 150MM (1)	19
19.	Cable C-KPKJ-UT085CFORM 150MM (2)	20
20.	Cable C-KPKP-UT085CFORM 150MM (1)	20
21.	Cable C-KPKP-UT085CFORM 150MM (2)	20
22.	Línea de transmisión con una carga	21
23.	Nivel de IL de entrada y ajuste	22
24.	Nivel de IL de salida y ajuste	22
25.	LNA YSG2002	23
26.	Proceso de calibración del NFA	23
27.	Montaje para caracterización en ambiente del LNA	24
28.	Ganancia y temperatura de ruido del LNA a temperatura ambiente	25
29.	Caracterización en parámetros S del LNA, a temperatura ambiente	25
30.	Montaje para caracterizar el LNA en criogenia	26
31.	Ganancia del LNA a temperatura criogénica	26
32.	Fotografía del DC Block	27
33.	Caracterización del DC Block	27
34.	Atenuador 10 dB	28
35.	Atenuador 20 dB	29
36.	Atenuador 30 dB	29
37.	Esquema del atenuador en "doble T"	30
38.	Modelos de atenuadores	31
39.	Substrato de simulación en ADS	31
40.	Layouts	32
41.	Simulación del modelo de 2 etapas	32
42.	Simulación del modelo de 3 etapas	33
43.	Ejemplo del alojamiento del atenuador	33
44.	Medidas del modelo de 2 etapas	34
45.	Medidas del modelo de 3 etapas	34
46.	Transiciones JMicro de los atenuadores	35
47.	Caracterización del atenuador de 2 etapas en la estación de sondas coplanares	35
48.	Caracterización del atenuador de 3 etapas en la estación de sondas coplanares	36
49.	Montaje del atenuador	36
50.	Sliding contact	37
51.	Caracterización del atenuador de 2 etapas montado con transiciones a coaxial	37

## **Acrónimos**

**ADS** Advanced Design System.

**BER** Bit Error Rate.

**CC** Cortocircuito.

**CMB** Cosmic Microwave Background.

**DUT** Device Under Test.

**ENR** Excess Noise Ratio.

**HEMT** High Electron Mobility Transistor.

**KID** Kinetic Inductance Detector.

**LEKID** Lumped Element Kinetic Inductance Detector.

**LNA** Low Noise Amplifier.

**NF** Noise Figure.

**NFA** Noise Figure Analyzer.

**RT** Room Temperature.

**SNR** Signal Noise Ratio.

**SOLT** Short, Open, Load, Through.

**TRL** Through, Reflect, Line.

**WMAP** Wilkinson Microwave Anisotropy Probe.

# 1. Introducción

## 1.1. ¿Por qué sistemas criogénicos de medida?

En 1961, en la estación de Holmdel Field de los Laboratorios Bell (Monmouth, Nueva Jersey, Estados Unidos) uno de los proyectos que estaba llevándose a cabo era el desarrollo de un nuevo sistema de comunicaciones; para ello, parte de la tarea del grupo encargado era determinar los límites en cuanto a sensibilidad del sistema. Las primeras mediciones fueron llevadas a cabo en torno a los 2.4 GHz en una antena y sistema receptor cuyas contribuciones de ruido fueron cuidadosamente medidas y estimadas dando como resultado 18.9 K; sin embargo, a la hora de medir la temperatura del cielo, se obtenía un resultado de 22.2 K, ligeramente superior a las contribuciones estimadas del sistema receptor y atmósfera, asumiéndose la diferencia de 3.3 K como una imprecisión en las medidas [1].

En 1962 dos radioastrónomos, Arno Penzias y Robert Wilson, se unieron a los Laboratorios Bell. Uno de sus trabajos tenía como objetivo la medición de la temperatura del cielo con una precisión sin precedentes. En tal línea, se prestó especial atención a la medición y calibración de todos los equipos del sistema receptor. Finalmente, se observó un sesgo de 3 K en las medidas. Aunque todavía no existía una interpretación científica, Penzias y Wilson habían obtenido resultados que demostrarían la existencia de una radiación de fondo en todo el cielo. Tras juntar sus resultados con el físico Robert Dicke, quien estableció la posible existencia de tal radiación, presentaron en 1965 dos artículos en la revista *Astrophysical Journal Letters*, lo cual llevó al descubrimiento de la radiación de fondo de microondas (CMB de ahora en adelante) y la aceptación del Big Bang como modelo principal de la cosmología [1]. Dicho descubrimiento hizo que les fuese otorgado a Penzias y Wilson el Premio Nobel de Física de 1978.

La radiación de CMB es emitida por nuestro universo desde su origen y contiene información crucial para comprender la creación de éste desde el Big Bang. Hoy en día su temperatura está establecida en 2.725 K. La mayor intensidad de radiación se encuentra entre las longitudes de onda de 1.25 y 2.05 mm [4], por lo que el desarrollo de tecnología que permita aumentar la precisión en las medidas en ese rango de frecuencias se ha convertido en una de los objetivos de la ingeniería de microondas. En la figura 1 se puede observar un mapa de calor de las fluctuaciones en los niveles de temperatura del CMB obtenido durante 9 años por la misión Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) de la NASA [2].

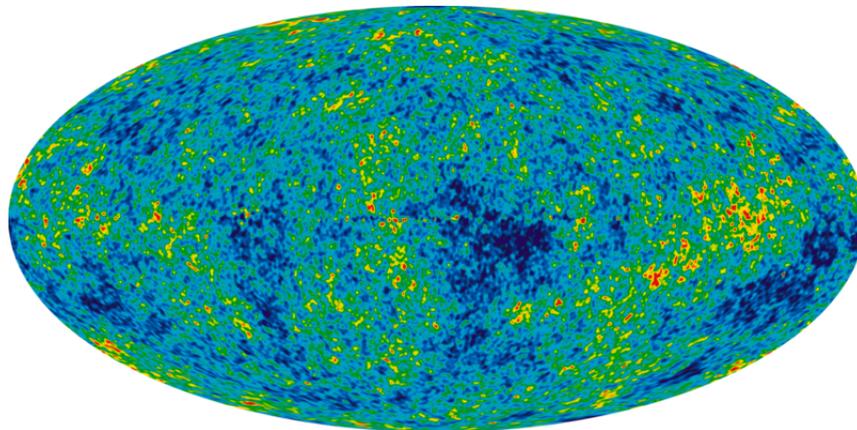


Figura 1: Mapa de calor de las fluctuaciones en los niveles de temperatura del CMB obtenido durante 9 años por la misión WMAP de la NASA [2]

Con el objetivo de entender mejor el origen del universo y la formación de galaxias se han llevado a cabo diversas misiones espaciales. Los receptores de radioastronomía han ido mejorando su sensibilidad para poder captar las tenues señales procedentes de la radiación del CMB. Tradicionalmente, estos receptores han estado basados en transistores HEMT (High Electron Mobility Transistor) sobre sustratos de GaAs (Arseniuro de Galio) y InP (Fosforo de Indio), por sus bajos niveles de ruido. Sin embargo, en los últimos años se han desarrollado detectores basados en superconductores, los cuales tienen la potencialidad de tener una sensibilidad próxima al límite cuántico. Dentro de este tipo de detectores se encuentran los detectores de inductancia cinética (KIDs, por sus siglas del inglés *Kinetic Inductance Detector*). Un KID se fundamenta en un circuito resonante acoplado a una línea de transmisión, cuya frecuencia de resonancia suele ser en frecuencias bajas, en torno a 1 GHz. El resonador está basado en materiales superconductores, de manera que por debajo de la temperatura crítica la resistencia sea prácticamente nula, gracias a la formación de pares de Cooper (en el estado de superconducción, los electrones se comportan como si se atrajeran). Los detectores LEKIDs (Lumped Element Kinetic Inductance Detectors) son un tipo de detectores superconductores en los cuales se combina la función de resonador de microondas junto a la de absorción directa de la radiación, evitando así la necesidad de una antena [3]. El LEKID se diseña para detectar radiación en un rango determinado de frecuencias. La incidencia de fotones a las frecuencias de detección cuya energía supere la brecha energética hace que éstos sean absorbidos y rompan los pares de Cooper, modificando de ésta manera las propiedades eléctricas del superconductor y variando la frecuencia de resonancia del circuito resonador. Al medir la variación de la frecuencia de resonancia y la fase del parámetro  $S_{21}$ , se puede establecer el nivel de potencia recibido. En la figura 2 se puede observar un ejemplo de variación de frecuencia central y fase en el  $S_{21}$  de un KID [4].

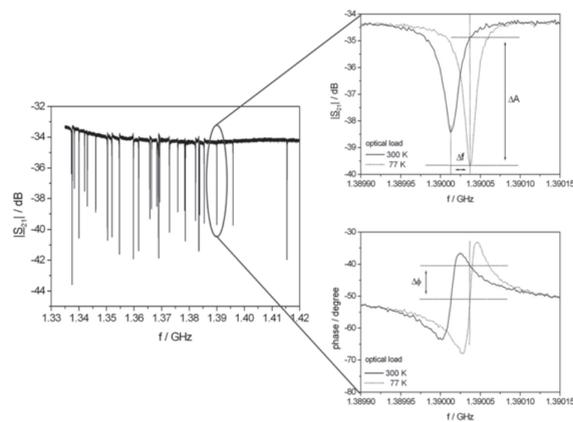


Figura 2: Variación de la frecuencia de resonancia y la fase en el  $S_{21}$  de un KID [4]

Fruto de esta tecnología, nace la necesidad de desarrollar sistemas para caracterizar y medir estos equipos a temperaturas criogénicas, ya que su funcionamiento se basa en la superconducción, fenómeno que solo se da si la temperatura del material superconductor es menor que su temperatura crítica, y esta magnitud suele ser cercana a los 0 K. Alternativamente, la puesta en marcha de estos equipos de medida también permite caracterizar y trabajar con un amplio rango de dispositivos y en general con todo aquello que guarde relación con el bajo ruido, típicamente amplificadores de bajo ruido (más comúnmente, y de ahora en adelante, LNA por sus siglas en inglés *Low Noise Amplifier*). A partir de todo esto, se genera la motivación para el desarrollo de este trabajo, en el que se tratarán las bases de la caracterización de dispositivos a temperaturas criogénicas y se detallarán todas las partes de un sistema de caracterización de dispositivos bajo evaluación (más comúnmente, y de ahora en adelante, DUT por sus siglas en inglés *Device Under Test*). Seguidamente, se mostrará el sistema completo de caracterización, tanto a temperatura ambiente como en criogenia, de un amplificador de bajo ruido (LNA) donado por el Observatorio de Yebes (Guadalajara, España), así como los resultados que ofrece el mismo. Finalmente se ha diseñado un atenuador para mejora de la precisión en las medidas de temperatura de ruido de dispositivos a temperaturas criogénicas. Con todo ello, se ha realizado una caracterización de los distintos elementos necesarios en un sistema de medida de KIDs.

## 1.2. Conceptos básicos sobre el ruido en dispositivos electrónicos

El ruido en los sistemas de comunicaciones se define como una serie de fluctuaciones aleatorias que generan una señal indeseada y que se mezcla con la señal que contiene la información útil. Hay dos fuentes principales de ruido, el ruido térmico y el ruido de disparo (o *shot noise*) aunque en general cuando nos referimos al ruido lo hacemos al primer caso, y se asume como la única contribución.

El ruido térmico se debe a vibraciones de electrones y huecos en cualquier cuerpo por el mero hecho de estar a determinada temperatura superior al cero absoluto. La potencia de esta señal aleatoria en una impedancia arbitraria  $Z_s$ , a una temperatura  $T_s$  se muestra en la ecuación 1. En dicha ecuación,  $k$  es la constante de Boltzmann (aproximadamente  $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ ) y la  $B$  es el ancho de banda de operación. Como se puede observar, la potencia de ruido es independiente del valor de la impedancia.

$$N = k T_s B ; N = 10 \log N \quad (1)$$

El ruido térmico está presente en todos los sistemas de comunicaciones, y, en general, es un factor indeseado; si no fuera por el ruido, cualquier nivel de potencia permitiría funcionar a un sistema de comunicaciones, ya que bastaría con una antena con suficiente ganancia como para amplificar la señal al nivel deseado; sin embargo, en cualquier sistema de comunicaciones es necesaria una relación de potencia de la señal útil sobre la potencia de ruido mínima para que el sistema opere con normalidad. A esta relación se la conoce como SNR (Del ingles, *Signal Noise Ratio*).

$$SNR = \frac{S}{N} ; \quad (2)$$

La forma de caracterizar la capacidad de un receptor de procesar señales se puede expresar mediante múltiples magnitudes, como la tasa de bits erróneos (BER por sus siglas en ingles, *Bit Error Rate*) o la sensibilidad (Que suele referirse al nivel mínimo de señal para que el sistema opere). Otra forma de caracterizarlo es la figura de ruido, de la cual junto con el ancho de banda se obtiene la sensibilidad. La figura de ruido (También llamada factor de ruido o NF, del inglés *Noise Figure*) se define como la degradación de la SNR que se produce dentro del sistema receptor por el mero hecho de que sus componentes añaden ruido. La definición matemática se muestra en la ecuación 3. En general, cuando se alude a la relación entre magnitudes se hace con el término factor de ruido y la letra  $F$ , y para la relación logarítmica (en dB), con el término figura de ruido y el acrónimo  $NF$ .

$$F = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o} ; NF (dB) = SNR_i - SNR_o = 10 \log F \quad (3)$$

La definición de factor de ruido se aplica sobre redes con 2 puertos; por ejemplo, filtros, atenuadores... No se emplea para redes de un puerto como terminaciones u osciladores. En este tipo de redes en general hay un escalado en potencia (Ganancia en un amplificador, atenuación en un atenuador...) al que podemos referirnos como  $g$  de forma arbitraria. Si en una red de dos puertos desarrollamos la relación señal a ruido a la salida, obtenemos la expresión 4.

$$F = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o} = \frac{S_i/N_i}{S_i g / (N_i g + N_a)} \quad (4)$$

En esta ecuación,  $N_a$  es el ruido que añade la propia red, independiente del ruido de entrada, y este sumando es el que produce el empeoramiento de la  $SNR$  (De ser nulo,  $SNR_i$  sería igual a  $SNR_o$  y no habría degradación). Prescindiendo del término arbitrario  $S_i$ , podemos obtener una expresión alternativa del factor de ruido, en la ecuación 5. En la citada expresión,  $N_i$  en general será  $k T_s B$ .

$$F = \frac{N_a + g N_i}{g N_i} \quad (5)$$

También podemos desarrollar el ruido que añade el sistema a partir de su figura de ruido, en la expresión 6.

$$N_a = k T B g (F - 1) \quad (6)$$

Se puede hablar de la NF de un sistema completo o de cada uno de sus componentes conectados en cascada; para ello, podemos definir la NF de cada red de dos puertos en un sistema multietapa como, por ejemplo, el de la figura 3.

