

# ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA



TRABAJO FIN DE GRADO

## RADAR DE FM-ONDA CONTINUA PARA BLANCOS ACTIVOS

Titulación: Grado en Ingeniería en Tecnologías de la Telecomunicación

Mención: Sistemas de Telecomunicación

Autor: D. Miguel Rodríguez Concepción

Tutor 1: Dr. Blas Pablo Dorta Naranjo

Tutor 2: Dr. Víctor Alexis Araña Pulido

Fecha: Julio de 2024



## **Agradecimientos**

Parece que fue ayer cuando entré a mi primera clase en la universidad, con una mezcla de nervios, ganas e ilusión por empezar una nueva etapa de mi vida. Me fui a vivir a una isla nueva, con gente nueva, lejos de mi familia y amigos, y volviéndome una persona totalmente independiente.

La etapa en la universidad no solo ha hecho que crezcan mis conocimientos en distintos campos que antes de empezar en la carrera eran escasos o simplemente desconocía, sino que también me ha formado como persona es muchísimos aspectos humanos, que al final es con lo que nos quedamos.

Han sido largos días y noches de estudio y sufrimiento, donde te equivocabas, te caías y lo volvías a intentar hasta que por fin se lograba. Largas tardes en los laboratorios para poder terminar prácticas o informes de distintas asignaturas que uno no veía su fin, o infinitas tutorías con distintos profesores a las que iba pensando que nunca lo iba a entender y al final veías como todo era posible.

Darle las gracias a todas las personas que el destino hizo que aparecieran durante todo o parte del camino en todos estos años, a mis padres y amigos que desde la distancia me han apoyado para que siguiera adelante cuando yo ni siquiera me veía con fuerzas para hacerlo. Por todas esas personas que confiaron en mi cuando yo no lo hice, y a todas aquellas que me ayudaron a retomar mi vida después de pasar por uno de los momentos más difíciles en las que me planteé hasta abandonarlo y dejarlo todo atrás. Gracias a ustedes estoy aquí hoy, y aunque cueste creerlo, terminando la carrera que hace unos años soñaba con alcanzar.

Por último, agradecer a mis tutores Pablo y Víctor por toda la ayuda mostrada durante todos estos meses con este proyecto, y a todo el equipo de trabajo que hay detrás en los laboratorios, que me han brindado todos los recursos necesarios para que todo pudiera salir adelante, ya sean en su horario de trabajo o en sus horas libres.

Ha sido todo un privilegio haberme rodeado de toda esta gente en esta etapa final de la carrera, estoy muy agradecido de haber podido llevar a cabo este proyecto, y por haber profundizado y mejorado mis conocimientos en distintas áreas de las telecomunicaciones.

## **Resumen**

En el ámbito de la tecnología radar, los sistemas CW-FM han emergido como herramientas esenciales para la detección y seguimiento de blancos. Estos sistemas se caracterizan por su capacidad para proporcionar mediciones precisas de distancia y velocidad, ofreciendo ventajas significativas sobre otros tipos de radares debido a su alta resolución y menor susceptibilidad a interferencias.

De la experiencia previa en radares CW-FM del grupo de investigación (GIC-ULPGC) en que se encuadra este trabajo, surgió la idea de explorar el diseño, realización y medida de un radar CW-FM, pensado para su aplicación en la detección de blancos activos.

En este trabajo se resumen los principios teóricos de estos radares, los aspectos técnicos necesarios para su construcción, y se presentarán experimentos que demuestran su comportamiento en escenarios prácticos.

Se detallará el diseño de cada uno de los componentes de nuestro radar a diseñar, así como la justificación de la selección de estos, donde se incluye el transmisor, receptor y el blanco activo a utilizar, entre otros. Se describirán los métodos experimentales llevados a cabo en el laboratorio y la explicación de sus resultados para evaluar el rendimiento práctico del radar que hemos diseñado.



## Índice

1.	INTRODUCCIÓN .....	10
2.	RADARES DE FM – ONDA CONTINUA .....	11
2.1.	Características básicas de un radar FM – onda continua .....	11
2.2.	Ecuación Radar .....	12
2.3.	Fundamento de medida en el Radar Onda Continua - FM .....	14
2.4.	Alcance no ambiguo y resolución.....	17
2.5.	Patrón de modulación .....	17
3.	BLANCOS ACTIVOS PARA RADAR CW-FM .....	19
4.	ESTUDIO DE LAS TOPOLOGÍAS DEL CIRCUITO A DISEÑAR.....	21
4.1.	Caso de uso de multiplicador y divisor.....	21
4.2.	Caso de uso de sólo divisores.....	22
4.3.	Caso de uso de sólo multiplicadores .....	23
4.4.	Selección de la topología.....	23
4.5.	Topología seleccionada .....	25
5.	CÁLCULO TEÓRICO DE LA DISTANCIA MÁXIMA ENTRE EL RADAR Y EL BLANCO ACTIVO....	27
5.1.	Cálculo del alcance del radar CW-FM con un blanco pasivo .....	27
5.2.	Distancia entre el transmisor y el blanco activo.....	28
5.3.	Distancia entre el blanco activo y el receptor.....	30
6.	REALIZACIÓN DEL SISTEMA .....	32
6.1.	Selección de componentes.....	32
6.1.1.	Circuito Transmisor .....	32
6.1.2.	Circuito Divisor.....	33
6.1.3.	Circuito Blanco activo.....	33
6.1.4.	Circuito Receptor .....	34
6.2.	Diseño de las placas .....	34
7.	REALIZACIÓN DE MEDIDAS.....	38
7.1.	Medidas y caracterización del Blanco Activo .....	38
7.2.	Medidas y caracterización del Divisor .....	40
7.3.	Medidas y caracterización del Receptor.....	42
7.3.1.	Medidas y caracterización del Receptor a frecuencia de 5 GHz.....	42
7.3.2.	Medidas y caracterización del Receptor a frecuencia de 2,5 GHz.....	45
7.4.	Medidas y caracterización del Transmisor .....	48
7.5.	Tabla resumen de los circuitos independientes .....	52
7.6.	Medida del sistema completo empleando un cable .....	53

7.7. Medida del sistema completo empleando dos cables .....	56
7.8. Medida del sistema en cámara anecoica .....	60
8. CONCLUSIONES .....	64
8.1. Objetivos .....	64
8.2 Líneas futuras .....	64
Bibliografía .....	67
PRESUPUESTO .....	69
Presupuesto hardware .....	69
Presupuesto software.....	69
Presupuesto ingeniero .....	70
Presupuesto de los componentes .....	71
Presupuesto de las placas .....	71
Presupuesto total .....	72
ANEXOS .....	74
A.1. Factor de ruido en el receptor .....	74
A.2. Factor de ruido en el receptor mediante el método Y.....	75

## Índice de figuras

Figura 1: Componentes de la velocidad del blanco.....	14
Figura 2: Blanco fijo.....	15
Figura 3: Blanco móvil.....	15
Figura 4: Circuito con multiplicador y divisor 1.....	21
Figura 5: Circuito con multiplicador y divisor 2.....	22
Figura 6: Circuito con sólo divisores.....	22
Figura 7: Circuito con sólo multiplicadores.....	23
Figura 8: Topología final.....	25
Figura 9: Modelo de propagación en espacio libre.....	29
Figura 10: Esquemático del transmisor.....	32
Figura 11: Esquemático del divisor.....	33
Figura 12: Esquemático del blanco activo.....	33
Figura 13: Esquemático del receptor.....	34
Figura 14: PCB diseñado del divisor.....	35
Figura 15: PCB diseñado del blanco activo.....	36
Figura 16: Placa del divisor.....	36
Figura 17: Placa del blanco activo.....	36
Figura 18: Placa del transmisor.....	37
Figura 19: Placa del receptor.....	37
Figura 20: Señal a la salida del blanco activo con $P_{in} \geq -35$ dBm.....	39
Figura 21: Señal a la salida del blanco activo con $P_{in} \geq -42$ dBm.....	39
Figura 22: Armónico en la salida del blanco activo.....	40
Figura 23: Señal a la salida del divisor con $P_{in} \geq -22$ dBm.....	41
Figura 24: Señal a la salida del divisor con $P_{in} \geq -28$ dBm.....	41
Figura 25: Armónico en la salida del blanco activo.....	42
Figura 26: Nivel de señal en FI con una señal RF de -50 dBm ( $f = 5$ GHz).....	43
Figura 27: Nivel de señal en FI con una señal RF de -40 dBm ( $f = 5$ GHz).....	43
Figura 28: Nivel de señal en FI con una señal RF de -30 dBm ( $f = 5$ GHz).....	44
Figura 29: Nivel de señal en FI con una señal de -50 dBm ( $f = 2,5$ GHz).....	46
Figura 30: Nivel de señal en FI con una señal de RF de -40 dBm ( $f = 2,5$ GHz).....	46
Figura 31: Nivel de señal en FI con una señal de RF de -30 dBm ( $f = 2,5$ GHz).....	47
Figura 32: Nivel de señal a la salida del transmisor.....	49
Figura 33: Armónico generado a la salida del transmisor.....	50

Figura 34: Nivel de señal a la salida del híbrido .....	50
Figura 35: Caracterización del radar usando un cable .....	53
Figura 36: Potencia de señal en la entrada del receptor de -65 dBm .....	54
Figura 37: Potencial de señal en la entrada del receptor de -75 dBm .....	55
Figura 38: Potencia de señal en la entrada del receptor de -85 dBm .....	55
Figura 39: Potencia de señal en la entrada del receptor de -95 dBm .....	56
Figura 40: Caracterización del radar usando dos cables .....	57
Figura 41: Señal de FI con dos blancos: uno a 6,4 m (-58 dBm) y otro a 20 m (-68,5 dBm). Atenuador variable a 40 dB.....	58
Figura 42: Señal de FI con dos blancos: uno a 6,4 m (-68 dBm) y otro a 20 m (-78,5 dBm). Atenuador variable a 50 dB.....	59
Figura 43: Señal de FI con dos blancos: uno a 6,4 m (-78 dBm) y otro a 20 m (88,5 dBm). Atenuador variable a 60 dB.....	59
Figura 44: Montaje de medidas del Tx-Rx en la cámara anecoica.....	61
Figura 45: Montaje de medidas en el lado del blanco activo.....	61
Figura 46: Señal de FI procedente del blanco con dos ciclos de rampa .....	62
Figura 47: Señal de FI procedente del blanco con un ciclo de rampa .....	63

## Índice de tablas

Tabla 1: Medidas del blanco activo .....	40
Tabla 2: Medidas del divisor .....	42
Tabla 3: Medidas del receptor .....	48
Tabla 4: Medidas del transmisor .....	51
Tabla 5: Tabla resumen.....	52
Tabla 6: Recursos hardware y vida útil .....	69
Tabla 7: Coste de recursos hardware .....	69
Tabla 8: Recursos software y vida útil .....	69
Tabla 9: Coste de recursos software.....	70
Tabla 10: Coste de los recursos de ingeniero .....	70
Tabla 11: Coste de los componentes.....	71
Tabla 12: Coste de las placas PCB.....	71
Tabla 13: Coste total.....	72



# 1. INTRODUCCIÓN

En el campo de la detección de objetos, la tecnología ha avanzado significativamente, ofreciendo diversas soluciones adaptadas a distintas aplicaciones y necesidades. Los radares de onda continua y frecuencia modulada [1] (CW-FM, por sus siglas en inglés), compiten y, en muchos casos, se complementan con otras tecnologías de detección de objetos como los sistemas LiDAR [2] (Light Detection and Ranging), los sonar y las cámaras de tiempo de vuelo [3] (ToF, Time-of-Flight). Cada una de estas tecnologías tiene sus propias ventajas y limitaciones, y la elección de una sobre otra depende de distintos factores como pueden ser la aplicación, la precisión o el costo, entre otras.

En el ámbito de la tecnología radar, los sistemas CW-FM han emergido como herramientas esenciales para la detección y seguimiento de blancos. Estos sistemas se caracterizan por su capacidad para proporcionar mediciones precisas de distancia y velocidad, ofreciendo ventajas significativas sobre otros tipos de radares debido a su alta resolución y menor susceptibilidad a interferencias. La flexibilidad y precisión de los radares CW-FM los han convertido en componentes cruciales en diversas aplicaciones.

De la experiencia previa en radares CW-FM del grupo de investigación (GIC-ULPGC) en que se encuadra este trabajo, surgió la idea de explorar el diseño, la realización y medida de un radar CW-FM, adaptado para su aplicación en la detección de blancos activos. Es un paso más en la trayectoria de detección de blancos pequeños ( $\sigma < 1 \text{ m}^2$ ). Con ello, no se descartan otras opciones como los radares CW-FM comerciales en banda K (24 GHz) y banda V (61 GHz) utilizados en el ámbito de la automoción pero que podrían ser válidos para este tipo de aplicaciones.

En este trabajo se resumen los principios teóricos de estos radares, los aspectos técnicos necesarios para su construcción, y se presentarán diferentes experimentos que confirman su aplicabilidad en escenarios reales.

Se detallará el diseño de cada uno de los componentes de nuestro radar a diseñar, así como la justificación de la selección de estos, donde incluimos el transmisor, el receptor y el blanco activo a utilizar, entre otros. Se describirán los experimentos llevados a cabo en el laboratorio y la explicación de sus resultados para evaluar el rendimiento práctico del radar que hemos diseñado.

Este TFG busca profundizar en los conocimientos de los radares CW-FM y valorar opciones diferentes que sean viables. En este caso, se quiere hacer **una prueba de concepto** para ver si es o no viable incorporar el uso de blancos activos en dichos radares.

## 2. RADARES DE FM – ONDA CONTINUA

Los radares obtienen información acerca de un blanco mediante la comparación del eco con la señal transmitida, el eco solamente nos indica la presencia de un objeto reflectante. El radar permite realizar una estimación de las características del blanco: posición, velocidad, forma y/o tamaño [1].

Las señales o ecos recibidos se dividen en dos:

- Señal útil: procedente del objeto reflectante deseado (blanco).
- Señales indeseadas.
  - Ruido: energía electromagnética indeseada como el ruido blanco (gwn) o el ruido coloreado.
  - Clutter: es el conjunto de ecos indeseados debidos al entorno, etc.
  - Interferencias: señales de otros transmisores que interfieren involuntariamente al radar.
  - Contramedidas: Señales provocadas deliberadamente para perturbar.

Los sistemas radar se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Según la naturaleza del objeto.
- Según la posición relativa del transmisor y receptor.
- Según su finalidad o atendiendo a su uso.
- Según el tipo de la señal transmitida.

Dentro de la última clasificación es donde nos encontramos con los radares de onda continua y frecuencia modulada (CW-FM).

El radar de onda continua-modulada en frecuencia es un tipo de sensor de radar que emite una señal de continua como en el caso de un radar de onda continua simple pero que puede cambiar su frecuencia de funcionamiento durante la medición: es decir, la señal transmitida está modulada en frecuencia. A diferencia de los radares simples de onda continua miden, además de la velocidad, la distancia al blanco.

### 2.1. Características básicas de un radar FM – onda continua

- Capacidad para evaluar distancias de objetivos extremadamente pequeños.
- Habilidad de medir simultáneamente tanto la distancia como la velocidad radial.
- Precisión muy alta en la medición de distancias.

- El procesamiento de la señal se lleva a cabo en un rango de baja frecuencia después de la mezcla, simplificando significativamente “la señal eco” recibida.
- Una fiabilidad operativa elevada gracias a la ausencia de altas potencias transmitidas (como en los radares de pulsos).

Algunas de las ventajas que presentan este tipo de radares es que: son más simples y baratos; no presentan limitaciones del alcance mínimo; y discriminan blancos fijos frente a blancos móviles.

También existen limitaciones como el problema de aislamiento existente entre la antena transmisora y receptora o la discriminación de blancos simultáneos.

Distintas aplicaciones de los radares FM-onda continua:

- Detector de intrusos.
- Medidor de velocidad. Radares de tráfico.
- Radares portátiles de infantería y artillería. Sistema de misiles.
- Navegador Doppler. Radio-altímetros.

## 2.2. Ecuación Radar

La ecuación radar ideal nos permite determinar el alcance máximo del radar al blanco [1], [4], [5]. Es una herramienta para entender la operación del radar y constituye la base para el diseño de un radar.

A pesar de que la ecuación radar ideal se utiliza especialmente para radares pulsados o de pulso, constituye una herramienta importante que te ayuda a comprender el funcionamiento de los radares, y es por esto que se hace un pequeño resumen sobre la misma.

La señal generada es enviada desde el transmisor, reflejada por el blanco y recibida por el receptor que requerirá de una sensibilidad mínima o mínima señal detectable (MDS) que permita la detección de dicho blanco. Valorando las distintas pérdidas existentes en el sistema radar, así como la potencia y la frecuencia empleada, y que la habilidad para detectar el eco procedente del blanco depende también del ruido presente en el receptor, dando lugar a la figura de ruido en el receptor, siendo esta la degradación de la señal/ruido. Podemos escribir la ecuación de la siguiente forma:

$$R_{MAX} = \left[ \frac{PtGtGr\lambda^2\sigma}{(4\pi)^3(S/N)_{min}KT_0BFLs} \right]^{1/4} \quad [1]$$

Parámetros de la ecuación:

- Pt: potencia de transmisión
- Gt: ganancia del transmisor
- Gr: ganancia del receptor
- $\lambda$ : longitud de onda ( $c/f$ )
- $\sigma$ : sección radar del blanco
- $(S/N)_{min}$ : relación señal a ruido mínima a la entrada del receptor
- K: constante de Boltzmann ( $1,38 * 10^{-23} J/K$ )
- To: temperatura absoluta en K
- B: ancho de banda
- F: figura de ruido del sistema
- Ls: pérdidas totales existentes

Para el caso de un radar pulsado se puede obtener una mejora de la relación señal/ruido por integración de los pulsos recibidos mientras se ilumina el blanco, de forma que la ecuación nos quedaría como:

$$R_{MAX} = \left[ \frac{PtGtGr\lambda^2\sigma n Ei(n)}{(4\pi)^3 (S/N)_1 KT_o B F L_s} \right]^{1/4} \quad [2]$$

Donde:

- n: número de ecos recibidos por blanco y vuelta de antena  $\left( n = \frac{\theta_B(^{\circ}) PRF}{6\Omega(rpm)} \right)$
- Ei(n): eficacia de integración  $\left( Ei(n) = \frac{(S/N)_{post\ detección}}{n(S/N)_1} \right)$

La integración ideal se obtiene cuando el proceso de integración es coherente:

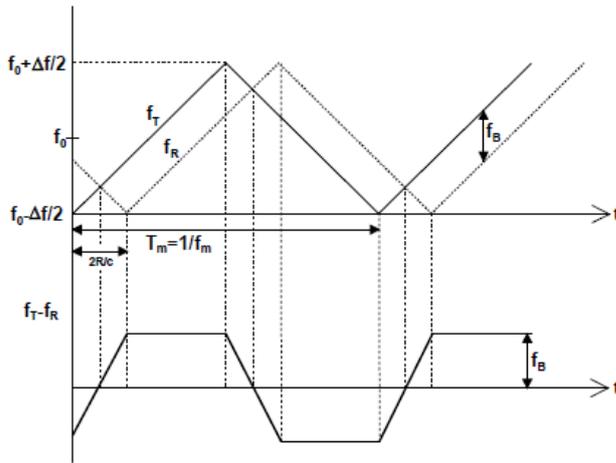
$$(S/N)_{n\ pulsos} = n (S/N)_1$$

A su vez la S/N y la eficacia de integración dependerán de la probabilidad de detección y de falsa alarma del sistema [5].

En el caso de radares CW-FM se hace una integración de n períodos. En ambos tipos de radares lo normal es hacerlo tras digitalizar la señal recibida.

En el apartado 5.1. se estimará el alcance del radar con los datos de los componentes de la topología elegida para el caso del radar CW-FM.





