

ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA



TRABAJO FIN DE GRADO

SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE UN RADAR CW-FM EN BANDA X

Titulación: Grado en Ingeniería en Tecnologías
de la Telecomunicación

Autor: Abel García Castellano

Tutor: B. Pablo Dorta Naranjo

Fecha: Junio 2014

ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA



TRABAJO FIN DE GRADO

SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE UN RADAR CW-FM EN BANDA X

HOJA DE FIRMAS

Alumno

Tutor

Fdo.: Abel García Castellano

Fdo.: B. Pablo Dorta Naranjo

Fecha: Junio 2014

ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA



TRABAJO FIN DE GRADO SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE UN RADAR CW-FM EN BANDA X HOJA DE EVALUACIÓN

Calificación: _____

Presidente

Fdo.:

Vocal

Secretario/a

Fdo.:

Fdo.:

Fecha: Junio 2014

Índice de contenido

MEMORIA.....	1
1. Introducción	3
2. Simulación del proceso de detección del sensor	5
2.1 Simulación de señal de FI con moduladora senoidal y triangular	5
2.2 Simulación del detector del radar	8
3. Diseño del sistema de caracterización del sensor	13
3.1 Diseño y montaje del sistema de caracterización instrumental	15
3.1.1 Diseño	15
3.1.2 Componentes escogidos	17
3.1.3 Balance del sistema	22
3.1.4 Montaje y medidas.....	23
3.2 Diseño del sistema de caracterización integrado	27
3.2.1 Diseño	27
3.2.2 Componentes utilizados.....	28
3.2.3 Balance del sistema	30
4. Conclusiones	33
Anexo 1: Fundamentos de radar	35
1.1 Introducción	35
1.2 Clasificación de los sistemas radar	36
1.3 Diagrama de bloques del radar	37
1.4 Radar de onda continua.....	38
1.4.1 Efecto doppler	39
1.4.2 Radar CW-FM.....	39
1.5 Ecuación radar	42
1.6 Frecuencias de funcionamiento	43
Anexo 2: Montaje del sensor CW-FM	45
Anexo 3: Evaluación del programa en Matlab	49
3.1 Amplificador-filtro de FI.....	49
3.2 Contador de pulsos.....	58
Anexo 4: Medidas del sistema de caracterización instrumental	63
Bibliografía	85
PLIEGO DE CONDICIONES.....	87
1. Pliego de mínimos técnicos	89
2. Pliego de condiciones para la realización.....	89
3. Pliego de condiciones legales	89

PRESUPUESTO.....	91
1. Recursos materiales	93
1.1 Recursos materiales fungibles	94
1.2 Recursos materiales amortizables.....	94
2. Trabajo tarificado por tiempo empleado	95
3. Costes de redacción del Trabajo Fin de Grado.....	96
4. Material fungible.....	96
5. Derechos de visado del COIT.....	97
6. Gastos de tramitación y envío	97
7. Aplicación de impuestos.....	97

Índice de figuras

Figura 1 – Esquema del sensor CW/FM	3
Figura 2 – Proceso para obtener la señal de FI	6
Figura 3 – Frecuencia de la señal transmitida por el sensor	6
Figura 4 – Frecuencia de batido.....	7
Figura 5 – Señal de FI en ausencia de doppler y señal acoplada	7
Figura 6 – Señal FI con señal acoplada.....	8
Figura 7 – Proceso de detección del sensor	8
Figura 8 – Respuesta del amplificador-filtro de FI	9
Figura 9 – Espectro de la entrada del filtro y filtro de FI.....	9
Figura 10 – Espectro de la salida del filtro	10
Figura 11 – Señal FI a la salida del filtro	10
Figura 12 – Sistema de caracterización conectado con antenas y cable	13
Figura 13 – Primera opción (Modulador BLU)	14
Figura 14 – Segunda opción (Mezcladores y OLs).....	14
Figura 15 – Supuesto a simular	15
Figura 16 – Montaje instrumental	16
Figura 17 – Mezclador.....	17
Figura 18– Filtro paso bajo.....	18
Figura 19 – Bobina de cable de 7 metros.....	18
Figura 20 – Atenuadores variables.....	19
Figura 21 – Acoplador	19
Figura 22 – Generador Agilent Technologies E8257D.....	20
Figura 23 – Agilent Technologies E33220A	20
Figura 24 – Osciloscopio Agilent Technologies MSO6054A	21
Figura 25 – Analizador de espectro Rohde&Schwarz FSEK30.....	21
Figura 26 – Fuentes de alimentación Agilent E3620A.....	22

Figura 27 - Balance del sistema	23
Figura 28 – Montaje del sistema de caracterización	23
Figura 29 – Amplificador-filtro FI, comparador, divisor y contador del sensor CW-FM.....	24
Figura 30 – Señal moduladora del VCO (amarillo) y señal a la salida del filtro FI (verde) ..	25
Figura 31 – Salida del divisor	25
Figura 32 – Esquema del montaje final del sistema de caracterización integrado	27
Figura 33 – Sistema de caracterización integrado.....	28
Figura 34 – RF y OL a la entrada del down-converter	30
Figura 35 – Señal de salida del down-converter	30
Figura 36 – Señal de salida del mezclador.....	31
Figura 37 – Diagrama de bloques básico de un radar	35
Figura 38 – Radares primario y secundario	36
Figura 39 – Radares CW-FM y de pulsos	37
Figura 40 – Diagrama de bloques de un radar genérico	38
Figura 41 – Radar CW-FM	40
Figura 42 – Frecuencia transmitida, recibida y diferencia entre ambas (batido).....	41
Figura 43 – Relación común entre ambas pendientes	41
Figura 44 – Diagrama para determinar el alcance del radar	42
Figura 45 – Espectro electromagnético.....	43
Figura 46 – Esquema del sensor CW/FM.....	45
Figura 47 – Montaje del sensor CW-FM.....	46
Figura 48 – Cabezal de RF en microstrip	46
Figura 49 – Placa del generador de barrido y trigger	47
Figura 50 – Placa de procesado.....	48
Figura 51 – Frecuencia Señal FI	49
Figura 52 – Señal FI a la entrada del filtro	50
Figura 53 – Señal FI a la salida del filtro	50
Figura 54 – Espectro de la entrada del filtro	50
Figura 55 – Espectro de la salida del filtro	50
Figura 56 – Frecuencia Señal FI	51
Figura 57 – Señal FI a la entrada del filtro	51
Figura 58 – Señal FI a la salida del filtro	51
Figura 59 – Espectro de la entrada del filtro	51
Figura 60 – Espectro de la salida del filtro	51
Figura 61 – Frecuencia Señal FI	52
Figura 62 – Señal FI a la entrada del filtro	52
Figura 63 – Señal FI a la salida del filtro	52
Figura 64 – Espectro de la entrada del filtro	52
Figura 65 – Espectro de la salida del filtro	52
Figura 66 – Frecuencia Señal FI	53
Figura 67 – Señal FI a la entrada del filtro	53
Figura 68 – Señal FI a la salida del filtro	53
Figura 69 – Espectro de la entrada del filtro	53
Figura 70 – Espectro de la salida del filtro	53
Figura 71 – Frecuencia Señal FI	54
Figura 72 – Señal FI a la entrada del filtro	54
Figura 73 – Señal FI a la salida del filtro	54

Figura 74 – Espectro de la entrada del filtro	54
Figura 75 – Espectro de la salida del filtro	54
Figura 76 – Frecuencia Señal FI	55
Figura 77 – Señal FI a la entrada del filtro.....	55
Figura 78 – Señal FI a la salida del filtro	55
Figura 79 – Espectro de la entrada del filtro.....	55
Figura 80 – Espectro de la salida del filtro	55
Figura 81 – Frecuencia Señal FI.....	56
Figura 82 – Señal FI a la entrada del filtro.....	56
Figura 83 – Señal FI a la salida del filtro	56
Figura 84 – Espectro de la entrada del filtro.....	56
Figura 85 – Espectro de la salida del filtro	56
Figura 86 – Frecuencia Señal FI.....	57
Figura 87 – Señal FI a la entrada del filtro.....	57
Figura 88 – Señal FI a la salida del filtro	57
Figura 89 – Espectro de la entrada del filtro.....	57
Figura 90 – Espectro de la salida del filtro	57

Índice de tablas

Tabla 1 – Especificaciones del mezclador utilizado.....	17
Tabla 2 – Especificaciones del cable utilizado.....	18
Tabla 3 – Especificaciones de los atenuadores utilizados.....	19
Tabla 4 – Especificaciones del acoplador utilizado	20
Tabla 5 – Muestra de las medidas del sistema de caracterización	25
Tabla 6 – Componentes del sistema integrado.....	28
Tabla 7 – Especificaciones del amplificador.....	29
Tabla 8 – Especificaciones del down-converter	29
Tabla 9 – Especificaciones del PLL fraccional	29
Tabla 10 – Especificaciones del mezclador	30
Tabla 11 – Bandas de frecuencia, según IEEE y ITU	44
Tabla 12 – Parámetros de entrada fijos	49
Tabla 13 - Coste componentes	94
Tabla 14 - Recursos materiales amortizables.....	95
Tabla 15 - Factor de corrección según el COIT	95
Tabla 16 - Material fungible.....	96
Tabla 17 - Coste total del trabajo.....	98

MEMORIA

1. Introducción

La finalidad básica de un sensor de proximidad es detectar la presencia y distancia de blancos. En este trabajo contaremos con un prototipo de un sensor realizado con un radar CW/FM en banda X [1-3]. Dicho radar se enmarca dentro de un proyecto del Instituto Universitario para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones (en adelante IDeTIC) de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, encargado por la empresa CSA (Consultores de Sistemas de Aeronáutica). Para garantizar un buen funcionamiento del sensor resulta necesaria una adecuada caracterización experimental. El sensor responde al siguiente diagrama de bloques:

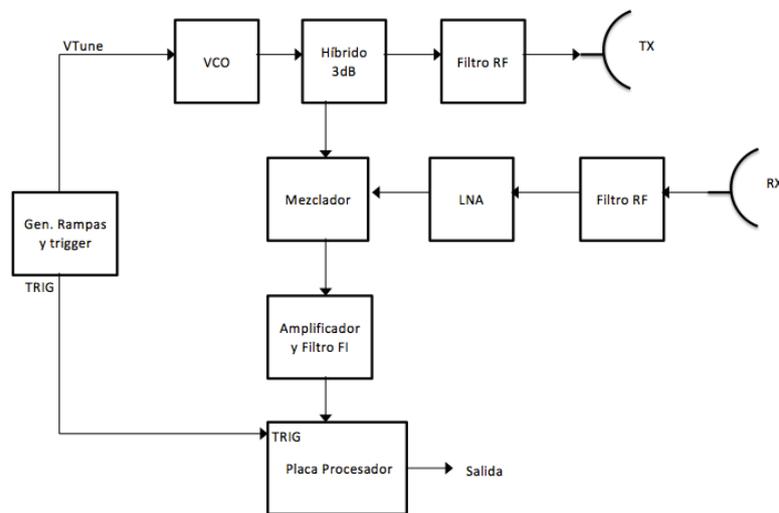


Figura 1 – Esquema del sensor CW/FM

Como podemos ver al VCO se le ataca directamente con la señal del generador sin ningún tipo de linealización debido a que el VCO presenta una buena linealidad. La señal de salida del VCO se reparte por una parte a un mezclador para compararla con la señal recibida, y por otra, hacia el filtro de salida del transmisor. La señal recibida se filtra, se amplifica y se mezcla con la del VCO. La señal de FI resultante también se amplifica y se filtra con el objeto de eliminar las componentes de baja frecuencia que se generan en FI por el acoplamiento entre receptor y transmisor que puedan enmascarar la señal del blanco.

Finalmente, a la salida del amplificador-filtro de FI se conecta el procesador que se encarga de indicar la distancia del blanco.

El montaje del sensor se ha realizado en 4 placas; placa de RF, placa de barrido y trigger, placa del amplificador FI y placa de procesado. En el anexo 2 se explica con más detalle cada una de las partes del montaje.

Destacar que en este prototipo aún no están cerrados los criterios para elegir la señal moduladora (tipo y frecuencia), así como el ancho de banda y la frecuencia central del filtro FI.

Los objetivos de este Trabajo Fin de Título son:

- a) Realizar simulaciones en Matlab que muestren la señal en FI de un blanco para diferentes distancias (frecuencia batido) y diferentes velocidades (frecuencia doppler), y además el propio proceso de detección.
- b) Diseñar y montar un sistema de caracterización del sensor. La idea es diseñar un sistema con componentes comerciales conectorizados que simule la distancia y el efecto doppler del blanco. La solución debe ser de pequeño tamaño, transportable, ligera, cómoda para su uso y de bajo coste. No obstante, en este apartado solo se llevará a la práctica un montaje con instrumentación del laboratorio.

2. Simulación del proceso de detección del sensor

El software utilizado para las simulaciones fue Matlab, el cual nos facilita muchas funciones para el procesamiento de señales. Aunque se podía haber escogido un lenguaje de programación más potente se ha optado finalmente por aquel que nos proporciona la sencillez en el manejo de señales puesto que desarrollar simulaciones de este tipo con otro programa aumentaría de manera considerable la complejidad [4].

Una vez comprendidas cada una de las partes del Sensor CW-FM y las señales involucradas se ha procedido a realizar simulaciones en Matlab de la señal recibida con el fin de mejorar las prestaciones del sensor.

Las simulaciones se han hecho utilizando los siguientes parámetros de entrada:

- Frecuencia moduladora. Se elige tipo (senoidal o triangular) y frecuencia de la señal que modula al VCO. La señal de salida oscila sobre los 11'75 GHz.
- Distancia al blanco.
- Desviación de frecuencia. Desviación de frecuencia de pico de la señal transmitida por el radar.
- Frecuencia doppler. Desplazamiento doppler que simula el movimiento del blanco.
- Porcentaje de la rampa de subida (solo en caso de moduladora triangular).
- Amplitud de la señal acoplada con respecto a la útil. Con este dato se quiere caracterizar la falta de aislamiento entre transmisor y receptor, que en FI produce una señal indeseable similar a la moduladora.
- Ancho de banda del filtro de FI.

2.1 Simulación de señal de FI con moduladora senoidal y triangular

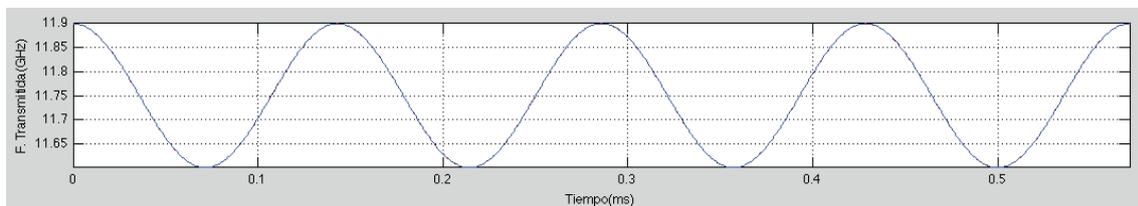
En esta parte se ha obtenido la señal de batido que se encuentra a la salida del mezclador.