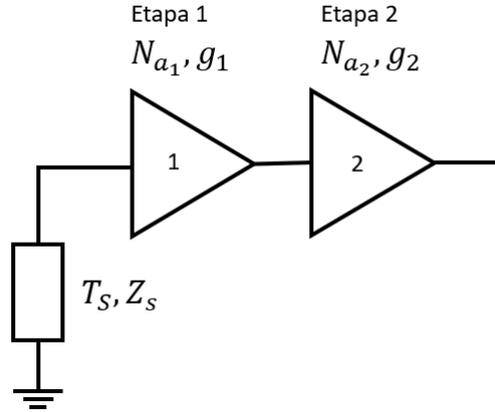


Figura 3: Ejemplo de sistema multietapa

En este ejemplo concreto, tenemos una fuente de ruido a la entrada que producirá un nivel de ruido  $N_i = k T_s B$ , y dos etapas cuya ganancia es  $g_1$  y  $g_2$ , y su ruido añadido es  $N_{a_1}$  y  $N_{a_2}$ , respectivamente. Si evaluamos la potencia tanto de señal como de ruido tras la etapa 1, tenemos las expresiones del conjunto de ecuaciones 7.

$$S_1 = S_i g_1 ; N_1 = N_i g_1 + N_{a_1} \quad (7)$$

Si hacemos lo propio con la etapa 2, obtenemos el conjunto de expresiones 8.

$$S_2 = S_1 g_2 = S_i g_1 g_2 ; N_2 = N_1 g_2 + N_{a_2} = (N_i g_1 + N_{a_1}) g_2 + N_{a_2} \quad (8)$$

A partir de las ecuaciones 8 y 6 podemos llegar a una expresión que muestra el factor de ruido del sistema de 2 etapas en cascada, (ecuación 9).

$$F_{sis} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{g_1} \quad (9)$$

Si extendemos la idea a un sistema de  $n$  etapas, llegamos a la ecuación 10, también denominada como la fórmula de Friis.

$$F_{sis} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{g_1} + (\dots) + \frac{F_n - 1}{g_1 g_2 (\dots) g_{n-1}} \quad (10)$$

Esta ecuación muestra que si la ganancia de nuestro primer componente de la cadena es alta, la contribución del resto de etapas será muy pequeña, lo cual explica por qué se emplean LNAs como primeros componentes de cadenas de recepción.

## 2. Técnicas de caracterización de dispositivos a temperaturas criogénicas

En esta sección, se presentarán las bases de los métodos empleados para la caracterización de ruido de dispositivos a temperaturas criogénicas.

### 2.1. Medida de ruido. Método del Y

La medida de ruido se basa en gran medida en la linealidad de éste. Para bajos niveles de potencia de entrada, las redes operan en la región lineal, eso significa que la potencia de salida es proporcional a la potencia de entrada, y por tanto, la potencia de ruido a la salida es linealmente dependiente de la potencia de ruido a la entrada. Los dispositivos lineales exhibirán una característica lineal en la potencia de salida en función de la temperatura de la fuente, como se muestra en la Figura 4. Con todo ello, es posible calcular el ruido que añade un dispositivo a partir de la pendiente de la recta [5].

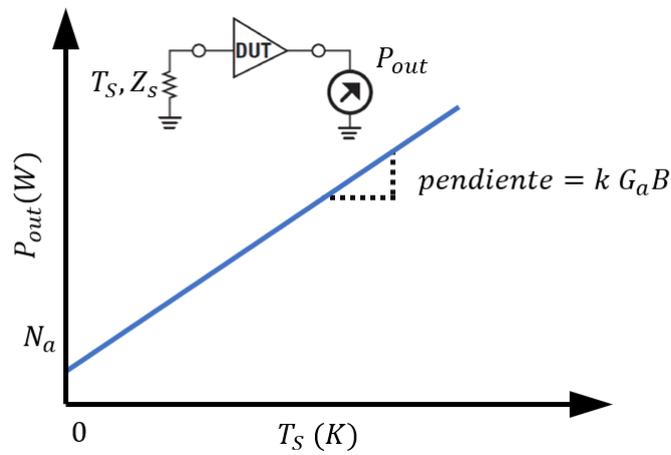


Figura 4: Relación lineal de ruido en un DUT de 2 puertos

Una forma de hallar la pendiente es aplicar 2 entradas distintas y para cada una de ellas medir la potencia de salida; para ello, se emplean usualmente las fuentes de ruido, que son diodos de baja capacitancia polarizados en inversa, y que mediante efecto avalancha son capaces de generar temperaturas equivalentes de ruido elevadas. Las fuentes de ruido, en general, producen dos temperaturas equivalentes de ruido, denominadas  $T_c$  ('Cold', Frío o apagado) y  $T_h$  ('Hot', Caliente o encendido), estas temperaturas corresponden al estado de polarización del diodo: para el estado 'frío' no hay polarización y para el estado 'caliente' sí está polarizado. En el estado 'caliente' el diodo genera una potencia de ruido  $N > kT_c B$  y en el estado 'frío'  $N = kT_c B$ . Valores típicos podrían ser, por ejemplo,  $T_c = 290K$  y  $T_h = 1000K$ .

Para cada fuente de ruido, se define su Relación de exceso de ruido (Excess Noise Ratio, ENR) como la diferencia entre las temperaturas equivalentes de ruido de sus dos estados en relación a la temperatura de referencia  $T_0=290$  K, representado en la ecuación 11.

$$ENR = \frac{T_h - T_c}{T_0} \quad (11)$$

A partir de la propiedad de linealidad de ruido, y empleando una fuente de ruido, es posible medir la figura de ruido de un DUT empleando el método del Factor Y. En primer lugar, para cada estímulo de entrada ( $T_h$  y  $T_c$ ) se obtienen los niveles de potencia a la salida, denominados  $N_2$  y  $N_1$  respectivamente. El factor Y se define como el cociente entre éstos, expresado en la ecuación 12.

$$Y = \frac{N_2}{N_1} \quad (12)$$

Como el valor de ENR representa un nivel de referencia para la entrada, se puede derivar una expresión del ruido que añade el DUT, según la ecuación 13.

$$N_a = kT_oBG\left(\frac{ENR}{Y-1} - 1\right) \quad (13)$$

De ahí podemos obtener la figura de ruido del sistema completo,  $NF_{sis}$ , llegando a la expresión de la ecuación 14. Este factor cuenta con el ruido añadido por el medidor, aunque la contribución de éste será pequeña siempre y cuando la ganancia del DUT sea alta.

$$F_{sis} = \frac{ENR}{Y-1} \quad (14)$$

## 2.2. Método del Atenuador frío (“Cold Attenuator”)

El método del Factor Y según el esquema básico es sencillo y directo, pero presenta varios inconvenientes. La principal desventaja es que, en muchas ocasiones, la temperatura de ruido del dispositivo a caracterizar es mucho menor que los valores de  $T_h$  y  $T_c$ , típicamente éste último en torno a 300K, lo que se traduce en un considerable error en la medida. Este es el caso que se produce en la medida de LNAs a temperaturas criogénicas. Otro problema es que la impedancia del diodo de la fuente de ruido varía entre un estado de polarización y otro (Entre ‘Caliente’ y ‘Frío’), lo cual provoca desadaptaciones y con ello reflexiones que producen un error significativo en la medida.

Para paliar estos problemas se puede utilizar el método del Atenuador Frío, o “Cold Attenuator” [6]. Este método consiste en colocar un atenuador enfriado, previamente caracterizado, dentro del criostato, inmediatamente antes del DUT, tal y como muestra la figura 5.

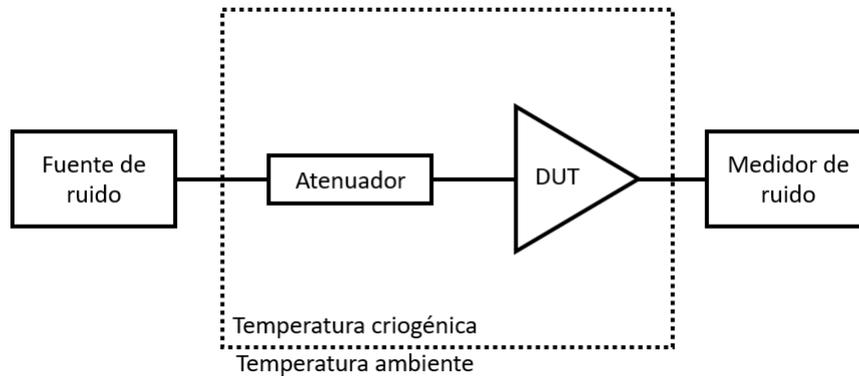


Figura 5: Esquema del método del “Cold attenuator”

Con esta disposición, las temperaturas equivalente de ruido de la fuente en los dos estados se ven reducida por el atenuador hasta un valor no muy alejado de la temperatura esperada del DUT.

De esta manera, conseguimos un método que permite medir con rapidez, que presenta poco cambio entre las impedancias en frío y caliente del diodo, y con el que se comete menor error a la hora de medir un DUT con una temperatura equivalente de ruido baja [6].

En este proceso, es necesario conocer con exactitud la ENR de la fuente de ruido, las pérdidas de inserción (IL) de las líneas de entrada y salida a la temperatura de operación y la atenuación introducida por del atenuador. Es importante conocer con precisión la temperatura física del atenuador para poder corregir el efecto introducido por la línea de entrada, formada por cables coaxiales y el atenuador. Toda esta caracterización se ha llevado a cabo y se detalla en las secciones futuras del trabajo.

### 2.3. Caracterización de detectores de inductancia cinética (KIDs)

Los KIDs han de ser diseñados de tal manera que sus frecuencias de resonancia no se solapen entre si y se distribuyan de forma uniforme en la banda de frecuencia deseada, debido a la cantidad de dispositivos empleados a la vez.

La otra característica de cada resonador individual es su factor de calidad. Este parámetro es también crítico ya que determina el ancho de banda ocupado por cada resonador y, si es demasiado ancho, va a solapar las frecuencias de resonancia más cercanas a ambos lados, y también tendrá un impacto en el número máximo de resonadores posibles para un ancho de banda determinado.

La caracterización de los KIDs se ha de realizar a temperaturas por debajo de su temperatura crítica. Para los detectores basados en Aluminio, cuya temperatura crítica es del orden de decenas de mK, se debe utilizar criostatos de dilución [7], para permitir alcanzar dichas temperaturas. Otros detectores basados en Niobio, por ejemplo, cuya temperatura crítica es del orden de 14 K pueden ser medidos en criostatos de ciclo cerrado de He, que permite alcanzar temperaturas en el dispositivo del orden de 3 ó 4 K. Este último modelo de criostato es el disponible en nuestro laboratorio y el que se utilizará en este proyecto.

Un esquema de medida para la caracterización de un KID en nuestro criostato se muestra en la figura 6. Podemos observar varios elementos aparte del KID cuya utilidad y características se detallarán en otras secciones. El sistema consta de una línea de entrada y otra de salida. Por un lado, se debe adecuar el nivel de la señal de entrada para poder medir las frecuencias de resonancia sin calentar los resonadores, a través de atenuadores, y por otro lado, se añadirán elementos, como DC Blocks para realizar choques térmicos para mantener la temperatura del resonador lo más baja posible. Los cables coaxiales de ambas líneas serán específicos y se explicarán en detalle en la sección siguiente. Después del dispositivo a medir, se debe añadir un amplificador bajo ruido para adecuar el nivel de salida a la entrada del equipo de medida que se vaya a utilizar.

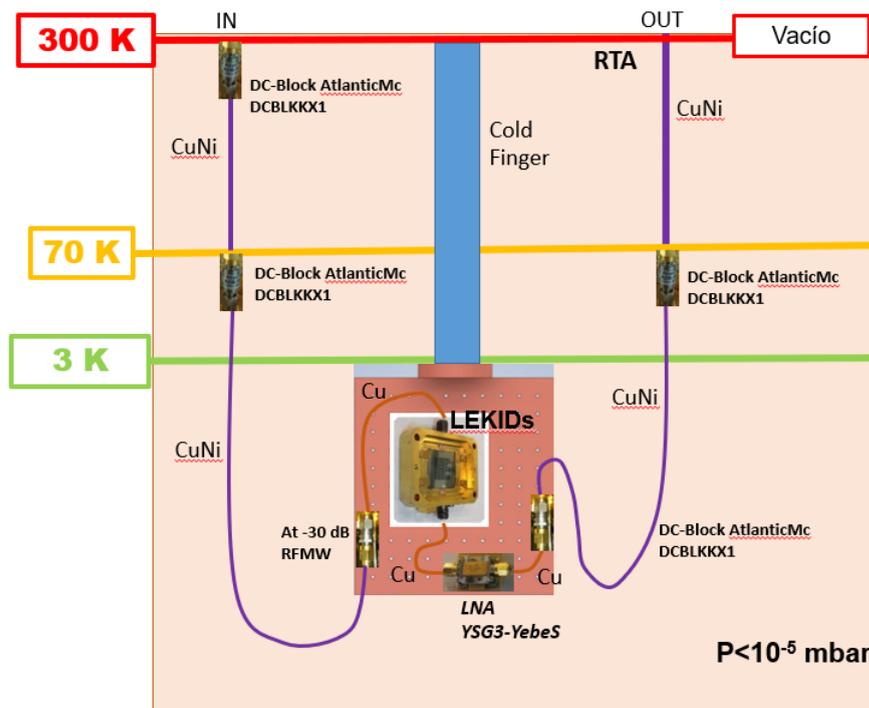


Figura 6: Esquema del setup para la caracterización de un KID

### 3. Descripción del sistema criogénico de medida

El sistema criogénico de medida se basa en un contenedor (en ocasiones llamado *dewar*) en el que, tras hacer un vacío, se consigue enfriar la base, donde se anclará el KID, hasta temperaturas de aproximadamente 3 K. Dentro de este contenedor se halla la base, ó segunda etapa, sobre la que se montan todos los dispositivos, esta base tiene una conexión térmica directa con el dedo frío (*cold finger*) que se trata de un cilindro a muy baja temperatura, obtenida mediante un proceso cíclico de enfriado con Helio.

El proceso de enfriado tiene varios pasos y suele necesitar unas 4 horas. Está basado en el ciclo de enfriamiento Glifford-McMahon, que usa Helio gas como refrigerante. En dicho sistema se utiliza una bomba de vacío para extraer el aire del interior, y un compresor que comprime el gas de Helio necesario para el proceso de enfriamiento de la carga. Una explicación más detallada de su funcionamiento se puede encontrar en [8]. En la figura 7 se puede observar una fotografía de uno de los compresores de helio de los que se dispone en el laboratorio.