➤ Por semejanza de triángulos

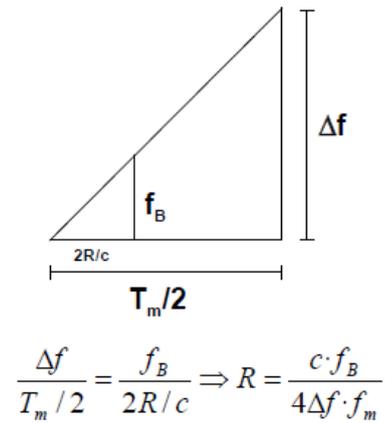


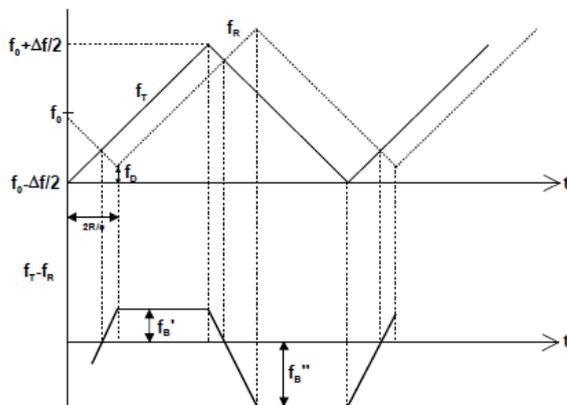
Figura 2: Blanco fijo

En la *figura 2* se explica cómo se lleva a cabo el procedimiento para hallar la distancia al blanco. Por una parte, tenemos el incremento de frecuencia ( $\Delta f$ ) y la mitad del tiempo de muestreo ( $\frac{T_m}{2} = \frac{1}{2f_m}$ ) ya que la base del triángulo corresponde con la mitad del tiempo. Por otro lado, tenemos el otro triángulo formado por la frecuencia de batido ( $f_B$ ) y dos veces la distancia al blanco entre la velocidad de la luz ( $\frac{2R}{c}$ ).

Haciendo la tangente para ambos triángulos es de donde obtenemos la igualdad anterior.

$$\frac{\Delta f}{T_m/2} = \frac{f_B}{2R/c} \rightarrow R = \frac{c f_B}{4\Delta f f_m} \quad [4]$$

Cuando se trata de un blanco móvil, el cálculo de la distancia al blanco y de la velocidad se lleva a cabo de la siguiente manera:



➤ Frecuencias de batido

$$f_B' = f_B - f_D$$

$$f_B'' = f_B + f_D$$

⇓

$$(+)\ f_B = \frac{1}{2}(f_B' + f_B'') \Rightarrow R = \frac{c}{4\Delta f \cdot f_m} \frac{1}{2}(f_B' + f_B'')$$

$$(-)\ f_D = \frac{1}{2}(f_B'' - f_B') \Rightarrow V_r = \frac{\lambda}{4}(f_B'' - f_B')$$

Figura 3: Blanco móvil

Debemos de tener en cuenta que el blanco se puede estar alejando o acercando a nuestro radar, de ahí que durante los ciclos ascendentes y descendentes de modulación el valor de la frecuencia

de batido tenga valores diferentes. Despejando los valores de frecuencia de batido y de frecuencia Doppler de las igualdades anteriores. Obtenemos la distancia al blanco y la velocidad de este.

$$f'_B = f_B - f_D$$

$$f''_B = f_B + f_D$$

Despejando el valor de  $f_B$  sumando ambas ecuaciones obtenemos:

$$f_B = \frac{1}{2}(f'_B + f''_B) \quad [5]$$

Aplicando nuevamente la ecuación [4], y despejando para  $f_B$  que es el valor que tenemos, obtenemos el valor de la distancia en el caso de que el blanco esté en movimiento:

$$\frac{R4\Delta f f_m}{c} = \frac{1}{2}(f'_B + f''_B) \rightarrow R = \frac{c}{4\Delta f f_m} \frac{1}{2}(f'_B + f''_B) \quad [6]$$

Cuando restamos ambas ecuaciones obtenemos la igualdad para la frecuencia Doppler  $f_D$ :

$$f_D = \frac{1}{2}(f''_B - f'_B) \quad [7]$$

La ecuación para el desplazamiento en frecuencia Doppler es la primera que explicamos en este apartado (ecuación [3]) y, por lo tanto, sabiendo sus componentes podemos hallar el valor de la velocidad del blanco:

$$\frac{2V_r}{\lambda} = \frac{1}{2}(f''_B - f'_B) \rightarrow V_r = \frac{\lambda}{4}(f''_B - f'_B) \quad [8]$$

Si el cambio de frecuencia es lineal en un amplio rango, podemos determinar la distancia dentro de este rango mediante una simple comparación de frecuencias  $\Delta f$ . Como solo podemos medir la diferencia de frecuencia, los resultados de un incremento lineal en el cambio de frecuencia en una situación estática son equivalentes a un cambio de frecuencia decreciente.

Cuando el objeto reflectante se mueve radialmente con respecto a la antena transmisora/receptora, se añade una frecuencia Doppler  $f_D$  (causada por la velocidad) a la señal de eco, además de la diferencia de frecuencia  $\Delta f$  respecto a la frecuencia de transmisión actual (causada por el tiempo de tránsito). Dependiendo de la dirección del movimiento y la modulación lineal, el radar mide únicamente la suma o la diferencia entre la diferencia de frecuencia, que lleva la información de alcance, y la frecuencia Doppler, que lleva la información

de velocidad. Cuando el objeto reflectante se aleja del radar, la frecuencia de la señal de eco se reduce debido a la frecuencia Doppler.

Además de la señal triangular como moduladora, como se ha explicado previamente, también es habitual utilizar una señal en rampa que si bien facilita el cálculo del alcance, puede complicar la determinación de la velocidad del blanco. Para las pruebas que se desean en este TFG es suficiente con usar la señal en rampa pues consideramos blancos estáticos.

## 2.4. Alcance no ambiguo y resolución

A través de una selección adecuada de la desviación de frecuencia por unidad de tiempo, puede determinarse por la duración del aumento de la frecuencia el poder de resolución y el máximo rango de medición posible [5]. La pendiente de subida lineal determina el poder de resolución y la precisión de la medición de la distancia. Según el circuito técnicamente empleado podría variar la máxima desviación de frecuencia y la pendiente.

El alcance máximo no ambiguo estará limitado por el período de repetición de la señal moduladora.

El valor del ancho de banda (BW) de la señal transmitida es fundamental para la resolución en este tipo de radares (CW-FM), que es simplemente la diferencia entre la frecuencia de corte superior e inferior de la señal transmitida.

La ecuación de la resolución es la siguiente:

$$\Delta R = \frac{c}{2\Delta f} \quad [9]$$

## 2.5 Patrón de modulación

Son posibles varios patrones de modulación, que pueden utilizarse para diferentes propósitos de medición:

- Modulación en forma de sierra: esta técnica de modulación se emplea en la medición de distancias amplias, especialmente en situaciones que implican distancias máximas, y tiene un impacto poco significativo de la frecuencia Doppler. Un ejemplo de aplicación puede ser observado en radares utilizados para la navegación marítima.
- Modulación triangular: Con esta modulación, se logra una separación sencilla entre la diferencia de frecuencia  $\Delta f$  y la frecuencia Doppler  $f_D$ .

- Modulación rectangular (incrustación por desplazamiento de frecuencia única, FSK): Este tipo de modulación se emplea para realizar mediciones de distancia altamente precisas en distancias cercanas, utilizando la comparación de fase entre las frecuencias de las señales de eco. Sin embargo, presenta una limitación: no permite la separación de las señales de eco de múltiples objetivos. Además, este método solo es efectivo para distancias de medición relativamente cortas y sin ambigüedades.
- Modulación de escalera: Las mediciones interferométricas amplían el rango de medición sin ambigüedades.
- Modulación sinusoidal: En épocas anteriores, se recurría al uso de formas de modulación sinusoidal. Este proceso se llevaba a cabo mediante un motor que giraba una placa de condensador dentro de la cámara de resonancia del oscilador del transmisor. Únicamente se aprovechaba la porción relativamente lineal cercana al cruce de cero para la función seno.

### 3. BLANCOS ACTIVOS PARA RADAR CW-FM

Los radares de onda continua – frecuencia modulada (CW-FM) son capaces de detectar blancos activos, es decir, blancos que reflejan la señal radar de vuelta al emisor, independientemente de si el objeto está emitiendo su señal propia.

Hablamos de sistemas activos cuando el objetivo a detectar está “activamente” involucrado en el proceso. El equipo móvil del que se quiere conocer su posición responde activamente a las interrogaciones que hace el equipo de tierra.

En el caso de los radares secundarios o SSR [6] (*Secondary Surveillance Radar*) el equipamiento de a bordo se denomina transpondedor, el cual detecta la señal emitida por el equipo de tierra y da una respuesta a esta señal. Es fundamental la colaboración del blanco para poder detectar la posición, donde la señal de transmisión se realiza a una frecuencia de 1030 MHz y la de respuesta a 1090 MHz. En estos radares el alcance efectivo es mayor y tiene una mayor inmunidad frente al clutter debido a las distintas frecuencias de emisión y recepción.

Los radares secundarios con la colaboración de los radares primarios son utilizados para el control del tráfico aéreo, ya que proporcionan por sí mismo información de distancia y acimut del blanco.

El sistema ideal de radar secundario presenta la información de cada una de las aeronaves, en la zona de cobertura del radar, con precisión y exactitud en los códigos. Sin embargo, en el sistema real de radar secundario se pueden producir y presentar datos correspondientes a blancos falsos y, como consecuencia, pueden ser tomados como verdaderos y producen inseguridad al controlador.

Existen distintas causas por las que se generan blancos falsos [1]:

- Las respuestas a lóbulos secundarios, ya que los pulsos radiados por lóbulos secundarios pueden llegar a un transpondedor. Como solución se tratan de suprimir los lóbulos secundarios en interrogación/recepción.
- Interferencias entre sistemas: *Fruit*. Al receptor del radar le llegan las respuestas propias y las respuestas a otros radares. Para evitar este problema se compara la información recibida en dos interrogaciones consecutivas (*Defruiter*).
- El solapamiento de respuestas: *Garbling*. Es el problema más grave de este tipo de radares y de difícil solución, para ello se lleva a cabo la interrogación selectiva (Modo S).

- Blancos de segunda vuelta. Las respuestas son recibidas en el intervalo siguiente al de la interrogación correspondiente. Por lo que se reduce la potencia del equipo de tierra a la zona de cobertura deseada o se lleva a cabo un entrelazado de PRF's (Stagger), que consiste en alternar la frecuencia de interrogación.
- Las reflexiones en la superficie terrestre u otros obstáculos generan blancos falsos en acimut y una distancia errónea. La solución propuesta es hacer un estudio de la zona donde está ubicado el radar y programar un Mapa de Reflejos.

Existen distintos modos de interrogación del sistema SSR, estas consultas se emiten de manera anónima para que todos los transpondedores que las reciban puedan responder, sin incluir ningún tipo de información salvo el propio modo de interrogación. La única excepción es el modo S, mencionado ya anteriormente como solución al problema de solapamiento de respuestas o *Garbling* que permite realizar interrogaciones selectivas dirigidas a una aeronave específica. La implantación del Modo S permite aerovías más próximas en altitud y por tanto optimizar el uso del espacio aéreo.

Muchos de los modos de interrogación ya están en desuso, pero, aparte del modo S, existe el modo 1, 2, 3, 4, 5, B, C y D.

En nuestro sistema trabajamos con un radar CW-FM, que a diferencia de los radares secundarios que emiten pulsos esperando una respuesta por parte del transpondedor que va a bordo de la aeronave, este transmite una señal de radio continua con una frecuencia que varía de manera lineal con el tiempo, y la diferencia de frecuencia entre la señal transmitida y la señal recibida se utiliza para determinar la distancia al objeto.

El cambio de información entre nuestro radar y el blanco activo no se realizará como en el caso típico de los radares secundarios. En nuestro sistema trabajaremos a una frecuencia seleccionada y el blanco se encargará de que esta frecuencia sea duplicada o dividida y el receptor del radar se tendrá que adaptar para ser capaz de detectar la señal procedente del blanco. Obsérvese que al trabajar a distintas frecuencias entre la etapa de transmisión y la de recepción podríamos evitar en gran medida el problema de aislamiento entre ambas antenas al estar en rangos de frecuencias muy diferentes. Por ello parte del trabajo de diseño será hacer un estudio de distintas topologías y seleccionar la más eficaz y precisa para nuestro caso.

Una de las principales aplicaciones que encontramos con este tipo de radares es la capacidad de que vehículos autónomos sean capaces de detectar blancos pequeños. Este es uno de los objetivos que se busca en este TFG: mejorar un sistema que se encargue de detectar blancos que se encuentran a una distancia cercana a nuestro dron para así evitar la colisión entre ambos.

## 4. ESTUDIO DE LAS TOPOLOGÍAS DEL CIRCUITO A DISEÑAR

En la primera parte de este proyecto nos centraremos en el estudio de distintas topologías que pueden ser utilizadas y valorar cual de todas puede ser la más eficiente para nuestra aplicación.

Planteamos varias opciones dependiendo de si el blanco multiplica o divide la señal recibida.

En el primero de ellos la frecuencia de la señal generada por un VCO del transmisor será dividida por dos por el blanco activo; en otros esquemáticos, en cambio, la  $f_i$  será multiplicado por 2. Esto se hace para evitar que parte de la señal transmitida alcance la antena receptora y, por lo tanto, nuestro sistema se vea alterado. Este constituye uno de los principales problemas de los radares CW-FM: la falta de aislamiento existente entre las antenas del radar.

Por lo tanto, clasificaremos las topologías según el blanco divida o multiplique la frecuencia de la señal que recibe.

### 4.1. Caso de uso de multiplicador y divisor

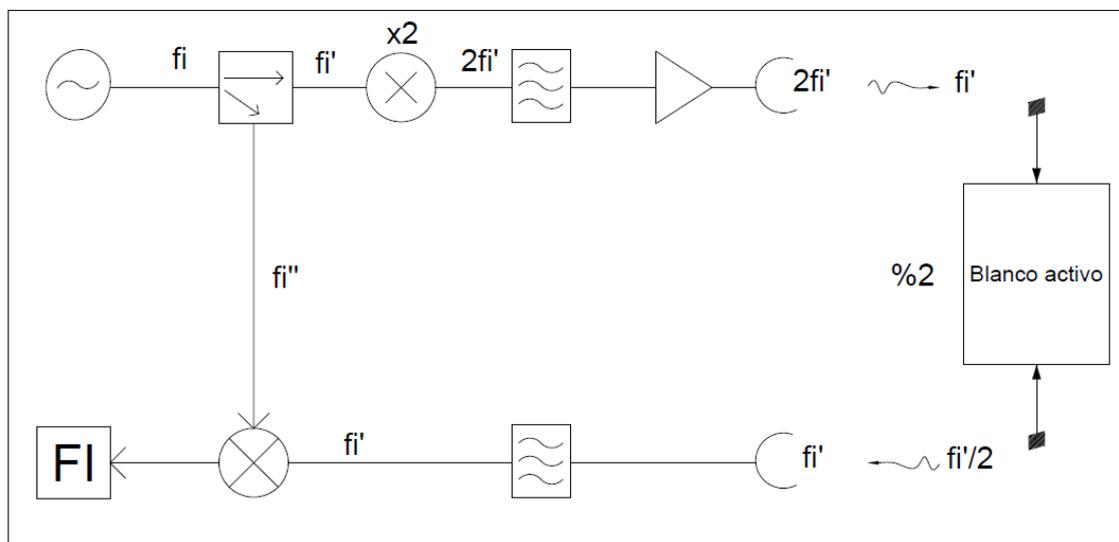


Figura 4: Circuito con multiplicador y divisor 1

En el *circuito con multiplicador y divisor 1* se observa que tras el oscilador (VCO), disponemos de un híbrido, un multiplicador, filtros para eliminar todos los espurios de la señal que se multiplica y la que se recibe y de un amplificador en el transmisor. También se observa que el blanco activo divide por dos la frecuencia de la señal a su entrada y, por tanto, el blanco actúa como divisor.

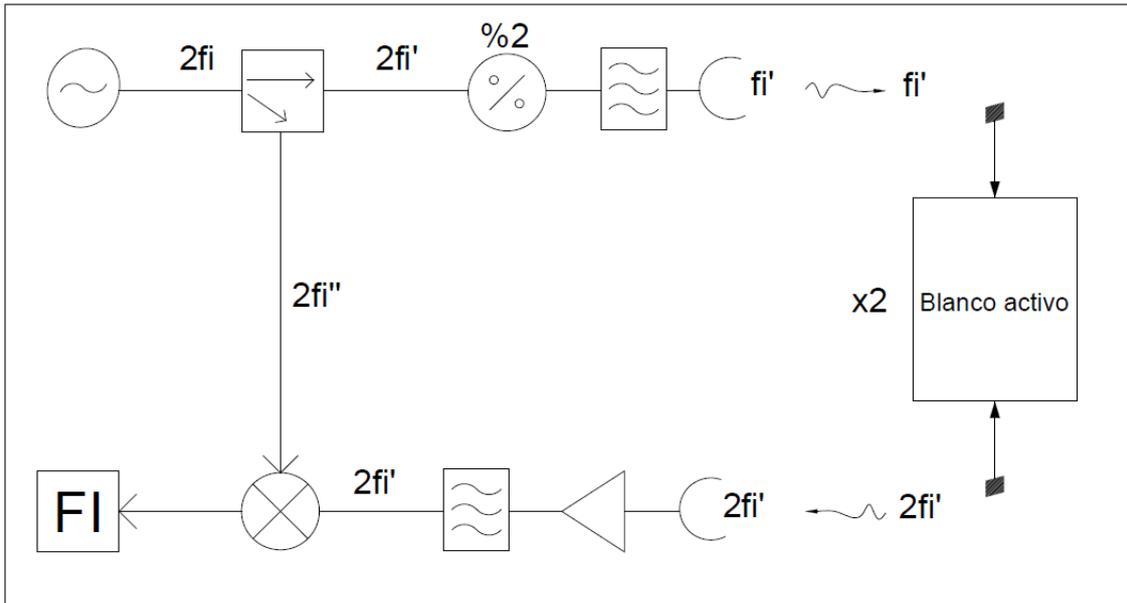


Figura 5: Circuito con multiplicador y divisor 2

En el caso del *circuito con multiplicador y divisor 2*, además del VCO y del híbrido, aparece un divisor y filtro en el transmisor. En este caso el blanco activo actúa como multiplicador haciendo que la frecuencia que devuelve sea el doble a la que recibe.

#### 4.2. Caso de uso de sólo divisores

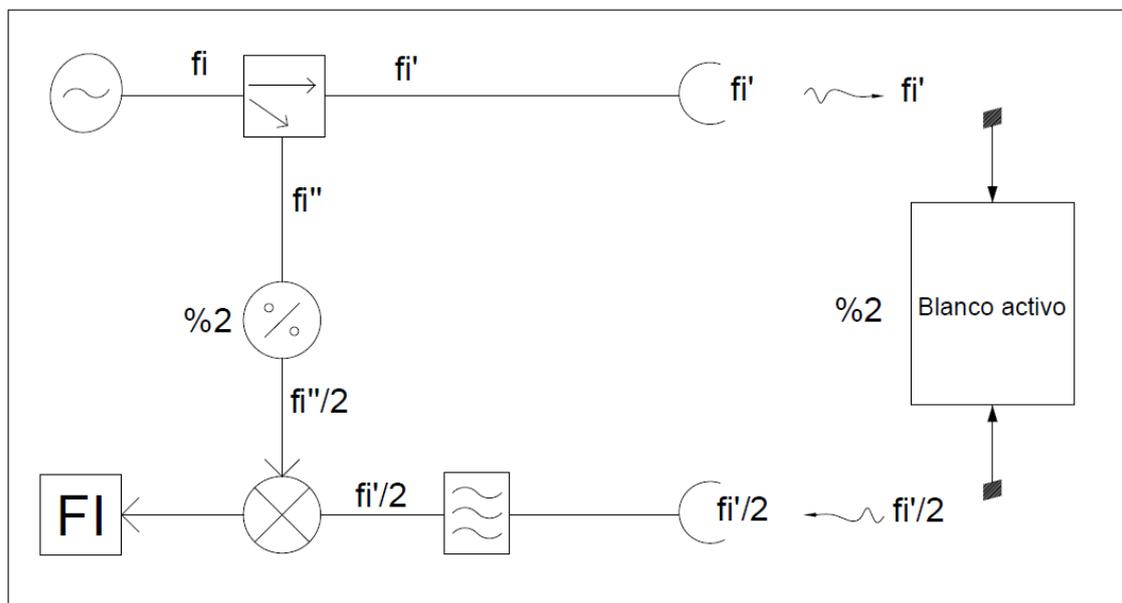


Figura 6: Circuito con sólo divisores

El *circuito con sólo divisores* tanto la señal que es generada como la señal que le llega al blanco activo es dividida por 2, para ello se pondrá un divisor para la parte en las salidas del híbrido al

mezclador del receptor, y se filtra a la entrada del receptor para sólo llegue la señal dividida del blanco activo.