En la siguiente figura se presenta un diagrama del proceso:

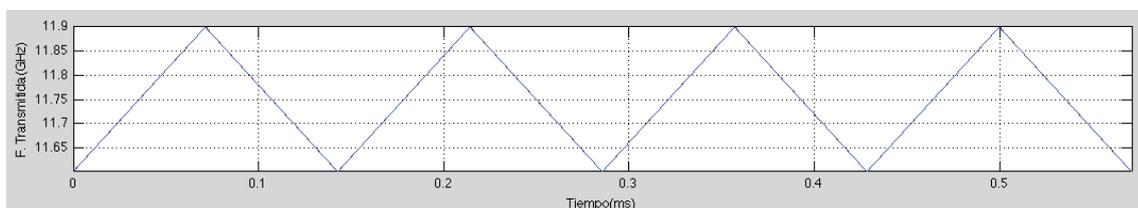


Figura 2 – Proceso para obtener la señal de FI

Para ello lo primero que se ha realizado ha sido generar la frecuencia de la señal transmitida con respecto al tiempo, tanto para moduladora senoidal como para triangular. A continuación, se genera la frecuencia de la señal recibida a partir de la frecuencia de la señal transmitida aplicando un retardo que se corresponda con la distancia. Si se tuviera blanco en movimiento, se ha de añadir el desplazamiento doppler. En la figura 3 se muestra la representación de la frecuencia de la señal transmitida por el radar teniendo una señal moduladora de 7 kHz con una desviación de frecuencia de pico de 150 MHz.



a) Moduladora senoidal

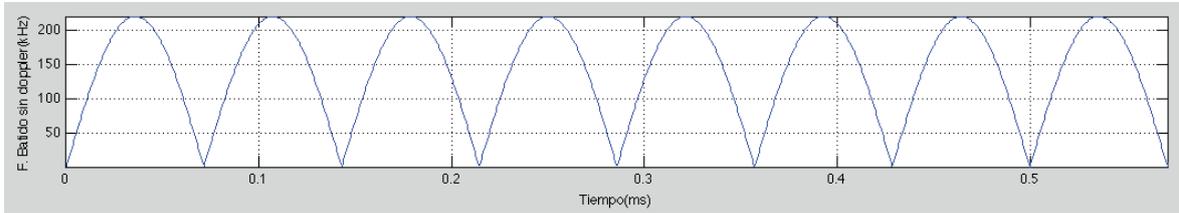


b) Moduladora triangular

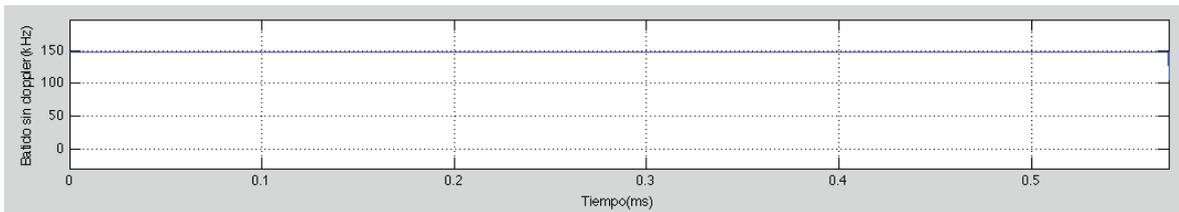
Figura 3 – Frecuencia de la señal transmitida por el sensor

A continuación se obtiene la frecuencia de la señal de batido calculando la diferencia en frecuencia de ambas señales (transmitida y recibida). Dicho batido es de forma senoidal

cuando tenemos moduladora senoidal, y de forma cuadrada cuando tenemos moduladora triangular, tal y como se muestra en la siguiente figura (blanco a 5 metros):



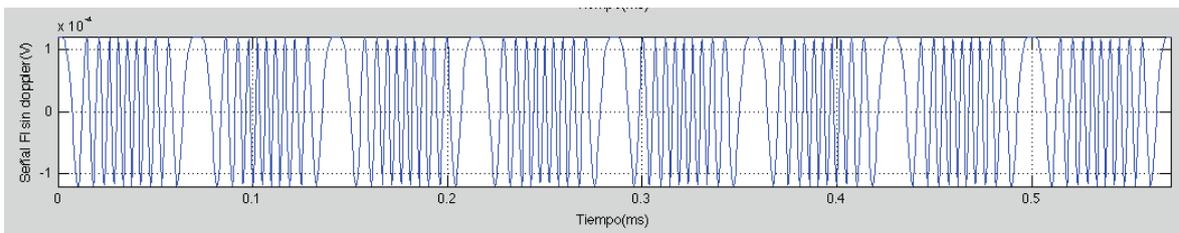
a) Moduladora senoidal



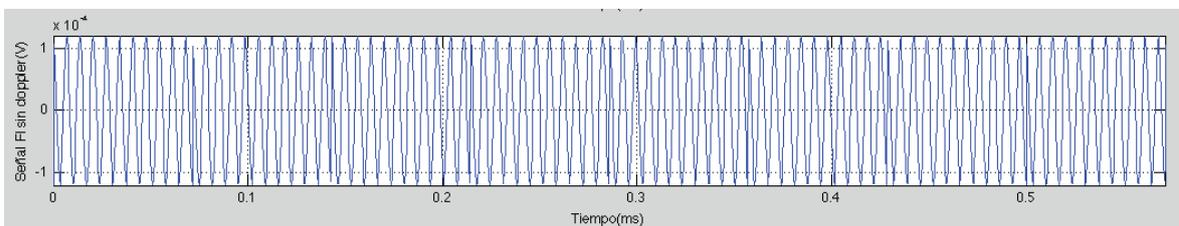
b) Moduladora triangular

Figura 4 – Frecuencia de batido

De este modo, la señal de FI en el caso de utilizar moduladora triangular será una señal de frecuencia constante, presentando cambios de fase en cada semiciclo de moduladora. Por el otro lado, en el caso de utilizar moduladora senoidal la señal de FI será una señal variable en frecuencia presentando los mismos cambios de fase que en el caso anterior.



a) Moduladora senoidal

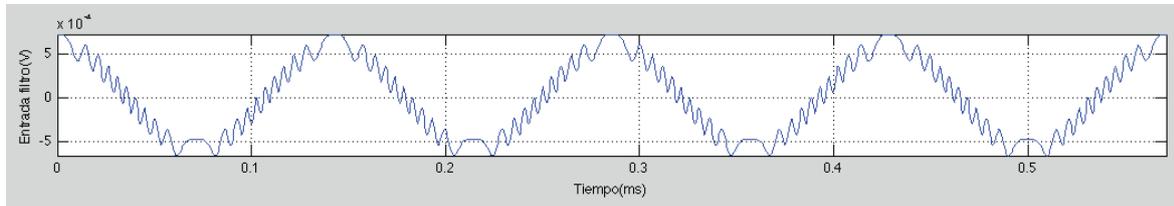


b) Moduladora triangular

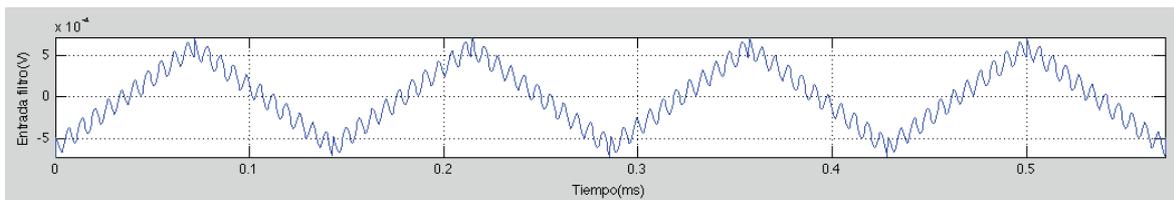
Figura 5 – Señal de FI en ausencia de doppler y señal acoplada

Cuando existe doppler, la frecuencia de la señal de FI cambia de manera proporcional al doppler en cada semiciclo, siendo en un semiciclo mayor y en otro menor.

También se ha generado la señal indeseable que se acopla para evaluar el buen funcionamiento del filtro.



a) Moduladora senoidal



b) Moduladora triangular

Figura 6 – Señal FI con señal acoplada

2.2 Simulación del detector del radar

Una vez obtenida la señal FI, ésta pasa por un proceso que finaliza con la determinación de la distancia del blanco, tal y como se muestra en el siguiente diagrama:

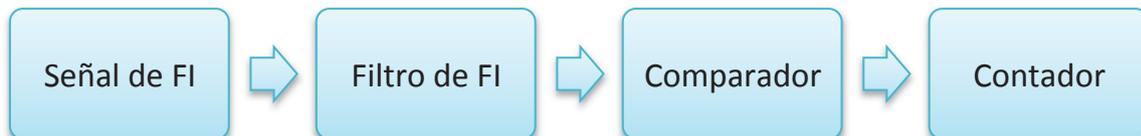


Figura 7 – Proceso de detección del sensor

Lo primero que hace el sistema es filtrar la señal de FI. Para ello se ha implementado un filtro paso banda Butterworth de tipo II (rizado en la banda de paso) y de orden 4. Este filtro tiene una banda de paso desde 100 kHz hasta 200 kHz, aunque la banda de paso puede ser modificada por el usuario.

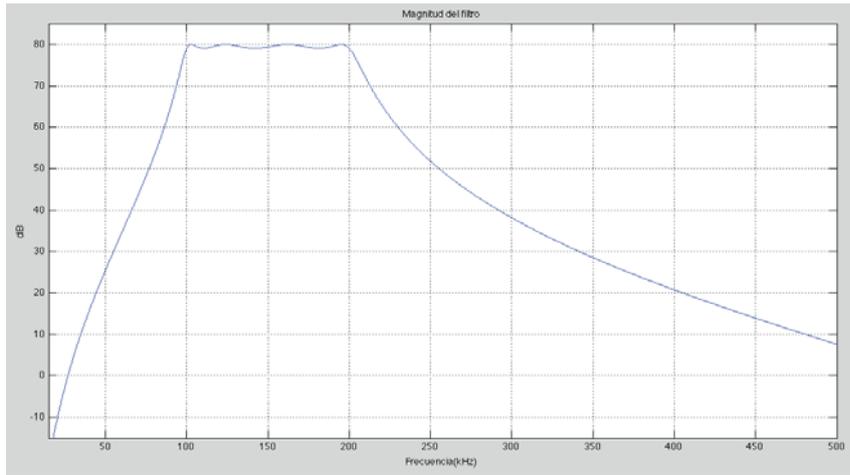
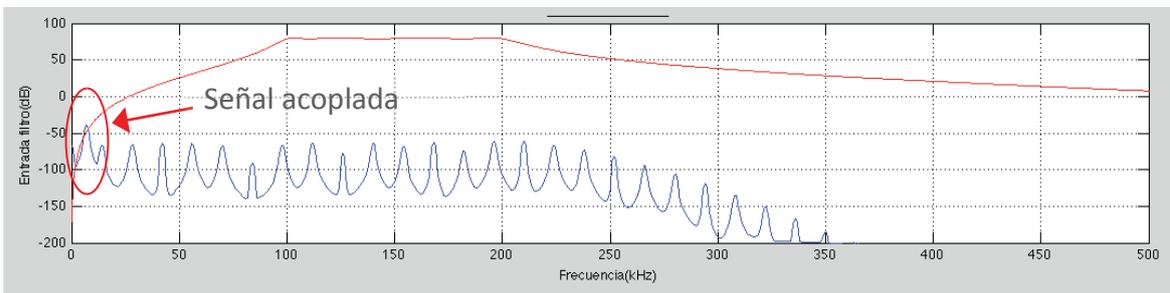
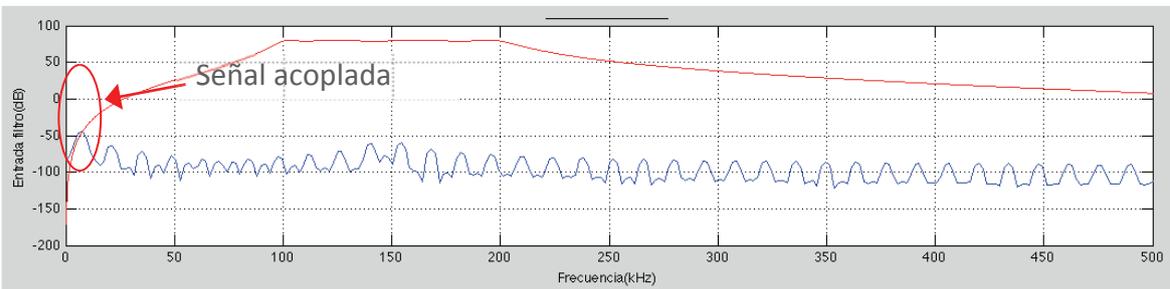


Figura 8 – Respuesta del amplificador-filtro de FI

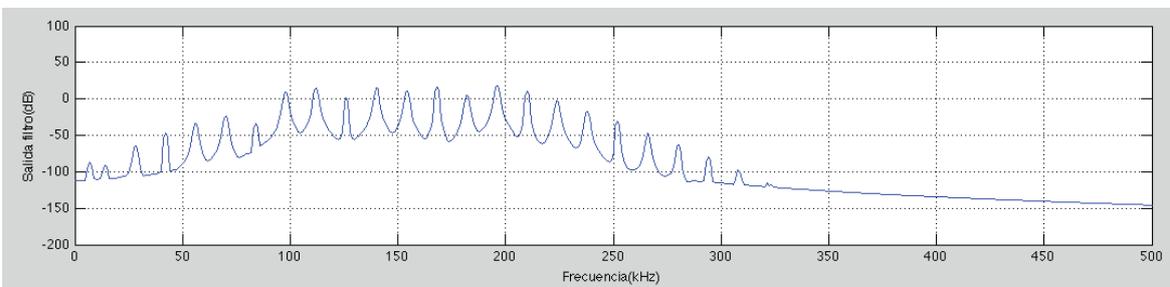


a) Moduladora sinusoidal

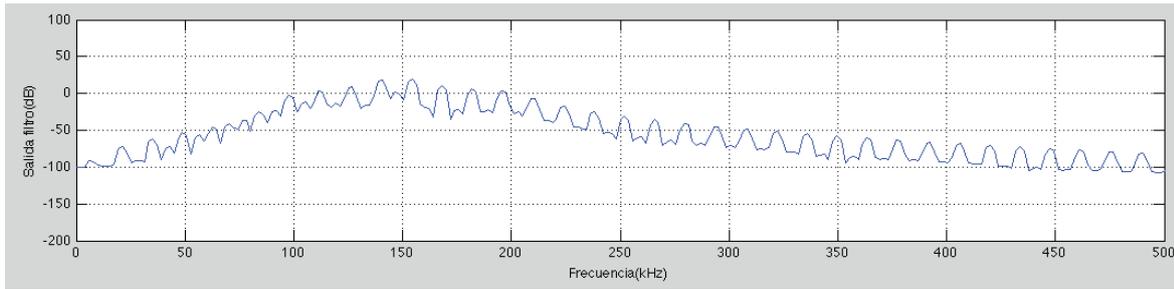


b) Moduladora triangular

Figura 9 – Espectro de la entrada del filtro y filtro de FI

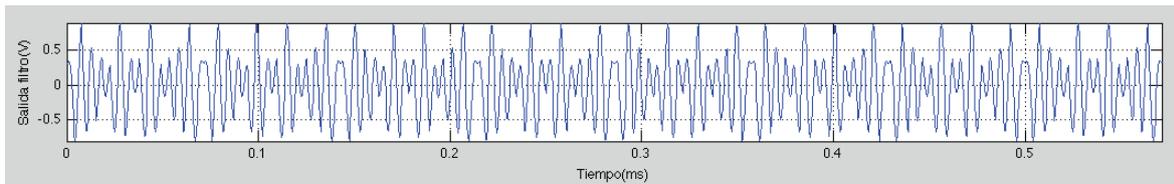


a) Moduladora sinusoidal

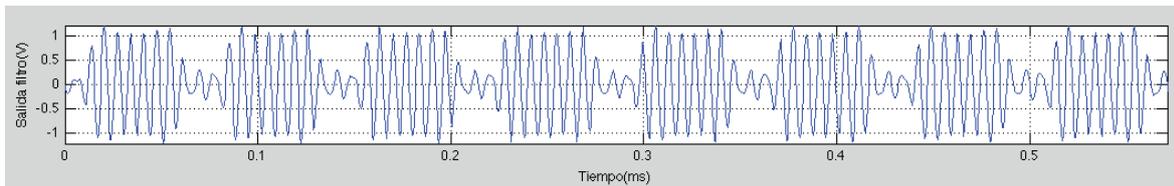


b) Moduladora triangular

Figura 10 – Espectro de la salida del filtro



a) Moduladora senoidal



b) Moduladora triangular

Figura 11 – Señal FI a la salida del filtro

Una vez la señal de FI se ha filtrado, solo queda convertirla a cuadrada, pasarla por un divisor de frecuencia y contar el número de pulsos. Lo que se ha realizado en Matlab ha sido recuadrarla y contar los pulsos durante un intervalo de tiempo de 1 ms y dividir el resultado por 10. A partir de este valor se puede obtener la distancia a la que se encuentra el blanco.

Después de haber realizado varias simulaciones se ha visto la diferencia con ambos tipos moduladoras. La principal diferencia es el ancho de banda requerido, siendo mucho mayor cuando se utiliza moduladora senoidal causando que al pasar por el filtro de FI la señal pierda energía entre semiciclos (nulos de la frecuencia de batido). En caso de tener doppler, el ancho de banda de la señal FI aumenta considerablemente, haciendo que el ancho de banda del filtro (100 kHz) quizás no sea el más adecuado.

En cuanto a la frecuencia moduladora, con una desviación de frecuencia de 150 MHz para un alcance de 5 metros, se registran buenos resultados con 7 kHz.