Figura 7: Compresor de helio del criostato

El contenedor que aloja la base para montar los dispositivos a caracterizar consta de varias partes, como se puede observar en la figura 8. En primer lugar, el contenedor de mayor tamaño (*dewar*) aísla el criostato del exterior, donde comienza el vacío. Posteriormente, un contenedor de menor tamaño, ó primera etapa, tiene como función realizar un apantallamiento para reducir el calor por radiación, proveniente del dewar. Finalmente, esta primera etapa contiene a la segunda etapa, la cual está térmicamente conectada al dedo frío, y es la parte que alcanza la temperatura más baja, que se termina en una placa, llamada *cold plate*, donde se ancla el dispositivo a medir. Los apantallamientos ayudan a proteger el *cold plate* de la transmisión de calor por radiación.

La separación entre etapas se realiza mediante pasamuros que garantizan el mantenimiento del vacío. También ayudan a un mejor aislamiento térmico entre etapas, que se mejora empleando cables coaxiales con materiales con baja conductividad térmica.

Si bien es cierto que en los ciclados realizados la temperatura mínima conseguida ha sido de 3 K, este resultado se da bajo ciertas condiciones. El hecho de añadir dispositivos y conectarlos entre ellos y con el exterior supone un incremento de la temperatura en el interior del criostato (Denominado como carga térmica o *thermal load*). Esta carga térmica tiene varias contribuciones: la conducción del calor, la radiación, conducción por gas residual y disipación [8].

La conducción es uno de los mecanismos de transferencia de calor basado en el contacto entre cuerpos a diferentes temperaturas. Esta afluencia de calor se puede minimizar si se emplean materiales con baja conductividad térmica, como el cuproníquel. Por otro lado, se puede aumentar el gradiente térmico aumentando la longitud física de los cables coaxiales de entrada y salida del criostato.

La radiación es otro mecanismo de transferencia de calor que afecta al criostato. Se caracteriza por la transferencia de calor sin contacto entre los cuerpos. Para solventar eso, se coloca un apantallamiento sobre el *cold plate* que protege de este fenómeno, tal y como se observa en la figura 8.

Finalmente, la última fuente de calor que genera carga térmica es la disipación de calor por parte de los dispositivos activos, al estar sometidos a una polarización. Para preveer esto, se puede calcular su potencia disipada en DC.

Con todo ello, en condiciones normales de operación, con cableado y componentes, la temperatura de operación puede que supere los 3 K, algo que limita los dispositivos superconductores que pueden ser medidos a todos aquellos cuya temperatura crítica sea superior a ésta.

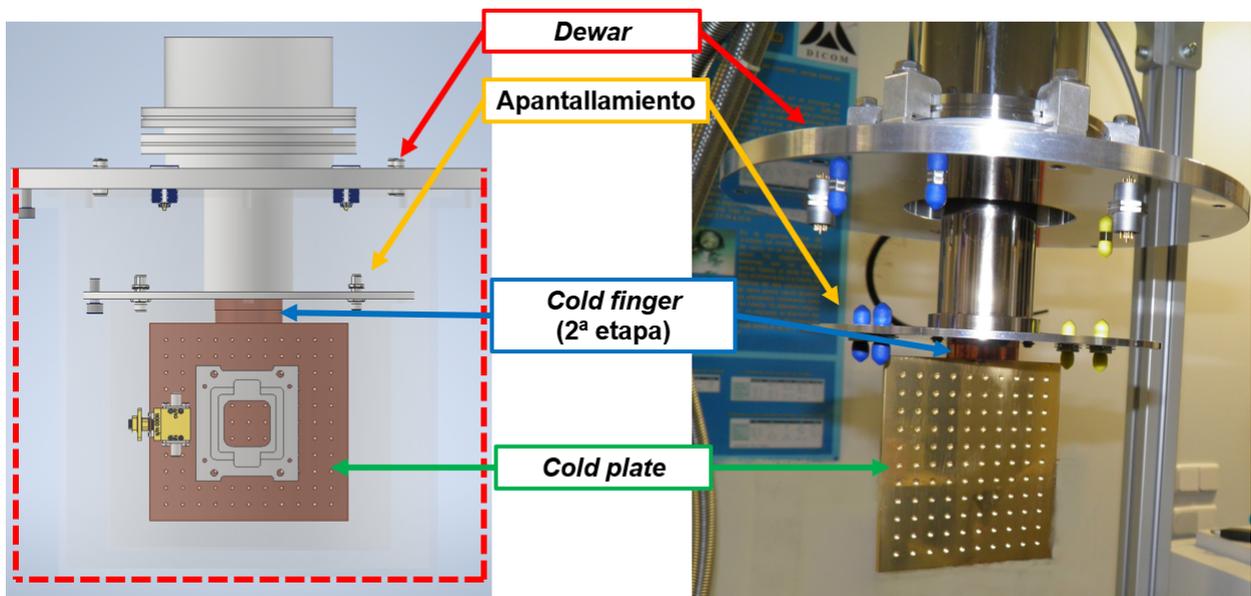


Figura 8: Vista interna de sistema

## 4. Caracterización de los cables de acceso

### 4.1. Descripción de los cables

Otro de los pasos importantes en la caracterización de dispositivos es la medida de las líneas de transmisión de acceso que conectarán todos los componentes con el DUT. La caracterización de todos los elementos pasivos se ha llevado a cabo en un PNA modelo N5227A de Keysight, calibrado con el kit de calibración K3652 de Anritsu.

La lista completa de modelos de cable empleados se detalla a continuación:

- C702-113-101P: Cable de CuNi con giramiento cóncavo
- C702-113-102P: Cable de CuNi con doble giramiento
- C702-113-103P: Cable de CuNi con giro en círculo
- C-KPKJ-UT085CFORM 60, 80 y 150 mm: Cables de cobre moldeables a mano con conectores macho - hembra
- C-KPKP-UT085CFORM 60, 80 y 150 mm: Cables de cobre moldeables a mano con conectores hembra - hembra

La variedad de cables seleccionados contiene modelos de dos materiales: CuNi y cobre. Los cables formados con CuNi tienen baja conductividad térmica, entre 25 y 40  $W/mK$ ; esta propiedad ayuda a reducir la carga térmica por conducción, y su ubicación ideal es al comienzo y final de la cadena, es decir, cercanos al apantallamiento de la primera etapa. La conductividad térmica del cobre es superior, del orden de 385  $W/mK$ , por lo que los cables moldeables a mano idealmente han de colocarse cercanos a la segunda etapa y a los componentes más enfriados.

De igual manera que la conductividad térmica ayuda a reducir la carga térmica por conducción, la longitud y el diámetro de los cables también contribuye a tal fin en tanto que a mayor longitud, mayor gradiente térmico y a menor diámetro menos conducción térmica, de forma análoga a la corriente eléctrica. Éste es uno de los motivos por el que los cables presentan longitudes altas y diámetros pequeños. Los alargamientos que presentan los cables no moldeables a mano en forma de distintos giros permiten de forma adicional cierta holgura en el montaje de la cadena.

A la hora de medir los cables, éstos presentan pequeñas desadaptaciones internas, lo cual deriva en un rizado en la medida que no se corresponde con los valores reales. Para evitar el arrastre de dicho error, se ha ajustado el  $S_{21}$  con un polinomio de tercer orden. En el siguiente apartado de ésta sección se muestran todos los cables empleados, su fotografía y su  $S_{21}$ .

El tramo de entrada que se ha propuesto y caracterizado consiste en un DC Block en serie con los cables C702-113-103P (2) y C702-113-101P. Del mismo modo, el tramo de salida consiste (Desde el puerto de salida hacia dentro) en un DC Block, y los cables C702-113-103P (1) y C702-113-102P. Dicho montaje se observa en la figura 9.

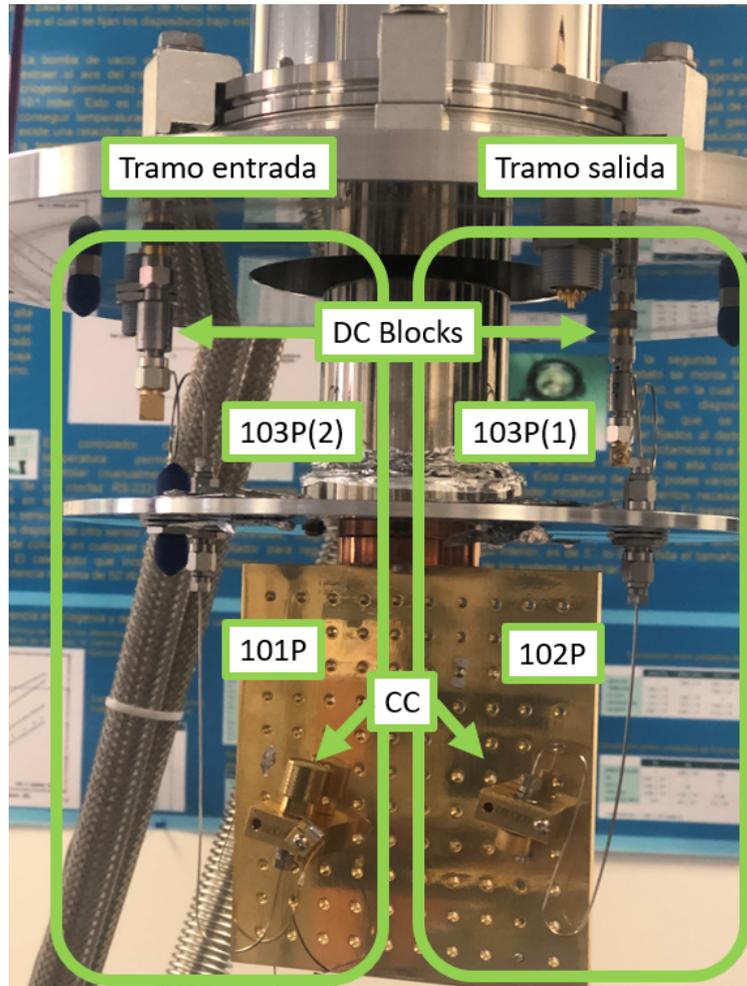


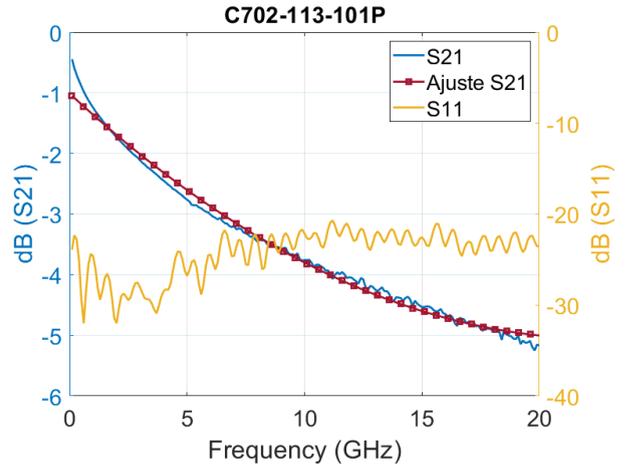
Figura 9: Montaje de entrada y salida del criostato

#### 4.2. Medidas a temperatura ambiente

A continuación se mostrará la caracterización realizada de los cables, la medida de sus parámetros de Scattering, así como una fotografía de los mismos, entre las figuras 10 y 21. Todos los cables presentan una adaptación mejor que 20 dB hasta 5 GHz que es la banda de trabajo y la mayoría de ellos lo consiguen hasta los 20 GHz. En transmisión, presentan bajas pérdidas aunque la cuantía de este parámetro no es tan importante, ya que se mide para posteriormente ser descontado.



(a) Fotografía

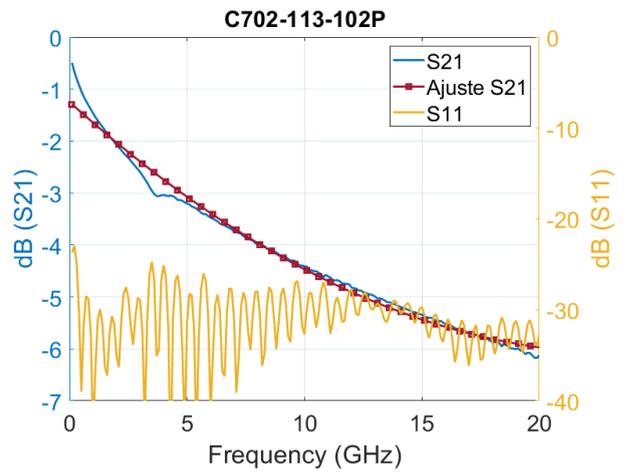


(b) Gráfica del S21

Figura 10: Cable C702-113-101P

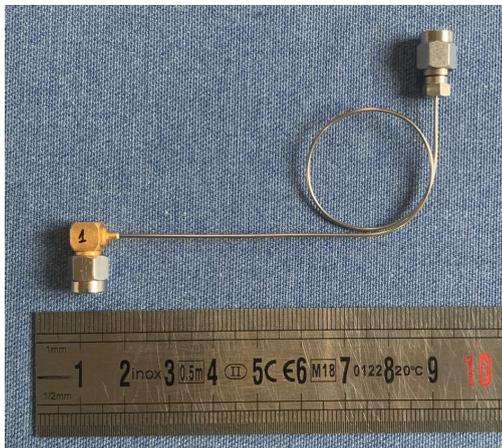


(a) Fotografía

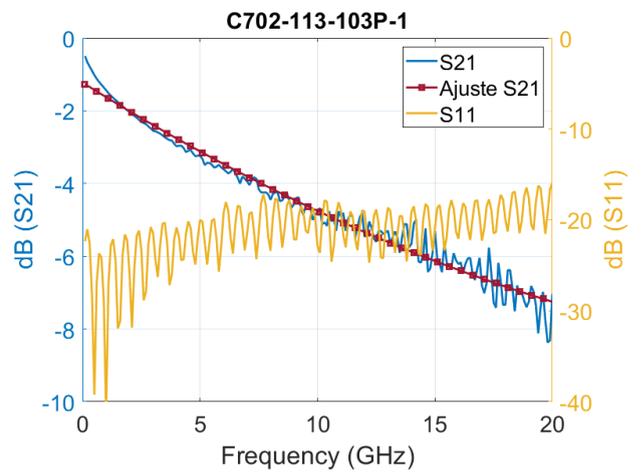


(b) Gráfica del S21

Figura 11: Cable C702-113-102P



(a) Fotografía

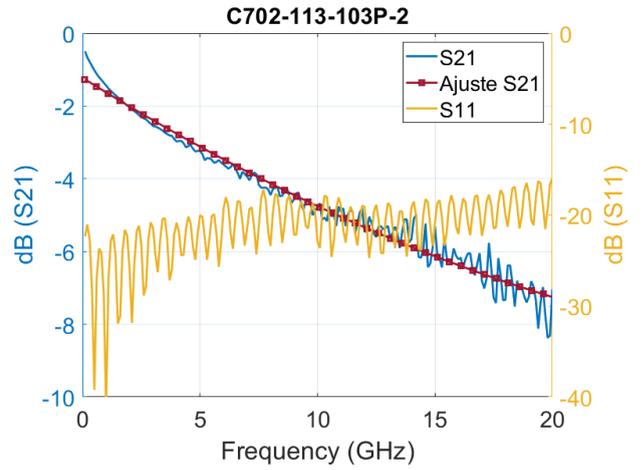


(b) Gráfica del S21

Figura 12: Cable C702-113-103P (1)