### 4.3. Caso de uso de sólo multiplicadores

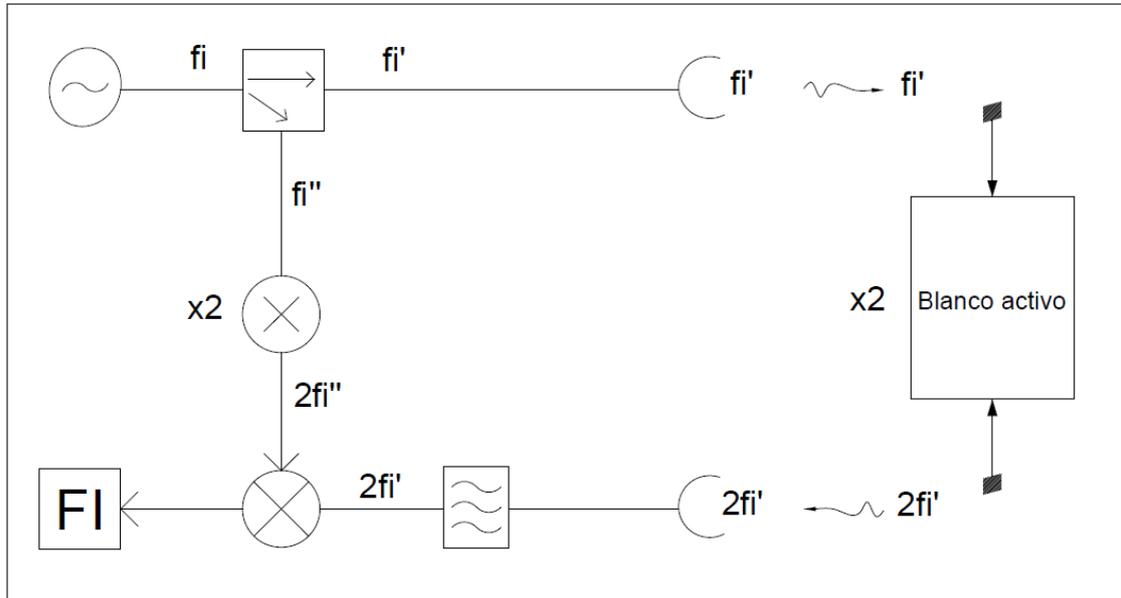


Figura 7: Circuito con sólo multiplicadores

En este último caso observamos, además del oscilador (VCO) y del híbrido, que la señal de salida del blanco activo se duplica y entra al receptor. Un filtro a la entrada de éste evita el acoplo de la señal transmitida. Para poder hacer la mezcla en el receptor, la señal que proviene del VCO también se duplica.

### 4.4. Selección de la topología

Una vez planteamos todos estos esquemas empezamos a valorar cuál de todos podría ser el más óptimo para el resultado que tratamos de obtener. Estudiaremos primeramente que tipo de circuito queremos utilizar, en los que el blanco activo duplicaría o dividiría la frecuencia que es transmitida y una vez escogido el tipo de topología nos tocaría seleccionar el que podría funcionar de una mejor manera.

Dado que el objetivo principal es realizar **una prueba de concepto** se ha optado por utilizar componentes ya disponibles en el Grupo de Investigación. Se plantean tres frecuencias posibles 2,5 GHz, 5,0 GHz y de 10 GHz. Por ello la estructura a escoger va a estar muy supeditada a los componentes disponibles. En todo caso, se podría adquirir algún componente más para completar el esquema escogido.

En cuanto a la potencia de transmisión, la idea inicial es de emplear una comprendida entre 10 y 15 dBm. La potencia no es un factor crítico en este diseño pues, como se ha indicado, el objetivo es estudiar y evaluar el uso de blanco activos y, por lo tanto, el valor dependerá de los componentes disponibles.

Entre los circuitos multiplicadores y divisores tendremos que seleccionar un tipo de topología que el blanco activo se encargara de multiplicar o dividir la frecuencia que es generada y transmitida.

Haciendo una valoración general de los esquemáticos propuestos podemos centrarnos comparando el uso de divisores frente a multiplicadores.

Así se puede ver que muchos divisores comerciales activos, requieren baja potencia de entrada y tener ganancia. Los multiplicadores por su lado requieren de altos valores de potencia de entrada (típico 8 dBm) y tienen pérdidas bastante significativas (10 dB típicos). Ello obliga a utilizar más amplificadores y filtros que en el caso de divisores de frecuencia. Además, los divisores disponibles en el laboratorio requieren baja potencia de entrada (unos -10 dBm) y con una ganancia de unos 10 dB. Estas características son especialmente importantes en el blanco donde debemos reducir en consumo todo lo posible. Por todo ello se optó por un esquema con divisores.

## 4.5. Topología seleccionada

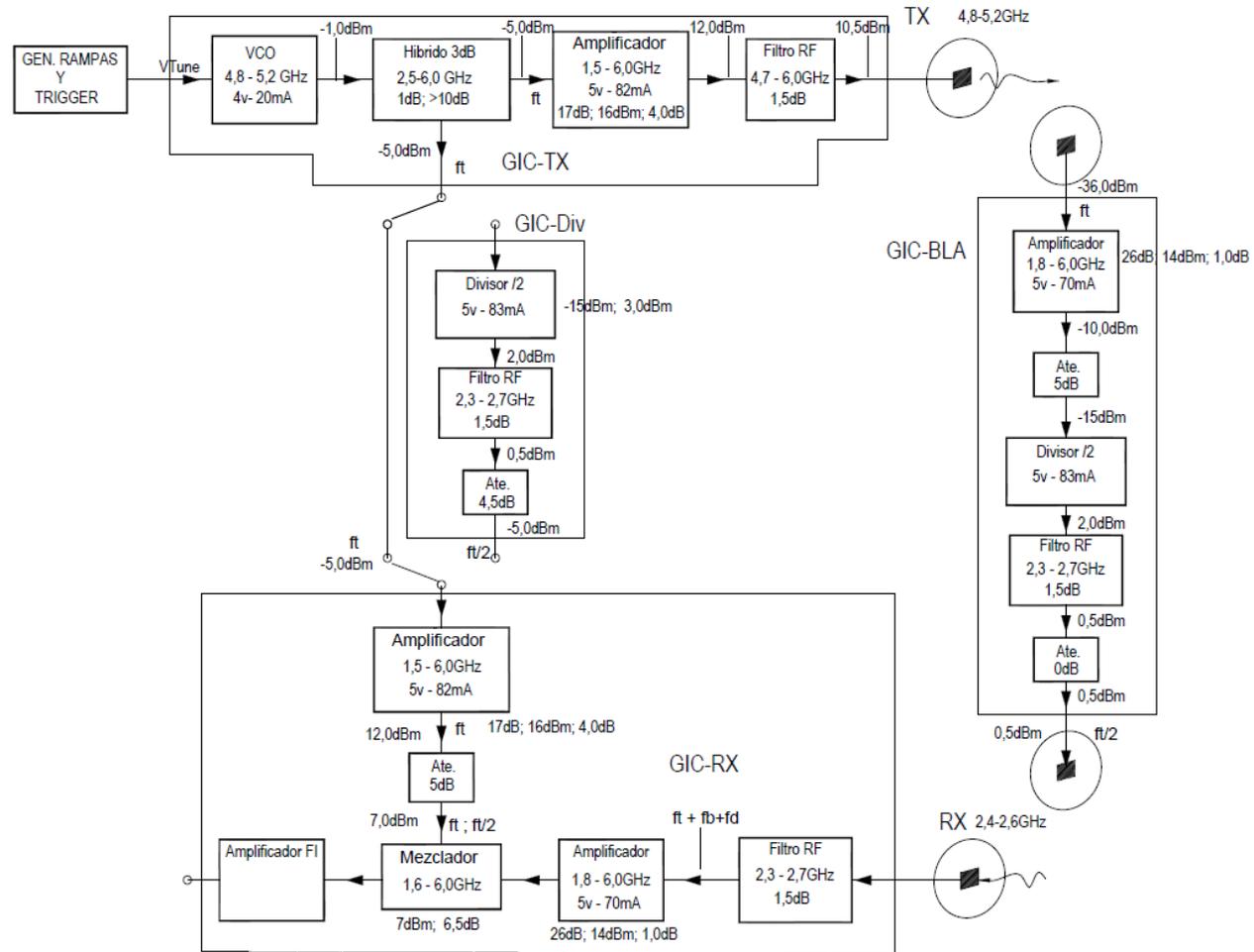


Figura 8: Topología final

En la *figura 8* se observa la topología del circuito a fabricar con sus distintos componentes haciendo un diseño de cada una de las partes de nuestro circuito con mayor detalle a diferencia de los primeros esquemas que habíamos diseñado para tener una orientación en nuestra selección.

Al lado de cada componente se le ha añadido la información básica necesaria como es el rango de frecuencia al que funcionan, sus respectivas ganancias, punto de compresión o figura de ruido en el caso de los amplificadores, el nivel de atenuación de cada uno de los atenuadores o las pérdidas de inserción de los filtros. Además, observamos como hemos hecho una estimación de cuanto sería el nivel de potencia para cada uno de los puntos entre los distintos componentes del circuito, siempre y cuando estemos trabajando con la frecuencia adecuada.

El blanco activo con el que estudiaremos el sistema será fabricado también por nosotros, haciendo uso primeramente de un amplificador para que la potencia de la señal que detecta sea amplificada, seguido de un atenuador que hemos puesto para proteger el divisor. Posteriormente haciendo uso de un divisor se divide la frecuencia recibida a la mitad, a la salida de este haremos uso de un filtro para quedarnos con la señal a la frecuencia a la que deseamos transmitir hacia el receptor y, antes de que sea enviada la señal, añadiríamos un atenuador si resulta necesario en las pruebas de laboratorio.

Como se observa el sistema también puede ser usado como un radar CW-FM en la banda de 5 GHz. La idea es comprobar previamente que el sistema efectivamente funciona como radar CW-FM a dicha frecuencia (sin utilizar el blanco activo). Para ello el filtro de entrada al receptor se cortocircuitó en la placa y se conectó de forma externa durante las pruebas.

## 5. CÁLCULO TEÓRICO DE LA DISTANCIA MÁXIMA ENTRE EL RADAR Y EL BLANCO ACTIVO

A partir de la topología escogida con los componentes disponibles podemos hacer una estimación del alcance al sistema.

Primero estimaremos el alcance del radar CW-FM con blanco pasivo de  $0,5 \text{ m}^2$  (es aproximadamente la sección radar del blanco a detectar). Después calcularemos el alcance con el blanco activo y finalmente haremos una comparativa entre ambos. En los cálculos supondremos una S/N deseada de al menos 10 dB.

Para el caso del blanco activo haremos el cálculo en dos etapas. En la primera se obtendrá la distancia entre la salida del transmisor y la entrada del divisor del blanco activo en la que trabajaremos a la frecuencia de 5 GHz. En la segunda etapa se calculará a partir de la salida de la señal dividida por el blanco activo y esta sea enviada de vuelta hacia la antena receptora a la mitad de frecuencia de inicio, es decir, a 2,5 GHz. Para ello, tendremos que tener en cuenta la figura de ruido del receptor, la ganancia, la compresión y demás parámetros relevantes después de pasar por el amplificador y sea procesada en el mezclador con la señal de OL que ha sido generada por el VCO y llevada, mediante un híbrido, hacia el receptor.

### 5.1. Cálculo del alcance del radar CW-FM con un blanco pasivo

Primero haremos una estimación del alcance utilizando la ecuación radar ideal, por lo que deberemos tener en cuenta los datos del diseño de la topología escogida.

- Ganancia de las antenas: 8 dB
- Sección radar:  $0,5 \text{ m}^2$  (valor escogido de la referencia [7])
- Potencia de transmisión: 10 dBm (-20 dBW)
- S/N deseada: 10 dB
- NF total: 2,5 dB
- Ancho de banda (BW): 400 MHz
- Pérdidas totales: 1 dB
- Frecuencia  $f = 5 \text{ GHz}$

Por lo tanto, sustituyendo los datos en la ecuación [1]:

$$R_{MAX} = \left[ \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 (S/N)_{min} K T_o B F L_s} \right]^{1/4}$$

$$R_{MAX} = \left[ \frac{10^{-2} * 10^{0.8} * 10^{0.8} * (3 * 10^8)^2 * 0,5}{(4\pi)^3 * 10 * 1,38 * 10^{-23} * 290 * 400 * 10^6 * 10^{0,25} * 10^{0,1} * (5 * 10^9)^2} \right]^{1/4}$$

$$= 10,02 \text{ m}$$

$$R_{MAX} = 10,02 \text{ m}$$

Como se observa en estos cálculos sólo se ha considerado la S/N deseada a la entrada del receptor. No se ha considerado ningún tipo de procesamiento de señal ni el tipo de filtrado en FI.

## 5.2. Distancia entre el transmisor y el blanco activo

PRIMERA ETAPA: Salida del transmisor – Entrada al blanco activo.

Para hacer el cálculo teórico de la distancia entre la antena de transmisión y el blanco activo consideraremos el modelo de propagación en el espacio libre, utilizado para predecir el nivel de la señal recibida cuando el transmisor y receptor están en un espacio de visión lo suficiente claro y sin obstáculos entre ellos, y que viene dado por la ecuación de espacio libre de Friis [8].

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad [10]$$

Parámetros de la ecuación de Friis:

- $P_r(d)$ : potencia recibida en función de la distancia.
- $P_t$ : potencia transmitida
- $G_t$ : ganancia de la antena del transmisor
- $G_r$ : ganancia de la antena del receptor
- $\lambda$ : longitud de la onda
- $d$ : distancia de separación
- $L$ : factor de pérdida del sistema no relacionado con la propagación ( $L \geq 1$ )

Como en nuestro estudio suponemos una potencia mínima necesaria a la entrada del blanco activo, podemos despejar el valor de la distancia y así estimar cuál será la distancia máxima a la que nuestro circuito es capaz de detectar un blanco.

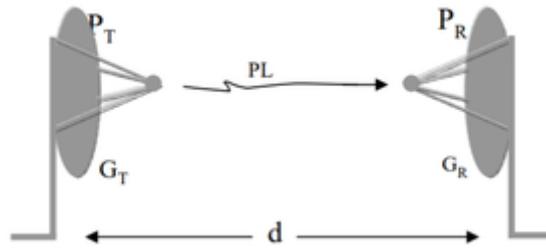


Figura 9: Modelo de propagación en espacio libre

Disponemos de la siguiente información para hallar la distancia máxima teórica:

- Las ganancias de ambas antenas es la misma ( $G_t = G_r = 8 \text{ dB}$ )
- La potencia que emite el transmisor es de  $10,5 \text{ dBm}$  ( $-19,5 \text{ dBW}$ )
- La potencia a la entrada del divisor es de  $-36 \text{ dBm}$  ( $-66 \text{ dBW}$ )
- La frecuencia utilizada en la transmisión es de  $5 \text{ GHz}$
- Consideramos un factor de pérdidas de  $L = 1 \text{ dB}$

Por lo tanto, despejando el parámetro de la distancia en [10], nos quedaría la siguiente ecuación:

$$d = \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 P_r L}}$$

Y sustituyendo cada parámetro por su correspondiente valor:

$$d(m) = \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 P_r L}} = \sqrt{\frac{10^{1,05} * 10^{0,8} * 10^{0,8} * \left(\frac{3 * 10^8}{5 * 10^9}\right)^2}{(4\pi)^2 * 10^{-3,6} * 1,26}} \approx 5,67(m)$$

Lo que hemos estudiado ha sido un caso ideal, sin embargo, cuando lo llevamos a la práctica en casos reales debemos tener en cuenta distintos tipos de pérdidas que pueden afectar al alcance del radioenlace.

A pesar de que nuestro sistema no es para grandes distancias se deberían de tener en cuenta las siguientes pérdidas:

- Pérdidas por obstrucción por si existe algún obstáculo entre el transmisor y el blanco.
- Pérdidas por difracción.
- Pérdidas debido a las condiciones climatológicas como la lluvia, nieve o niebla.
- Pérdidas por dispersión atmosférica que suele ocurrir cuando se trabaja a muy alta frecuencia.
- Pérdidas por polarización de las antenas transmisoras y receptoras.

- Pérdidas por desvanecimiento.

Muchas de las pérdidas mencionadas no tendrán gran impacto, por no decir que no afectarán a nuestro sistema, pero a pesar de eso las debemos tener siempre presentes a la hora de llevarlo a la práctica.

Además, en nuestro sistema no hemos considerado el uso de un filtro adaptado en el receptor [9], donde su uso es comúnmente utilizado en aplicaciones radar ya que se encarga de maximizar la SNR en presencia de ruido blanco aditivo y gaussiano.

### 5.3. Distancia entre el blanco activo y el receptor.

SEGUNDA ETAPA: Salida del blanco activo – Receptor

En esta segunda etapa tenemos unos valores para nuestros parámetros diferentes a los que teníamos en la primera etapa, ya que la frecuencia se ha dividido entre dos, por lo que trabajaremos a 2,5 GHz, además, a la salida del blanco activo tenemos un nivel de señal de 0,5 dBm.

A la salida del mezclador queremos tener una relación S/N  $\geq 10$  dB y una potencia  $\geq -20$  dBm, y tenemos la siguiente información:

- Las ganancias de ambas antenas es la misma ( $G_t = G_r = 8$  dB)
- La potencia que se emite a la salida del blanco activo es de 0,5 dBm (-29,5 dBW)
- La potencia a la salida del mezclador es de -20 dBm (-50 dBW)
- Frecuencia utilizada en el enlace es de 2,5 GHz
- Ganancia del amplificador de entrada en el Rx = 29,7 dB a 2,5 GHz
- Pérdidas filtro de entrada = 1,5 dB
- Pérdidas del mezclador de 5,8 dB a 2,5 GHz con OL de 7 dBm
- Potencia a la salida del mezclador  $\geq -20$  dBm
- Consideramos un factor de pérdidas de  $L = 1$  dB

Con los datos indicados podemos determinar cuál será la máxima distancia entre blanco y receptor para que la potencia a la salida de la antena receptora sea de unos -38,3 dBm (-68,3 dBW) de forma que en el FI tengamos los -20 dBm.

Al igual que hicimos para la primera etapa, despejamos el parámetro de la distancia:

$$d(m) = \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 P_r L}} = \sqrt{\frac{10^{0,05} * 10^{0,8} * 10^{0,8} * \left(\frac{3 * 10^8}{2,5 * 10^9}\right)^2}{(4\pi)^2 * 10^{-3,83} * 1,26}} \approx 4,68(m)$$

Observando los resultados de distancia que hemos obtenido para ambas etapas, podemos sacar como conclusión que nuestro sistema está preparado para detectar blancos activos a una distancia máxima de 4,68 metros aproximadamente.

Comparando los resultados entre blanco pasivo y activo, se observa que en el primer caso se obtiene un alcance más elevado. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que dicho alcance se puede ver afectado por la falta de asilamiento entre transmisor y receptor y otros efectos como el clutter.

A efectos de nuestro experimento el alcance máximo previsto será el de 4,68 m.

## 6. REALIZACIÓN DEL SISTEMA

### 6.1. Selección de componentes

Como se ha visto la topología escogida era dependiente de los componentes ya disponibles en el laboratorio; Sin embargo, ha sido necesario adquirir algunos para llevar a cabo el montaje. La selección de la frecuencia de trabajo también se ha hecho en base a los componentes disponibles en la banda de 2,5 y 5 GHz.

Analizaremos cada uno de los circuitos de manera independiente explicando cuales han sido los componentes que hemos seleccionado.

#### 6.1.1. Circuito Transmisor

Para el transmisor hemos escogido el VCO SMV5068A que ya disponíamos y funciona en la banda de frecuencia comprendida entre los 4,8 y 5,2 GHz. El híbrido 3 dB de modelo PD4859J5050S2HF que también teníamos. A continuación, el amplificador seleccionado es el MNA-7A+, este amplificador si tuvo que ser pedido para nuestro montaje, también se tuvo en cuenta el amplificador XB1007 a la hora de llevar a cabo la selección de componentes, ambos son amplificadores de bajo ruido y alta ganancia, pero finalmente escogimos el seleccionado por su facilidad de polarización. Por último, antes de que la señal del transmisor sea transmitida, se pone un filtro RF de modelo BFCW-542+ que trabaja en la banda de 5Ghz.

Una vez hecho el diseño del transmisor, hemos realizado su esquemático a través de la herramienta de edición de AutoCad. Tanto este circuito como todos los siguientes se realizaron con la misma aplicación.