En el anexo 3 se muestran representaciones de la señal de FI a la entrada y salida del filtro y sus espectros, además del número de pulsos que cuenta el programa en Matlab con diferentes parámetros de entrada con el fin de ser comparado con las medidas realizadas en el capítulo 3.

3. Diseño del sistema de caracterización del sensor

El sistema de caracterización del sensor [5] está pensado para caracterizar físicamente la señal reflejada por el blanco (doppler incluido). Para ello se han planteado varias topologías, de las que se vieron ventajas e inconvenientes de cada una. El sistema debe ser capaz de recibir la señal, aplicarle un desplazamiento doppler e introducir el retardo asociado a la distancia.

Para recibir la señal e introducir el retardo el sistema puede ser conectado de diferentes maneras, tal y como se muestra en la figura 12:

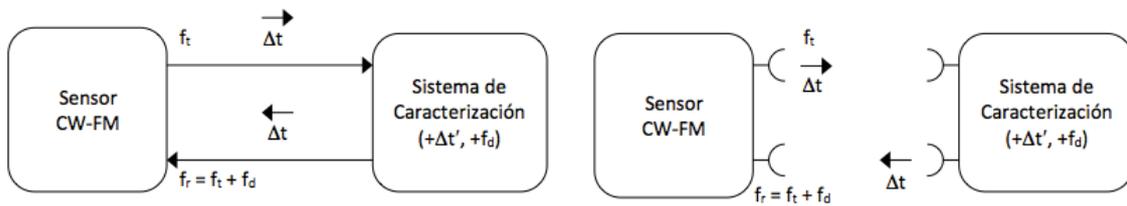
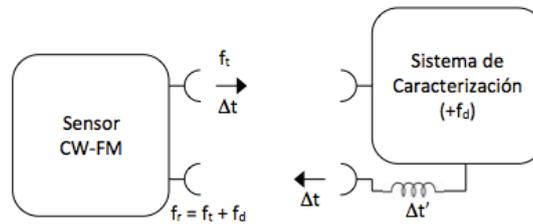


Figura 12 – a) Sistema de caracterización conectado por cable b) Con antenas



c) Sistema de caracterización conectado con antenas y cable

Por el otro lado, para aplicarle el desplazamiento doppler a la señal transmitida por el sensor se han planteado dos opciones.

La primera opción consiste en hacer pasar la señal transmitida por un modulador BLU. La señal transmitida modulada en BLU tendrá en el caso ideal el mismo aspecto, pero desplazada a la frecuencia moduladora (doppler en este caso).

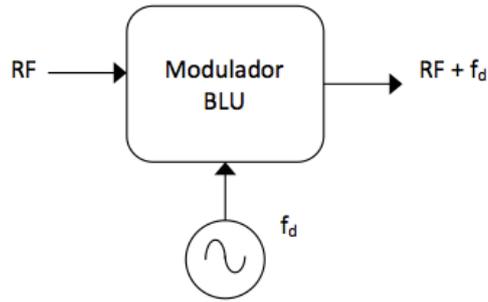


Figura 13 – Primera opción (Modulador BLU)

La segunda propuesta es más compleja. En lugar de un modulador BLU, se utiliza un sistema compuesto por mezcladores, osciladores y filtros donde se hace una doble conversión en frecuencia. La primera etapa hace una conversión a baja frecuencia y después se sube con otro OL con el doppler ya incluido, tal y como se muestra en la figura 14. Ambos osciladores deben tener una referencia común para mantener cierto sincronismo.

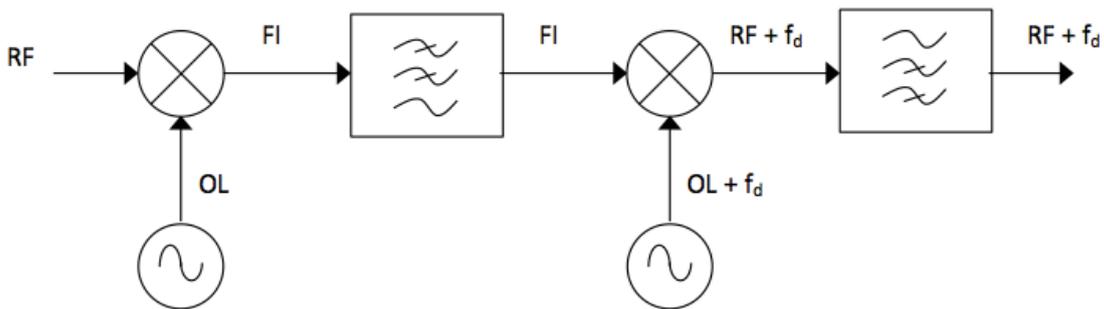


Figura 14 – Segunda opción (Mezcladores y OLs)

La principal ventaja de la primera opción es su simplicidad y su aparente bajo coste pues se requiere generar las señales I-Q del modulador a partir de la señal doppler. El gran inconveniente es el bajo aislamiento entre OL y RF que generalmente tienen estos sistemas [6].

En el caso de la segunda opción el sistema es más complejo, de coste similar o mayor pero con un mejor aislamiento.

3.1 Diseño y montaje del sistema de caracterización instrumental

Después de ver las ventajas e inconvenientes de cada propuesta, se ha escogido la segunda opción, que aunque pudiera ser de un mayor coste, la diferencia no sería muy notable y se conseguiría mayor aislamiento entre puertas.

3.1.1 Diseño

El sistema se ha diseñado para una situación real como la que se observa en la figura 15.

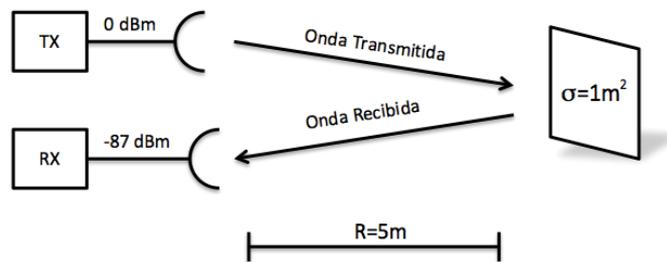


Figura 15 – Supuesto a simular

Se ha considerado una potencia transmitida de 0 dBm con un blanco de sección radar de $\sigma = 1 \text{ m}^2$ a una distancia de 5 metros. La ganancia de las antenas del sensor es de 3 dB y la frecuencia de la señal transmitida está sobre los 11'75 GHz.

Aplicando la ecuación radar [1] se obtuvo que la potencia en el receptor es de unos -87 dBm.

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

Debido a que en el laboratorio no se disponía de amplificadores se ha optado por un montaje sin antenas conectando el sistema con el sensor por medio de un cable y se añadieron atenuadores variables para ajustar el nivel de RF (figura 16). También se añadió un acoplador para ver una muestra de la señal transmitida en el analizador de espectros.

Para dicho montaje ha sido necesario:

- Generador de señales para generar la señal moduladora del sensor.

- Analizador de espectros para visualizar la señal transmitida del radar.
- Acoplador de 10 dB para obtener una muestra de la señal transmitida.
- Material necesario para el sistema de caracterización:
 - o Dos generadores externos para utilizarlos como osciladores locales
 - o Dos mezcladores
 - o Una bobina de cable
 - o Un filtro paso bajo
 - o Dos atenuadores variables

En este caso no es necesario el uso de un filtro paso alto (o paso banda) a la salida del segundo mezclador para atenuar la banda imagen ya que el mismo sensor ya tiene un filtro de RF.

En el laboratorio se contaba con todos los elementos necesarios a excepción de la bobina de cable, la cual fue diseñada para introducir el retardo a la señal transmitida.

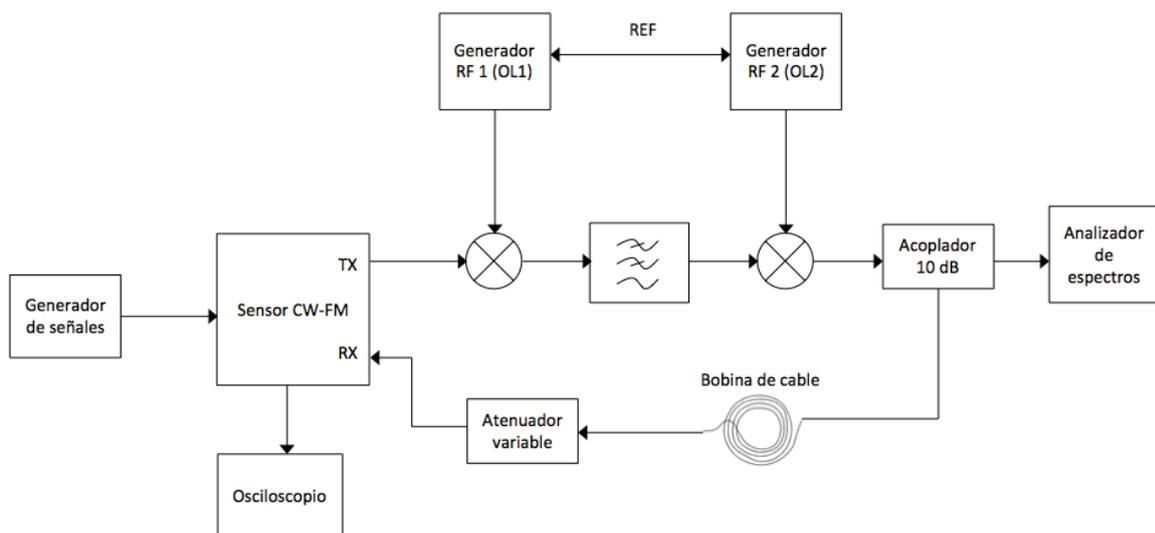


Figura 16 – Montaje instrumental

Con este sistema es posible evaluar el proceso de detección del sensor con diferentes retardos (cambiando la bobina de cable), diferentes desplazamientos en frecuencia (modificando la frecuencia del segundo generador) y diferentes moduladoras (tipo y frecuencia).

3.1.2 Componentes escogidos

En este apartado se recogen los equipos escogidos para la realización del montaje y sus medidas.

a) Elementos del sistema de caracterización

Mezclador

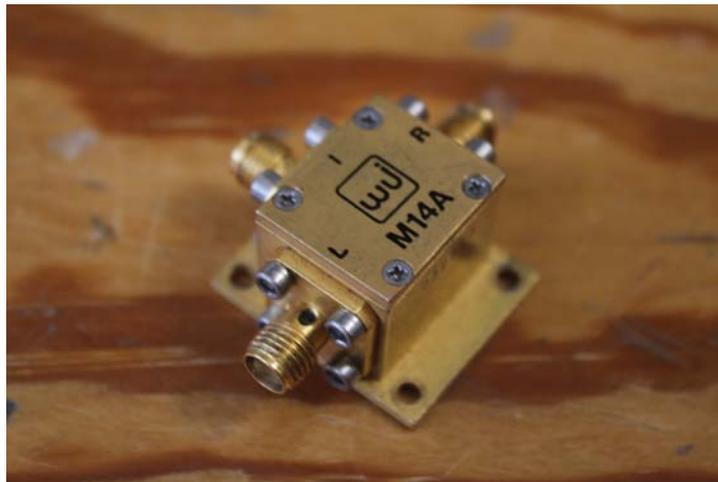


Figura 17 – Mezclador

Marca	Macom
Referencia	M14A
Rango de frecuencia RF	6 – 14 GHz
Rango de frecuencia OL	4 -16 GHz
Rango de frecuencia FI	DC – 2 GHz
Pérdidas de conversión ($P_{OL}=+7dBm$)	6 dB
Aislamiento OL/FI	35 dB
Aislamiento OL/RF	35 dB

Tabla 1 – Especificaciones del mezclador utilizado

Filtro paso bajo

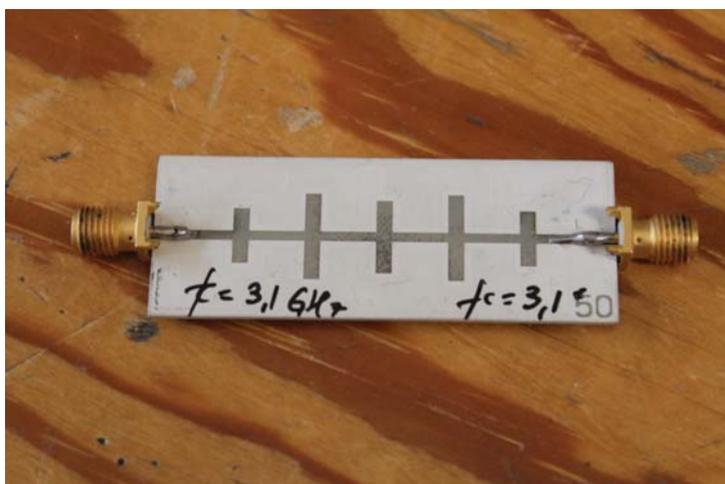


Figura 18– Filtro paso bajo

Bobina de cable



Figura 19 – Bobina de cable de 7 metros

Marca	Suhner
Referencia	Sucoform 141
Atenuación	2 dB/m
Permitividad relativa	2

Tabla 2 – Especificaciones del cable utilizado

Atenuadores variables



Figura 20 – Atenuadores variables

Marca	Agilent	Agilent
Referencia	8494B	8496B
Frecuencia	DC – 18 GHz	DC – 18 GHz
Rango de atenuación	0 – 11 dB	0 – 110 dB
Salto en atenuación	1 dB	10 dB

Tabla 3 – Especificaciones de los atenuadores utilizados

Acoplador



Figura 21 – Acoplador

Marca	Macom
Referencia	2020-6625-10
Frecuencia de señal de entrada	7-18 GHz
Acoplamiento	10 dB
Aislamiento	30 dB

Potencia de entrada máxima	47 W
Pérdidas de inserción	0,4 dB

Tabla 4 – Especificaciones del acoplador utilizado

b) Equipos de medida y generadores

Generadores de señal



Figura 22 – Generador Agilent Technologies E8257D

- Agilent Technologies, E8257D, 250kHz-20GHz
 Ruido de fase menor a -110dBc/Hz para 3-10GHz, 20kHz offset
 0'001 Hz de resolución
 Salida hasta +26 dBm @ 20 GHz
 Modulación AM, FM, fase, pulsos y scan
 Generadores internos duales de seno, triángulo cuadrado, rampa y ruido



Figura 23 – Agilent Technologies E33220A

- Agilent Technologies, E33220A, 1kHz-20MHz
 0'001 Hz de resolución
 Salida hasta +24 dBm
 Modulación AM, FM, fase, pulsos y scan
 Generadores internos duales de seno, triángulo cuadrado, rampa

Osciloscopio

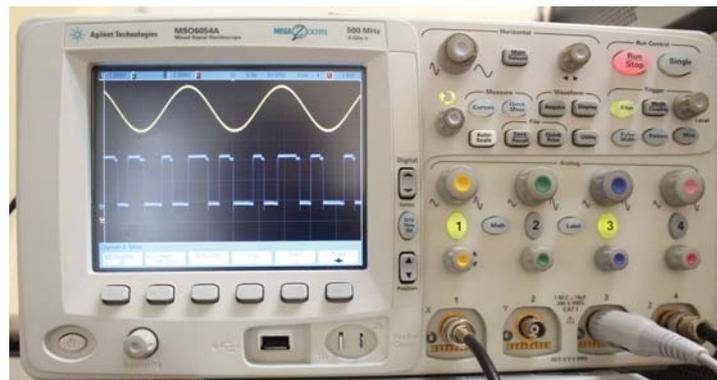


Figura 24 – Osciloscopio Agilent Technologies MSO6054A

- Agilent Technologies MSO6054A
 500 MHz de ancho de banda
 4Gsamples/s
 4 canales

Analizador de espectro

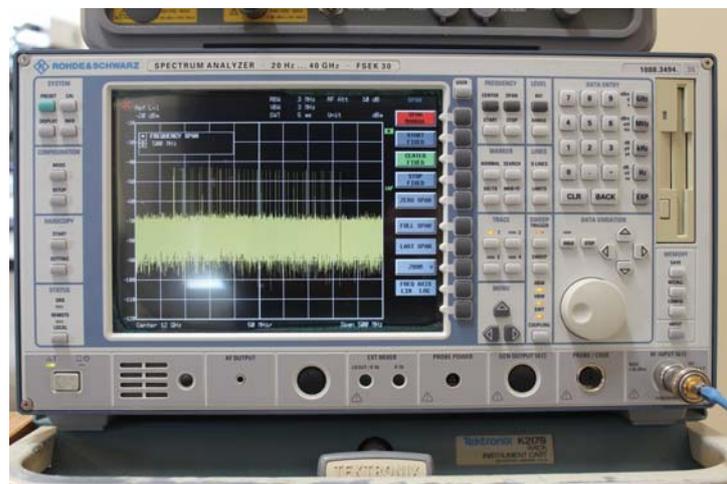


Figura 25 – Analizador de espectro Rohde&Schwarz FSEK30

- Rohde&Schwarz FSEK30, 20Hz-40GHz
Precisión de frecuencia $2'5 \cdot 10^{-11}$ %
Resolución mínima de ancho de banda 1Hz
Ancho de banda de vídeo mínimo 1Hz
Rango dinámico máximo 160dB

Fuentes de alimentación



Figura 26 – Fuentes de alimentación Agilent E3620A

- Agilent E3620A, 0-25V 0-1A Dual output
Potencia máximo 50W
Rizado y ruido en el rango de 20 Hz a 20 MHz menor de 350 μ V

3.1.3 Balance del sistema

Una vez escogidos los componentes que constituirán el sistema de caracterización se ha pasado a realizar un balance del sistema.