(a) Fotografía

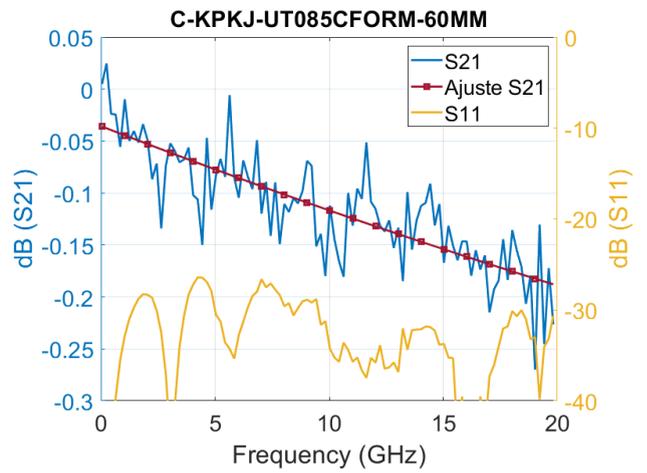


(b) Gráfica del S21

Figura 13: Cable C702-113-103P (2)



(a) Fotografía

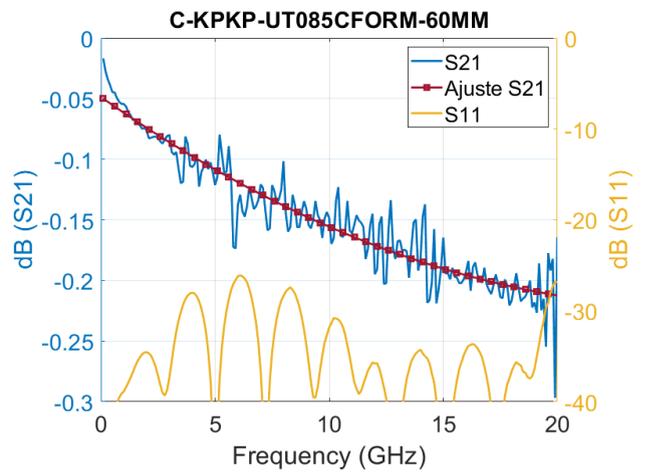


(b) Gráfica del S21

Figura 14: Cable C-KPKJ-UT085CFORM 60MM



(a) Fotografía

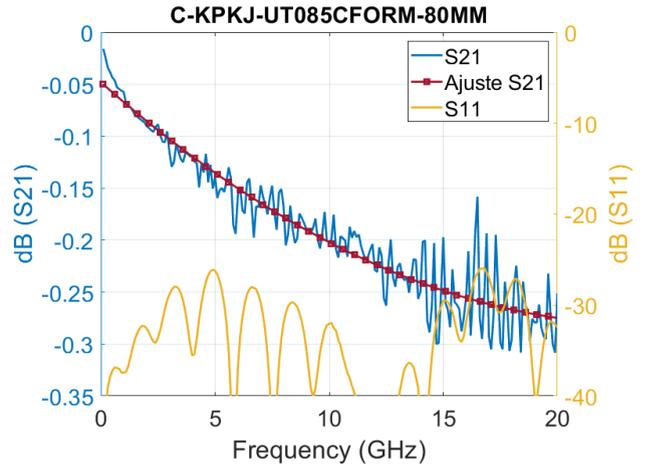


(b) Gráfica del S21

Figura 15: Cable C-KPKP-UT085CFORM 60MM



(a) Fotografía

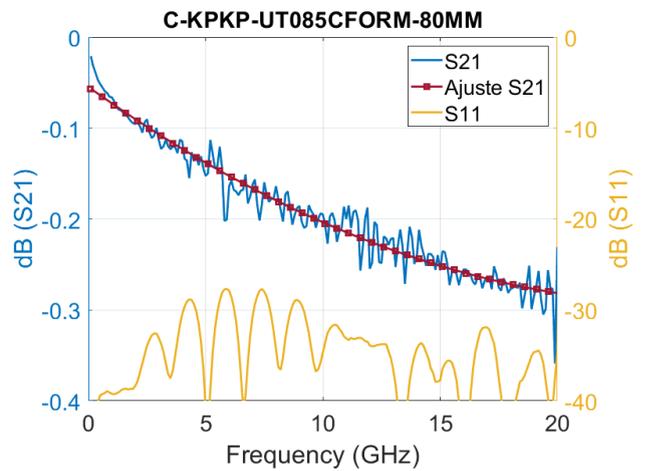


(b) Gráfica del S21

Figura 16: Cable C-KPKJ-UT085CFORM 80MM



(a) Fotografía

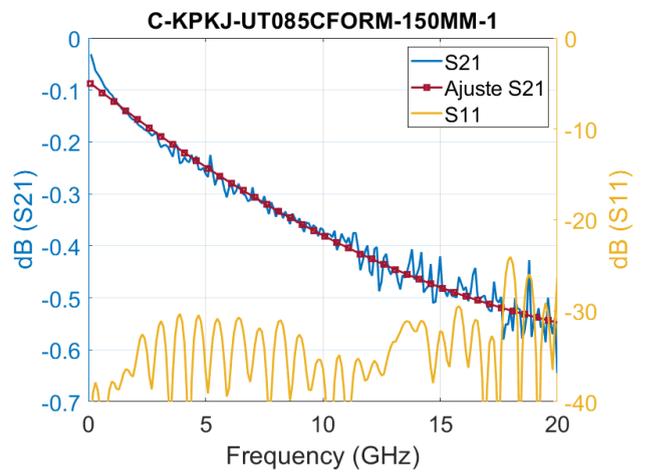


(b) Gráfica del S21

Figura 17: Cable C-KPKP-UT085CFORM 80MM

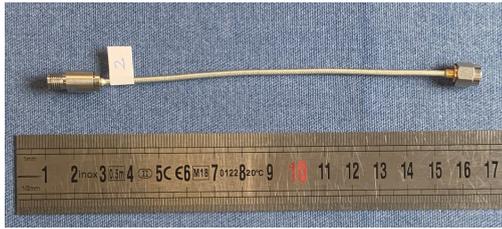


(a) Fotografía

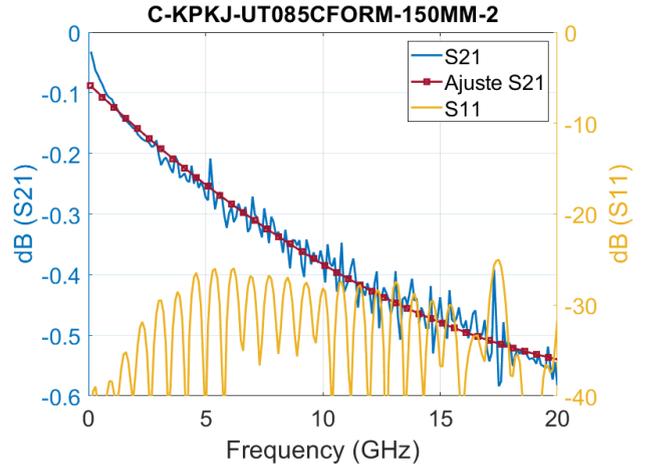


(b) Gráfica del S21

Figura 18: Cable C-KPKJ-UT085CFORM 150MM (1)

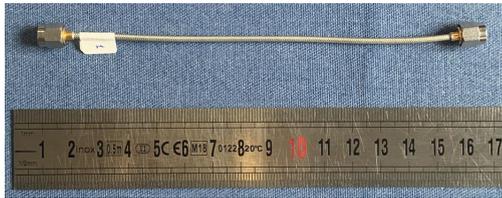


(a) Fotografía

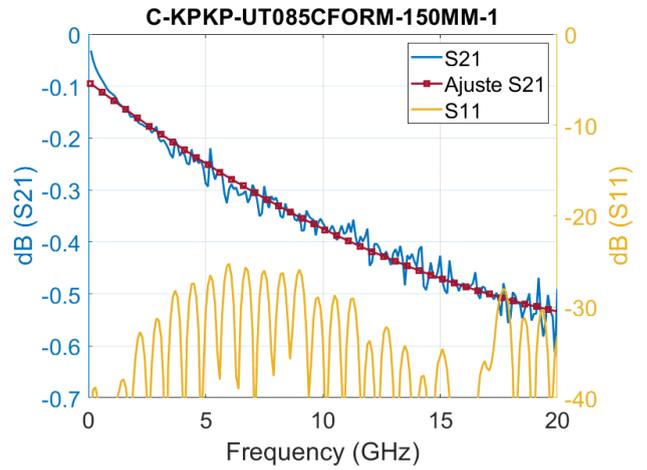


(b) Gráfica del S21

Figura 19: Cable C-KPKJ-UT085CFORM 150MM (2)

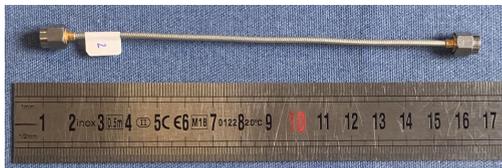


(a) Fotografía

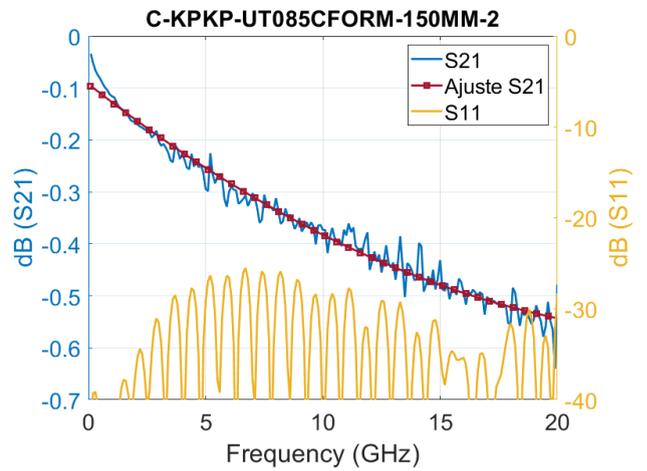


(b) Gráfica del S21

Figura 20: Cable C-KPKP-UT085CFORM 150MM (1)



(a) Fotografía



(b) Gráfica del S21

Figura 21: Cable C-KPKP-UT085CFORM 150MM (2)

Tal y como se puede observar en todas las gráficas, los cables de CuNi tienen niveles de pérdidas muy superiores a los de cobre, dado que su conductividad y diámetro son inferiores. La adaptación de todos los cables es buena, por debajo de -20 dB. El único caso en que esta adaptación es algo peor, es en los cables con giramientos, debiéndose a las terminaciones a coaxial acodadas, que en general suelen empeorar la adaptación.

### 4.3. Medidas a temperatura criogénica

La caracterización de las líneas de entrada y salida de la figura 9 de forma independiente no es medible directamente empleando el analizador de redes, pues solo tenemos acceso a uno de los puertos y el parámetro  $S_{21}$  hay que medirlo de manera indirecta. Para medir las pérdidas de un tramo consistente en una línea de transmisión y una carga como en la figura 22 a partir de su  $S_{11}$ , partimos de la ecuación 15, donde  $\Gamma_L$  representa el coeficiente de reflexión en la carga, y  $\Gamma_{in}$  en la entrada del tramo.

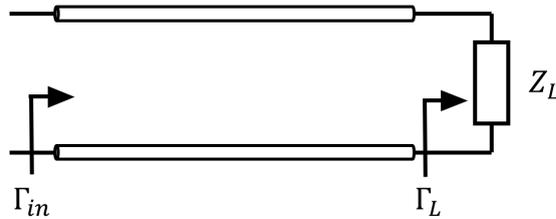


Figura 22: Línea de transmisión con una carga

$$\Gamma_{in} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L} \quad (15)$$

Si se asume que la adaptación es muy buena ( $S_{11}, S_{22} \ll S_{21}$ ), que el cortocircuito es ideal ( $\Gamma_L = -1$ ) y que los cables son recíprocos ( $S_{21} = S_{12}$ ), la expresión anterior se transforma en la ecuación 16, con la que podemos obtener las pérdidas a través del coeficiente de reflexión.

$$\Gamma_{in} = -S_{21}^2 \quad (16)$$

Para poder caracterizar los tramos de entrada y salida se coloca un cortocircuito como terminación a éstos. De esta forma se mide el  $S_{11}$  y a partir de ahí se pueden obtener las pérdidas del tramo tal y como se describe en el párrafo anterior. Las gráficas de pérdidas de inserción calculadas se muestran en las figuras 23 y 24, para el tramo de entrada y salida, respectivamente. Para evitar el error en la calibración por el rizado de los cables, se adaptan las curvas con un polinomio de orden 4.