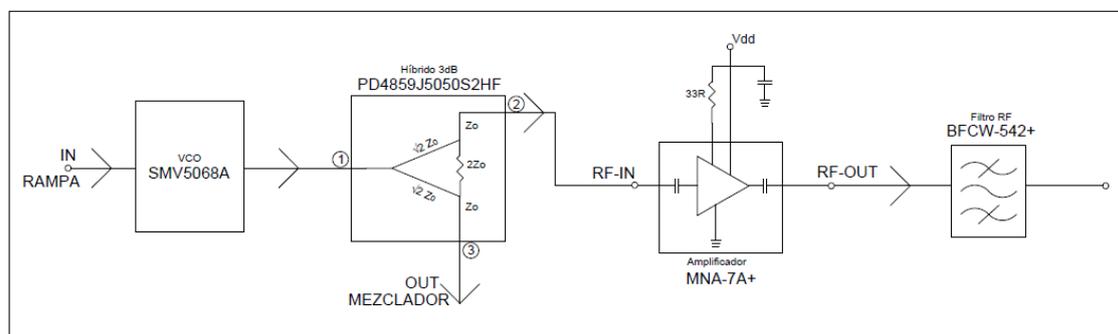


Figura 10: Esquemático del transmisor

### 6.1.2. Circuito Divisor

El montaje del divisor es de los más sencillos de cada uno de los circuitos independientes, ya que este consta solamente del divisor HMC361S8G, seguido del filtro DEA162495BT el cual tuvo que ser pedido ya que no disponíamos de este tipo de filtros en el laboratorio, es un filtro SMD para 2,5 GHz que reduce los armónicos y el ruido, y por último, se añadió un atenuador justo antes de la salida de la señal para ajustar el nivel de OL.

En la *figura 11*, se incluye el esquemático del circuito con indicación de cada uno de sus componentes.

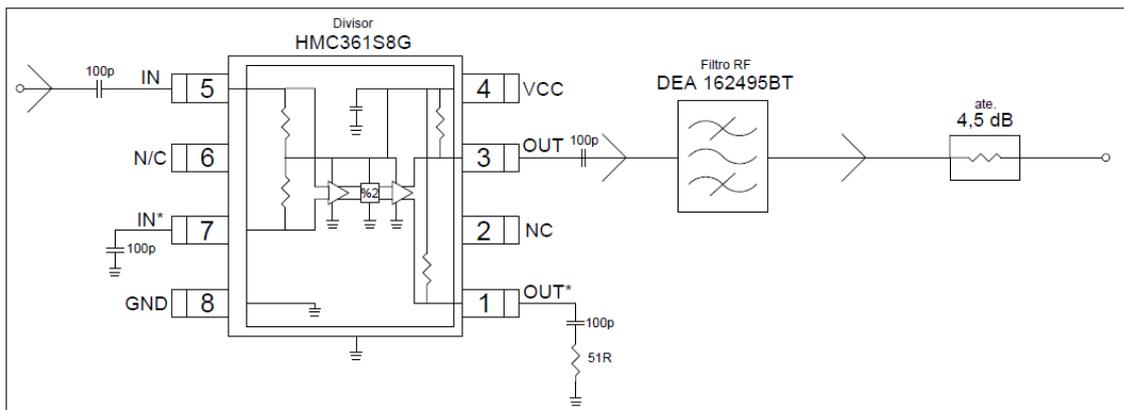


Figura 11: Esquemático del divisor

### 6.1.3. Circuito Blanco activo

El diseño del blanco activo también se ha realizado en el laboratorio. A su entrada se sitúa el amplificador PMA3-63GLN seguido de un atenuador. Se utilizó el mismo modelo de divisor que en el circuito divisor, el HMC361S8G, el mismo filtro RF DEA162495BT y un atenuador opcional a la salida. Este diseño es prácticamente igual que el circuito divisor, simplemente le hemos añadido un amplificador y un atenuador a la entrada del blanco para que la señal que le llegue pueda ser detectada correctamente. El esquemático del blanco activo se muestra en la *figura 12*.

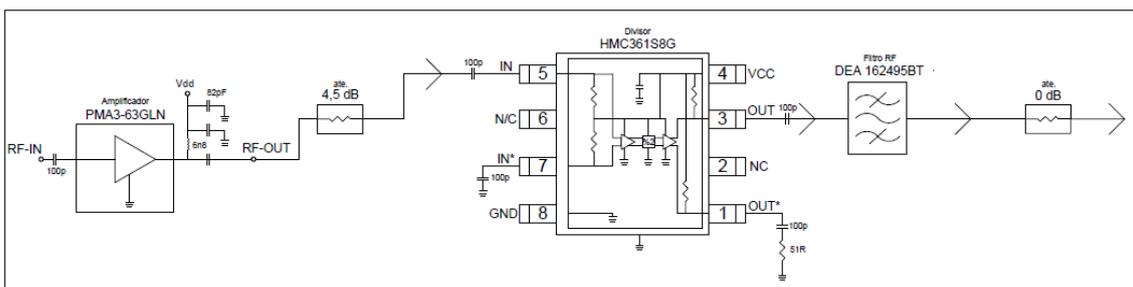


Figura 12: Esquemático del blanco activo

### 6.1.4. Circuito Receptor

La parte del receptor es la más compleja, ya que es donde hay mayor cantidad de componentes. Por un parte, para la señal procedente del OL tenemos el amplificador de alta ganancia y le sigue un atenuador justo antes de entrar al mezclador para ajustar su nivel. Por la parte del receptor que recibe la señal de RF tenemos nuevamente el filtro RF DEA162495BT y el amplificador PMA3-63GLN antes de que la señal entre al mezclador. El mezclador seleccionado es el MAC-60+ y a la salida de este tenemos el amplificador de FI. Este se ha realizado con un amplificador operacional clásico (LM6132). El esquemático para el circuito receptor se muestra en la *figura 13*.

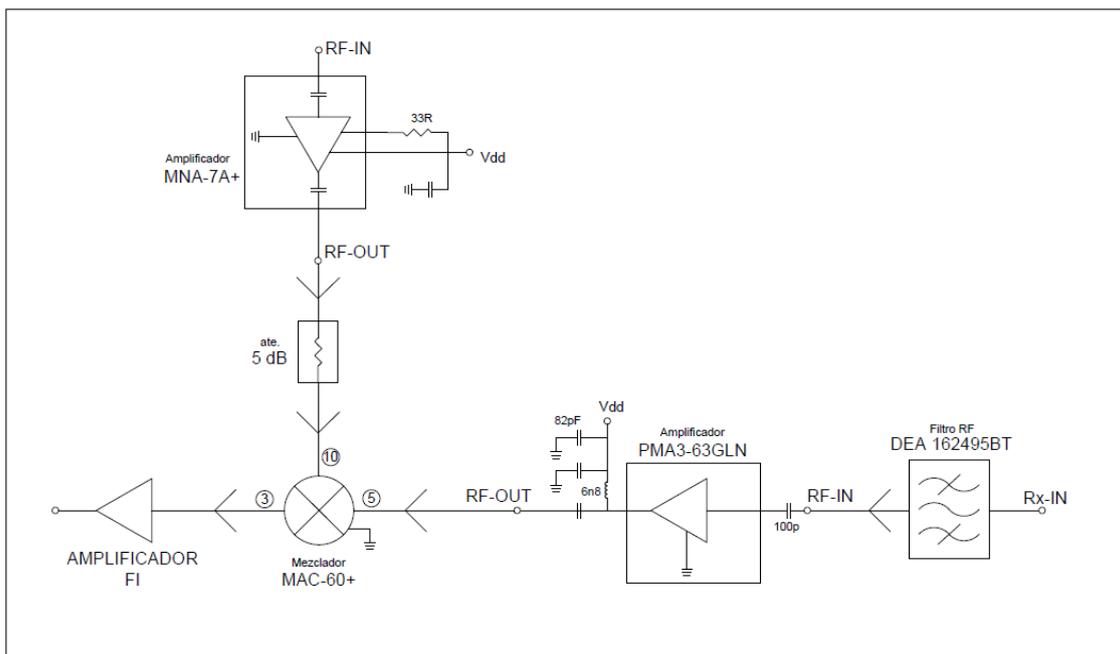


Figura 13: Esquemático del receptor

### 6.2. Diseño de las placas

El diseño de cada una de las placas se llevó a cabo en el programa AutoCad, del cual ya disponíamos de algunos modelos previos y porque ya lo había usado en otras asignaturas de la carrera. Los ficheros “gerber” para la fabricación se generaron con el programa ADS. En el grupo de investigación existen otros programas para el diseño de las placas y que se ha usado en otras ocasiones, como el Eagle o el mencionado anteriormente ADS, pero optó por comodidad y la experiencia previa en AutoCad.

El diseño de la placa del divisor y la del blanco activo fueron diseñadas por el autor del TFG, mientras que las restantes, que corresponden con la placa del transmisor y receptor se hicieron en el Grupo de Trabajo para que estuvieran terminados a tiempo y poder realizar las medidas de cada una y del sistema. Todas ellas fueron montadas en los laboratorios del Grupo.

Para las placas se optó por tecnología de bajo coste. Se hicieron sobre FR4 de 0,8 mm y con líneas cortas de 50 ohm ( $W = 1,6 \text{ mm}$ ) siempre que no hubiera fuertes discontinuidades. Esta anchura ( $W$ ) se calculó con el programa Qucs (de libre distribución).

En la figura 14 y 15 se muestran las placas del divisor y del banco activo.

Como se observa se corresponden con los esquemáticos de la figura 11 y 12, respectivamente, a los que se ha añadido un regulador de tensión que finalmente no se usó.

En las figuras 16 a 19 se muestran las fotos de todas las placas.

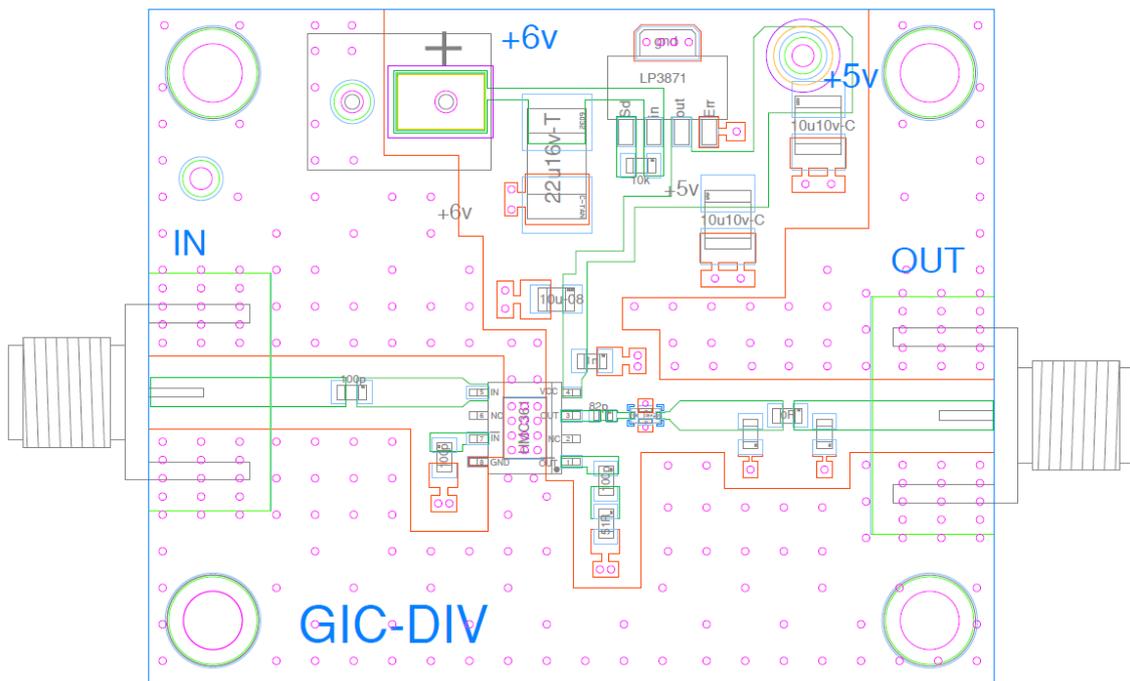


Figura 14: PCB diseñado del divisor

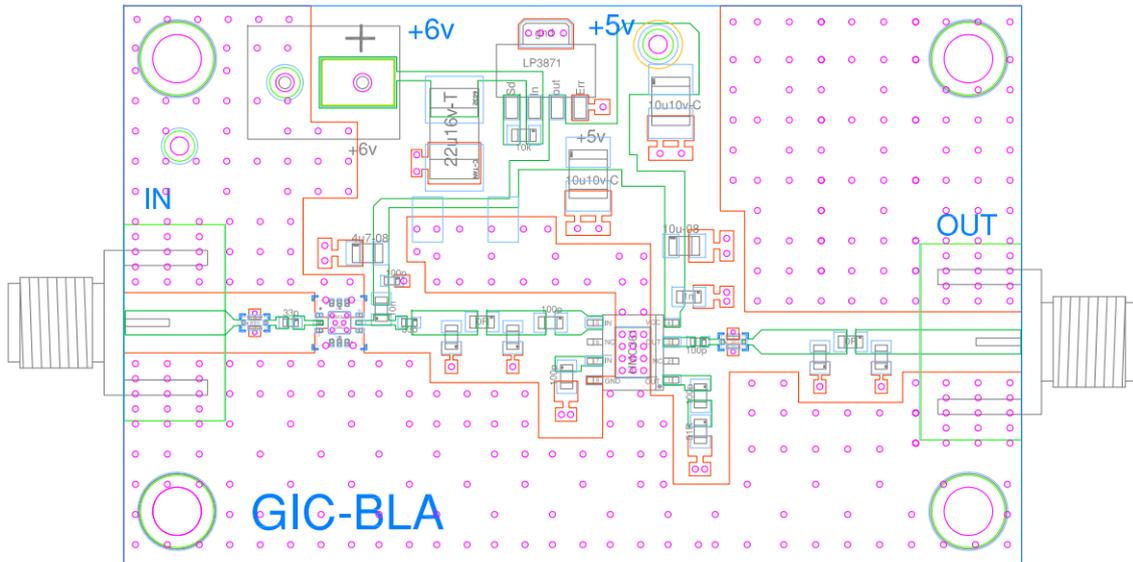


Figura 15: PCB diseñado del blanco activo

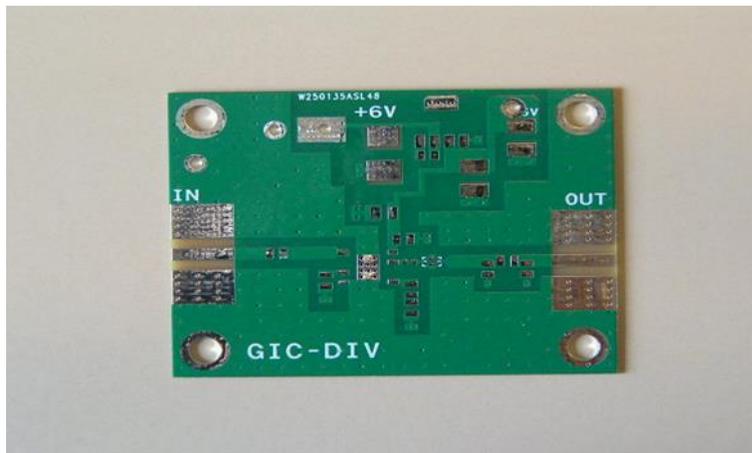


Figura 16: Placa del divisor

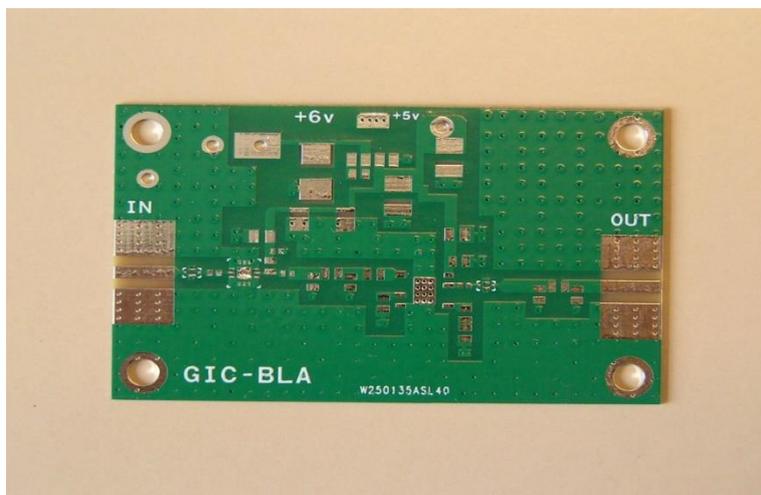


Figura 17: Placa del blanco activo

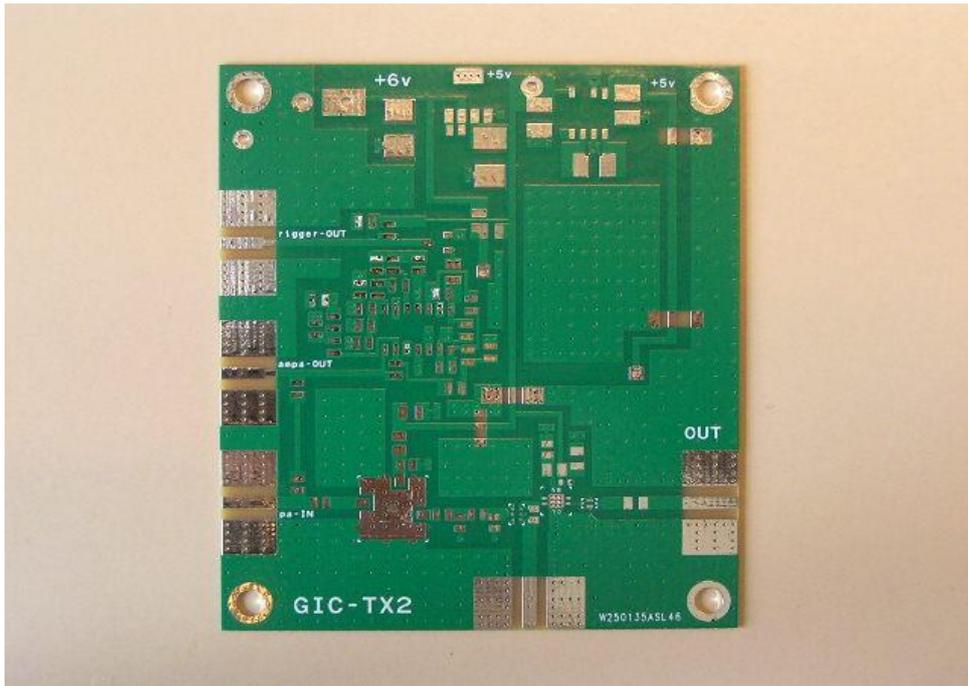


Figura 18: Placa del transmisor

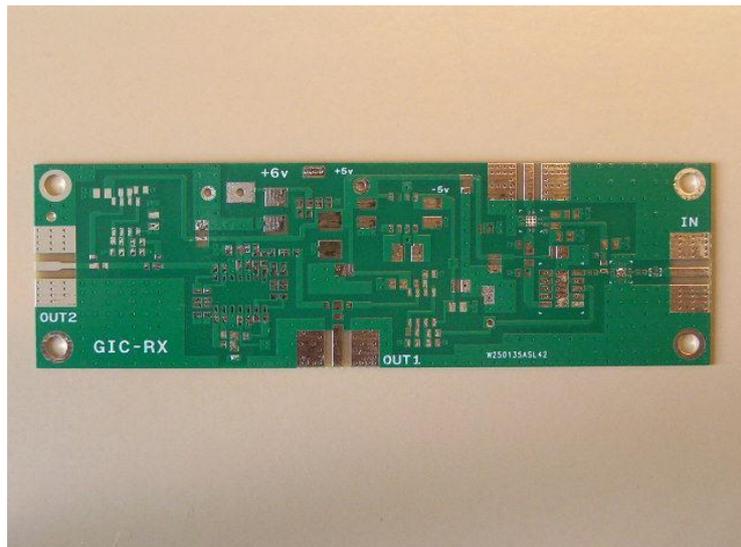


Figura 19: Placa del receptor

## 7. REALIZACIÓN DE MEDIDAS

En el laboratorio hemos hecho las medidas para cada una de las placas, empezando por el blanco activo y el divisor, ya que hicimos las mismas pruebas para ambos, después hicimos el estudio del receptor, y finalmente del transmisor.

En el puesto de trabajo dentro del laboratorio se cuentan con dos analizadores de espectros distintos y de los que haremos uso de ambos, el más “sencillo” de la marca Agilent que trabaja para frecuencias de entre 9 kHz y 6,7 GHz lo utilizaremos para el estudio del blanco activo, el divisor y el receptor. Por otra parte, se dispone de otro más completo, de la casa Rohde, que cubre la banda entre 20 Hz y 40 GHz, para trabajar con la placa de transmisión.