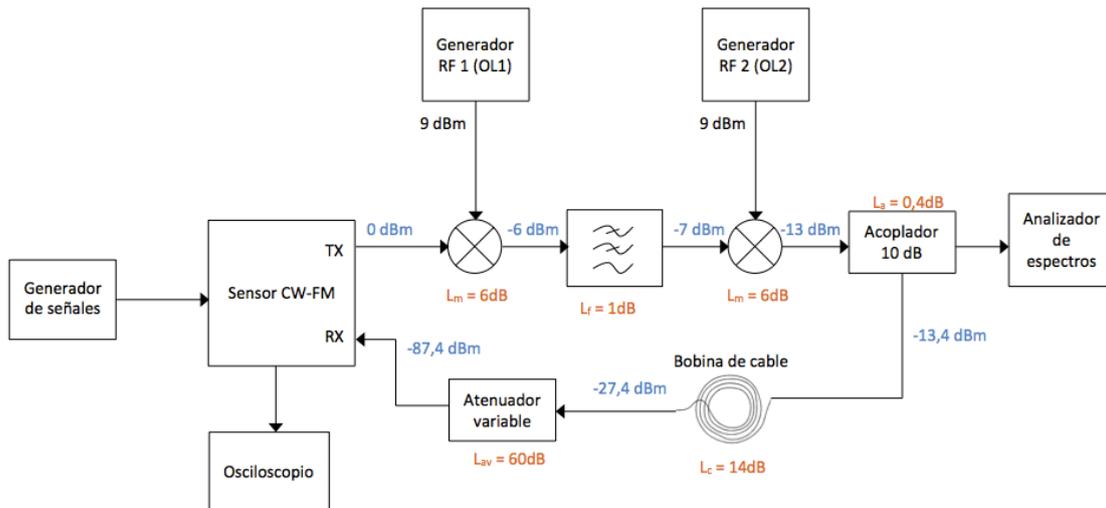


Figura 27 - Balance del sistema

Considerando la situación real supuesta (potencia transmitida de 0 dBm) se ha calculado la potencia en cada punto del sistema de acuerdo con las especificaciones de cada componente. Hay que señalar que el cable utilizado es de una longitud real de 7 metros (equivalente a 10 metros en el vacío), por lo que su atenuación es de 14 dB (2dB/m). Sumando todas las atenuaciones se ha llegado a la conclusión de que ambos atenuadores deberán introducir unas pérdidas de 60 dB. A pesar de que solo con el atenuador 8496B es posible atenuar 60 dB, se ha dejado el otro por si era necesario hacer algún ajuste in situ.

3.1.4 Montaje y medidas

En la siguiente figura se muestra una fotografía del montaje:



Figura 28 – Montaje del sistema de caracterización

Una vez montado se pasó a realizar las medidas necesarias. El sensor indica la presencia de un blanco dependiendo del número de pulsos que cuente (proporcional a la frecuencia media del batido). Por ello, se han medido varios parámetros:

- Amplitud de la señal FI a la salida del filtro en rampa de subida y bajada
- Frecuencia de la señal FI a la salida del filtro en rampa de subida y bajada
- Nº de pulsos contados en 1 ms a la salida del divisor



Figura 29 – Amplificador-filtro FI, comparador, divisor y contador del sensor CW-FM

Cada uno de estos parámetros ha sido medido para dos formas de onda de la señal moduladora del VCO con distintas frecuencias (f_m), y varios desplazamientos doppler (f_d).

El resto de parámetros del sensor como son la desviación de frecuencia, la frecuencia de portadora o el mismo filtro de FI no se han modificado, esperando que sean los adecuados para que el sensor tenga un alcance máximo de 5 metros. Además del cable que simulara un blanco a 5 metros, se han hecho otras medidas con un cable mayor, con el fin corroborar el alcance del sensor.

A continuación se muestra un ejemplo de las medidas tomadas. En el anexo 4 se muestran todas las medidas.

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	3'4	170	3'4	170	17
+20	2'6	150	3'1	190	18
+40	2'2	130	1'9	210	18
+60	2'1	110	1'1	230	17
+80	1'7	100	0'9	250	14
+100	-	-	-	-	12

+120	-	-	-	-	11
+140	-	-	-	-	10
+160	-	-	-	-	11

Tabla 5 – Muestra de las medidas del sistema de caracterización

En la figura 30 se muestra una fotografía de la pantalla del osciloscopio durante la toma de medidas. A la izquierda tenemos una señal moduladora de tipo sinusoidal y a la derecha una triangular (% ciclo subida del 45%), ambas de 4'5 kHz. Del mismo modo en la figura 31 se encuentra la salida del divisor durante 1 ms.

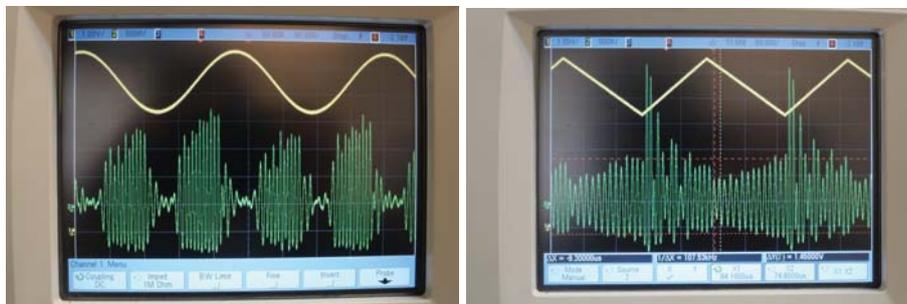


Figura 30 – Señal moduladora del VCO (amarillo) y señal a la salida del filtro FI (verde)

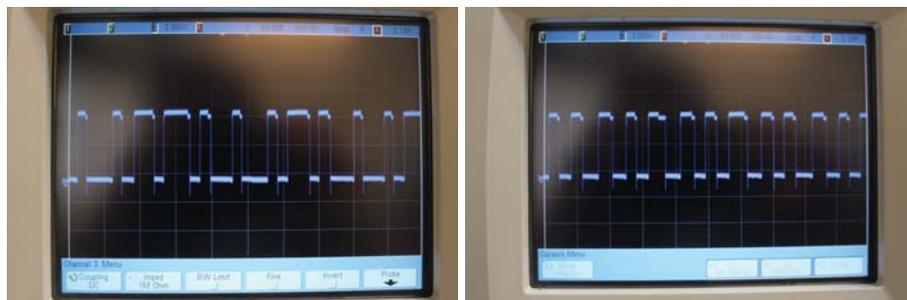


Figura 31 – Salida del divisor

Por último, una vez realizadas las medidas se ha hecho una comparación con los resultados que se han obtenido de las simulaciones en Matlab introduciendo parámetros de entrada similares. De este modo, se ha contado con valores que coincidan entre sí y que también tengan semejanza con lo teórico, bajando la posibilidad de sacar conclusiones erróneas.

Después de comparar las medidas con las simulaciones se ha percibido la principal diferencia entre ambas que se pudo ver también en las simulaciones; el ancho de banda de FI requerido con moduladora senoidal es mayor que al utilizar moduladora triangular.

Por ello, entre semiciclos se pierde energía causando que estando en las mismas condiciones con una moduladora se cuenten más pulsos que con la otra.

Por otro lado, el principal inconveniente de la moduladora triangular es la cantidad de armónicos que genera, además de una señal indeseada de gran amplitud que se aprecia en cambios entre semiciclo y semiciclo pudiendo dificultar en el proceso de decisión (figura 30).

Al igual que en las simulaciones, el filtro de FI de 100 kHz limita la detección del dispositivo, sobre todo en presencia de doppler, haciendo que el ancho de banda de la señal aumente considerablemente.

3.2 Diseño del sistema de caracterización integrado

En esta fase se ha pretendido obtener un diseño de un sistema de caracterización integrado, equivalente al sistema instrumental, de bajo coste, tamaño y peso que sea fácilmente transportable.

3.2.1 Diseño

El montaje que permite el laboratorio es el que se muestra en la figura 32. Como se ve se dispone de una cámara anecoica de un largo de 3 metros. En el lado izquierdo se monta el sensor y en el derecho las mismas antenas del sensor (3dB) más todos los elementos que constituyen el sistema de caracterización. En la figura 33 se muestra un esquema más detallado.

Debido al tamaño de la cámara el retardo de la señal deberá completarse con una bobina de cable.

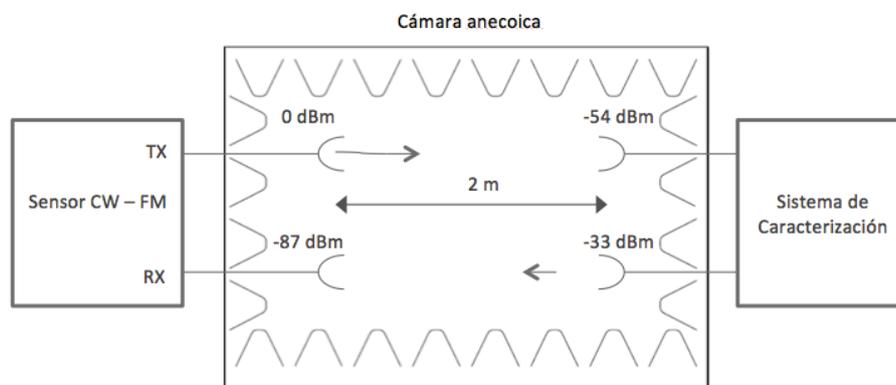


Figura 32 – Esquema del montaje final del sistema de caracterización integrado

En este caso, a diferencia que en el del sistema instrumental, se tiene presente el efecto de las antenas.

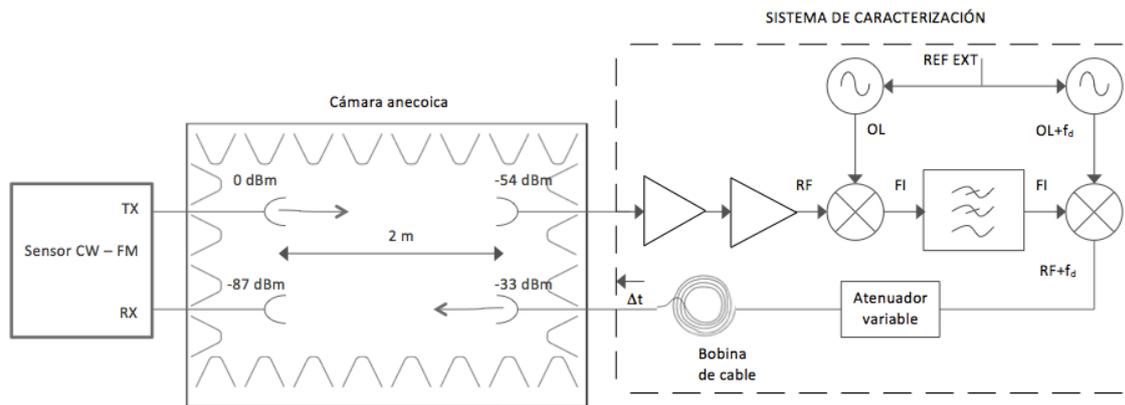


Figura 33 – Sistema de caracterización integrado

Al igual que en el montaje instrumental se han calculado los componentes que integrarán el sistema para que el sensor reciba una potencia de -87 dBm.

El sistema de caracterización se ha considerado a una distancia de 2 metros del sensor, siendo las pérdidas en el espacio libre de unos 54 dB. De este modo se ha calculado que el sistema de caracterización debe tener a la entrada unos -54 dBm y a la salida -33 dBm.

3.2.2 Componentes utilizados

Los componentes que finalmente se han utilizado son:

Componente	Unidades	Marca	Referencia
Amplificador de bajo nivel de ruido	2	Hittite	HMC516
Down-Converter	1	Hittite	HMC908LC5
PLL fraccional	2	Hittite	HMC778LP6CE
Mezclador	1	Hittite	HMC412A

Tabla 6 – Componentes del sistema integrado

A continuación se detallan las características de los componentes utilizados

Amplificador de bajo nivel de ruido

Ganancia	20 dB
Figura de ruido	2 dB

Rango de frecuencia	7 – 17 GHz
Potencia de salida 1 dBc	15 dBm
IP3 (salida)	20 dBm

Tabla 7 – Especificaciones del amplificador

Down-converter

Rango de frecuencia RF	9-12 GHz
Rango de frecuencia FI	5,5 – 15,5 GHz
Rango de frecuencia OL	DC-3,5 GHz
Ganancia de conversión	11 dB
Figura de ruido	2,2 dB
Rechazo de imagen	25 dB
Potencia de entrada 1 dBc	-5 dBm
Aislamiento (OL/RF)	50 dB
Aislamiento (OL/FI)	10 dB
IP3 (entrada)	2 dBm

Tabla 8 – Especificaciones del down-converter

PLL fraccional

Banda de RF	9,6 GHz – 10,8 GHz
Potencia de salida	4 – 13 dBm
Resolución	3 Hz
Frecuencia de referencia	DC – 350 MHz

Tabla 9 – Especificaciones del PLL fraccional

Mezclador

Rango de frecuencia RF	9 – 15 GHz
Rango de frecuencia OL	9 – 15 GHz
Rango de frecuencia FI	DC – 2,5 GHz
Pérdidas de conversión	8 dB
Figura de ruido	8 dB

Potencia de entrada 1 dBc	11,5 dBm
IP3 (Entrada)	19 dBm
Aislamiento OL/RF	44 dB
Aislamiento OL/FI	42 dB
Aislamiento RF/FI	30 dB

Tabla 10 – Especificaciones del mezclador

3.2.3 Balance del sistema

A la salida de los dos amplificadores tendríamos la señal de RF que se mezcla con el primer OL:

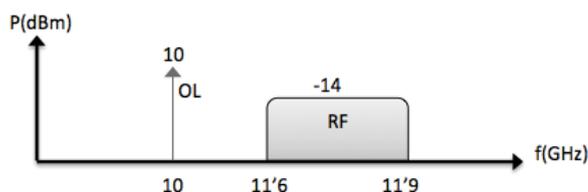


Figura 34 – RF y OL a la entrada del down-converter

A la salida del down-converter la señal tendrá el siguiente espectro:

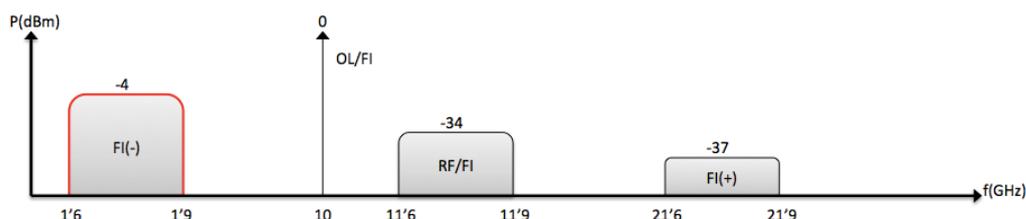


Figura 35 – Señal de salida del down-converter

El down-converter presenta un aislamiento entre la puerta RF y FI de 20 dB, por lo que la banda de 11,6 a 11,9 GHz pasa a la salida con una potencia de -34 dBm. El aislamiento entre puertas OL y FI es de 10 dB por lo que la señal del OL pasa a la puerta de FI con 0 dBm (se ha considerado que las potencias de los dos OL serán de 10 dBm). Por último, el dispositivo tiene un rechazo de imagen de 33 dB resultando ésta atenuada hasta -37 dBm.