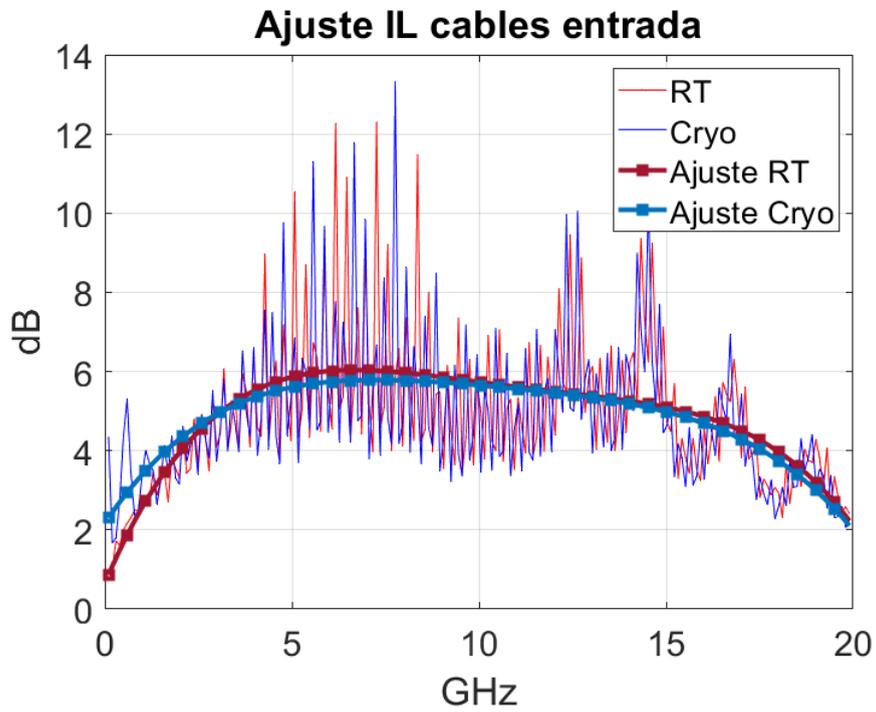


Figura 23: Nivel de IL de entrada y ajuste

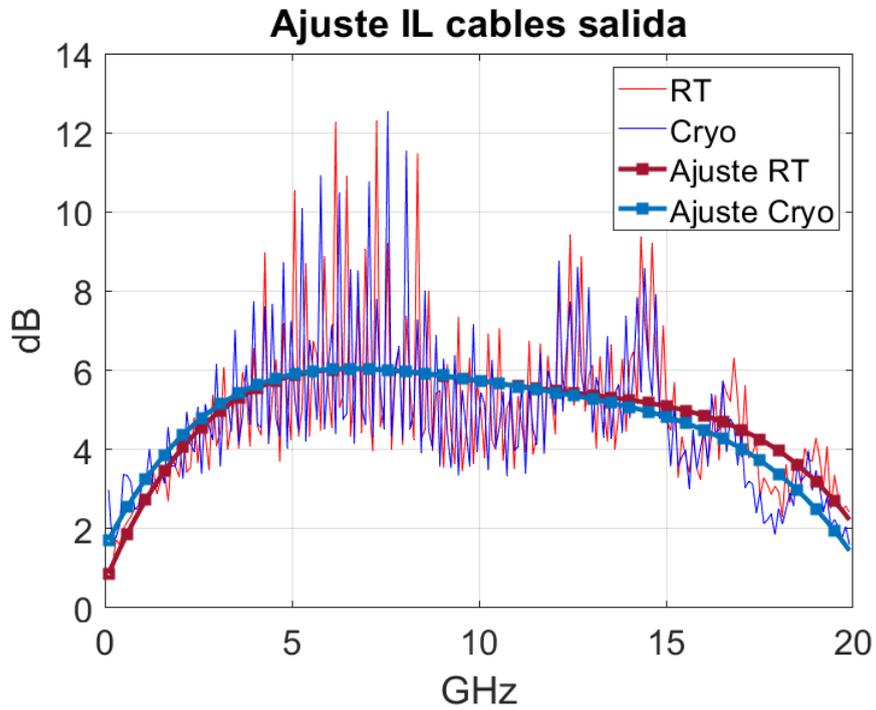


Figura 24: Nivel de IL de salida y ajuste

## 5. Otros elementos: LNA, DC Blocks y atenuadores

### 5.1. LNA

Dentro del funcionamiento del sistema de KIDs es preciso contar con un LNA a la salida de éstos para amplificar la señal saliente, cuyo nivel de potencia es muy bajo. En esta etapa del proceso es preciso que la contribución de ruido sea mínima, tal y como se explica en la sección 1.2, de ahí que se emplee un amplificador de bajo ruido operando a temperaturas criogénicas para optimizar tanto su ganancia como su contribución de ruido. El modelo propuesto para su caracterización y uso es el LNA YSG 2002 donado al departamento por el Observatorio de Yebes, ubicado en Guadalajara, España. Este amplificador criogénico de bajo ruido tiene como zona de trabajo la banda entre 0.3 y 3.3 GHz. Se puede observar una imagen del mismo en la figura 25.



Figura 25: LNA YSG2002

Debido a problemas técnicos en el laboratorio, por los que ha sido imposible utilizar el nuevo criostato, las medidas del LNA se han realizado en el criostato antiguo del departamento.

Para realizar las medidas se han empleado dos fuentes de ruido de Agilent, modelos N4000 de 6 dB de ENR para ambiente y modelo 346K01 con una ENR de unos 15 dB para criogenia, además del NFA (Noise Figure Analyzer) del laboratorio, modelo N8975A de Agilent. La calibración se realiza de forma automática conectando la fuente de ruido al analizador, tal y como se observa en la figura 26.

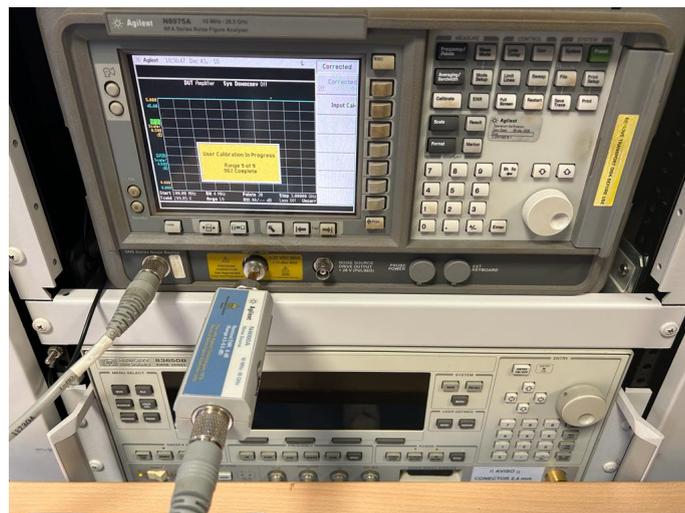


Figura 26: Proceso de calibración del NFA

### 5.1.1. Medidas a temperatura ambiente

El montaje para la caracterización a temperatura ambiente se muestra en la figura 27. En este proceso de calibración el cable morado no se ha descontado, por lo que es necesario medir sus pérdidas y ruido, y descontarlos del resultado final. Para la caracterización en ambiente, se polariza el LNA con 1,96 V y 14,4 mA. El cable se mide con el mismo analizador de redes que se ha empleado para caracterizar todos los cables anteriores y sus pérdidas y ruido se han descontado de los resultados del NFA.

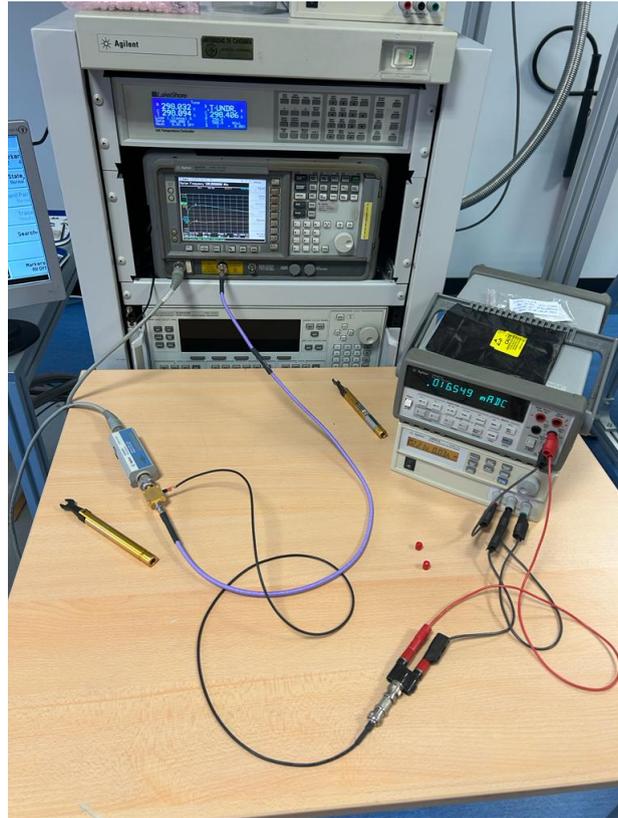


Figura 27: Montaje para caracterización en ambiente del LNA

El NFA se puede controlar en remoto desde uno de los ordenadores del departamento. A través del PC, se pueden configurar las opciones de medición y también se extrae un archivo ".xls" (Hoja de cálculo de Microsoft Excel) con los resultados de la medida del NFA. Dicho archivo de datos muestra tanto la ganancia como la figura de ruido (Del LNA junto con el cable). El mencionado fichero del NFA se procesa en MATLAB junto con los ficheros del cable obtenidos del analizador de redes, obteniendo los valores de ganancia y figura de ruido únicamente del LNA. Para los valores de ganancia, simplemente se descuentan las pérdidas del cable. Para calcular la figura de ruido es necesario aplicar la fórmula de Friis y descontar el ruido del cable, según la expresión 17. En este caso, al ser el cable una línea de transmisión de bajas pérdidas, su figura de ruido se considera igual a sus pérdidas. Finalmente, en la figura 28 se muestra la ganancia junto con la temperatura equivalente de ruido del LNA, a temperatura ambiente.

$$F_{Total} = F_{LNA} + \frac{F_{cable} - 1}{G_{LNA}} \quad (17)$$

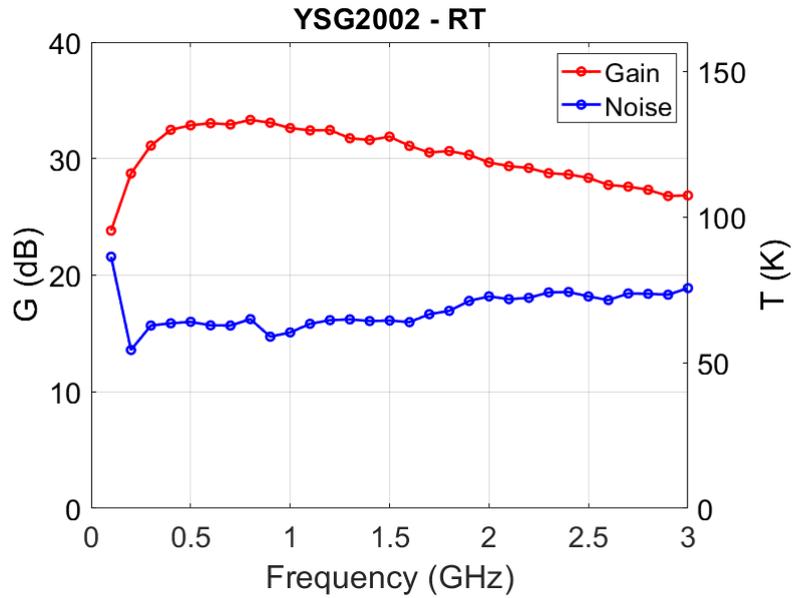


Figura 28: Ganancia y temperatura de ruido del LNA a temperatura ambiente

Adicionalmente, se realiza una caracterización en parámetros S del LNA, empleando el analizador de redes que hemos utilizado para todas las medidas anteriores. Los resultados de dicha medida se muestran en la figura 29.

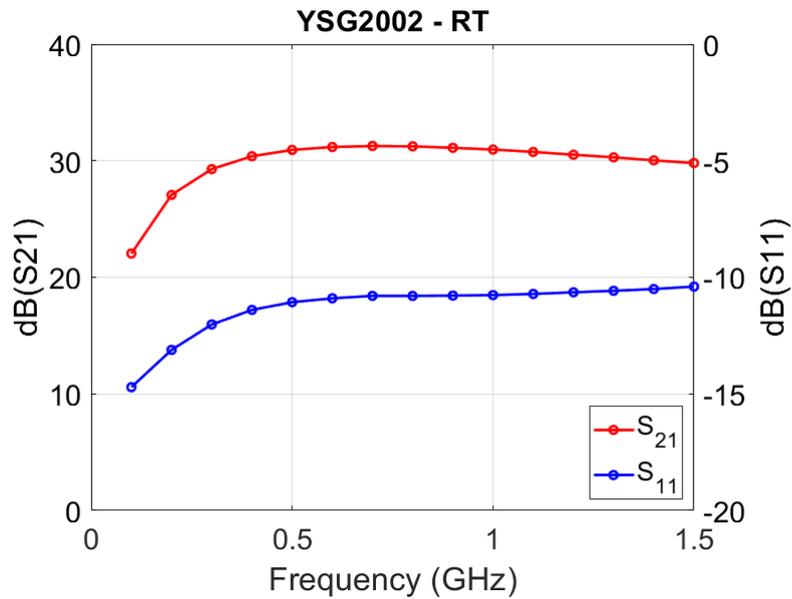


Figura 29: Caracterización en parámetros S del LNA, a temperatura ambiente

### 5.1.2. Medidas a temperatura criogénica

Como se ha mencionado anteriormente, el criostato empleado para caracterizar el amplificador ha sido el modelo antiguo. El montaje de medida en el interior del criostato se muestra en la figura 30 y, dado que es el criostato antiguo, todos los elementos de dicho montaje están caracterizados y sus efectos son descontados, al contar el programa con los ficheros de pérdidas y ruido, obteniendo tras la calibración el valor de ganancia y figura de ruido directamente del LNA. En este caso, la polarización del LNA es de 1.86 V y 10.46 mA.

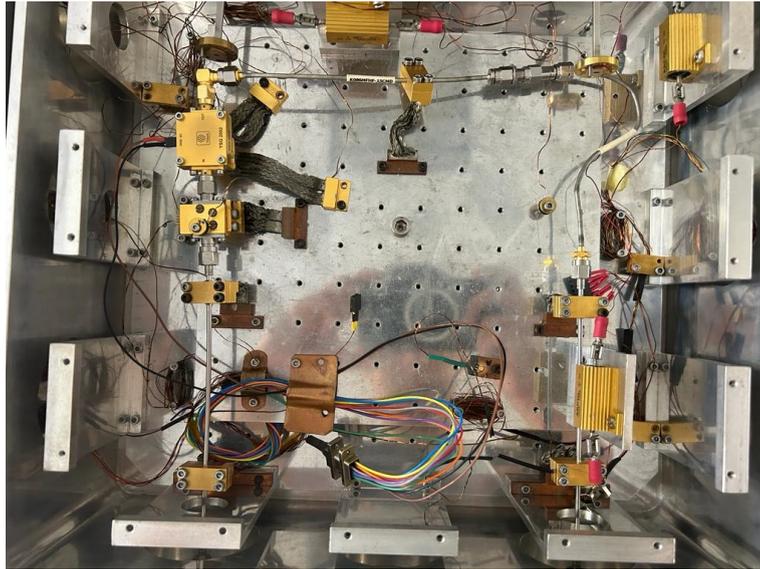


Figura 30: Montaje para caracterizar el LNA en criogenia

La ganancia del LNA a temperaturas criogénicas junto con su temperatura equivalente de ruido se muestra en la figura 31.