Todas las capturas que se proporcionan son guardadas y descargadas directamente de ambos analizadores a partir de un tarjetero, ya que las capturas apenas requieren poco espacio en disco y, por lo tanto, hemos extraído la información de una manera más limpia y ordenada.

### 7.1. Medidas y caracterización del Blanco Activo

Para las mediciones en el blanco activo hemos hecho uso del generador de RF de laboratorio, que conectamos a la entrada del blanco activo y la salida del mismo al analizador de espectros de Agilent. Debemos tener en cuenta que el cable empleado para el generador de señales introduce una atenuación de unos 2 dB aproximadamente que debemos considerar en el ajuste de la amplitud de la señal del generador.

Una vez tenemos todo conectado, trabajando a la frecuencia de 5 GHz y ajustando la amplitud a -35 dBm en la entrada del blanco. Activamos la señal RF del generador y observamos en el analizador de espectros la salida del blanco activo. Haremos un barrido en frecuencia para comprobar el correcto funcionamiento en los 400 MHz del transmisor. Además, anotaremos el consumo en la fuente; para este caso de 140 mA.

En la *figura 20* se observa como la señal que obtenemos a la salida del blanco está centrada en 2,5 GHz y tiene un nivel de 0,23 dBm que es aproximadamente el nivel de potencia esperado, y además funciona correctamente en el ancho de banda de unos 400 MHz, que es el margen de frecuencia a la que se debe trabajar.

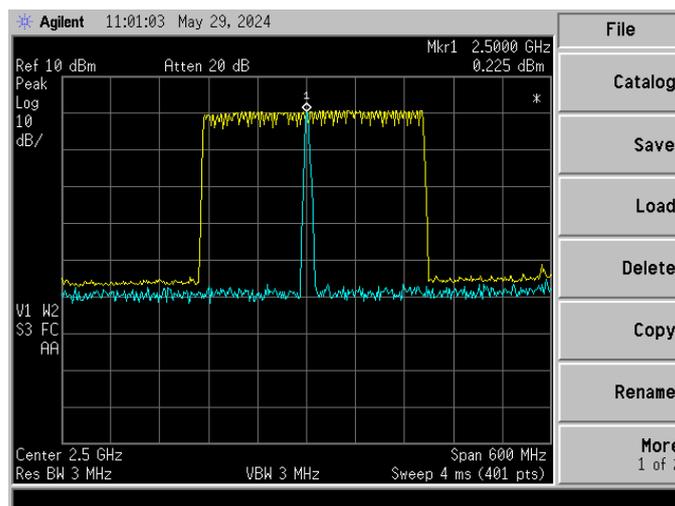


Figura 20: Señal a la salida del blanco activo con  $P_{in} \geq -35$  dBm

Ahora buscaremos cual es el mínimo de señal para el cual el blanco activo sería capaz de funcionar correctamente, trabajando siempre a la frecuencia de 5 GHz. Vamos reduciendo desde el mando de amplitud del generador el nivel y observamos que cuando ponemos -42 dBm a la entrada del blanco, el nivel de señal a la salida cae unos 10 dB.

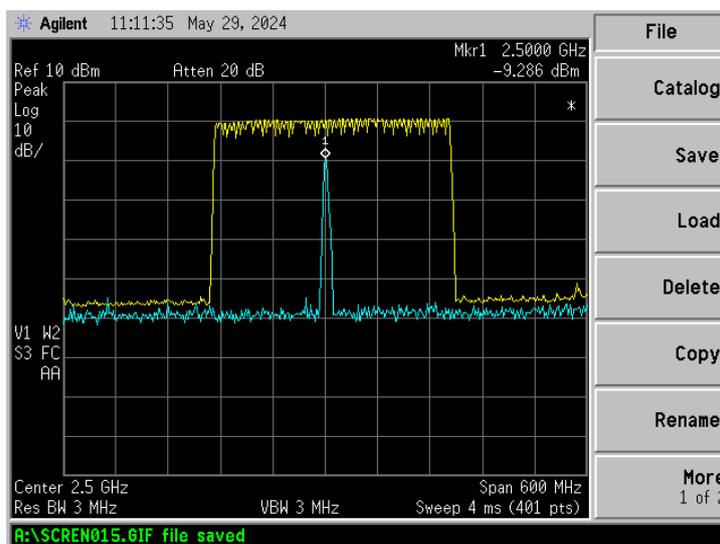


Figura 21: Señal a la salida del blanco activo con  $P_{in} \geq -42$  dBm

Es decir, la potencia mínima a la entrada del blanco activo para la cual obtenemos a la salida un nivel de 0,225 dBm sería de  $P_{min} > -42$  dBm.

Por último, aumentando “el spam” del analizador de espectros hasta 2,2GHz (ver figura 22) podemos comprobar la práctica ausencia de armónicos en la salida gracias al filtro de salida.

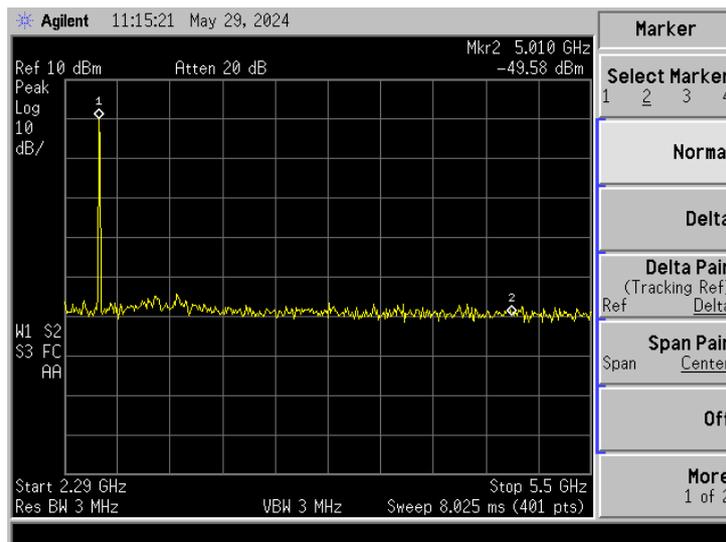


Figura 22: Armónico en la salida del blanco activo

Los resultados del blanco activo han salido como se esperaba desde con los datos del fabricante. En la *tabla 1* se muestra un resumen de las medidas.

Circuito	ENTRADA			SALIDA		Consumo (mA)
	Frecuencia (GHz)	Pmin (dBm)	BW (MHz)	Pout (dBm)	BW (MHz)	
Blanco activo	5	> -42	≥ 400	0,23	≥ 200	140

Tabla 1: Medidas del blanco activo

## 7.2. Medidas y caracterización del Divisor

Para el caso del divisor, haremos el mismo estudio que para el blanco activo, e iremos anotando los distintos resultados que vayamos obteniendo.

Empezaremos nuevamente conectando el generador de señales a la entrada del divisor, el generador de potencia también es conectado a la placa, y la salida del divisor directamente al analizador de espectros. El consumo obtenido para este caso es de 80 mA.

En la *figura 23* observamos nuevamente el ancho de banda para las frecuencias que es capaz de detectar el divisor, siendo de unos 400 MHz, la señal centrada en 2,5 GHz a la salida se observa que tiene un nivel de potencia de -4,5 dBm que es también la esperada para este caso e incluso inferior a los -5,0 dBm teóricos esperados.

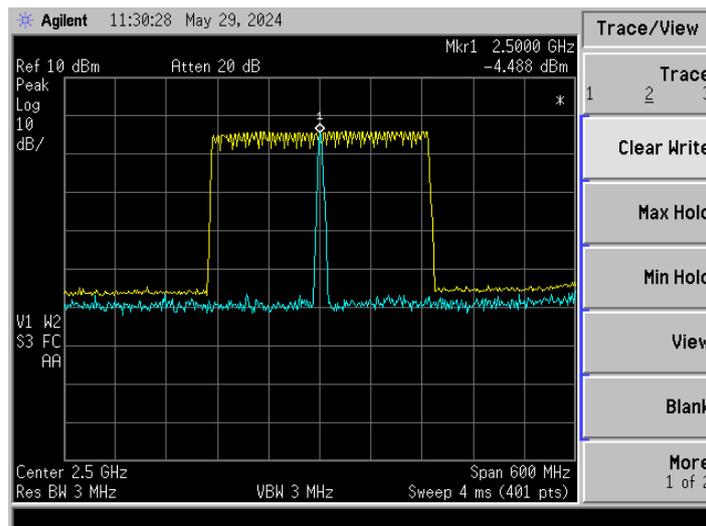


Figura 23: Señal a la salida del divisor con Pin  $\geq$  -22 dBm

A continuación, buscaremos la potencia mínima a la entrada del divisor para cual a la salida se pueda seguir obteniendo el nivel mencionado anteriormente.

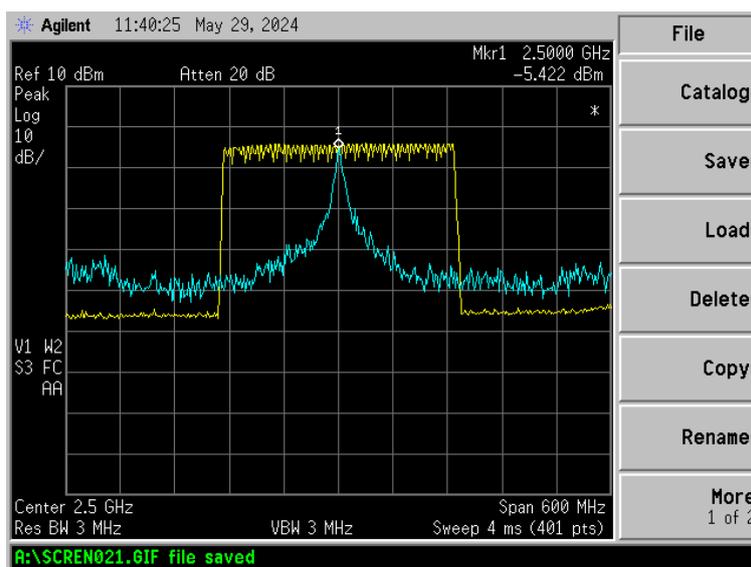


Figura 24: Señal a la salida del divisor con Pin  $\geq$  -28 dBm

Observamos que si bajamos la amplitud del generador de señales hasta un nivel de -28 dBm, el divisor ya no funciona correctamente. Por tanto, la potencia mínima a la entrada de nuestro divisor debe ser mayor de -28 dBm.

Por último, volveremos a buscar el armónico de la señal de salida, para ello aumentaremos el spam hasta 2,2 GHz.

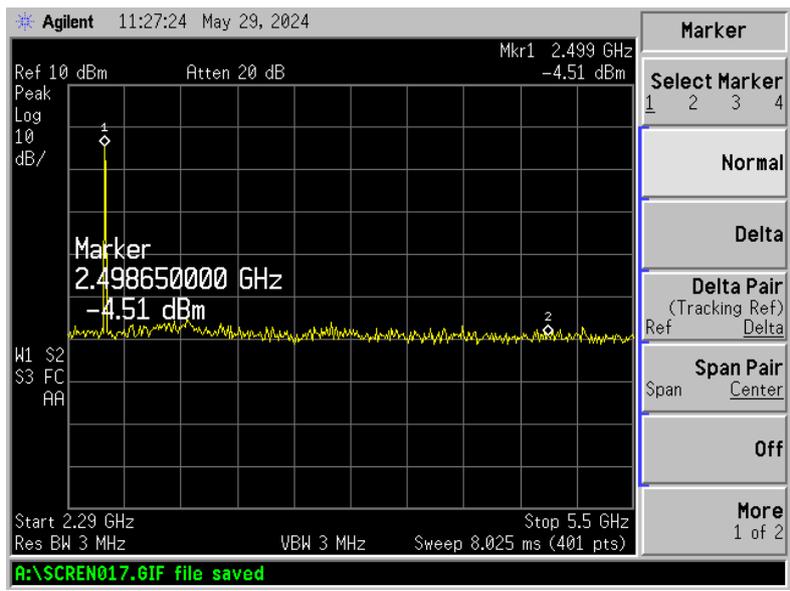


Figura 25: Armónico en la salida del blanco activo

Vuelve a ocurrir, al igual que en el caso del blanco, que el filtro RF seleccionado se encarga de eliminar este armónico y, por lo tanto, no es observable.

Todos los resultados obtenidos para el estudio del divisor son bastante coherentes con lo que se esperaba en el cálculo teórico.

Circuito	ENTRADA			SALIDA		Consumo (mA)
	Frecuencia (GHz)	Pmin (dBm)	BW (MHz)	Pout (dBm)	BW (MHz)	
Divisor	5	> -28	≥ 400	-4,488	≥ 200	140

Tabla 2: Medidas del divisor

### 7.3. Medidas y caracterización del Receptor

Para el caso del receptor, haremos dos estudios, empleando dos generadores de señales que trabajen a 5 GHz cada uno y posteriormente repetiremos el proceso para 2,5 GHz. Además, también estudiaremos el factor de ruido para ambas frecuencias mediante el método Y.

#### 7.3.1. Medidas y caracterización del Receptor a frecuencia de 5 GHz

Empezamos con la frecuencia de 5 GHz donde no se usa el divisor ni el blanco activo. Por lo tanto, uno de los generadores de señal lo ajustaremos a 5 GHz y con un nivel de -3 dBm lo conectaremos a la entrada del OL. Por otro lado, conectamos a la entrada de RF del receptor el otro generador de señales con una frecuencia de 5,010 GHz donde la amplitud la iremos variando en tres medidas distintas para observar cómo se comporta el circuito Empezaremos con una amplitud de -50 dBm e iremos subiendo el nivel 10 dB en dos ocasiones, para así tener el número de muestras que queremos. La salida del receptor la llevamos al analizador de espectros, y el

generador de potencia lo conectamos también a la placa, una vez tenemos todo el conexionado montado pasamos a observar la señal en el analizador. Cuando activamos el generador de potencia observamos que se tiene un consumo de 130 mA.

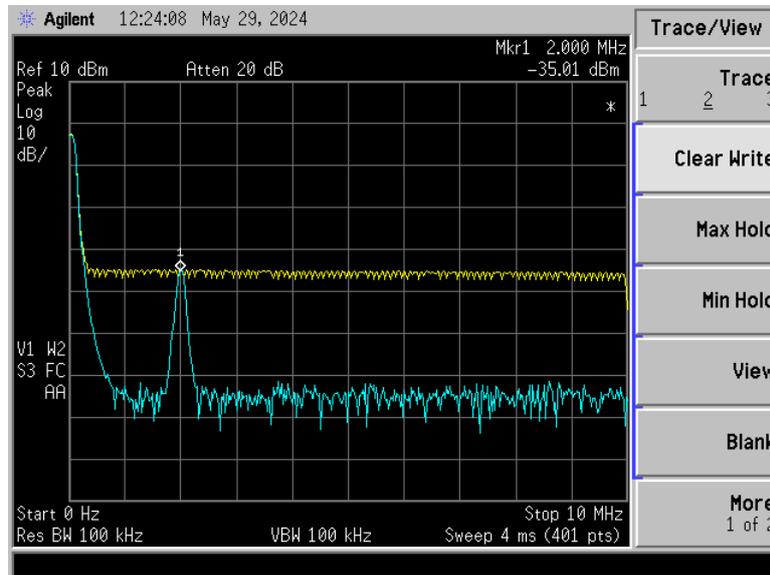


Figura 26: Nivel de señal en FI con una señal RF de -50 dBm ( $f = 5$  GHz)

En la *figura 26* se muestra la señal de FI donde hemos ajustado la amplitud del generador de señal que va conectado a la entrada RF del receptor con un nivel de -50 dBm. Se observa que se ha amplificado la señal 15 dB y la potencia a la salida es de -35,01 dBm.

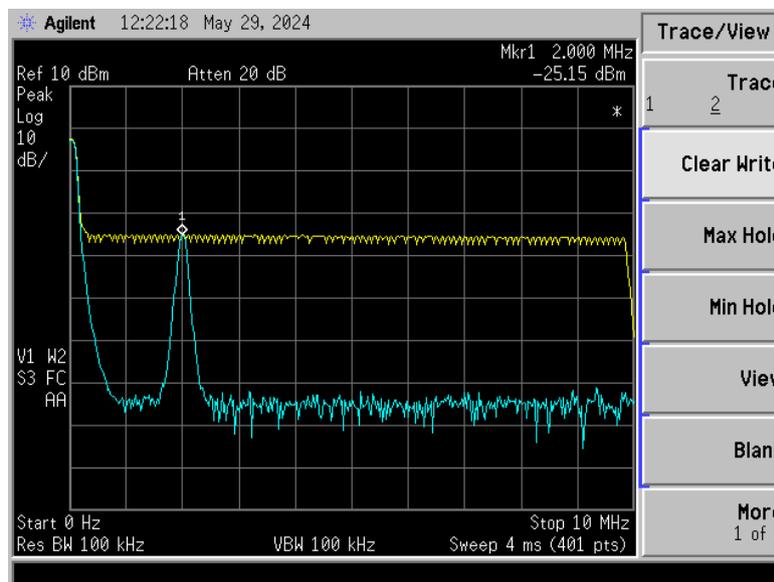


Figura 27: Nivel de señal en FI con una señal RF de -40 dBm ( $f = 5$  GHz)

En la gráfica de la *figura 27* se ve el resultado de trabajar con una amplitud de -40 dBm, donde vemos un nivel de señal a la salida de -25,15 dBm.

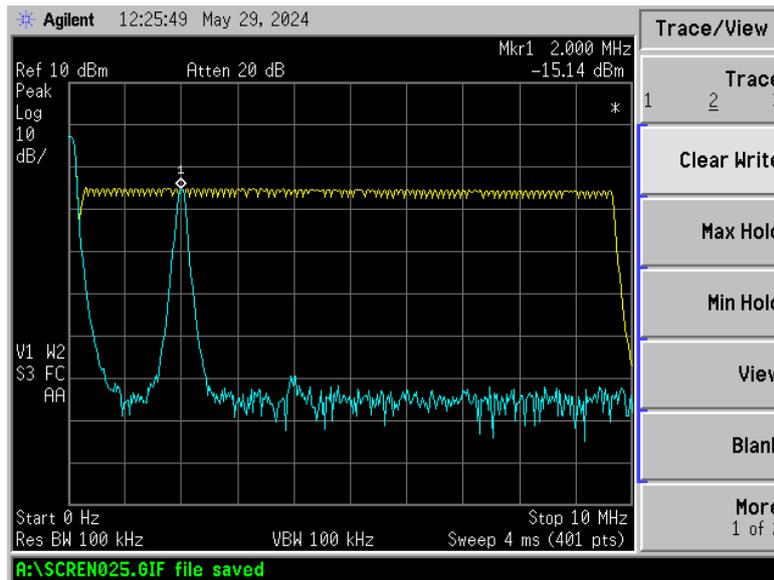


Figura 28: Nivel de señal en FI con una señal RF de -30 dBm ( $f = 5 \text{ GHz}$ )

En este último caso (figura 28), ajustamos la amplitud a -30 dBm y obtenemos a la salida -15,14 dBm. En los tres casos estudiados la señal se amplifica de manera correcta 15 dB.

Para la frecuencia estudiada, se empiezan a observar armónicos a partir de un nivel de -30 dBm a la entrada RF del receptor.

### 7.3.1.1. Figura de ruido en el Receptor a 5 GHz

Para calcular la figura de ruido, haremos uso de un tubo de ruido y estudiaremos la variación del nivel de la señal cuando el tubo está apagado y cuando está encendido. Haremos uso de los dos analizadores de espectros, el Agilent y el Rohde, para ver como varía el factor de ruido de un equipo a otro.

Colocamos el tubo de ruido a la entrada de la señal RF, le suministramos el voltaje necesario, que en nuestro caso era de 28 V mínimo para que tuviera un correcto funcionamiento y estudiamos la variación del nivel.

Empleando el analizador Rohde obtuvimos un nivel de señal de -109 dBm con el tubo apagado, y cuando lo encendimos el nivel aumentó hasta los -92 dBm.

El factor de ruido por el método Y sigue la siguiente ecuación:

$$F(dB) = ENR - 10 \log(Y - 1) \quad [11]$$

Siendo el valor de Y:

$$Y = \frac{P_{out,on}}{P_{out,off}} \quad [12]$$

El valor de ENR del tubo de ruido para la frecuencia de 5 GHz es de 19,7 dB.