Finalmente se hace la conversión mediante el mezclador HMC412A resultando:

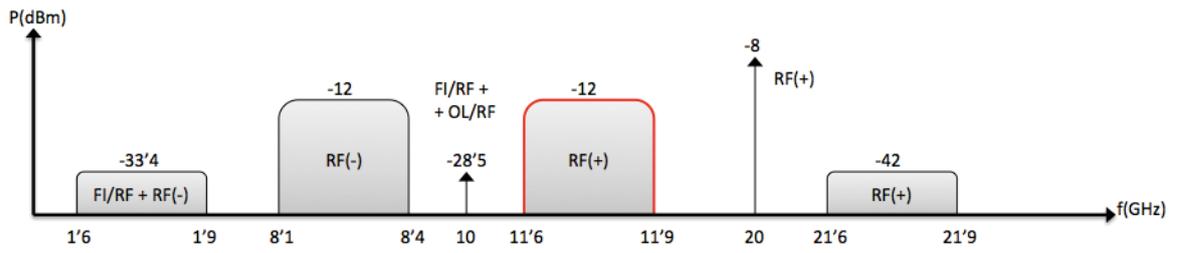


Figura 36 – Señal de salida del mezclador

A la salida del mezclador se encuentra la banda útil y su imagen con una potencia de -12 dBm junto a otros espurios. No se ha añadido ningún filtro después del mezclador ya que el sensor cuenta con uno y el resto de señales no supondrán ningún problema.

4. Conclusiones

Se ha construido un sistema de caracterización experimental para un sensor de proximidad que ha permitido optimizar la detección comparando las medidas del mismo realizadas en el laboratorio con las simulaciones en Matlab. Se ha podido comprobar que hay una gran correspondencia entre las medidas y las simulaciones.

En cuanto al tipo de señal moduladora, en caso de ausencia de señal doppler, se ha apreciado que el ancho de banda de FI requerido con moduladora triangular es mucho menor que utilizando moduladora senoidal pues la frecuencia de batido se mantiene constante en cada semiciclo. En el otro caso esta frecuencia varía y por ello se requiere un mayor ancho de banda.

Esto se ha visto reflejado en el filtro de FI utilizado ($BW=100\text{kHz}$), sobre todo al utilizar moduladoras senoidales, ya que se necesitaría un ancho de banda mayor para no atenuar frecuencias de interés. Este efecto se incrementa en presencia de doppler. Así, el filtrado produce una modulación en amplitud, disminuyendo la energía en los cambios de semiciclo (cuando pasa por mínimos de frecuencia). Esto se traduce a la hora de contar pulsos en una pérdida de sensibilidad.

Por otro lado, la moduladora triangular hace que la señal de FI tenga contempla más armónicos. Esto se debe a la propia señal de FI, además de los armónicos de la señal que se cuela por falta de aislamiento. No obstante, la moduladora triangular permite estrechar el ancho de banda de FI requerido en presencia de doppler cambiando el ciclo de trabajo.

En cuanto a la frecuencia de la señal moduladora su valor óptimo depende del filtro FI y de la desviación de frecuencia. Con el filtro de 100 kHz y una desviación de frecuencia de pico de 150 MHz para blancos a 5 metros, las frecuencias de la señal moduladora en los mejores casos rondan por los 7 kHz.

Por último, se puede afirmar que se comprobó la necesidad de aumentar el ancho de banda del filtro para detectar blancos a grandes velocidades. A pesar de que no se han

tomado resultados, se ha simulado el proceso de detección en Matlab con otra etapa de FI observando mejores resultados.

Anexo 1: Fundamentos de radar

1.1 Introducción

El radar (Radio Detection and Ranging) es un sistema electrónico que emite radiaciones electromagnéticas y utiliza las reflejadas por un objeto para determinar la localización, la velocidad o alguna otra característica de éste.

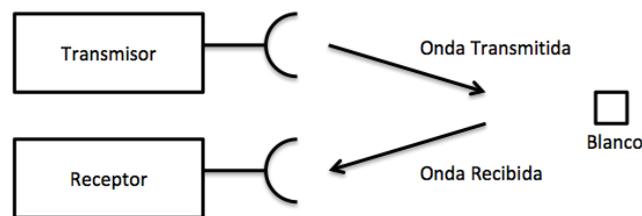


Figura 37 – Diagrama de bloques básico de un radar

Según se observa en la figura 37 la naturaleza de la señal reflejada contiene o transporta información acerca del blanco. Por ejemplo la distancia a la que se encuentra se puede extraer del tiempo que tarda en regresar el eco de la señal emitida. En el caso de disponerse de una antena direccional se puede extraer la posición angular relativa. Si el objeto está en movimiento se puede deducir su trayectoria a partir de sucesivas detecciones. Los desplazamientos en la frecuencia debido al efecto doppler provocado por el desplazamiento del objetivo permiten diferenciar entre el fondo estático y el elemento en movimiento o incluso entre diferentes objetivos. Los desplazamientos en frecuencia se pueden detectar aún si el eco del elemento en movimiento es varios órdenes de magnitud menor que el fondo [7]. Si el radar dispone de diferentes resolución se pueden conocer detalles acerca de la forma y el tamaño del objeto, normalmente para lograr mayor resolución es necesario aumentar el ancho de banda de la señal transmitida.

El objetivo de un radar no es sustituir la visión sino complementarla haciéndonos conocer lo que el ojo no puede distinguir. El radar no puede resolver detalles tan bien como el ojo, ni distinguir colores, no obstante, puede detectar objetos en condiciones meteorológicas en las que el hombre no puede ver tales como niebla, lluvia, oscuridad, etc. Además el radar permite medir exactamente la distancia a la que se encuentra un objeto y/o la

velocidad a la que se desplaza. Ésta es probablemente su contribución más importante [1].

Uno de los factores limitantes en el uso del radar es el ruido proveniente de diversas fuentes como por ejemplo ruido cósmico, el generado por circuitos propio o cercanos, contramedidas en caso de uso militar, interferencias por ejemplo de antenas o otros radares.

La aplicación de esta tecnología es muy variada y se puede encontrar en el control de tráfico aéreo, teledetección, maniobras espaciales, navegación marítima, además de su uso intensivo en el ámbito militar, etc.

1.2 Clasificación de los sistemas radar

Los diferentes sistemas pueden clasificarse atendiendo a distintos criterios [3]:

a) Según la naturaleza del objeto

- Radar primario: el blanco es pasivo y se limita a actuar como reflector de la señal que incide en él.
- Radar secundario: el blanco es activo (ej. avión) respondiendo a la señal de interrogación que recibe desde el transmisor (ej. torre de control).

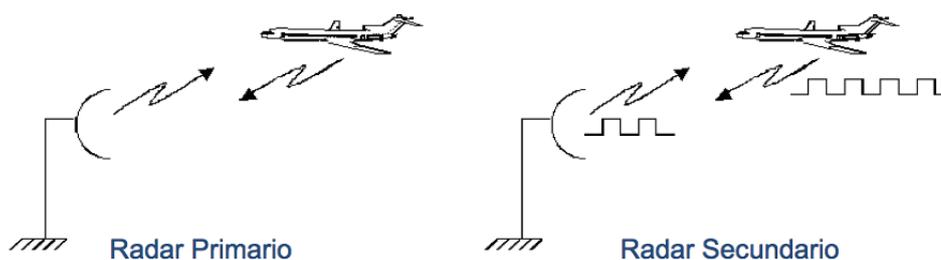


Figura 38 – Radares primario y secundario

b) Según la posición relativa del transmisor y receptor

- Radar monoestático cuando es la misma antena la que se usa para transmitir y recibir, o existiendo una para cada función se encuentran en la misma ubicación.
- Radar biestático cuando emplea una antena diferente para la transmisión y recepción.

- Radar multiestático cuando la localización del transmisor está alejada del receptor. Pueden existir varios receptores, también distanciados entre sí, o uno solo en cuyo caso se denomina radar biestático.

c) Según la naturaleza de la señal transmitida

- Radar de onda continua o radar doppler: emite una señal de onda continua sin modulación. Proporciona únicamente la velocidad radial del blanco.
- Radar de onda continua modulada: la onda continua transmitida se modula en frecuencia o fase obteniéndose la distancia y velocidad del blanco.
- Radar de pulsos: la señal se pulsa siguiendo una trama periódica. Es el clásico radar para medida de distancia.



Figura 39 – Radares CW-FM y de pulsos

Además de los anterior, a veces se suele referir a su frecuencia de funcionamiento o a su aplicación como una forma más de agruparlos.

1.3 Diagrama de bloques del radar

Un sistema radar está formado básicamente por las partes que se muestra en la figura 40 a modo de diagrama de bloques, aunque en función de la aplicación existen otras mejoras o ampliaciones [8].

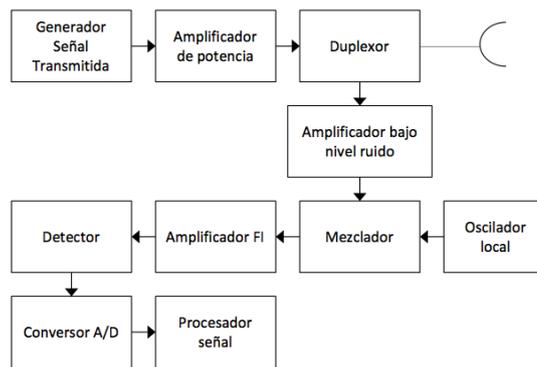


Figura 40 – Diagrama de bloques de un radar genérico

La señal que emite el radar, normalmente una serie repetitiva de pulsos o rampas de frecuencia, se genera en la parte del transmisor y se radia al espacio a través de la antena. El duplexor permite que con una sola antena se pueda realizar la transmisión y recepción de la señal. La radiación emitida se propaga por el espacio hasta que es interceptada por el blanco, en el momento de la colisión una parte de la señal es reflejada en la dirección donde se encuentra el radar, esta señal la capta la antena y es amplificada por el receptor. Mediante el mezclado de la señal del oscilador local se realiza un desplazamiento descendiente de la señal recibida del duplexor. En el caso de que el nivel de la señal es suficiente se produce la detección del objeto [7].

Normalmente un radar indica la distancia y el ángulo del blanco, esta información se puede enviar directamente a un monitor o mediante procesado de señal extraer otros parámetros de la señal de eco captada.

1.4 Radar de onda continua

Una de las grandes ventajas de este tipo de radar es la facilidad que permite a la hora de medir el efecto doppler, permitiendo (con algún tipo de codificación) medir al mismo tiempo la distancia del blanco.

Además entre las ventajas del radar de onda continua está la aparente sencillez constructiva y la poca energía que dispersa por el resto del espectro. Éste hecho reduce significativamente las interferencias producidas al operar el radar en el entorno circundante, mientras que al mismo tiempo simplifica la circuitería de preselección en microondas, filtrado, etc. En la parte de recepción se facilita también el diseño dado que

se necesitará un ancho de banda de FI reducido. Por otro lado el bajo requerimiento en potencia de los radares de CW posibilita el uso de un único componente de estado sólido en la etapa de potencia.

Otro de los puntos fuertes del radar CW en su facilidad de manejar con alta precisión diferentes blancos que se desplazan a prácticamente cualquier velocidad.

Como contrapartida de los radares CW tienen también algunas desventajas relevantes, el hecho de la transmisión continua provoca fugas hacia el receptor que terminan en forma de ruido en el receptor complicando la detección o limitando la sensibilidad del radar [7].

1.4.1 Efecto doppler

Se incluye aquí el concepto del efecto Doppler así como su ecuación práctica en el ámbito radar.

El efecto Doppler (en el entorno radar), es el aparente cambio de frecuencia de la onda reflejada producido por el movimiento relativo del blanco respecto al radar.

$$f_d = \frac{2 \cdot V_R \cdot f_T}{c}$$

- f_d : Frecuencia doppler
- V_R : Velocidad relativa del blanco respecto al radar
- f_T : Frecuencia de transmisión
- Velocidad de propagación

1.4.2 Radar CW-FM

El radar de onda continua de frecuencia modulada radia energía de forma continua, por lo que no es posible separar la señal transmitida y la recibida en el tiempo. Es por ello que obtener la información de la distancia y la velocidad del blanco solo es viable si la señal transmitida se modula en amplitud o en fase.

Además, no se modula en amplitud la señal debido a que es prácticamente imposible separar la señal reflejada del resto de la interferencia de fondo de la transmisión. Las señales reflejadas de los blancos aunque se encuentren a unos metros del radar serán decenas de decibelios inferiores a la señal transmitida. Por ello el único medio para determinar el retraso del reflejo respecto a lo transmitido es a través de la diferencia de fase de las señales si se modulan angularmente. Para realizar la operación de recuperar la diferencia de fase basta con realizar la multiplicación de las señales transmitida y recibida, uno de los resultados de esta multiplicación será una señal con la fase diferencia de las dos iniciales (frecuencia de batido).

En la figura 41 se puede ver un diseño que realiza las funciones anteriormente mencionadas.

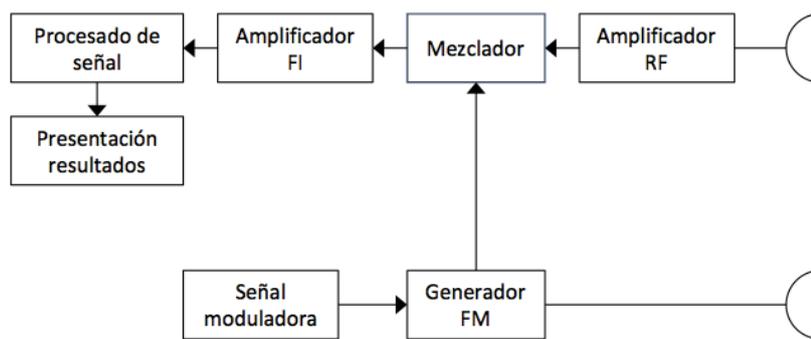


Figura 41 – Radar CW-FM

En un radar de FM se pueden usar diferentes tipos de señales para realizar la modulación, una típica es modular la frecuencia mediante otra señal sinusoidal.

En la parte alta de la figura 42 se observa una moduladora triangular y su reflejo. A partir de esta representación es sencillo demostrar el procedimiento de cálculo de la distancia del radar al blanco[9].

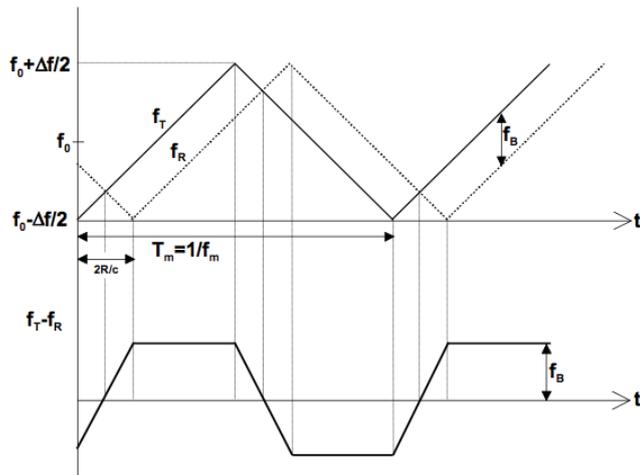


Figura 42 – Frecuencia transmitida, recibida y diferencia entre ambas (batido)

Dado que existe una relación de proporcionalidad entre $\Delta f / (T_m / 2)$ y $f_B / (2R / c)$ según la figura 43 obtenemos la distancia al blanco R:

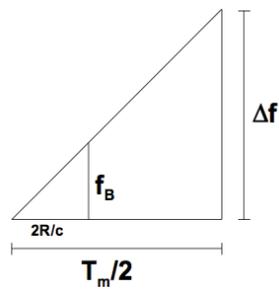


Figura 43 – Relación común entre ambas pendientes

$$\frac{\Delta f}{T_m / 2} = \frac{f_B}{2R / c} \Rightarrow R = \frac{c \cdot f_B}{4 \cdot \Delta f \cdot f_m}$$

- T_m : Periodo de la moduladora
- f_B : Frecuencia de batido
- R: Distancia al blanco
- c: Velocidad de blanco
- f_m : Frecuencia moduladora
- Δf : Desviación de frecuencia

1.5 Ecuación radar

La ecuación radar relaciona el alcance de un radar con las características del transmisor, receptor, antena, blanco y entorno. Es útil, no sólo como medio para determinar la máxima distancia desde el radar al blanco, sino que además puede ser utilizada para entender la operación del radar y como base para el diseño del mismo [3].