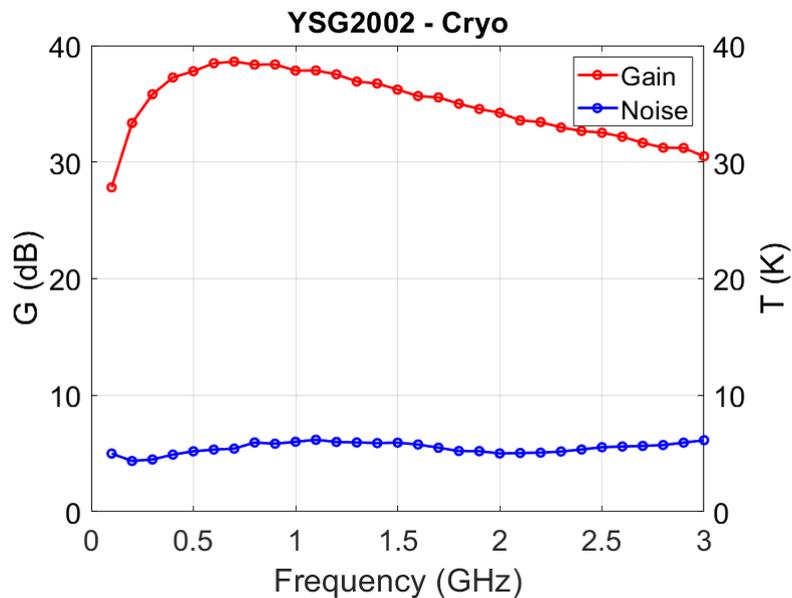


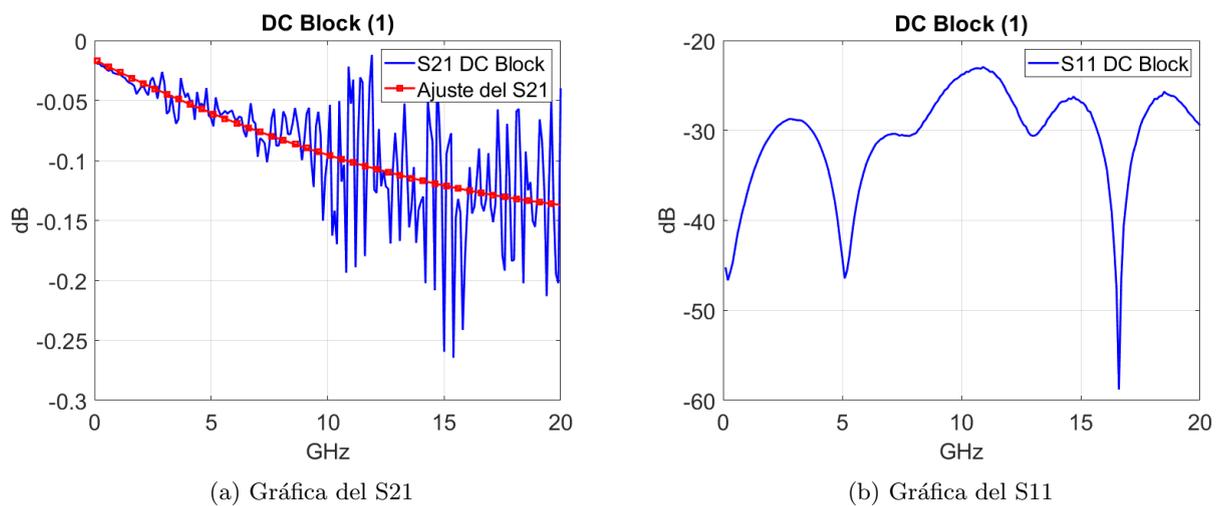
Figura 31: Ganancia del LNA a temperatura criogénica

## 5.2. DC Blocks

Los DC Blocks son unos componentes de RF cuya utilidad es generar un choque térmico. Esto ayuda a mantener las condiciones de temperatura deseadas dentro del criostato. Se dispone de 3 DC Blocks del mismo modelo del fabricante Atlantic Microwave. Su apariencia se muestra en la figura 32 y su caracterización en parámetros S en la figura 33.



Figura 32: Fotografía del DC Block



(a) Gráfica del S21

(b) Gráfica del S11

Figura 33: Caracterización del DC Block

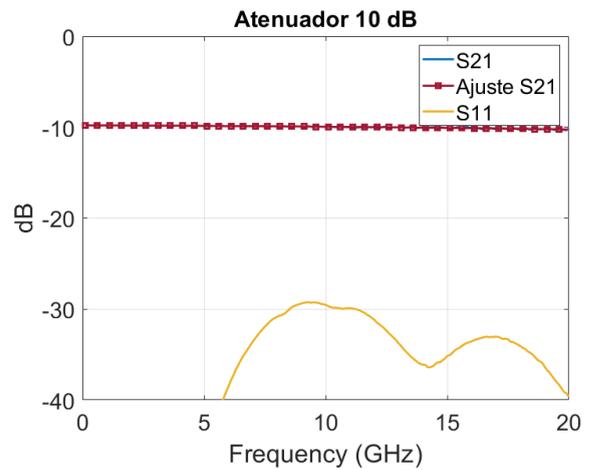
### 5.3. Atenuadores comerciales

Los atenuadores son elementos necesarios en el sistema de caracterización de KIDs debido al nivel de potencia necesario en cada punto del montaje para disminuir el nivel de potencia a la entrada de los detectores. Los analizadores de redes empleados necesitan un nivel mínimo de potencia para operar adecuadamente (Esto es, realizar la calibración de y medir de forma precisa); sin embargo, este nivel de potencia mínimo del analizador es excesivo a la entrada de un KID, ya que son detectores muy sensibles. Para solucionar esto, se utilizan atenuadores en una ubicación previa al KID que reducen significativamente el nivel de potencia. El nivel de atenuación necesario se calcula a partir del nivel deseado a la entrada del detector y de las pérdidas de los cables coaxiales utilizados. A la salida de detector es necesario añadir un LNA para adecuar el nivel de potencia de salida según el rango dinámico del analizador de señal. Otro beneficio, aunque secundario, de los atenuadores es que son útiles para mejorar la adaptación del sistema, reduciendo reflexiones internas que induzcan a error en la medida. Adicionalmente, reducen el ruido térmico de entrada al DUT, contribuyendo a una medición más precisa.

Se dispone de 3 modelos de Atlantic Microwave, que ofrecen 10, 20 y 30 dB de atenuación respectivamente. Sus fotografías y parámetros se muestran a continuación en las figuras 34, 35 y 36.



(a) Fotografía

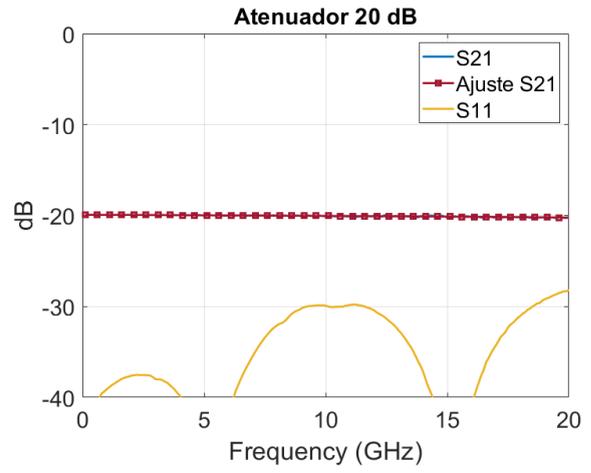


(b) Gráfica del S21 y S11

Figura 34: Atenuador 10 dB



(a) Fotografía

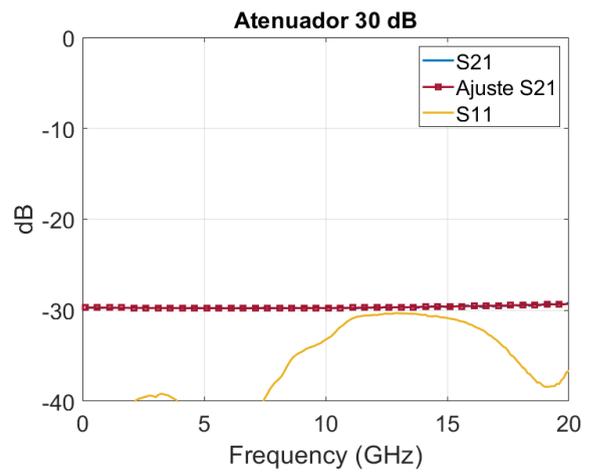


(b) Gráfica del S21 y S11

Figura 35: Atenuador 20 dB



(a) Fotografía



(b) Gráfica del S21 y S11

Figura 36: Atenuador 30 dB

## 6. Diseño de un atenuador para medidas en criogenia

En esta sección se detallará el proceso de diseño de un atenuador para realizar medidas en criogenia tal y como se explica en la sección 2.2, aplicando el método del atenuador frío. El objetivo es tener un atenuador de un nivel de atenuación de 20 dB en el mayor ancho de banda posible, aunque se optimizará su funcionamiento en la banda de frecuencia entre 0.1 GHz y 3 GHz. El atenuador se diseñará en tecnología microstrip. Para poder conocer con precisión la temperatura física a la que está, se alojará un sensor de temperatura, basado en silicio, que se conectará a un controlador de temperatura de la marca LakeShore (modelo LakeShore-340).

A la hora de elegir una topología, se contemplaron dos posibles opciones: con distribución en “T” y en “Doble T”. Ambos tipos son válidos aunque se ha optado por el modelo en “Doble T” debido a que ofrece un ancho de banda ligeramente mayor y permite una mayor flexibilidad en el diseño. El esquema de este modelo se muestra en la figura 37 y los valores de  $R_1$  y  $R_2$  se escogen en función de los parámetros buscados, según la ecuación 18 [8].

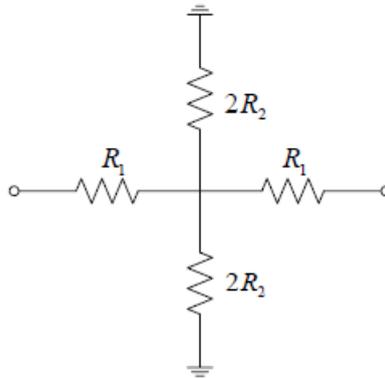


Figura 37: Esquema del atenuador en “doble T”

$$\begin{aligned} R_1 &= Z_0 \frac{1 - S_{21}}{1 + S_{21}} \\ R_2 &= 2Z_0 \frac{S_{21}}{1 - S_{21}^2} \end{aligned} \quad (18)$$

Se han realizado dos diseños en paralelo: 20 dB en dos etapas y en tres de aproximadamente 6.6 dB. La multietapa en un atenuador ayuda a mejorar el ancho de banda del mismo, permite mayor precisión y flexibilidad en el diseño y mejora la estabilidad de la señal al no afectar tanto una posible malformación de una de las etapas. Los circuitos de los dos modelos se observan en la figura 38.

El diseño se ha realizado sobre sustrato de Alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), con un grosor de 10 mil (0,254 mm), permitividad 9.9 y tangente de pérdidas de 0.0001. El conductor es oro con una conductividad de  $\sigma = 4,1 \cdot 10^7 \text{ S/m}$ . Las resistencias se han implementado mediante tramos de capa resistiva cuya resistencia viene dada por la ecuación 19, donde  $R$  es la resistencia deseada,  $L$  la longitud del tramo y  $W$  su anchura, la resistencia por cuadro,  $R_s$ , es de  $50 \Omega/\text{sq}$  y define la resistencia por unidad de superficie del tramo resistivo.

$$R = R_s \frac{L}{W} \quad (19)$$

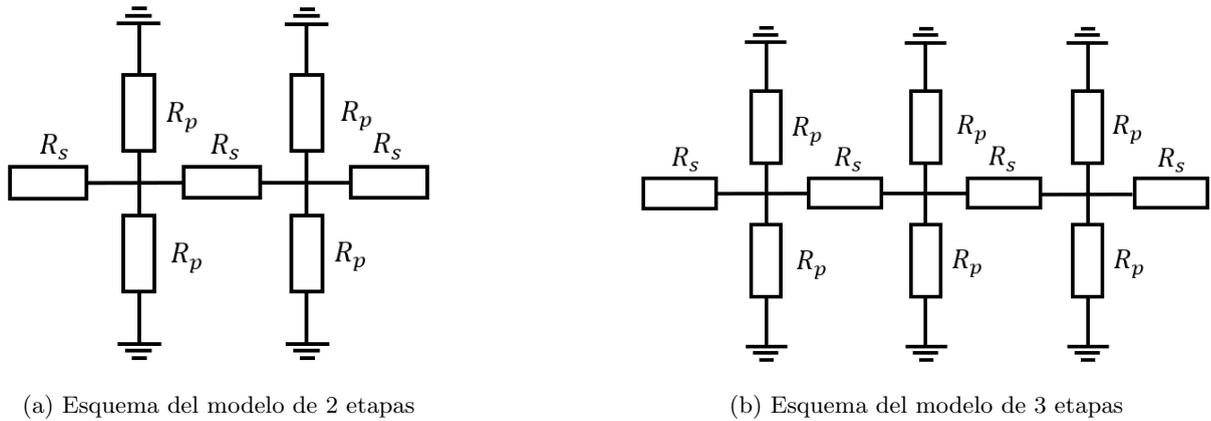


Figura 38: Modelos de atenuadores

A estas frecuencias, en este sustrato, la anchura de línea correspondiente a  $50 \Omega$  es de, aproximadamente,  $0,243 \text{ mm}$ . Partiendo de dicha anchura de línea, se escoge el valor de  $L$  que da la resistencia deseada. En el cuadro 1 se puede observar el valor de longitud de cada resistencia en cada diseño..

Modelo	$L_s$	$L_p$	$R_s$	$R_p$
2 Etapas	$0,16 \text{ mm}$	$0,32 \text{ mm}$	$33 \Omega$	$66 \Omega$
3 Etapas	$0,13 \text{ mm}$	$0,54 \text{ mm}$	$27 \Omega$	$111 \Omega$

Cuadro 1: Valores de las resistencias

Se ha utilizado el software ADS para el diseño de ambos atenuadores. En primer lugar, se ha realizado su modelo esquemático, del que se ha realizado la simulación en parámetros S de forma lineal entre 0,1 y 5 GHz, con un paso de 50 MHz y 101 puntos. Posteriormente, se ha procedido a la generación del *layout*, el cual se ha simulado electromagnéticamente, para la cual se ha configurado un sustrato idéntico al empleado en el esquemático: un plano de referencia de 0 mm de conductor perfecto, un dieléctrico de 10 mil de espesor ( $0,254 \text{ mm}$ ) de constante dieléctrica de  $\epsilon_r = 9,9$  y una tangente de pérdidas de 0,0001, la capa resistiva se configura con un valor de resistencia de  $50 \Omega/sq$ , el conductor tiene 3 mil de espesor y una conductividad de  $\sigma = 4,1 \cdot 10^7 \text{ S/m}$ . Adicionalmente se configura el paso a masa como un agujero del proceso *Delectric Via*, del mismo material que la capa de conductor. La representación en ADS del sustrato se observa en la figura 39. La simulación se configura del tipo adaptativa entre 0.1 y 5 GHz con 200 puntos como máximo.