Teniendo todos los datos, podemos obtener el factor de ruido para el analizador Rohde para la frecuencia de 5 GHz.

$$Y = \frac{P_{out,on}}{P_{out,off}} = -92 - (-109) = 17 \text{ dB} \rightarrow \text{lineal: } Y = 10^{17/10} = 50,12$$

$$F(\text{dB}) = 19,7 - 10 \log(50,12 - 1) = 2,79 \text{ dB}$$

Repetimos el mismo proceso, pero ahora utilizando el analizador de la marca Agilent, obteniendo como resultados del nivel de ruido de -120 dBm con el tubo apagado y de -102 dBm cuando estaba encendido. Por lo tanto, el resultado del factor de ruido fue el siguiente:

$$Y = \frac{P_{out,on}}{P_{out,off}} = -102 - (-118) = 16 \text{ dB} \rightarrow \text{lineal: } Y = 10^{16/10} = 39,81$$

$$F(\text{dB}) = 19,7 - 10 \log(39,81 - 1) = 3,81 \text{ dB}$$

Se obtiene un peor factor de ruido cuando empleamos el analizador Agilent para hacer la toma de medidas.

### 7.3.2. Medidas y caracterización del Receptor a frecuencia de 2,5 GHz

A continuación, repetiremos todo el proceso anterior, pero para la frecuencia de 2,5 GHz, que es como si estuviéramos empleando nuestro divisor estudiado anteriormente entre el transmisor y la entrada del OL del receptor. Por lo tanto, llevamos una de las salidas del generador de señales a la frecuencia de 2,5 GHz a la entrada del OL del receptor y una amplitud de -3 dBm, y a la frecuencia de 2,510 GHz y variando las amplitudes para tres medidas distintas lo conectaremos a la entrada RF del receptor. El consumo sigue siendo el mismo que para la frecuencia de 5 GHz, es decir, 130 mA.

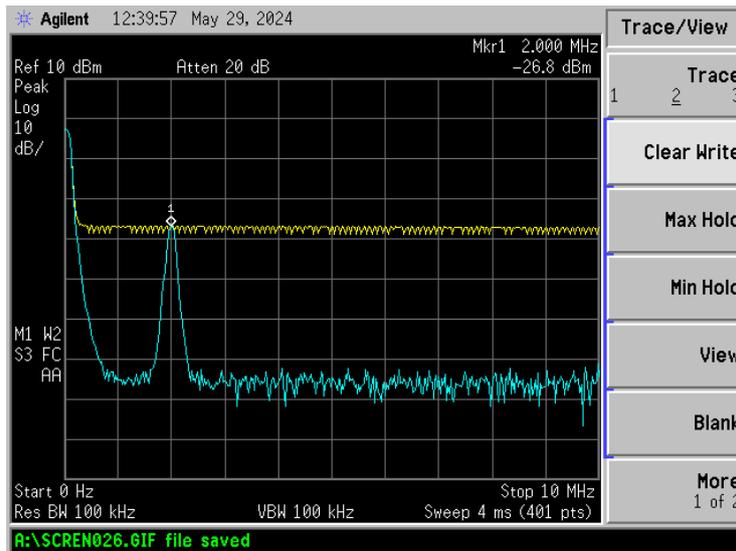


Figura 29: Nivel de señal en FI con una señal de -50 dBm ( $f = 2,5$  GHz)

Para la gráfica de la *figura 29*, en el generador de señales que va a la entrada de RF le hemos puesto una amplitud de -50 dBm, obteniendo a su salida una señal con un nivel de -26,8 dBm, por lo que ha amplificado la señal unos 23 dB aproximadamente.

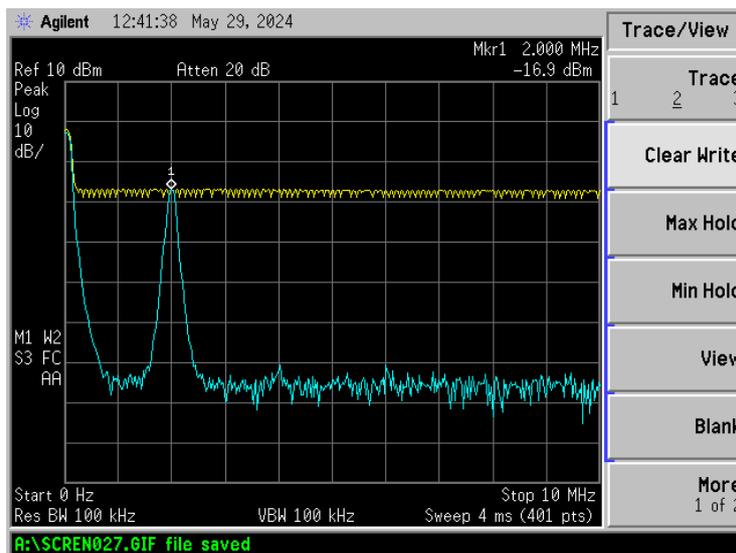


Figura 30: Nivel de señal en FI con una señal de RF de -40 dBm ( $f = 2,5$  GHz)

En la *figura 30* se muestra el resultado de emplear una amplitud total de -40 dBm, y se observa que se obtiene un nivel de señal de -16,9 dBm.

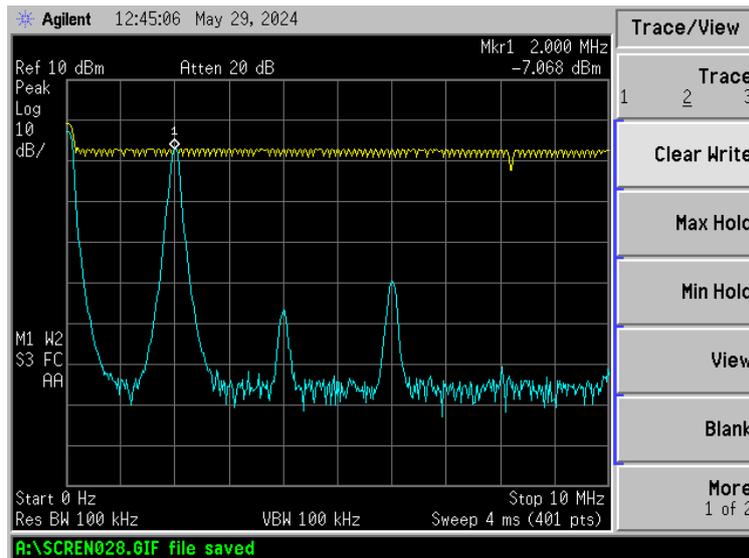


Figura 31: Nivel de señal en FI con una señal de RF de -30 dBm ( $f = 2,5$  GHz)

Por último, como se ve en la *figura 31*, se utiliza una amplitud total de -30 dBm y se obtiene una señal con un nivel de -7,068 dBm a la salida. Además, podemos observar distintos armónicos en esta última gráfica, siendo estos visibles a partir de una señal de RF mayor de -36 dBm.

### 7.3.2.1. Figura de ruido en el Receptor a 2,5 GHz

Para calcular la figura de ruido repetiremos el proceso explicado anteriormente para la frecuencia de 5 GHz. Y volveremos a utilizar los dos analizadores de espectros, el Agilent y el Rohde, para ver como varía el factor de ruido de un equipo a otro.

Colocamos el tubo de ruido a la entrada de la señal RF, le suministramos el voltaje necesario, que en nuestro caso era de 28 V para que tuviera un correcto funcionamiento y estudiamos la variación del nivel.

Empleando el analizador Rohde obtuvimos un nivel de señal de -110 dBm con el tubo apagado, y cuando lo encendimos el nivel aumentó hasta los -92 dBm.

El factor de ruido por el método Y sigue la siguiente ecuación:

$$F(dB) = ENR - 10 \log(Y - 1)$$

Siendo el valor de Y:

$$Y = \frac{P_{out,on}}{P_{out,off}}$$

El valor de ENR del tubo de ruido para la frecuencia de 2,5 GHz es de 20,7 dB.

Como tenemos todos los datos necesarios, calcula el factor de ruido para el equipo Rohde:

$$Y = \frac{P_{out,on}}{P_{out,off}} = -92 - (-110) = 18 \text{ dB} \rightarrow \text{lineal: } Y = 10^{18/10} = 63,1$$

$$F(\text{dB}) = 20,7 - 10 \log(63,1 - 1) = 2,77 \text{ dB}$$

Repetimos la toma de medidas para el analizador Agilent, obteniendo como resultados los niveles de -110 dBm con el tubo apagado y de -93 dBm cuando lo encendemos, por lo tanto, la figura de ruido obtenida sería la siguiente:

$$Y = \frac{P_{out,on}}{P_{out,off}} = -93 - (-110) = 17 \text{ dB} \rightarrow \text{lineal: } Y = 10^{17/10} = 50,12$$

$$F(\text{dB}) = 20,7 - 10 \log(50,12 - 1) = 3,79 \text{ dB}$$

Se obtiene un peor factor de ruido cuando empleamos el analizador Agilent para hacer la toma de medidas.

Un resumen de las medidas realizadas en el receptor se muestra en la *tabla 3*.

Circuito	ENTRADA			SALIDA		Ganancia (dB)	Figura de ruido Agilent (dB)	Figura de ruido Rohde (dB)	Consumo (mA)
	Frecuencia (GHz)	Nivel (dBm)	BW (MHz)	Nivel (dBm)	Armónicos observables				
Receptor	5	-50	≥ 400	-35,01	No	≈ 15	3,81	2,79	130
		-40		-25,15	No				
		-30		-15,14	Sí				
	2,5	-50	≥ 200	-26,8	No	≈ 23	3,79	2,77	
		-40		-16,9	No				
		-30		-7,068	Sí				

Tabla 3: Medidas del receptor

## 7.4. Medidas y caracterización del Transmisor

Para el estudio de la parte del transmisor haremos uso del analizador de espectros Rohde, además, utilizaremos un generador de rampas de Agilent para modular el VCO del transmisor y cargaremos con 50 Ω la salida del híbrido mientras medimos en la salida del transmisor.

Ajustamos el generador de rampas con una amplitud de 2 Vpp y con 2 V de continua, además se le añade una señal de control de 1 kHz que actúa de barrido, pero que a la hora de observarlo en el analizador bajaremos el barrido hasta 1 MHz para poder observar la señal de una manera más precisa. Además, debemos conectar también el generador de potencia al circuito que una vez activo tiene un consumo de 90 mA.

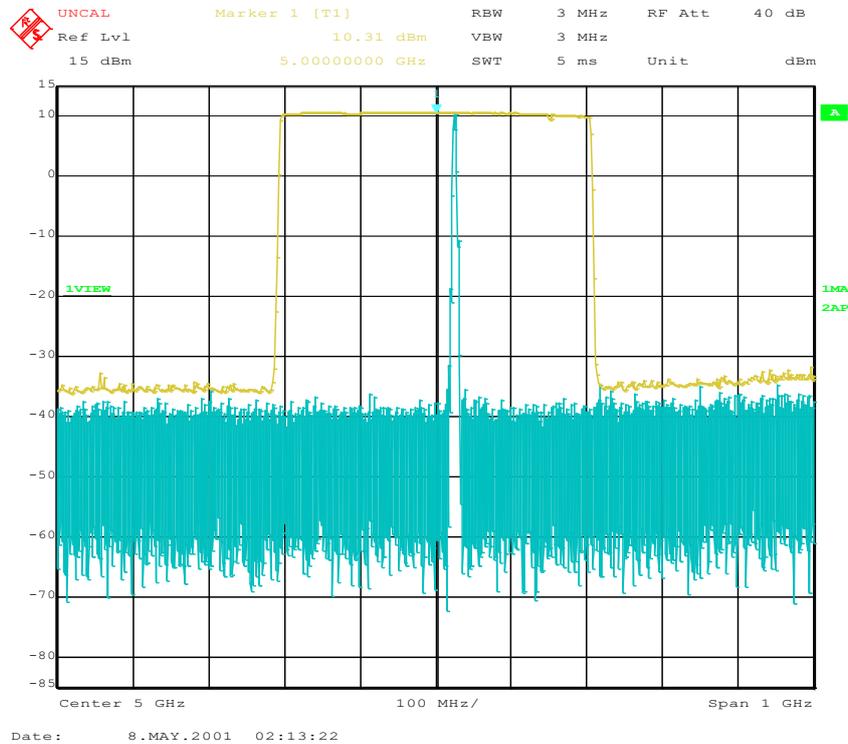


Figura 32: Nivel de señal a la salida del transmisor

En la gráfica de la *figura 32* se observa el nivel de la señal a la salida del transmisor que tiene un valor de 10,31 dBm que es el valor aproximado que se esperaba. Además, se tiene un ancho de banda de hasta 400 MHz para poder detectar señales que trabajen a frecuencias cercanas de los 5 GHz.

Ampliando “el spam”, se puede observar los armónicos que se generan a la frecuencia de 10 GHz. En la *figura 33* vemos como aparece el armónico para la frecuencia indicada anteriormente.

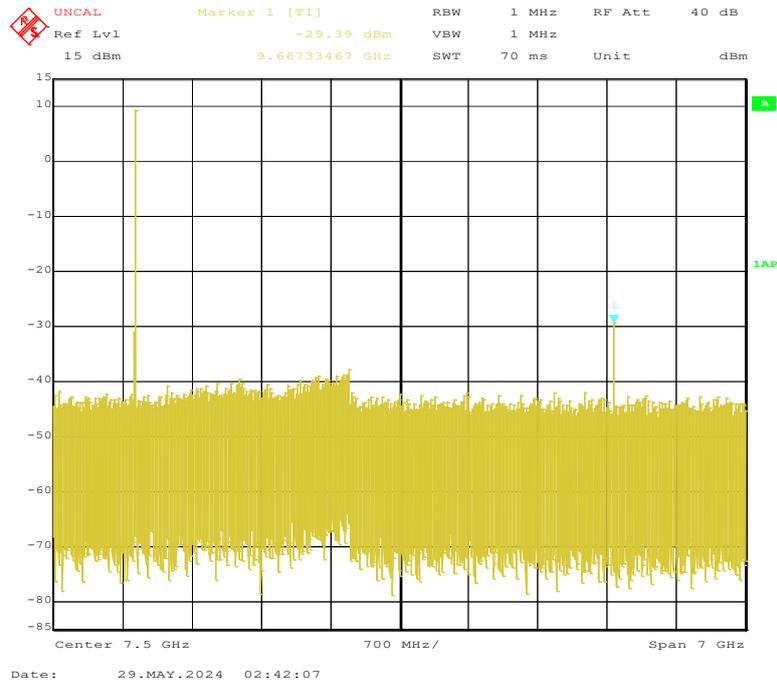


Figura 33: Armónico generado a la salida del transmisor

A continuación, estudiaremos el comportamiento a la salida del híbrido, para ello cargaremos la salida del transmisor con 50  $\Omega$  y conectaremos la salida del híbrido al analizador.

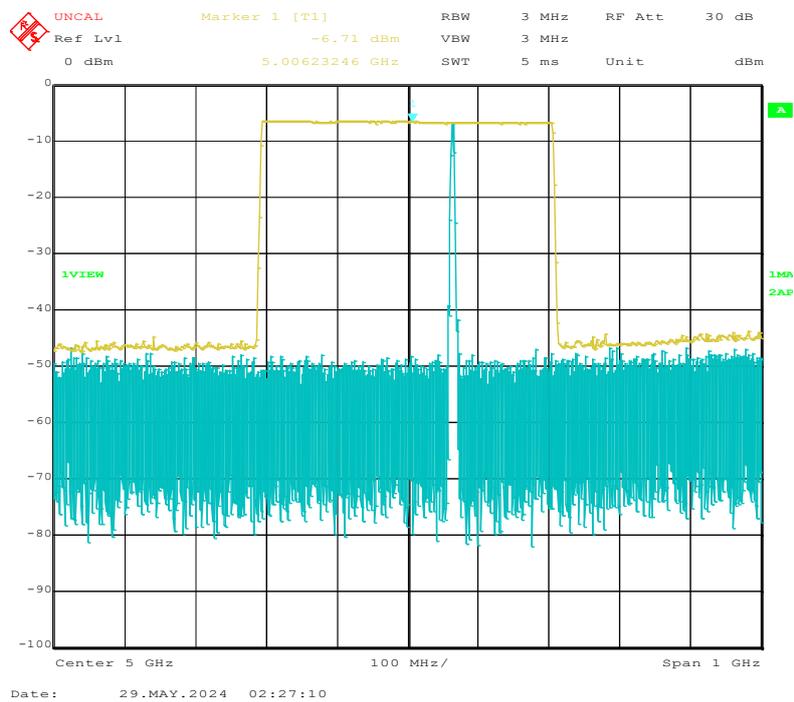


Figura 34: Nivel de señal a la salida del híbrido

En la figura 34 se observa que se obtiene un nivel de potencia de -6,71 dBm, a la cual se le ha añadido 1 dB de pérdidas que es introducido por el cable y, por lo tanto, el nivel de potencia real a la salida del híbrido sería -5,71 dBm que es el que teóricamente se esperaba. Además, se

comprueba como a la salida del transmisor un ancho de banda de 400 MHz. En la *tabla 4* se resumen los resultados de las medidas del transmisor.

Por último, le sustituimos la carga de salida del transmisor por una antena que teníamos en el laboratorio para ver su comportamiento, y se obtuvieron buenos resultados ya que el amplificador que hemos escogido en el diseño de nuestro transmisor hace que al tener la antena acoplada no de malos resultados ya que este actúa como aislador.

Circuito	RAMPA		SALIDA				Consumo (mA)
	Frecuencia	Nivel	BW (MHz)	Nivel Híbrido (dBm)	Nivel RF Tx (dBm)	Armónicos RF observables	
Transmisor	2kHz	2+2Vpp	≥ 400	-5,71	10,31	2º < 40 dB	90

*Tabla 4: Medidas del transmisor*

### 7.5. Tabla resumen de los circuitos independientes

Circuito	ENTRADA				SALIDA			Ganancia (dB)	Figura de ruido Agilent (dB)	Figura de ruido Rohde (dB)	Consumo (mA)
	Frecuencia (GHz)	Nivel (dBm)	BW (MHz)	Pmin (dBm)	Nivel (dBm)	BW (MHz)	Armónicos observables				
Blanco activo	5	-33	≥ 400	> -42	0,23	≥ 200	No	> 42 dB	-	-	140
Divisor	5	-20	≥ 400	> -28	-4,488	≥ 200	No	> 23 dB	-	-	80
Receptor	5	-50	≥ 200	-	-35,01	≥ 200	No	≈ 15	3,81	2,79	130
		-40		-	-25,15		No				
		-30		-	-15,14		Sí				
	2,5	-50		-	-26,8		No	≈ 23	3,79	2,77	
		-40		-	-16,9		No				
		-30		-	-7,068		No				
Transmisor Tx/h3dB	Rampa/2kHz	2+2Vpp	-	-	10,31	≥ 400	Sí	-	-	-	90
					-5,71						

Tabla 5: Tabla resumen

## 7.6. Medida del sistema completo empleando un cable

Una vez hemos estudiado cada uno de los circuitos de manera independiente conectaremos todas las placas entre sí para hacer un estudio general de nuestro sistema.

El esquema del circuito quedaría de la siguiente manera:

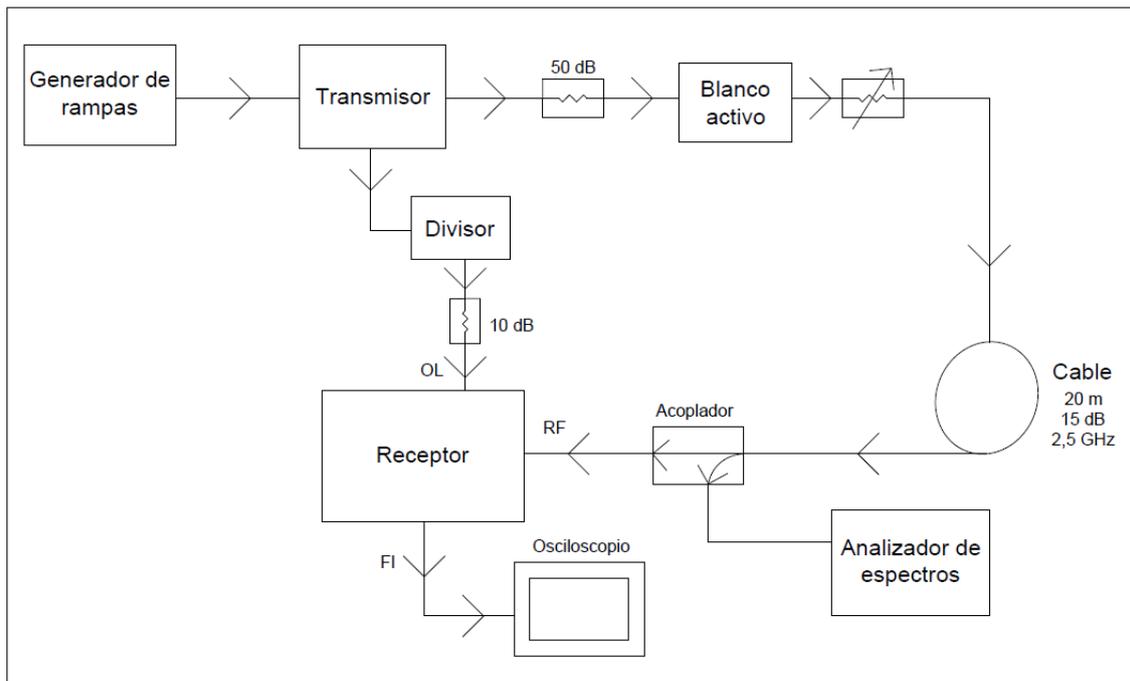


Figura 35: Caracterización del radar usando un cable

Se observa que hemos incluido algunos atenuadores entre el transmisor y el blanco activo y entre el divisor y la entrada al OL del receptor para que los niveles de potencia a la entrada de cada placa se ajusten a los teóricamente estudiados, además de un atenuador variable a la salida de nuestro blanco activo al cual le tenemos que sumar la atenuación de 15 dB cuando se trabaja a la frecuencia de 2,5 GHz que introduce el cable de 20 metros que empleamos.