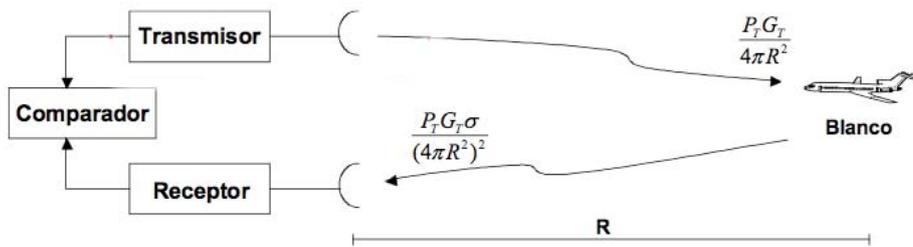


Figura 44 – Diagrama para determinar el alcance del radar

Si la potencia transmitida es P_T y la antena tiene una ganancia G_T , la densidad de potencia en el blanco es:

$$D_p = \frac{P_T \cdot G_T}{4 \cdot \pi \cdot R^2}$$

Con un blanco de sección radar σ , la potencia reflejada por éste en la dirección del radar es:

$$P_{REF} = \frac{P_T \cdot G_T \cdot \sigma}{4 \cdot \pi \cdot R^2}$$

Y la densidad de potencia en el radar:

$$D_p' = \frac{P_T \cdot G_T \cdot \sigma}{(4 \cdot \pi \cdot R^2)^2}$$

Si la antena receptora tiene una ganancia efectiva A_e , la potencia recibida a la entrada del receptor viene dada por: $P_R = A_e \cdot D_p'$ donde, $A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_R$ obteniendo la ecuación radar:

$$P_R = \frac{P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

Ésta sería la forma más simplificada de la ecuación radar. A ella se le pueden añadir pérdidas del sistema, efectos del entorno del radar o la relación S/N.

1.6 Frecuencias de funcionamiento

No existen unos límites definidos para el rango de trabajo en frecuencia de un radar. De hecho cualquier dispositivo que emita alguna forma de radiación electromagnética y use el reflejo de la mismo para detectar un objeto es un radar.

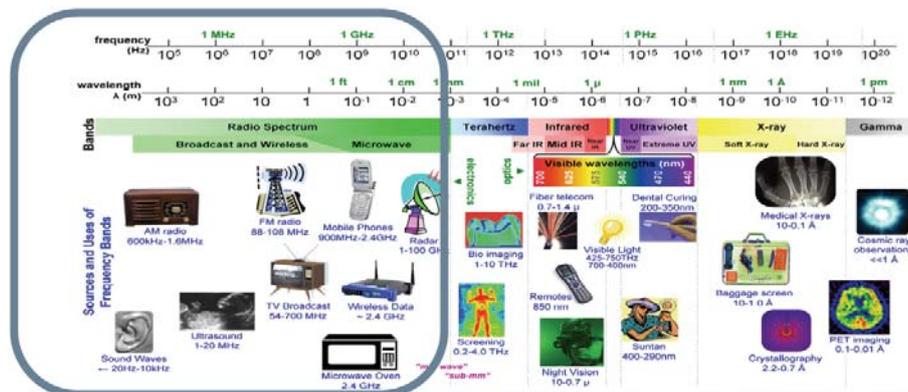


Figura 45 – Espectro electromagnético

Se han diseñado radares para funcionar a frecuencias que van desde los megahercios hasta la zona del espectro del ultravioleta. Los principios básicos son siempre los mismos independientemente de la frecuencia. Sin embargo la implementación práctica es completamente diferente, aunque la mayoría de los radares suelen operar en la zona de las microondas

En la tabla 10 se muestran los rangos de frecuencia definidos por el IEEE y por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU), así como las letras asociadas a cada una de las bandas [10].

El presente trabaja en la denominada banda X que corresponde al rango de las ondas centimétricas (SHF, Super High Frequency).

IEEE			ITU	
Banda		Rango de frecuencias	Banda	Rango de frecuencias
HF		3 MHz – 30 MHz	High frequency (HF)	3-30 MHz
VHF		30 MHz – 300 MHz	Very high frequency (VHF)	30-300 MHz
UHF		300 MHz – 1 GHz	Ultra high frequency (SHF)	0'3-3 GHz
M I C R O O N D A S	L	1 GHz – 2 GHz		
	S	2 GHz – 4 GHz		
	C	4 GHz – 8 GHz		
	X	8 GHz – 12 GHz		
	Ku	12 GHz – 18 GHz		
	K	18 GHz – 27 GHz		
	Ka	27 GHz – 40 GHz		
	V	40 GHz – 75 GHz		
	W	75 GHz – 110 GHz		
mm		110 GHz – 300 GHz	Super high frequency (SHF)	3-30 GHz
			Extremly high frequency (EHF)	30-300 GHz

Tabla 11 – Bandas de frecuencia, según IEEE y ITU

Anexo 2: Montaje del sensor CW-FM

El diagrama de bloques del sensor realizado se muestra en la figura 46:

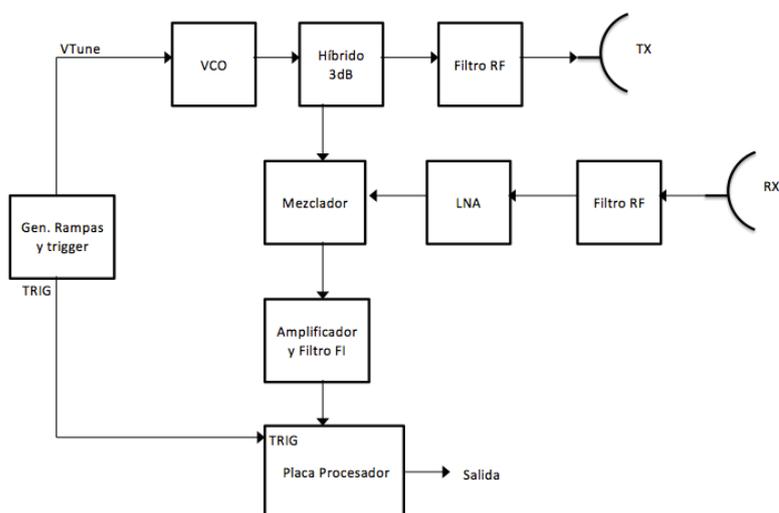


Figura 46 – Esquema del sensor CW/FM

Como podemos el VCO es atacado directamente con la señal del generador. En este caso no se ha requerido linealizar debido a que el VCO presenta una buena linealidad. La señal del VCO se reparte por una parte a un mezclador para compararla con la señal recibida, y por otra parte hacia un filtro que minimiza los efectos de posibles interferencias externas. Al mezclador, pues, llega la señal que se transmite y la señal recibida filtrada y amplificada.

Finalmente la señal de FI se amplifica mediante 4 operacionales y, tras ello, se realiza el procesado de decisión. Debido a la proximidad de las antenas, el amplificador, además de necesitar una alta ganancia, debe eliminar cualquier componente de baja frecuencia que pueda enmascarar la señal del blanco. A la salida de este amplificador-filtro de FI se conecta el comparador, el divisor y el contador que se pone a "1" si la cuenta es correcta.

El montaje del sensor se ha realizado en 3 placas; placa de RF, placa de barrido y trigger y placa de procesado (donde también se incluye el amplificador de FI).

La etapa amplificador-filtro se hace necesaria debido al inevitable y bajo aislamiento entre TX y RX que presenta el radar. En principio interesaba por un lado, una frecuencia central (batido) alta para eliminar con mayor facilidad la componente de baja frecuencia pero requería tanto moduladoras de alta frecuencia como mayores desviaciones de frecuencia dificultando otros aspectos, y por otro lado, un ancho de banda lo menor posible para eliminar cualquier armónico, pero sin embargo existe un ancho de banda mínimo debido al tiempo que se tarda en procesar. Finalmente, se optó por una etapa centrada en 150 kHz con un ancho de banda de unos 100 kHz.

Placa de barrido y trigger

Esta placa tiene la función de generar la señal de barrido del VCO a partir de un circuito comercial montado en una placa conectorizada. Tiene dos salidas, la que ataca al VCO (senoidal, triangular y tipo rampa) y la de trigger (tipo pulso).

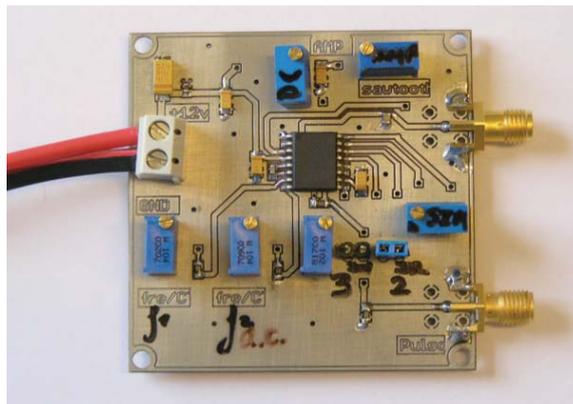


Figura 49 – Placa del generador de barrido y trigger

Placa de procesado

En esta placa antes de que actúe el contador, la señal se convierte a cuadrada por medio de un trigger Schmitt y posteriormente pasa por un divisor de frecuencia por 10.

A través de una interfaz RS-232 el usuario debe indicar el margen de frecuencias que se quiere contar. El contador, que puede contar entre 10 y 80 kHz (100 y 800 kHz contando con el divisor), dará a la salida un “1” cuando cuente en un intervalo de tiempo de 1 ms tantos pulsos que equivalgan al rango de frecuencias indicado.

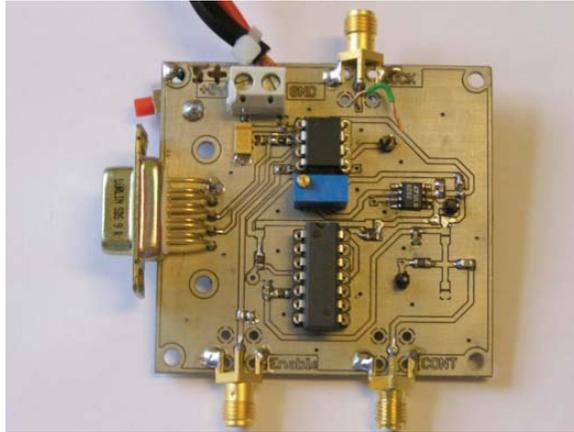


Figura 50 – Placa de procesado

Anexo 3: Evaluación del programa en Matlab

En el presente anexo se presentan algunos ejemplos del proceso de detección del sensor simulado con Matlab. Para ello se ha evaluado el efecto que tiene el filtro y el número de pulsos contado con diferentes señales de FI.

Se ha contado con diferentes moduladoras (tipo y frecuencia) y blancos a distintas distancias y velocidades (doppler).

El resto de parámetros se ha dejado tal y como aparece en la tabla 12:

Δf	150 MHz
$\frac{V_{\text{acoplada}}}{V_{\text{deseada}}}$	5
BW_{FI}	100 kHz

Tabla 12 – Parámetros de entrada fijos

3.1 Amplificador-filtro de FI

A continuación se muestran algunas gráficas de las señales a la entrada y salida del filtro.

Tipo de moduladora: Senoidal

Frecuencia moduladora: 7 kHz Distancia al blanco: 5 metros

Frecuencia doppler: 0 Sin señal acoplada

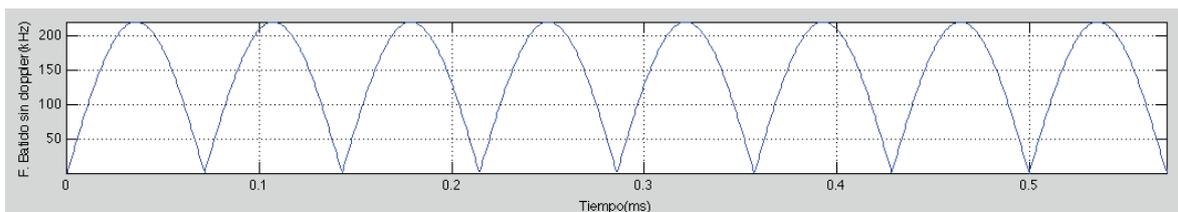


Figura 51 – Frecuencia Señal FI

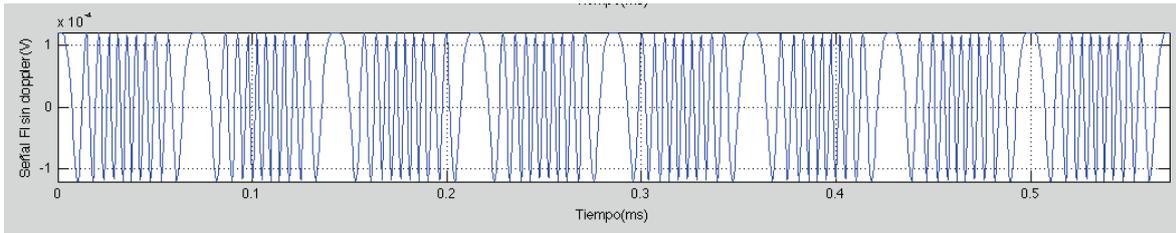


Figura 52 – Señal FI a la entrada del filtro

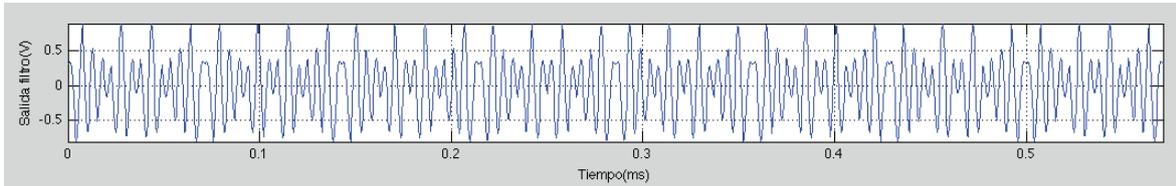


Figura 53 – Señal FI a la salida del filtro

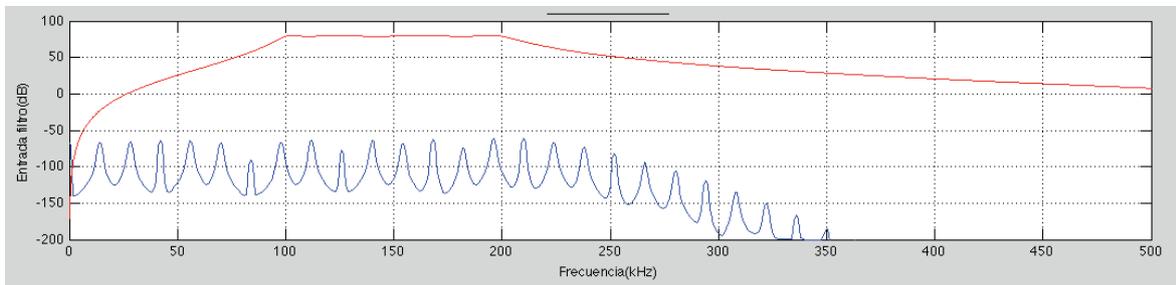


Figura 54 – Espectro de la entrada del filtro

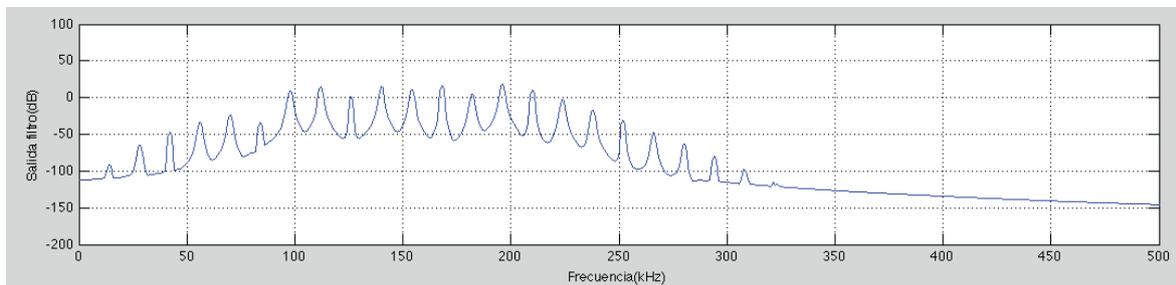


Figura 55 – Espectro de la salida del filtro

Tipo de moduladora: Triangular (50%)