Figura 39: Substrato de simulación en ADS

La configuración del modelo de 3 etapas es la misma que la del de 2 etapas, realizándose de la misma forma todas las simulaciones.

El layout de ambos modelos se puede observar en la figura 40.

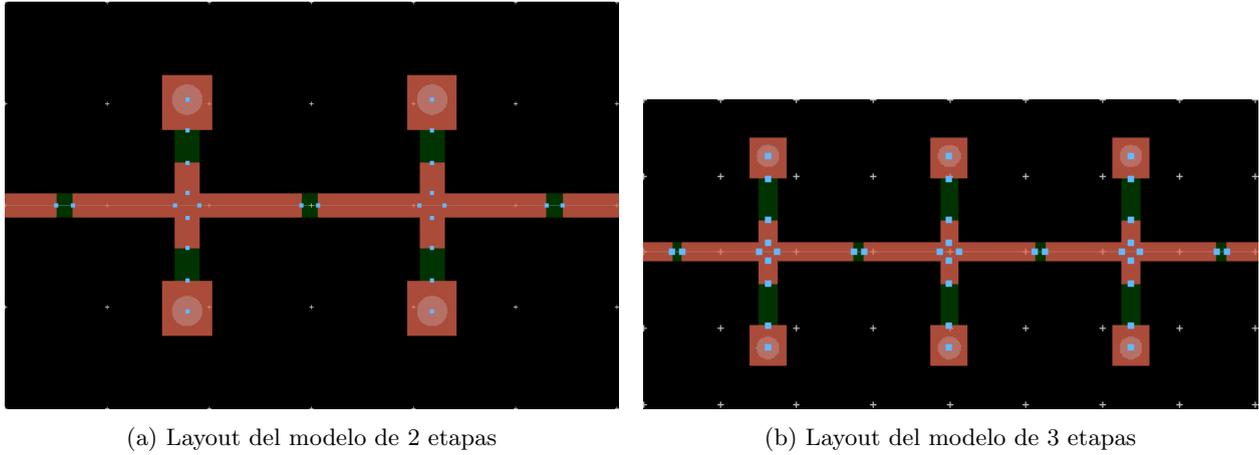


Figura 40: Layouts

Ambas simulaciones se observan en las figuras 41 y 42, las líneas continuas representan la simulación lineal y las líneas con puntos la electromagnética. Ambos modelos muestran un buen funcionamiento en el ancho de banda considerado, por lo que se ha procedido a la fabricación de ambos atenuadores y caracterización en el laboratorio para seleccionar una de las dos versiones.

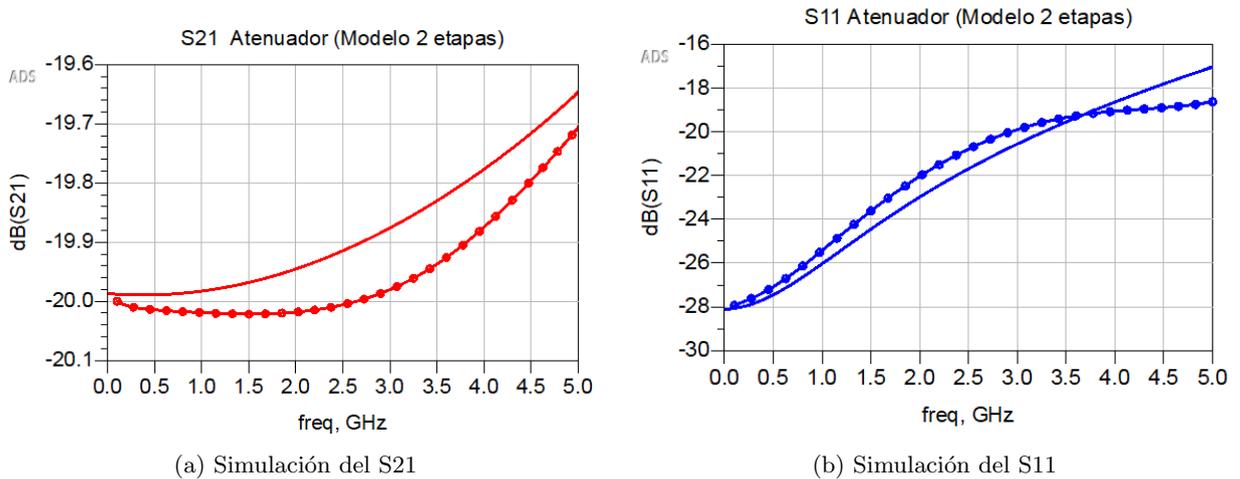


Figura 41: Simulación del modelo de 2 etapas

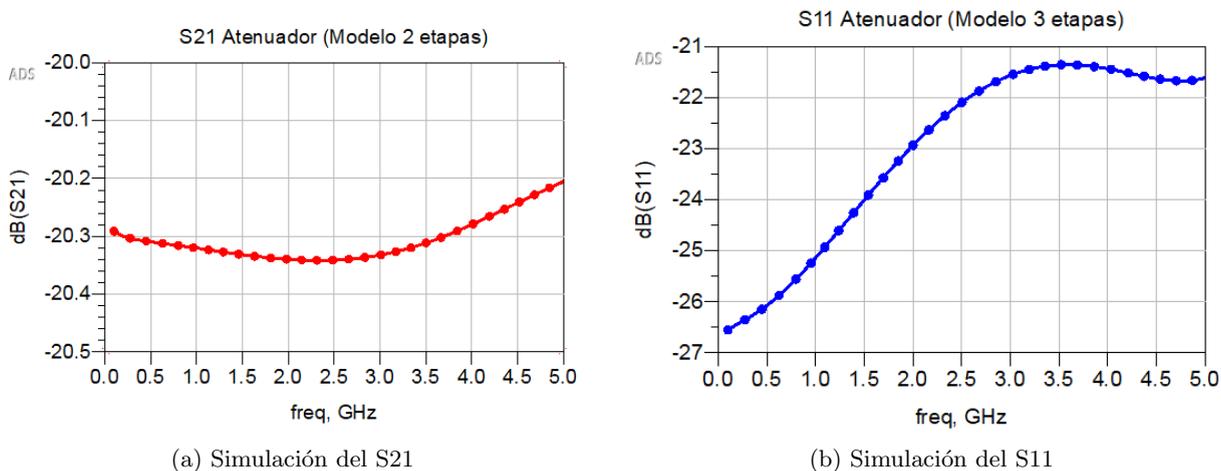


Figura 42: Simulación del modelo de 3 etapas

Una vez construidos los modelos y caracterizados, la versión elegida será alojada en una pequeña caja en la que se soldará un sensor de temperatura, para conocer con precisión la temperatura del atenuador (esto es debido a que según el método del *cold attenuator*, descrito en la sección 2.2, para conocer la temperatura de ruido del atenuador se debe conocer con precisión la temperatura física del mismo, y así poder corregir el valor de ENR de la fuente de ruido). Un ejemplo del montaje mencionado se puede observar en la figura 43.

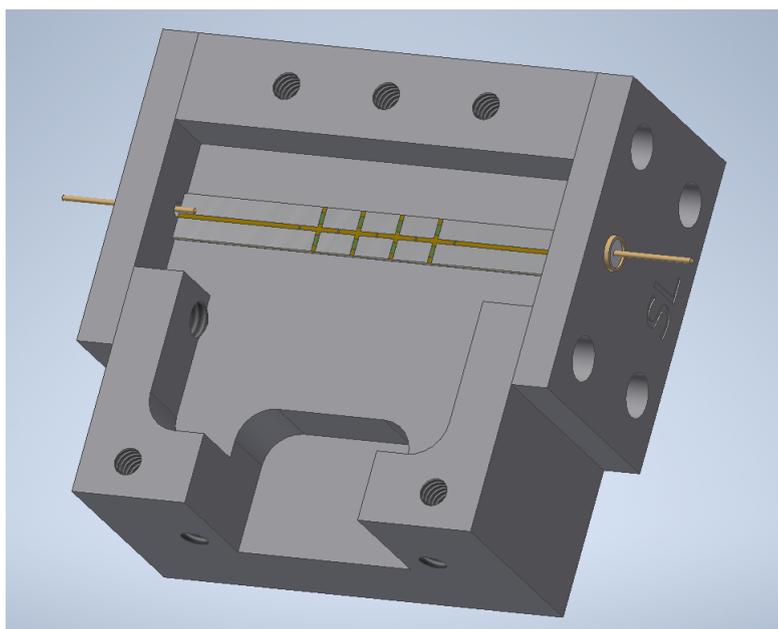


Figura 43: Ejemplo del alojamiento del atenuador

## 7. Caracterización del atenuador

Una vez fabricados ambos modelos, se observan las medidas de los tramos fabricados con el microscopio del laboratorio. El software del mismo permite de forma sencilla medir distancias dentro de la imagen. Las imágenes de ambos modelos con las medidas de los tramos se muestran en las figuras 44 y 45.

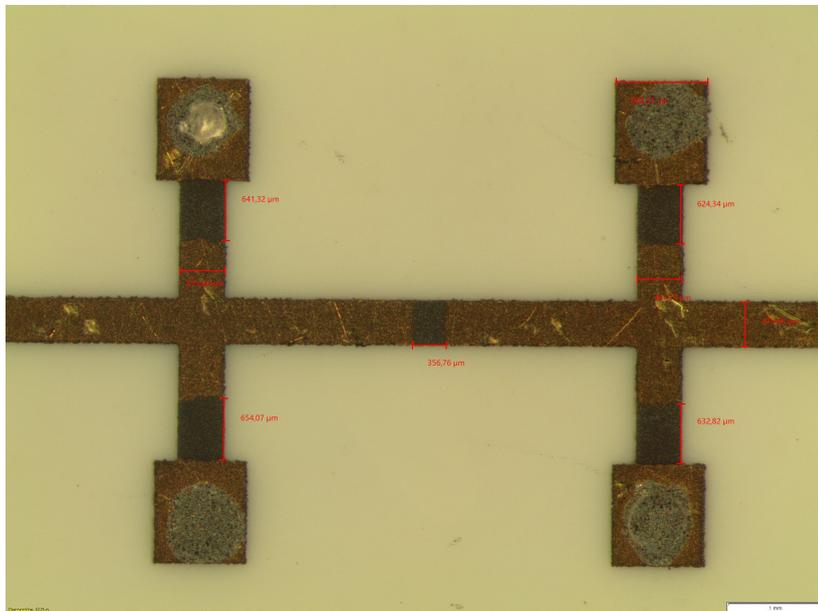


Figura 44: Medidas del modelo de 2 etapas

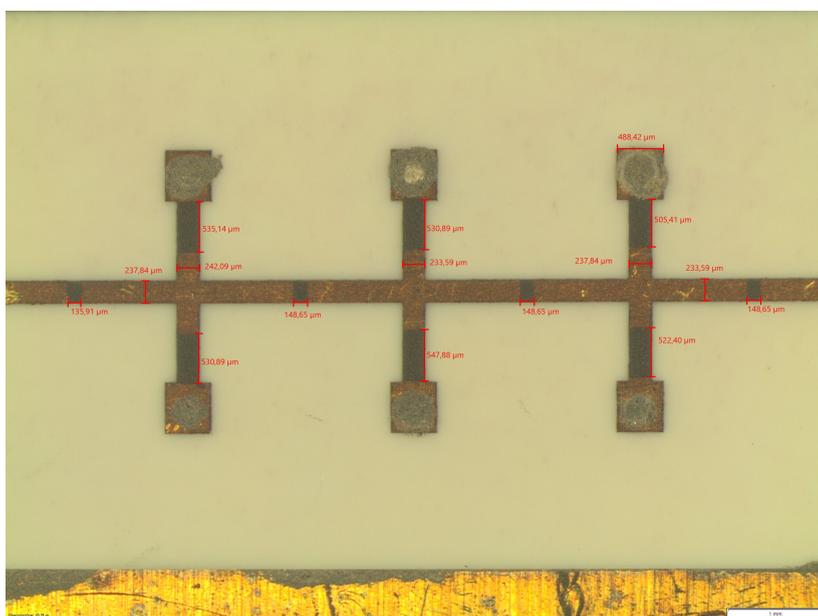


Figura 45: Medidas del modelo de 3 etapas

Tras comprobar que las medidas son, con sus tolerancias, cercanas a los valores establecidos, se ha procedido a montar transiciones JMicro en ambos modelos. Las transiciones JMicro son unas transiciones de microstrip a coplanar (o CPW, del inglés *Coplanar Waveguide*), que permiten una rápida caracterización del prototipo en una estación de sondas coplanares. Para conectar las transiciones se emplean 4 hilos de oro, de  $25\ \mu\text{m}$  de diámetro, que conectan el conductor central del tramo coplanar coplanar con la tira microstrip del atenuador, este tipo de conexión genera un efecto inductivo que se reduce al incrementar el número de hilos y reducir su diámetro. Todo el montaje mencionado se puede observar en la figura 46, donde se observa el prototipo del modelo del atenuador de 2 etapas al que se le han montado las transiciones.

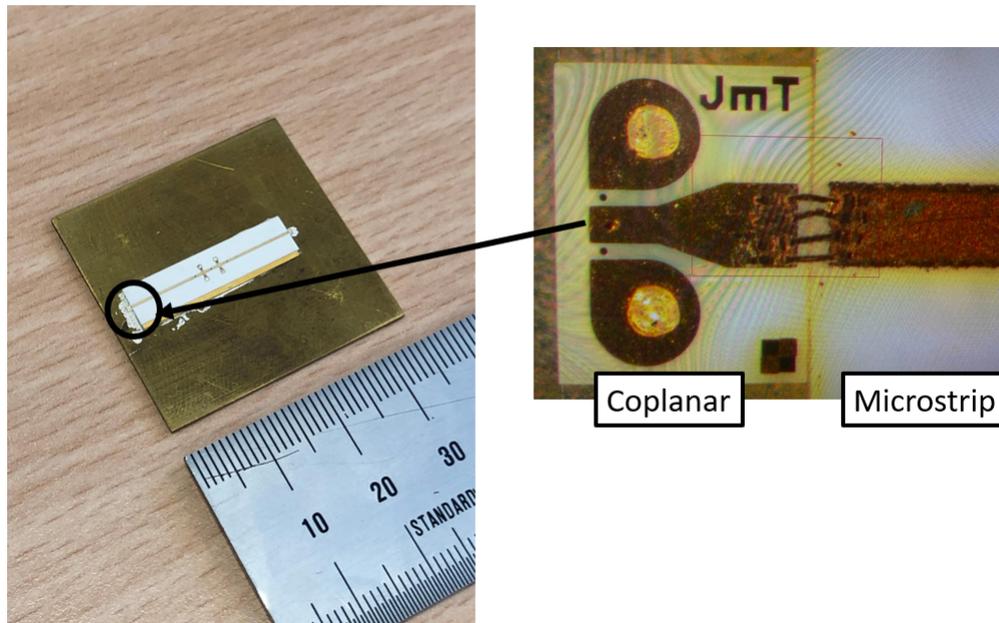


Figura 46: Transiciones JMicro de los atenuadores

Una vez en la estación de sondas, para calibrar con las mencionadas transiciones se ha empleado el kit de calibración CM10LX de JMicro Technologies, realizando una calibración TRL (*Through, reflect y line*), este tipo de calibración es típica de estos conectores y una forma alternativa a la calibración SOLT convencional.