Una vez tenemos el circuito montado conectamos el generador de rampas al transmisor y generamos la rampa a 2 KHz, y encendemos el generador de potencia que también está conectado al circuito, donde observamos en el mismo que el circuito en su conjunto tiene un consumo de 460 mA. Aunque la frecuencia de la rampa no es relevante para el tipo de pruebas que se desean hacer, se eligió 2 kHz por ser un valor usado en aplicaciones similares; en general interesa que sea lo bastante alta para poder detectar el blanco y a su vez, lo más baja posible para facilitar la realización de los circuitos de generación de moduladora y de filtrado de la señal de FI.

Para el sistema completo empleando el cable solo hemos tomado 3 medidas que observaremos en un osciloscopio, donde únicamente iremos variando el valor de atenuación de nuestro atenuador para ver cómo se comporta la señal procedente del blanco activo en el osciloscopio.

El primer estudio se hizo ajustando la atenuación a 50 dB que sumado a los 15 dB que introduce el cable para la frecuencia de trabajo suman un total de 65 dB de atenuación. Con las siguientes tres medidas lo único que se hizo fue aumentar 10 dB el atenuador variable, para reducir la potencia de la señal que llega al receptor en 10 dB para los siguientes casos a estudiar. Dado que la salida del blanco activo es de unos 0dBm el nivel a la entrada del receptor con 65dBs de atenuación sería de -65dBm.

Los resultados observados en el osciloscopio fueron los siguientes:



Figura 36: Potencia de señal en la entrada del receptor de -65 dBm

La figura 36 se corresponde a la señal de FI en el osciloscopio para el nivel de -65dBm a la entrada del receptor. El tono correspondiente al blanco activo (con el cable usado) se encuentra en la frecuencia de 42 KHz. Se puede observar que la señal medida se corresponde con un periodo de la rampa.

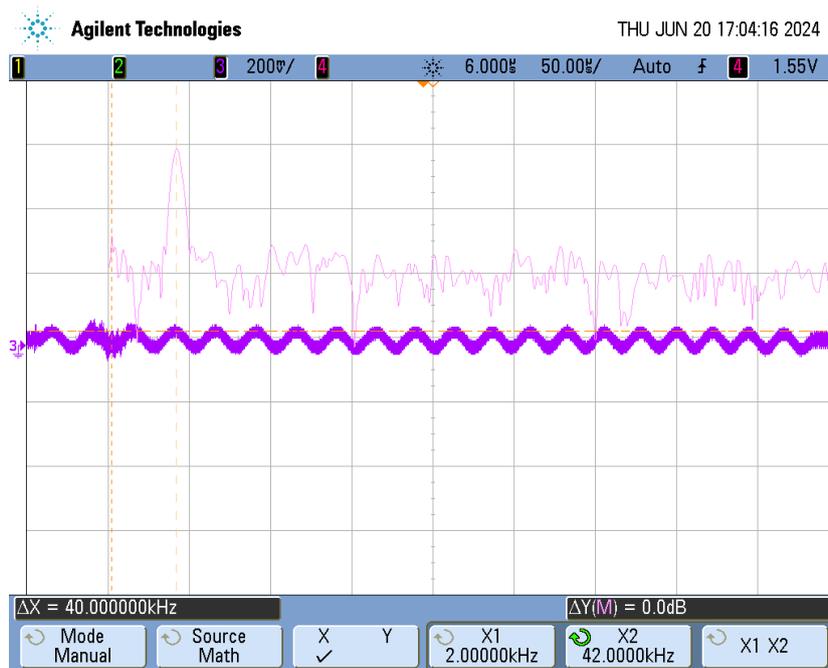


Figura 37: Potencia de señal en la entrada del receptor de -75 dBm

En la *figura 37* se muestra la señal con un nivel de potencia de -75 dBm en el receptor, sigue en la misma frecuencia de 42 kHz, ya que la distancia del cable es la misma y sigue detectando el blanco.

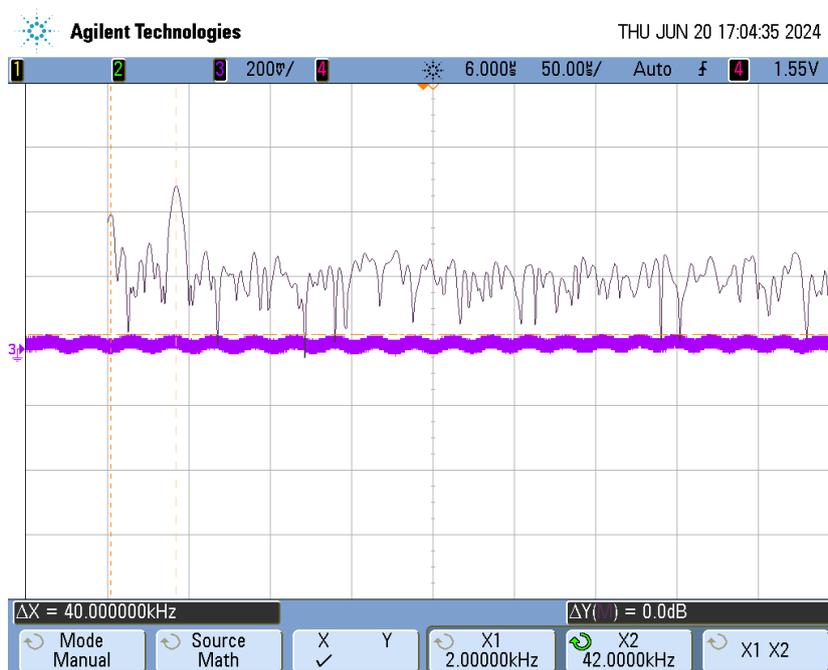


Figura 38: Potencia de señal en la entrada del receptor de -85 dBm

A continuación, observamos la señal procedente del blanco (*figura 38*) situada a la misma frecuencia tras aumentar la atenuación en 10dBs. Se ve que cuando al receptor le llega un nivel

de señal de -85 dBm se observa la señal del blanco, pero no con tanta precisión que los casos anteriores.

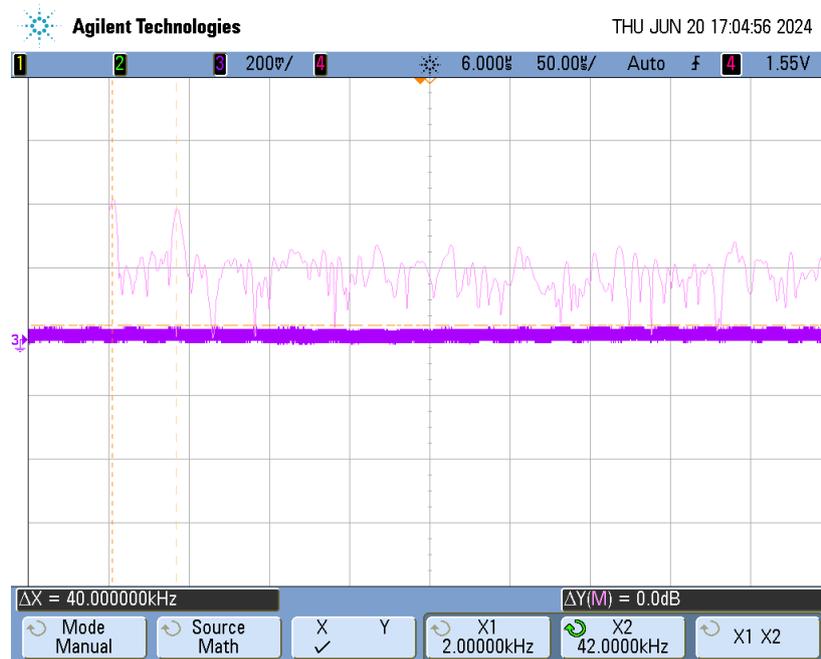


Figura 39: Potencia de señal en la entrada del receptor de -95 dBm

En este último caso, hemos ajustado el circuito para que la potencia a la entrada del receptor sea de -95 dBm. En la *figura 39* se observa la señal del blanco, pero ya el sistema empieza con dificultades para detectarlo. Cuando al receptor le llega una potencia inferior a los -105 dBm la señal ya no es observable en el osciloscopio, por lo que no estaríamos detectando el blanco.

## 7.7. Medida del sistema completo empleando dos cables

Hicimos un último estudio en el que a la salida del atenuador variable, colocamos un divisor para que la señal sea transmitida a través de dos cables de distinta longitud y así simular dos blancos diferentes. Al final de cada cable se conectan nuevamente a otro divisor para que ambas señales lleguen finalmente al receptor y puedan ser visualizadas.

El esquema del nuevo circuito quedaría de la siguiente manera:

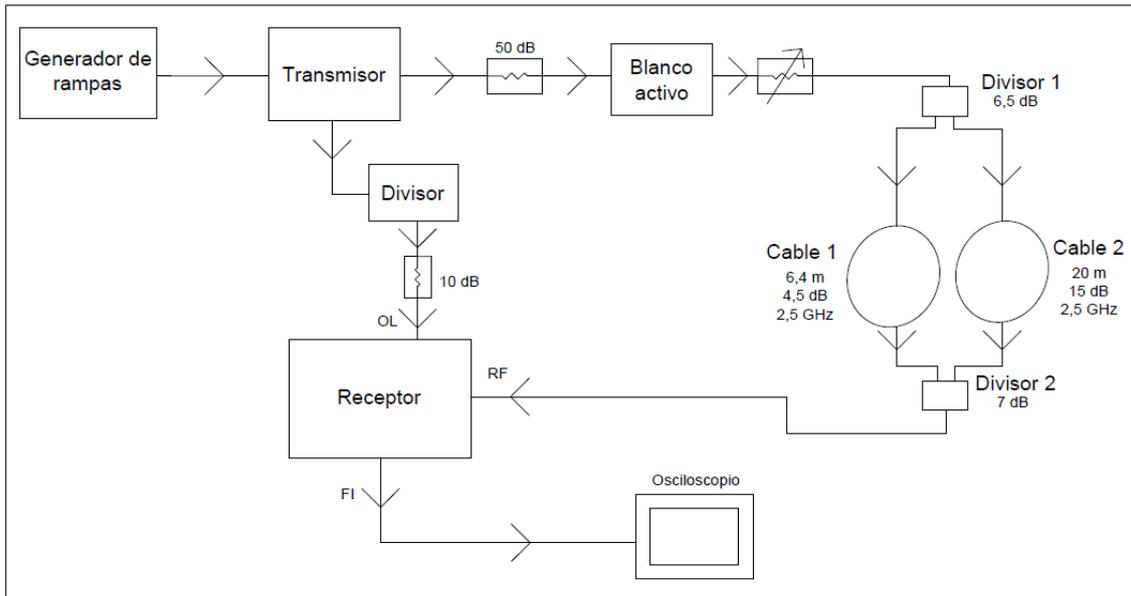


Figura 40: Caracterización del radar usando dos cables

Observamos en el esquema que cada uno de los divisores introduce una atenuación de 6,5 dB y de 7 dB respectivamente que deberemos tener en cuenta para el estudio de la señal procedente de “ambos blancos” que llega al receptor.

El estudio que haremos será el mismo que para el caso de un solo cable, donde iremos variando la atenuación en el atenuador variable, empezamos haciendo una toma de medidas con una atenuación de 40 dB a la cual le tendremos que añadir la atenuación de ambos divisores y de cada uno de los cables, e iremos aumentando nuestra atenuación en 10 dB.

Para este primer caso observamos lo siguiente en el osciloscopio:

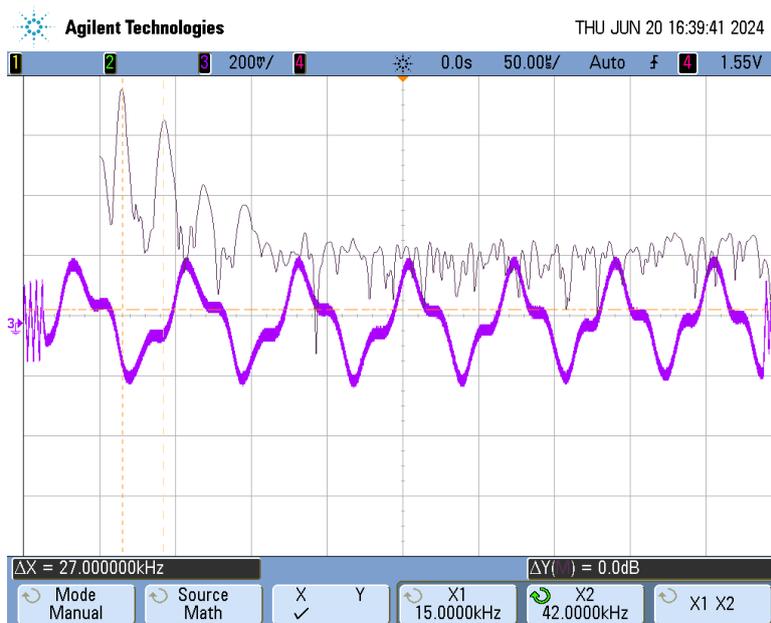


Figura 41: Señal de FI con dos blancos: uno a 6,4 m (-58 dBm) y otro a 20 m (-68,5 dBm). Atenuador variable a 40 dB

Observamos en la *figura 41* dos señales con distinto nivel en el osciloscopio, esto se debe a la atenuación introducida por cada uno de los cables a la frecuencia de 2,5 GHz.

El nivel de señal que llega al receptor para “cada uno de los blancos” es diferente. Esto se debe a la longitud del cable empleado para cada blanco, haciendo simular que cada uno de ellos está situado a distancias distintas. Debemos de tener en cuenta la atenuación de cada uno de los divisores, además de la que ajustamos nosotros en el atenuador variable, ya que esto degrada el nivel de señal o potencia que le llega de cada uno de los blancos al receptor. Para el cable número 1, el cual simula el “blanco 1”, al ser más corto y atenuar menos la señal que se obtiene en el receptor tiene un nivel de potencia de -58 dBm, teniendo en cuenta todos los componentes que hemos añadido y que alteran la señal. Para el caso del cable 2 o “blanco 2”, obtenemos un nivel de potencia en el receptor de -68,5 dBm.

Esto se puede observar en la imagen adjunta anterior, en la que la señal con nivel más alto corresponde con el cable 1 o “blanco 1” situado a una frecuencia de 15 kHz, en cambio, para el cable 2 o “blanco 2” el nivel de la señal es menor y está desplazada a la frecuencia de 42 kHz.

Se observa un tercer y cuarto nivel de señal mucho menor que los dos primeros a la frecuencia de 68 kHz y 96kHz, estos pueden ser causados por la reflexión del primer cable.

Repetimos el mismo procedimiento, pero ahora ajustando una atenuación de 50 dB en el atenuador variable, por lo que los niveles de ambos blancos se reducirán en 10 dBm, siendo para el “blanco 1” de -68 dBm y para el “blanco 2” de -78,5 dBm.

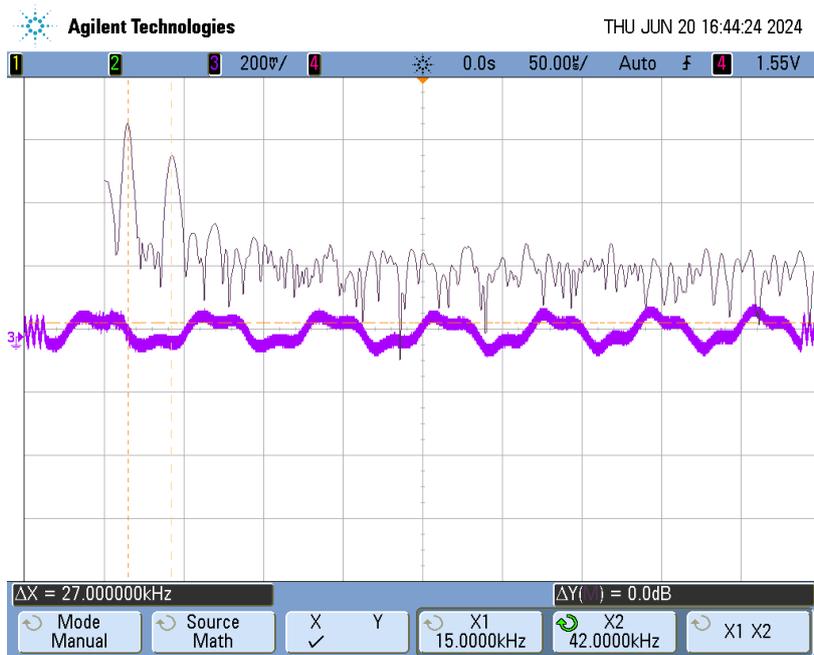


Figura 42: Señal de FI con dos blancos: uno a 6,4 m (-68 dBm) y otro a 20 m (-78,5 dBm). Atenuador variable a 50 dB  
 Seguimos observando de manera precisa los niveles a la frecuencia de 15 kHz y a 42 kHz procedente de los dos blancos 1 y 2 respectivamente. Además, ya no se observan los niveles generados en el caso anterior en las frecuencias de 68 kHz y 96 kHz.

Por último, ajustamos el atenuador variable a 60 dB y observamos lo siguiente:

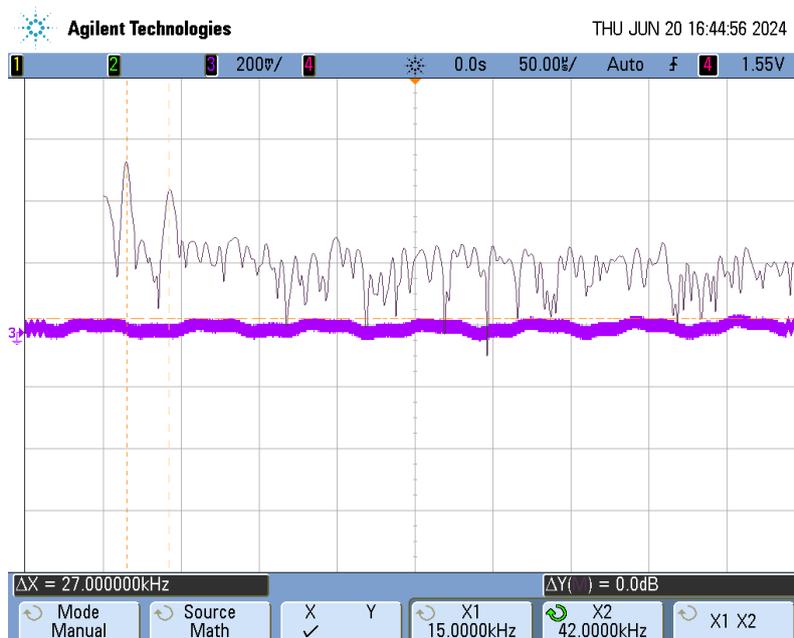


Figura 43: Señal de FI con dos blancos: uno a 6,4 m (-78 dBm) y otro a 20 m (88,5 dBm). Atenuador variable a 60 dB

Podemos ver en la *figura 43* que se siguen detectando ambas señales y su nivel se ha ido reduciendo considerablemente. Para el “blanco 1” llega un nivel de señal al receptor de -78 dBm a la frecuencia de 15 kHz y para el “blanco 2” de -88,5 dBm a la frecuencia de 42 kHz.