Frecuencia moduladora: 7 kHz Distancia al blanco: 5 metros

Frecuencia doppler: 60 kHz Sin señal acoplada

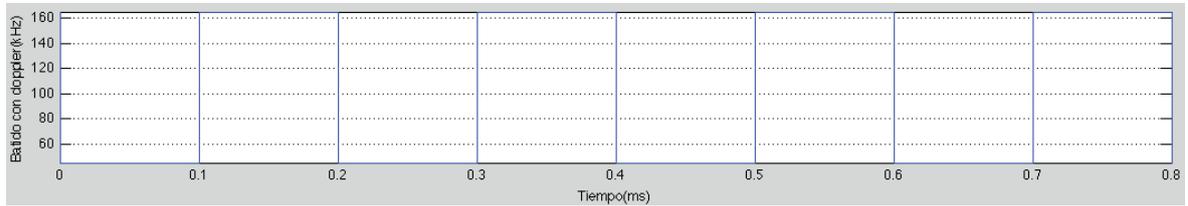


Figura 56 – Frecuencia Señal FI

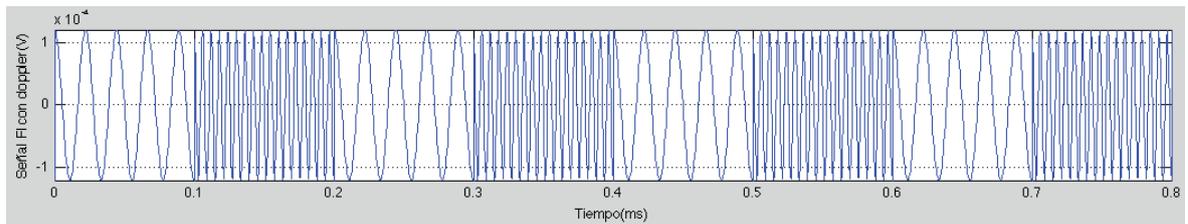


Figura 57 – Señal FI a la entrada del filtro

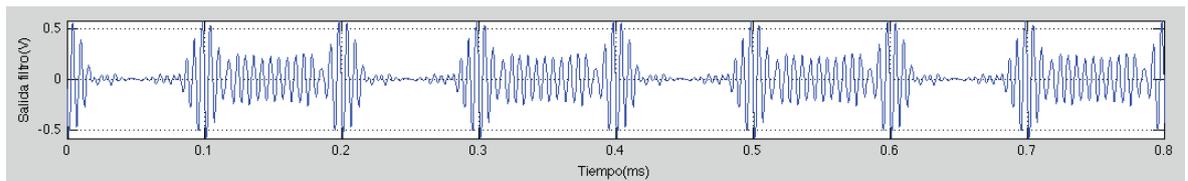


Figura 58 – Señal FI a la salida del filtro

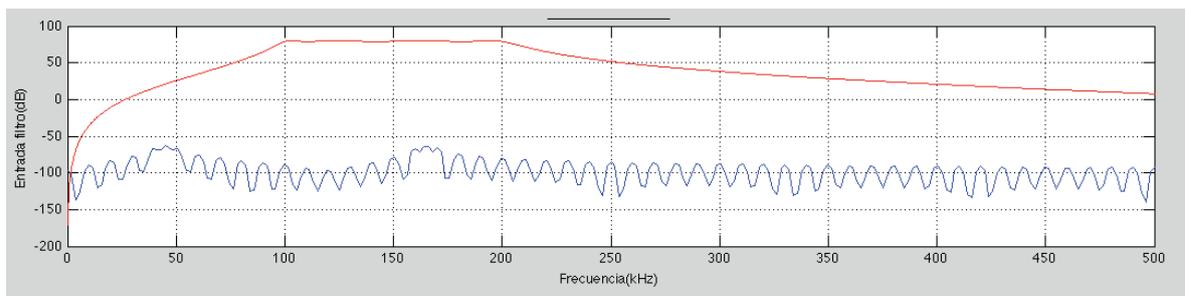


Figura 59 – Espectro de la entrada del filtro

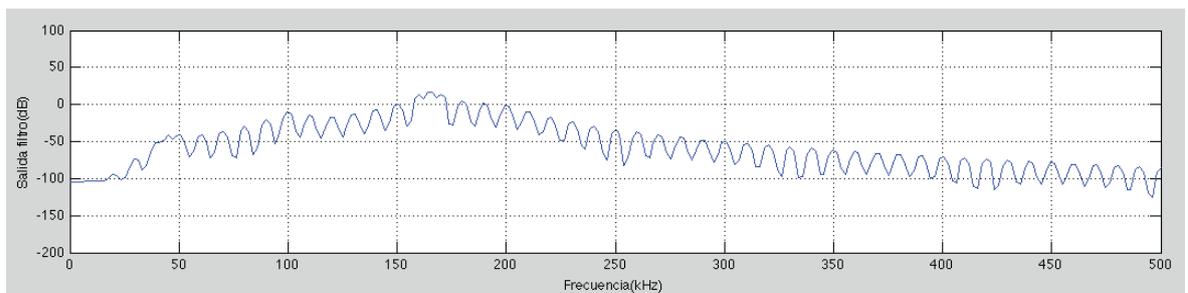


Figura 60 – Espectro de la salida del filtro

Tipo de moduladora: Senoidal

Frecuencia moduladora: 6 kHz

Distancia al blanco: 5 metros

Frecuencia doppler: 60 kHz

Con señal acoplada

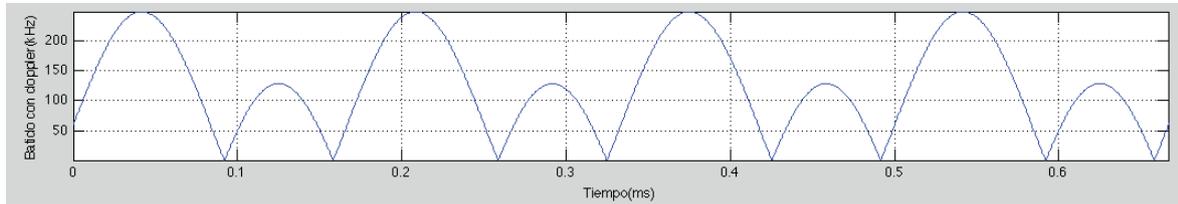


Figura 61 – Frecuencia Señal FI

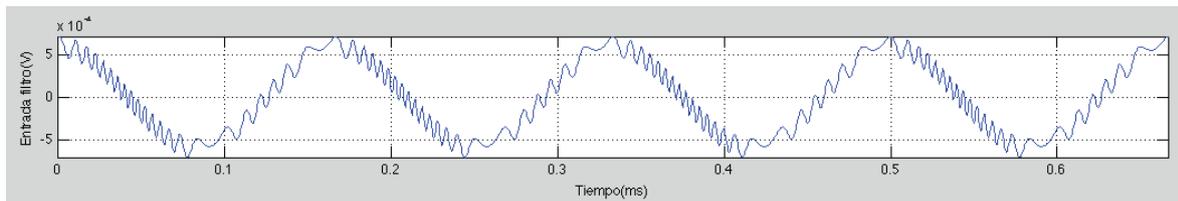


Figura 62 – Señal FI a la entrada del filtro

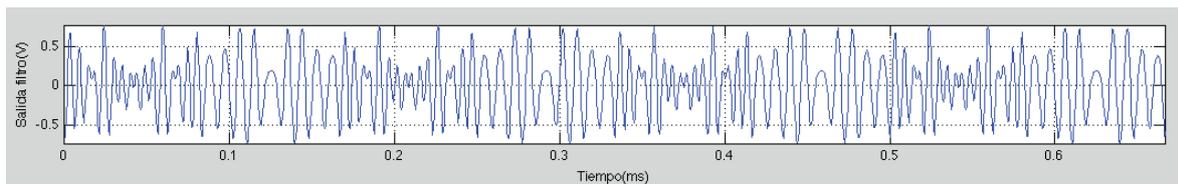


Figura 63 – Señal FI a la salida del filtro

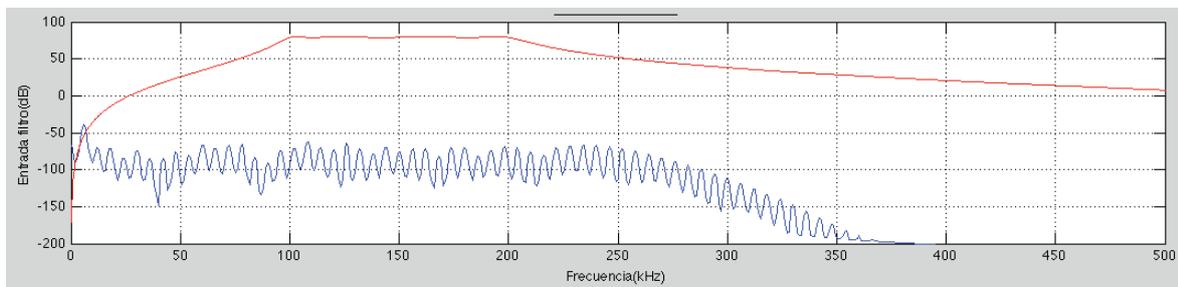


Figura 64 – Espectro de la entrada del filtro

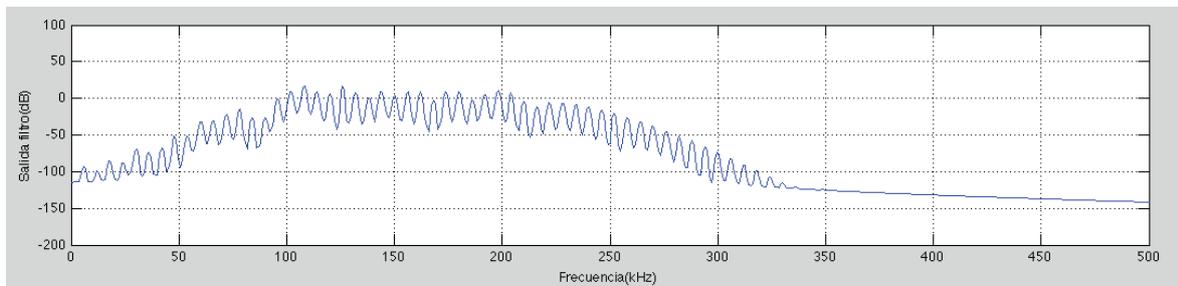


Figura 65 – Espectro de la salida del filtro

Tipo de moduladora: Triangular (50%)