Tras realizar la caracterización de los atenuadores, llegamos a los resultados visibles en las figuras 47 y 48.

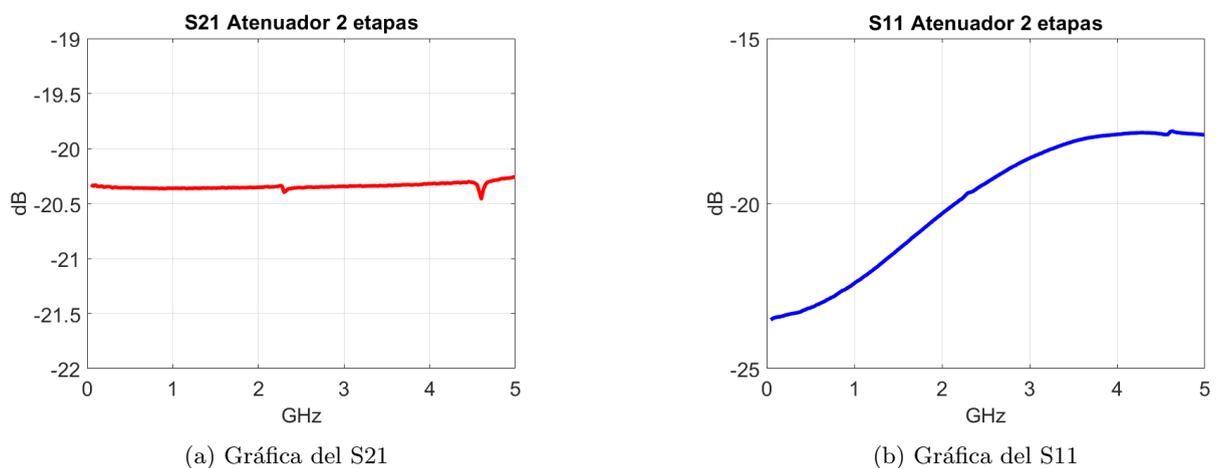
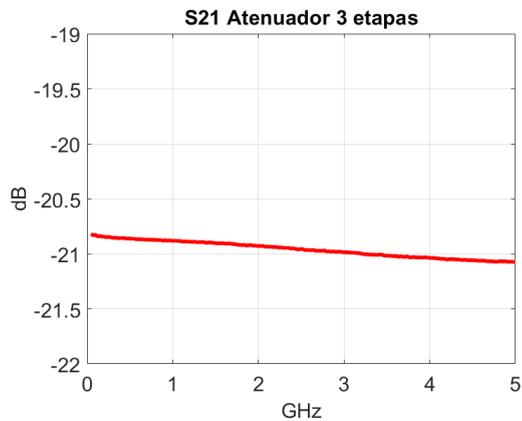
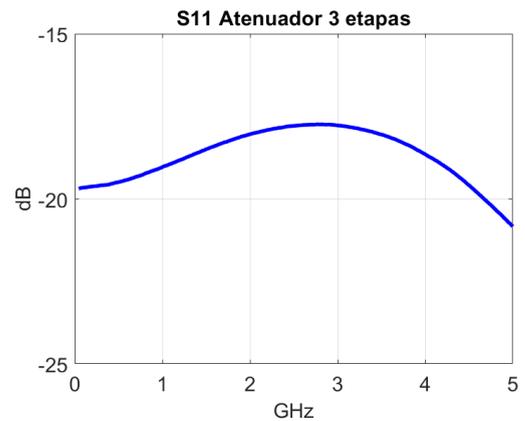


Figura 47: Caracterización del atenuador de 2 etapas en la estación de sondas coplanares



(a) Gráfica del S21



(b) Gráfica del S11

Figura 48: Caracterización del atenuador de 3 etapas en la estación de sondas coplanares

Una vez evaluadas las medidas de ambos modelos, finalmente el modelo de 2 etapas es escogido por su mejor adaptación entre 0 y 3 GHz. Se procede a su montaje en la caja ó chasis con transiciones a coaxial. Adicionalmente, en la caja se coloca un sensor de temperatura, modelo DT-670A-SD de LakeShore, con el objetivo de conocer con precisión la temperatura a la que se encuentra el atenuador cuando se enfríe. Los conectores coaxiales herméticos son de Southwest Microwave y el conductor central va conectado a la línea microstrip del atenuador a través de una pieza especial (*sliding contact*) que permite una cierta flexibilidad necesaria en las contracciones y dilataciones que se producen en los procesos de enfriamiento y calentamiento. Todo este montaje se muestra en la figura 49. En la figura 50 se puede observar cómo se conecta el conductor central del conector coaxial con la línea microstrip, a través del *sliding contact*.

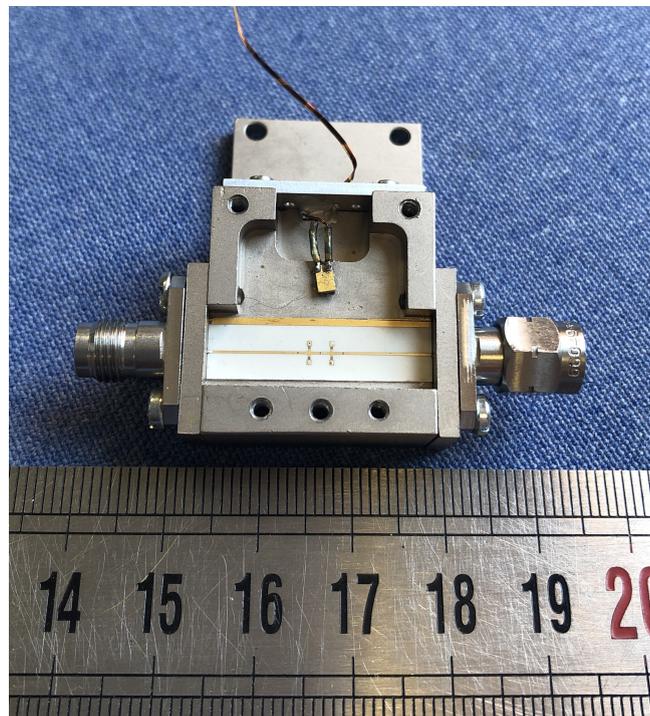
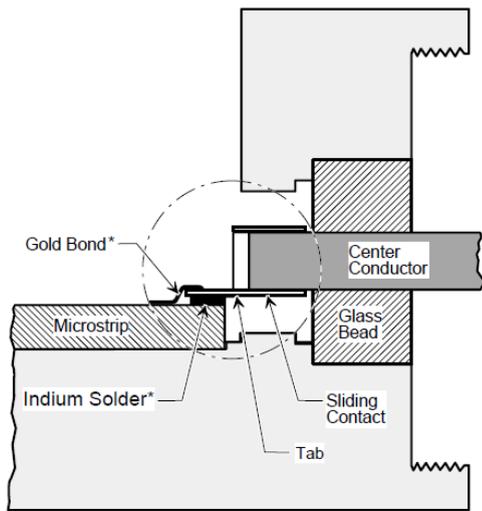


Figura 49: Montaje del atenuador



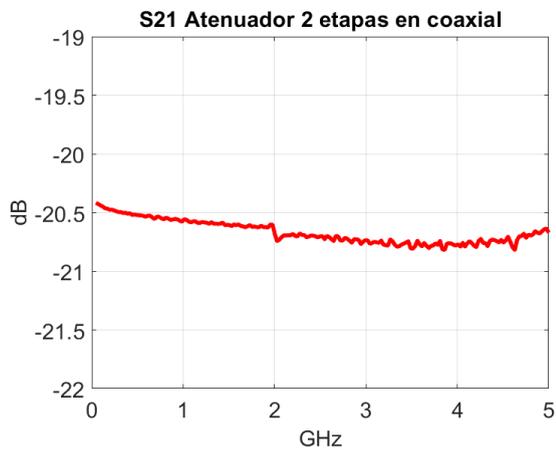
(a) Esquema del sliding contact



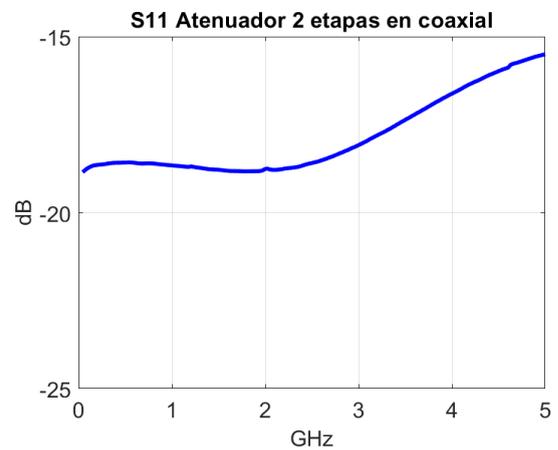
(b) Fotografía del sliding contact

Figura 50: Sliding contact

La caracterización a temperatura ambiente del atenuador montado en el chasis con conectores coaxiales se ha llevado a cabo en el analizador de redes y se muestra en la figura 51.



(a) Gráfica del S21



(b) Gráfica del S11

Figura 51: Caracterización del atenuador de 2 etapas montado con transiciones a coaxial

A la vista de los resultados, se ve que la adaptación del prototipo ya montado empeora respecto a la medida hecha con las transiciones temporales de JMicro, entendiéndose que se debe al efecto del conector coaxial y del sliding contact, aunque manteniéndose menor que -15 dB, lo cual es aceptable para su funcionamiento. La curva de las pérdidas muestra un rizado que anteriormente no tenía, debiéndose probablemente a pequeñas desadaptaciones en los conectores. Dicho rizado no es un problema pues se puede ajustar el valor del  $S_{21}$  de forma idéntica a como se hace con los cables.

## 8. Conclusiones

En este trabajo se ha caracterizado para su puesta en funcionamiento un sistema completo para medir el comportamiento de KIDs a temperaturas criogénicas, formado por varios elementos como cables coaxiales, atenuadores, DC Blocks y un LNA. Adicionalmente, se ha diseñado y fabricado un atenuador para realizar medidas con precisión de la temperatura de ruido de amplificadores de bajo ruido en criogenia.

Respecto a mi desarrollo personal y como estudiante durante el proyecto, y a la valoración de los objetivos una vez finalizado éste, he de mencionar los siguientes puntos:

En primer lugar, ha sido un trabajo con evolución, ya que, lo que inicialmente se ideó como un proyecto dedicado a los KIDs, ha terminado por poner en funcionamiento un sistema para caracterizar cualquier otro dispositivo de bajo ruido o que requiera temperaturas criogénicas para su funcionamiento. Con todo ello, se ha cumplido con creces el objetivo inicial del proyecto de poner en marcha un sistema de caracterización de KIDs.

Por otra parte, es un proyecto que ha tocado muchas áreas de conocimiento: Detectores de inductancia cinética, teoría de superconductores, LNAs, criogenia, ruido... entre las cuales tengo que destacar esta última. El ruido es un concepto muy importante para un ingeniero de telecomunicaciones y este trabajo ha permitido que profundice mis conocimientos sobre tal materia, no solo en la parte teórica sino en la práctica, aprendiendo a medirlo empleando una fuente de ruido y un medidor de ruido.

Otro punto a destacar en este trabajo han sido los inconvenientes que se han presentado durante su desarrollo; entre ellos, y el más grave, la detección de una fuga de helio que impidió usar el criostato nuevo durante gran parte del proyecto. Teniendo que llevar a cabo muchas de las medidas que se presentan en el proyecto en otro criostato disponible en el laboratorio, sobreponiéndonos al problema. De igual manera, a la hora de fabricar los atenuadores, han sido necesarios varios intentos para que funcionasen de manera adecuada. Todo esto ha hecho que me haya visto enfrentado a los impedimentos que pueden surgir durante el desarrollo de cualquier proyecto de ingeniería.

Finalmente, quiero poner en valor la cantidad de horas invertidas en el laboratorio, que me han dado la capacidad de ser más versátil a la hora de realizar montajes y medidas, y me han hecho ser más cuidadoso en todo el trabajo realizado.

Si bien todavía han quedado pequeñas tareas por desarrollar que no se han llevado a cabo por falta de tiempo, considero este proyecto un éxito tanto por los objetivos planteados al comienzo como por mi desarrollo personal y como estudiante durante el transcurso del trabajo.

## 9. Líneas de futuro

Los primeros pasos a pensar como líneas de futuro son las pequeñas tareas que no han podido ser desarrolladas por falta de tiempo. Entre ellas, se encuentran la caracterización del atenuador en criogenia y del sistema completo, compuesto por los cables, DC Blocks, atenuador y LNA tanto en ambiente como en criogenia.

Otro de los puntos sería la caracterización de un KID u otro dispositivo que requiera este tipo de sistemas para su funcionamiento.

## 10. Referencias y bibliografía

### Referencias

- [1] BERNARD F. BURKE, FRANCIS GRAHAM-SMITH, PETER N. WILKINSON, *An Introduction to Radio Astronomy*, 4<sup>a</sup> Edición, Cambridge, agosto de 2019.
- [2] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, <https://map.gsfc.nasa.gov/>.
- [3] BENJAMIN A. MAZIN, *Microwave Kinetic Inductance Detectors*, agosto de 2004.
- [4] MARKUS RÖSCH, *Development of lumped element kinetic inductance detectors for mm-wave astronomy at the IRAM 30 m telescope*, 2013.
- [5] AGILENT, *Fundamentals of RF and Microwave Noise Figure Measurements. Application Note 57-1*, marzo de 2004.
- [6] J. E. FERNANDEZ, *A Noise-Temperature Measurement System Using a Cryogenic Attenuator*, TMO Progress Report 42-135, noviembre de 1998.
- [7] HALL H.E., P. J. FORD, K. THOMPSON, *A helium-3 dilution refrigerator*, febrero de 1966.
- [8] JUAN LUIS CANO DE DIEGO, *Cryogenic Technology in the Microwave Engineering: Application to MIC and MMIC Very Low Noise Amplifier Design*, mayo de 2010.