Una vez terminamos este experimento, cambiamos el cable que estaba conectado a la salida del atenuador variable y lo conectamos a su entrada, por lo que a la salida de este estaría el blanco activo. Pusimos el sistema en marcha y seguía detectándose el blanco ya que continuamos observando su nivel de señal en el osciloscopio. Esto se debe a que, aunque pongamos el cable a la entrada, el sistema seguiría funcionando ya que el batido de FI depende de la distancia al blanco y del ancho de banda del barrido, pero no de la frecuencia de RF.

## 7.8. Medida del sistema en cámara anecoica

Por último, realizamos una toma de medidas en una cámara anecoica que se disponía en el laboratorio.

Una cámara anecoica [10] es una sala especialmente diseñada para eliminar cualquier tipo de reflexión causada por ondas acústicas o electromagnéticas en todas sus superficies, incluyendo las paredes, el suelo y el techo.

Estas salas suelen tener paredes recubiertas con cuñas en forma de pirámide, cuyas bases están apoyadas sobre la pared. Se utilizan materiales que absorben el sonido, como la fibra de vidrio, la lana de roca o la espuma porosa, para aumentar la dispersión o difusión del poco sonido que no es absorbido. El rango de frecuencias de la cámara anecoica del Grupo de Investigación cubre la banda entre 2 y 18 GHz con una capacidad de absorción entorno al 95%.

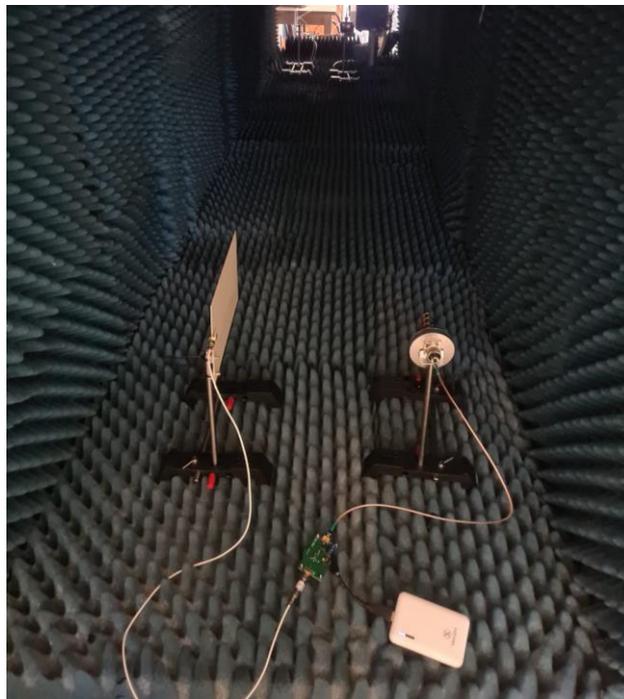
En nuestro caso, la cámara estaba abierta por los dos extremos para conectar las placas del sistema y las antenas, así como los equipos de medida: osciloscopio, el generador de rampas y la fuente de DC.

En la *figura 44* se muestra el lado del transmisor que comprende el transmisor, el divisor, receptor y las antenas de transmisión y recepción. Fuera de la cámara se muestra la instrumentación sobre un carrito.



*Figura 44: Montaje de medidas del Tx-Rx en la cámara anecoica*

En el otro lado (ver *figura 45*), se ubica el blanco activo con su entrada conectado a la antena receptora, y su salida a la antena repetidora (o de transmisión del blanco). Además, se utilizó una batería para suministrar la DC a la placa del blanco.



*Figura 45: Montaje de medidas en el lado del blanco activo*

En la etapa de transmisión se utilizó una antena de bocina que trabaja en la banda entre 4 y 5 GHz. La entrada del blanco activo se conectó a una antena en espiral también en 5 GHz.

Por otro lado, para la salida del blanco activo y para la entrada del receptor (en 2,5 GHz) se utilizaron dos antenas iguales tipo “vivaldi” que trabajan entre 2,5 y 5 GHz.

A la entrada al receptor se añadió el filtro en 2,5 GHz para evitar que parte de la señal de la etapa de transmisión pudiera llegarle al receptor y provocar interferencias en la señal deseada.

Una vez teníamos todo el montaje hecho, pusimos en marcha en el generador de rampa y el de potencia para observar si se detectaba la señal, la primera señal que obtuvimos se observaba en el osciloscopio que tenía gran nivel de voltios pico a pico en el canal correspondiente a la rampa, esto se debe a que al blanco activo le estaba llegando un alto nivel de potencia a su entrada, por lo que colocamos un atenuador de 10 dB para disminuir la potencia transmitida por el blanco activo. Finalmente, pudimos llevar el cabo el experimento donde obtuvimos resultados favorables en el estudio.

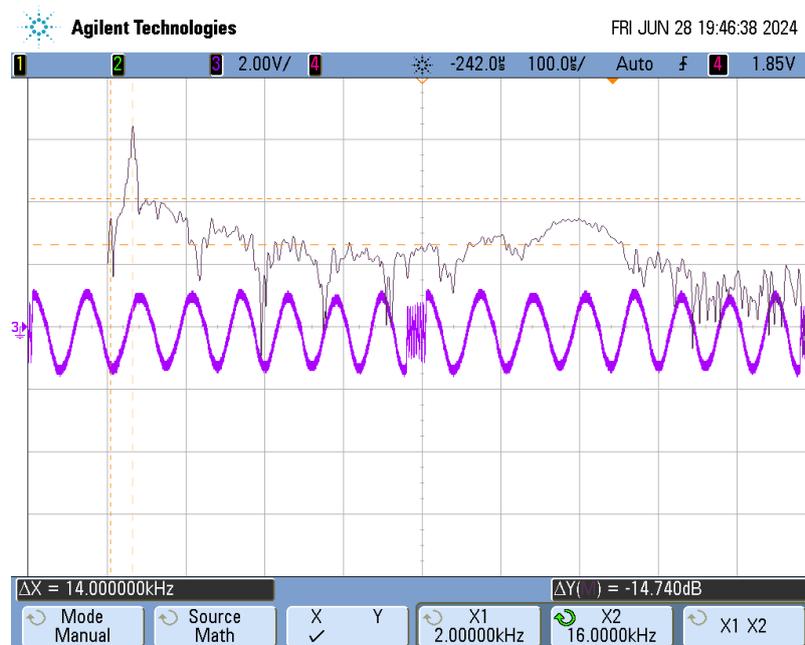


Figura 46: Señal de FI procedente del blanco con dos ciclos de rampa

En la *figura 46* observamos que para la frecuencia de 16 kHz detectamos la señal procedente del blanco (a unos 3,5m). La imagen extraída del osciloscopio fue ajustada para que pudiéramos visualizar dos ciclos de rampa. También se extrajo otra imagen (ver *figura 47*) ajustándola para un único ciclo de rampa del generador.

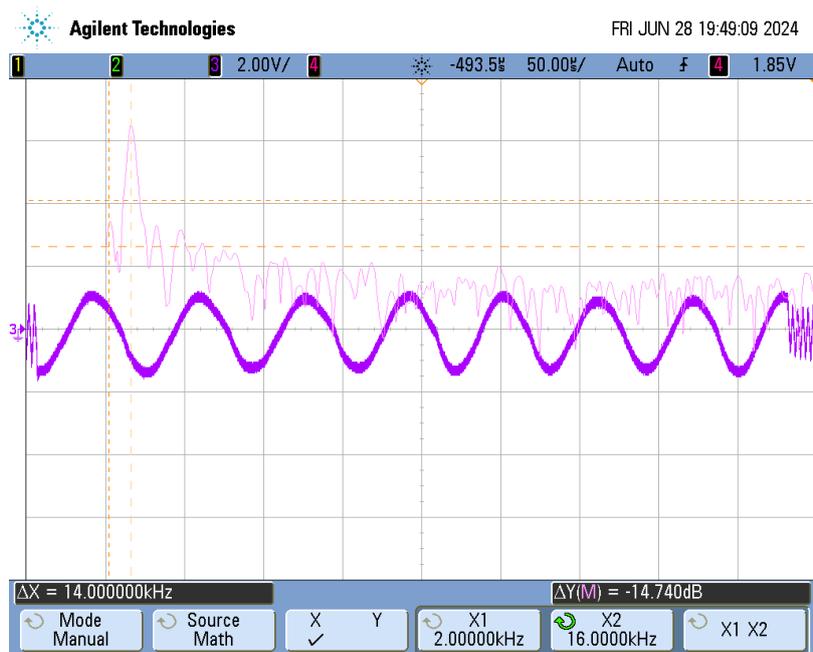


Figura 47: Señal de FI procedente del blanco con un ciclo de rampa

Además, variamos un poco la orientación de las antenas para ver si se seguía detectando el blanco y así era, se reducía el nivel de la señal, pero la seguíamos observando en el osciloscopio.

Por último, le quitamos el filtro que teníamos entre la antena receptora y la placa receptora y seguíamos observando la señal, sin embargo, si orientábamos la antena receptora un poco hacia la antena transmisora de bocina se observaba interferencias en la señal del osciloscopio, y obtenemos una señal indeseada, ya que parte de la señal que es transmitida se “cuela” en la antena receptora directamente. En cambio, cuando tenemos el filtro puesto, a la placa solo le llega la señal que opera en la frecuencia de 2,5 GHz y no aparecen interferencias en la señal deseada.

Podemos decir que todos los estudios o experimentos que hemos hecho durante el desarrollo de este TFG han sido satisfactorios y se han obtenido todos los resultados previstos.

## 8. CONCLUSIONES

Una vez finalizado este TFG se puede decir que se han abordado y superado los desafíos relacionados con el diseño, el desarrollo y el rendimiento del sistema radar CW-FM usando un blanco activo. A continuación, se detallarán todos los objetivos que se han cumplido y las posibles líneas futuras para llevar a cabo una mejora del sistema creado.

### 8.1. Objetivos

El punto de partida en este TFG es el de crear un circuito a partir de componentes que tenemos en el laboratorio que sea capaz de detectar blancos pequeños.

Para ello, primero nos hemos encargado de hacer un estudio sobre el funcionamiento y aplicaciones de los radares de CW-FM, para así conocer sus principales limitaciones y ver si podemos ver otras posibilidad de uso a este tipo de radares como cuando usamos los blancos activos.

A continuación, pasamos a hacer un estudio de las distintas topologías que podíamos diseñar tanto para la parte de transmisión como de recepción, así como la del blanco activo la cual también fue diseñada en este trabajo. Para ello, a partir de los componentes existentes evaluamos si fuese más eficiente dividir o multiplicar la frecuencia de la señal de trabajo, y a partir de las características de los componentes seleccionados hacer una estimación sobre los distintos niveles de señal que existen en diferentes puntos del sistema y, además, sacar un cálculo teórico en condiciones ideales para estimar el alcance que tendría el radar a diseñar.

Una vez empezamos a realizar todas las medidas en el laboratorio, tanto de manera independiente, para cada subsistema como para el circuito completo, obtuvimos que los resultados eran los esperados en las estimaciones y cálculos teóricos que habíamos realizado previamente.

### 8.2 Líneas futuras

Al fin y al cabo, nuestro estudio se ha realizado con componentes que teníamos presentes en el laboratorio a excepción de alguno que a fuerza mayor tuvo que ser adquirido.

Es por esto, que nuestro sistema podría ser mejorado y tener una mayor efectividad si cambiásemos algunos de los componentes o hubiésemos escogido otra topología distinta, lo cual podría detectar este tipo de blancos a una distancia mayor y con niveles de señal menores.

Uno de elementos especialmente a mejorar sería el blanco activo. Habría que hacerlo con características similares, pero con un tamaño mucho menor, especialmente el relacionado con las antenas. Esto también se aplicaría al Tx-Rx que aún, siendo complejo sería algo más viable que en el blanco activo.

Además, al sistema realizado faltaría añadirle ciertas funciones que se han realizado con la instrumentación, así como añadir el filtrado y el procesado de la señal de FI.

Por otro lado, nos parece interesante comprobar la viabilidad de utilizar radares comerciales en las bandas K y V así como otros métodos de medida donde destacaríamos el LiDAR.



## Bibliografía

- [1] F. Eugenio y F. J. Marcello, *Fundamentos de Radar*. Editorial Servicio de Publicaciones y Difusión Científica de la ULPGC; N.º 1 edición, 2002, ISBN: 978-8496131088.
- [2] “LiDAR is a technologies getting used in multiple applications.” Accessed: Jul. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.geospatialworld.net/videos/lidar-is-among-the-array-of-technologies-getting-used-in-multiple-applications/>
- [3] “ToF: Time-of-Flight - Overview, Principles, Advantages.” Accessed: Jul. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.avsystem.com/blog/linkyfi/time-of-flight/>
- [4] “Fundamentos de radar - La Ecuación de Radar.” Accessed: Abr. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.radartutorial.eu/01.basics/La%20Ecuaci%C3%B3n%20de%20Radar.es.html>
- [5] Merrill I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, McGraw-Hill International Editions.
- [6] “Qué es el radar secundario de vigilancia o SSR - One Air.” Accessed: Jun. 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.oneair.es/radar-secundario-vigilancia-ssr/>
- [7] Alejandro Fernández Estévez, “Sistemas Anticolisión para tendidos eléctricos embarcado en un UAV ligero”. *Trabajo Fin de Máster, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria*, Junio, 2015.
- [8] “Propagación por espacio libre - Wikipedia, la enciclopedia libre.” Accessed: Jul. 03, 2024. [Online]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Propagaci%C3%B3n\\_por\\_espacio\\_libre](https://es.wikipedia.org/wiki/Propagaci%C3%B3n_por_espacio_libre)
- [9] “Filtro adaptado - Wikipedia, la enciclopedia libre.” Accessed: Jul. 03, 2024. [Online]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Filtro\\_adaptado](https://es.wikipedia.org/wiki/Filtro_adaptado)
- [10] “¿Qué es una cámara anecoica? Definición y Ejemplos ▷ EDS Robotics.” Accessed: Jul. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.edsrobotics.com/blog/camara-anecoica/>
- [11] ULPGC, *BOULPGC 3 de febrero de 2023*.



## PRESUPUESTO

En este apartado se añadirá el presupuesto utilizado para adquirir los componentes utilizados y la fabricación de cada una de las placas PCB, además de los recursos hardware y software que se han necesitado.

### Presupuesto hardware

En cuanto al presupuesto hardware, únicamente nos encontramos con nuestro dispositivo portátil con el cual hicimos toda la búsqueda de información necesaria y redacción de la memoria.

Recurso hardware	Vida útil (años)
Lenovo ideapad 330	5

Tabla 6: Recursos hardware y vida útil

#### PRESUPUESTO HARDWARE

Recurso	Tiempo	Valor adquisición	Amortización anual	Coste total
<b>Lenovo ideapad 330</b>	4 meses	636 €	127,2 €	<b>42,40 €</b>

Tabla 7: Coste de recursos hardware

El coste final de los recursos hardware es de CUARENTA Y DOS EUROS CON CUARENTA CÉNTIMOS.

### Presupuesto software

Se requiso de distintos softwares para llevar a cabo el estudio.

Recurso software	Vida útil (años)
SO Windows 11	5
Office 365	1
AutoCad	1
ADS	1

Tabla 8: Recursos software y vida útil

### PRESUPUESTO SOFTWARE

Recurso	Tiempo	Valor adquisición	Amortización anual	Coste total
SO Windows 11	4 meses	131,99 €	26,40 €	8,80 €
Office 365	4 meses	0 €	0 €	0 €
AutoCad	1 mes	2500 €	2500 €	208,33 €
ADS	15 días	2500 €	2500 €	104,17 €
<b>Total</b>		<b>5131,99 €</b>	<b>5026,40 €</b>	<b>321,30 €</b>

Tabla 9: Coste de recursos software

El coste final de los recursos hardware es de TRESCIENTOS VIENTIUN EUROS CON TREINTA CÉNTIMOS.

### Presupuesto ingeniero

Según la tabla *CLASIFICACIÓN Y RETRIBUCIÓN DEL PERSONAL CONTRATADO CON CARGO A PROYECTOS, PROGRAMAS, CONVENIOS Y CONTRATOS* del BOULPGC del 3 de febrero de 2023 [11], el sueldo base de un ingeniero técnico a 20 horas semanales se recoge en la siguiente tabla:

### PRESUPUESTO INGENIERO

Personal	Coste total mensual (€)	Tiempo	Total (€)
Ingeniero Técnico	745,15	4 meses	<b>2980,60 €</b>

Tabla 10: Coste de los recursos de ingeniero

El coste final de los recursos de ingeniero es de DOS MIL NOVECIENTOS OCHENTA EUROS CON SESENTA CÉNTIMOS.

## Presupuesto de los componentes

PRESUPUESTO COMPONENTES			
Componente	Precio unidad (€)	Cantidad	Total (€)
Filtro RF DEA162495BT-1289A1	0,18	15	2,7
Filtro RF BFCW-542+	7,03	1	7,03
Filtro PB VBFZ-2575-S+	56,55	3	169,65
Amplificador MNA-7A+	4,11	2	8,22
Amplificador PMA3-63GLN	6,17	2	13,34
Divisor HMC361S8G	25,31	2	50,62
Híbrido 3dB PD4859J5050S2HF	0,95	1	0,95
Mezclador MAC-60+	37,45	1	37,45
			<b>289,96 €</b>

Tabla 11: Coste de los componentes

El coste de los distintos componentes empleados para el montaje de los circuitos es de un total de DOSCIENTOS OCHENTA Y NUEVA EUROS CON NOVENTA Y SEIS CÉNTIMOS.

## Presupuesto de las placas

PRESUPUESTO PLACAS			
Placa	Precio unidad (€)	Cantidad	Total (€)
PCB divisor	6,66	5	33,30
PCB blanco activo	6,66	5	33,30
PCB transmisor	6,66	5	33,30
PCB receptor	6,66	5	33,30
			<b>133,20 €</b>

Tabla 12: Coste de las placas PCB

El coste de la fabricación de las distintas placas PCB para el montaje de los circuitos es de un total de CIENTO TREINTA Y TRES EUROS CON VEINTE CÉNTIMOS.

## Presupuesto total

En la siguiente tabla se recoge el presupuesto total de los distintos recursos utilizados.

<b>PRESUPUESTO TOTAL</b>	
<b>COSTES</b>	<b>TOTAL (€)</b>
Hardware	42,40
Software	321,30
Ingeniero	2980,60
Componentes	289,96
Placas	133,20
<b>TOTAL</b>	<b>3767,46 €</b>

*Tabla 13: Coste total*

El coste total es de TRES MIL SETECIENTOS SESENTA Y SIETE EUROS CON CUARENTA Y SEIS CÉNTIMOS.



## ANEXOS

### A.1. Factor de ruido en el receptor

Para el cálculo teórico del factor de ruido en el receptor seguiremos la siguiente fórmula:

$$F = \frac{(S/N)_i}{(S/N)_o} \quad [13]$$

Donde el factor de ruido es la relación existente en la relación de señal a ruido a la salida del mezclador con la que existe a la entrada del receptor.

Sabemos que a la salida del mezclador debemos tener una relación  $(S/N) > 10$  dB y tenemos una potencia de -20 dBm. Por otra parte, observamos que por los componentes que hemos seleccionado, el amplificador PMA3-63GLN tiene una figura de ruido de aproximadamente 1 dB, y el filtro RF DEA132495BT de 1,5 dB, a pesar de que este filtro no esté montado en la placa del receptor para poder hacer el estudio a la frecuencia de 5 GHz sin tener que hacer uso del divisor y ver el comportamiento del circuito, tendremos en cuenta este factor, ya que el objetivo final es hacer que la señal a la frecuencia de 5 GHz sea dividida entre 2 cuando entra por el receptor.

Es por esto, que si la  $(S/N)$  a la salida es de 10 dB, por los componentes seleccionados, la  $(S/N)$  a la entrada deberá ser como mínimo de 12,5 dB, para que se cumpla la relación buscada a la salida.

Por lo tanto, el resultado del factor de ruido en el receptor es de:

$$F = \frac{(S/N)_i}{(S/N)_o} = 12,5 - 10 = 2,5 \text{ dB}$$

En nuestro montaje al no estar el filtro, el resultado real sería de 1 dB.

## A.2. Factor de ruido en el receptor mediante el método Y

El factor de ruido por el método Y sigue la siguiente ecuación:

$$F(dB) = ENR - 10 \log (Y - 1)$$

Siendo el valor de Y:

$$Y = \frac{P_{out,on}}{P_{out,off}}$$

El valor de ENR del tubo de ruido dependerá de la frecuencia en la que estemos trabajando.