Frecuencia moduladora: 6 kHz Distancia al blanco: 5 metros

Frecuencia doppler: 0 Con señal acoplada

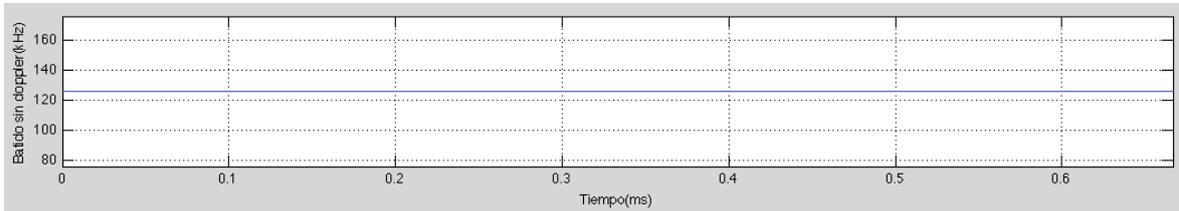


Figura 66 – Frecuencia Señal FI

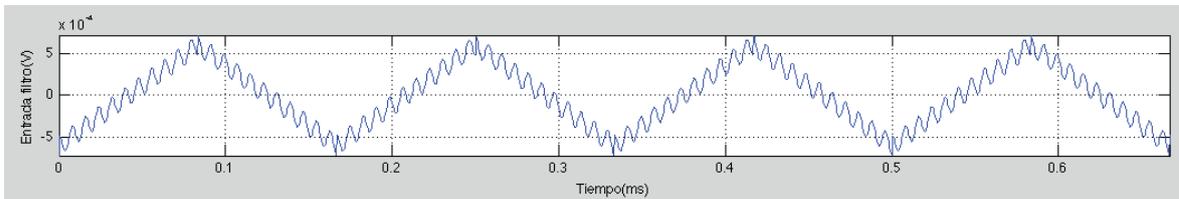


Figura 67 – Señal FI a la entrada del filtro

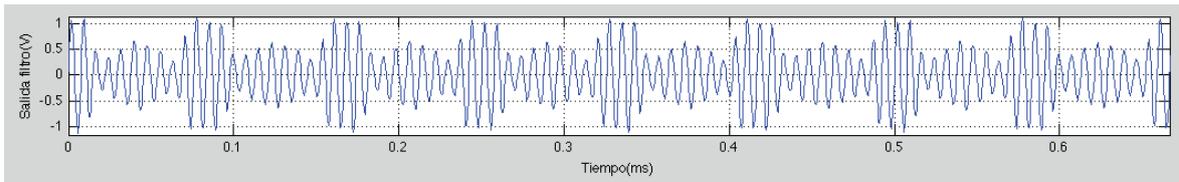


Figura 68 – Señal FI a la salida del filtro

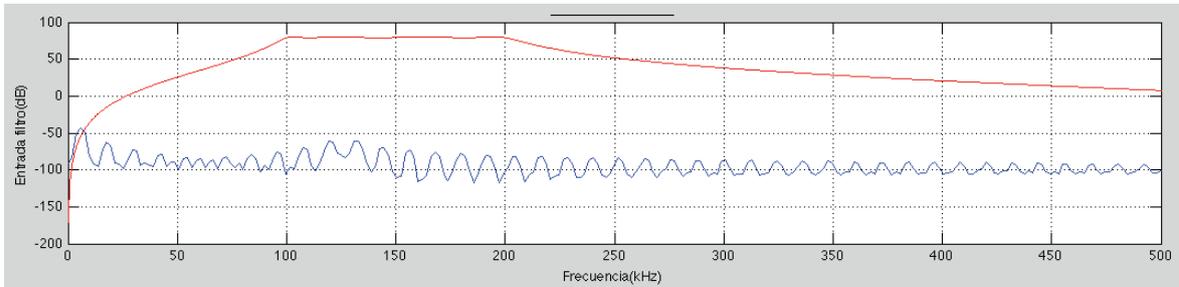


Figura 69 – Espectro de la entrada del filtro

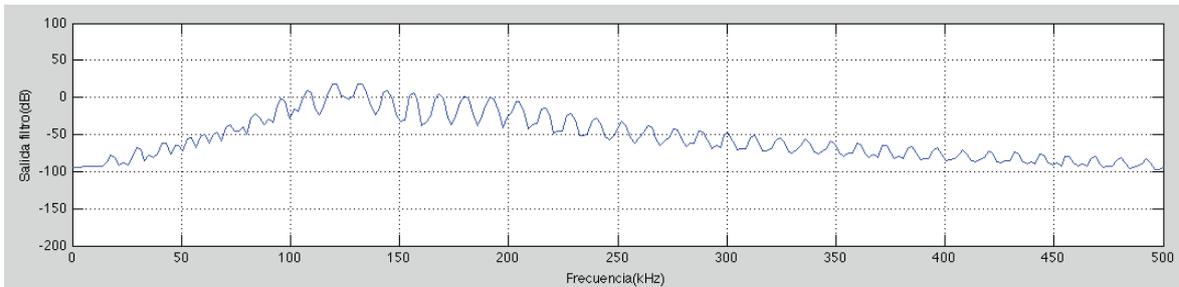


Figura 70 – Espectro de la salida del filtro

Tipo de moduladora: Senoidal

Frecuencia moduladora: 8 kHz

Distancia al blanco: 5 metros

Frecuencia doppler: +80 kHz

Con señal acoplada

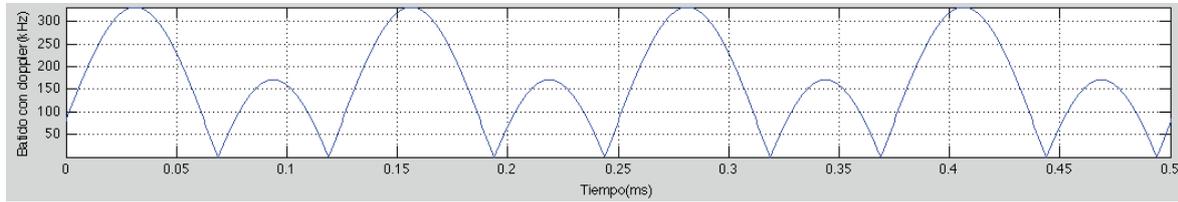


Figura 71 – Frecuencia Señal FI

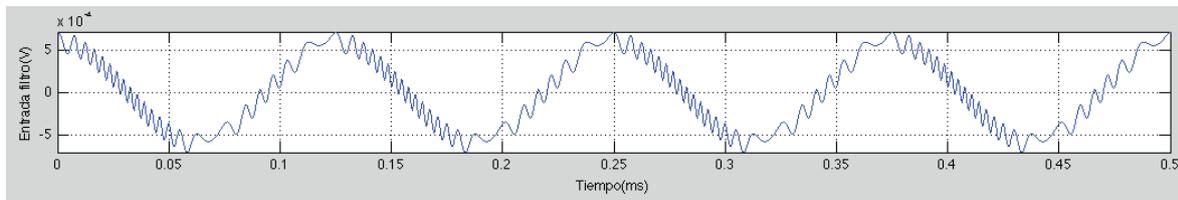


Figura 72 – Señal FI a la entrada del filtro

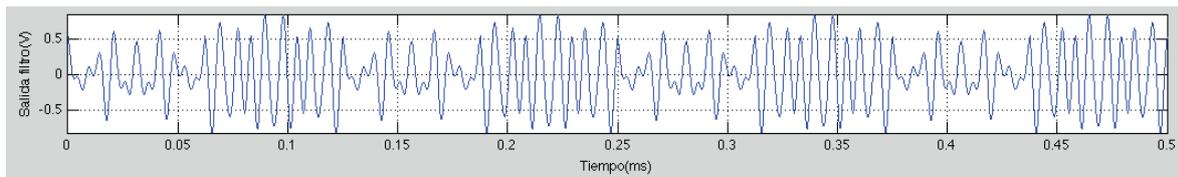


Figura 73 – Señal FI a la salida del filtro

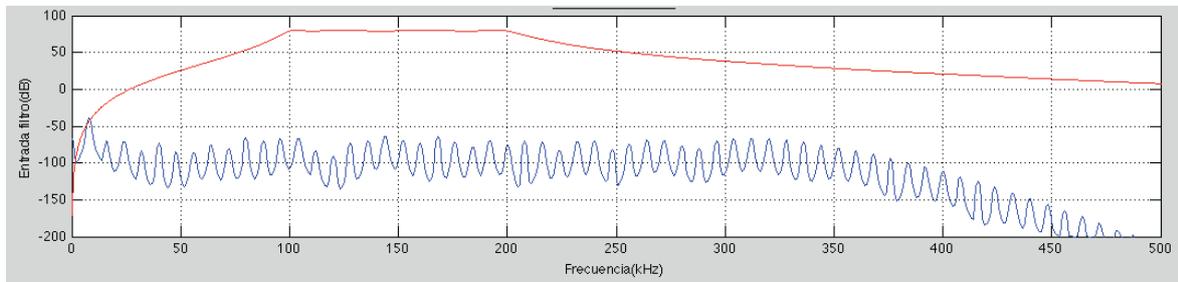


Figura 74 – Espectro de la entrada del filtro

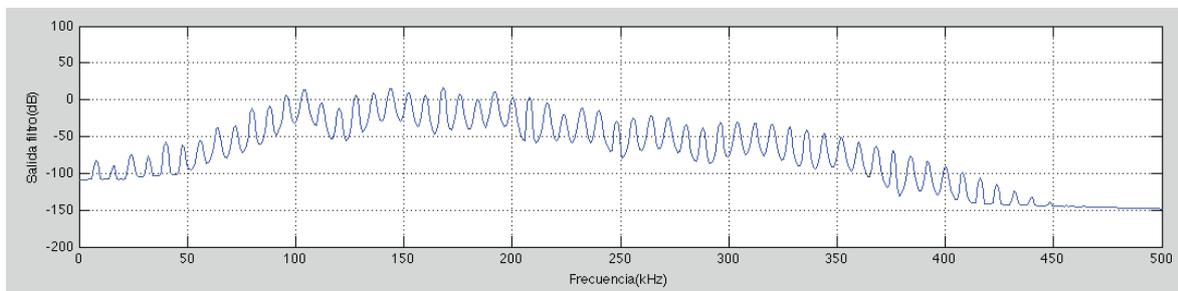


Figura 75 – Espectro de la salida del filtro

Tipo de moduladora: Triangular (50%)

Frecuencia moduladora: 7 kHz Distancia al blanco: 5 metros

Frecuencia doppler: +100 kHz Con señal acoplada

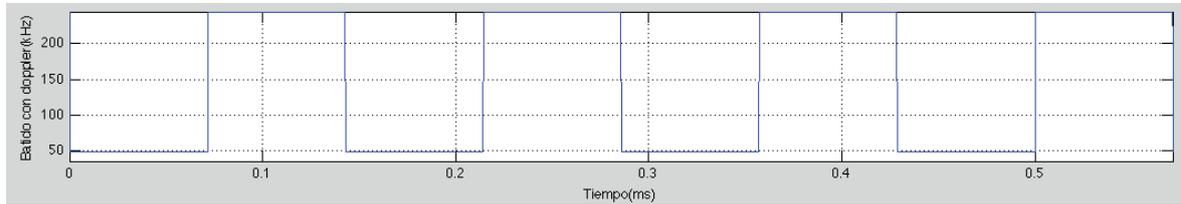


Figura 76 – Frecuencia Señal FI

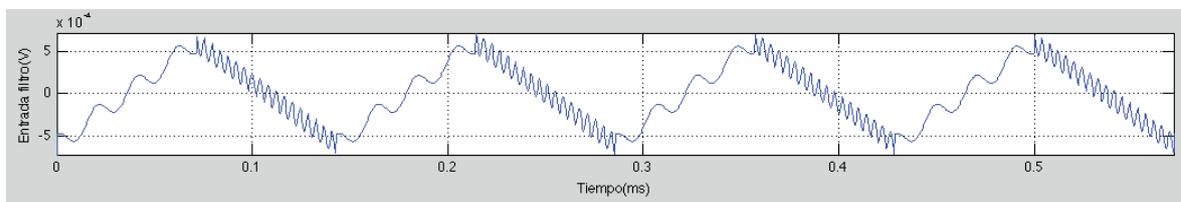


Figura 77 – Señal FI a la entrada del filtro

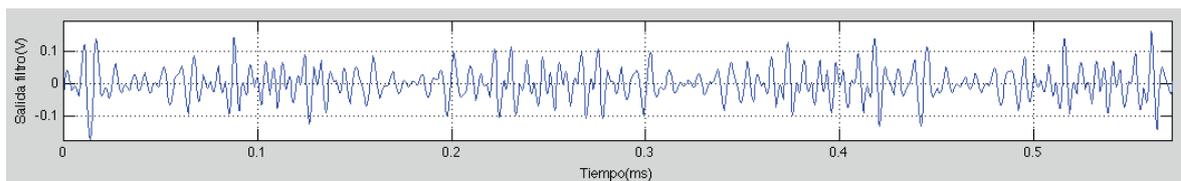


Figura 78 – Señal FI a la salida del filtro

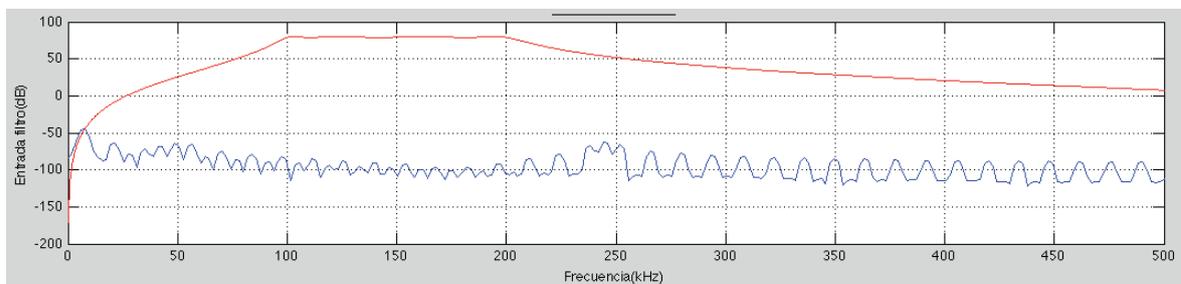


Figura 79 – Espectro de la entrada del filtro

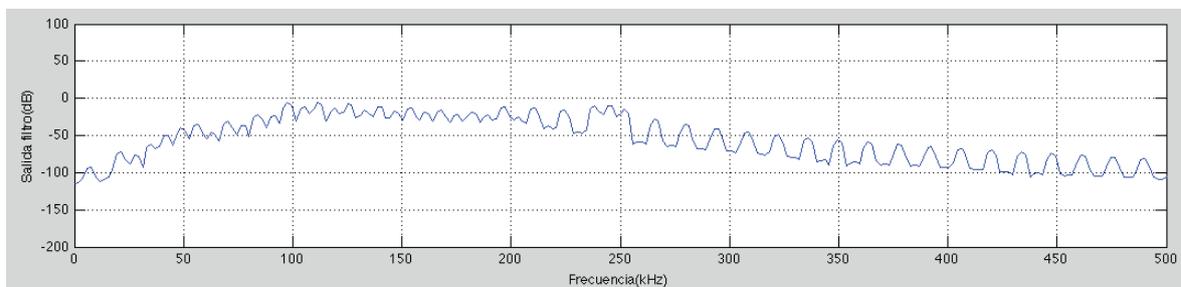


Figura 80 – Espectro de la salida del filtro

Tipo de moduladora: Senoidal

Frecuencia moduladora: 4 kHz

Distancia al blanco: 8,5 metros

Frecuencia doppler: +20 kHz

Con señal acoplada

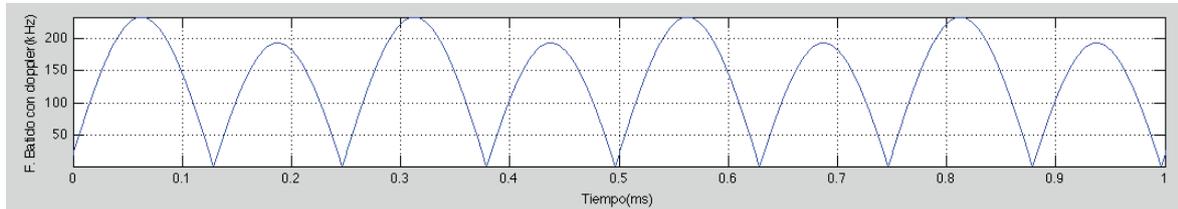


Figura 81 – Frecuencia Señal FI

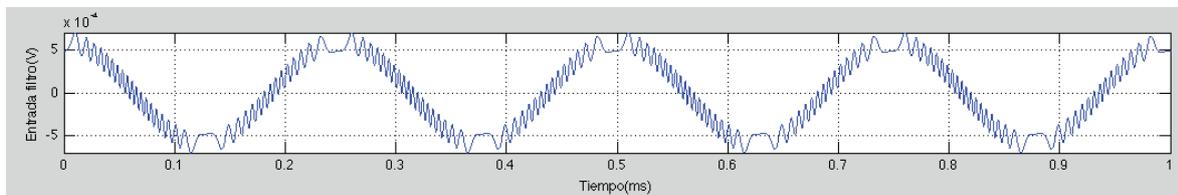


Figura 82 – Señal FI a la entrada del filtro

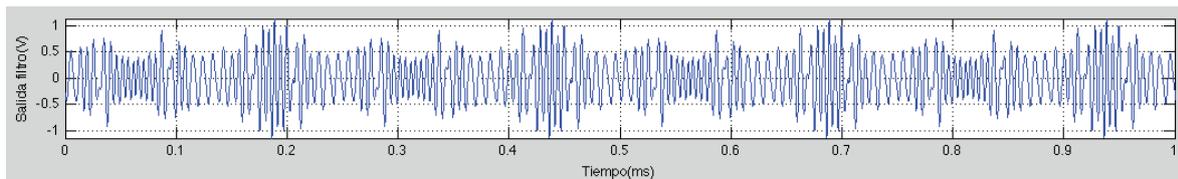


Figura 83 – Señal FI a la salida del filtro

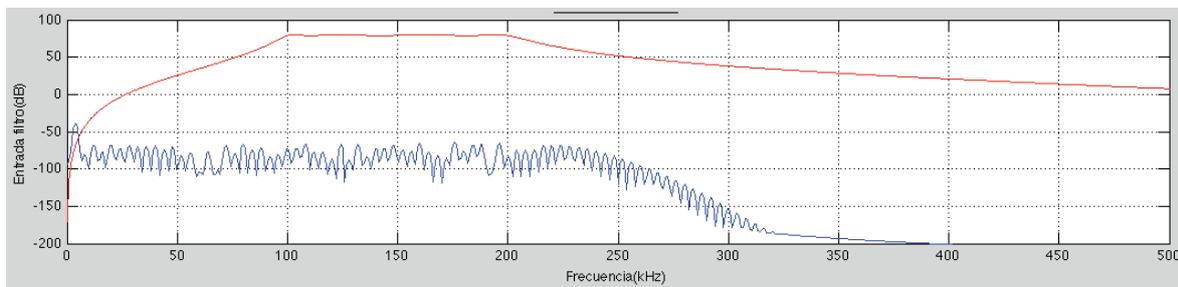


Figura 84 – Espectro de la entrada del filtro

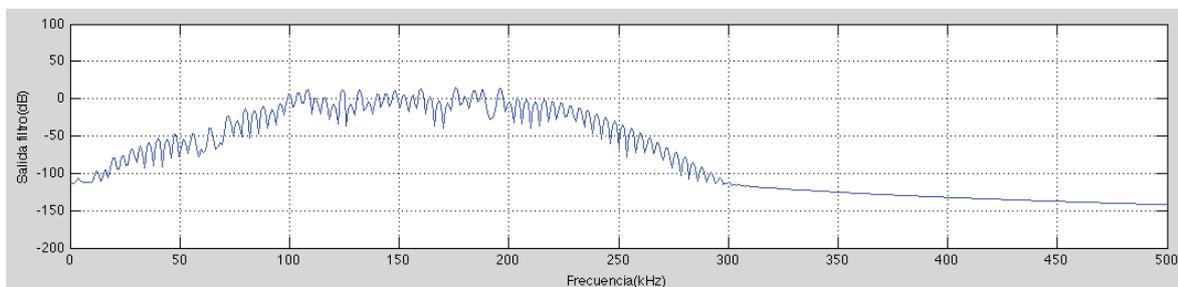


Figura 85 – Espectro de la salida del filtro

Tipo de moduladora: Triangular (50%)

Frecuencia moduladora: 5 kHz Distancia al blanco: 8,5 metros

Frecuencia doppler: +20 kHz Con señal acoplada

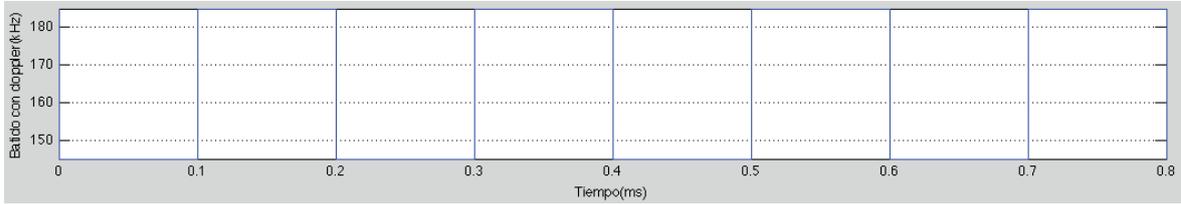


Figura 86 – Frecuencia Señal FI

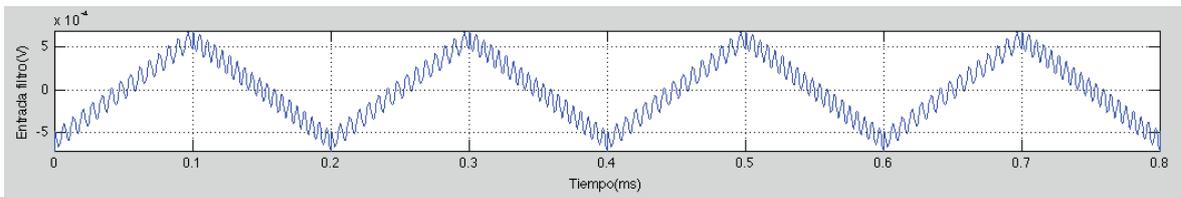


Figura 87 – Señal FI a la entrada del filtro

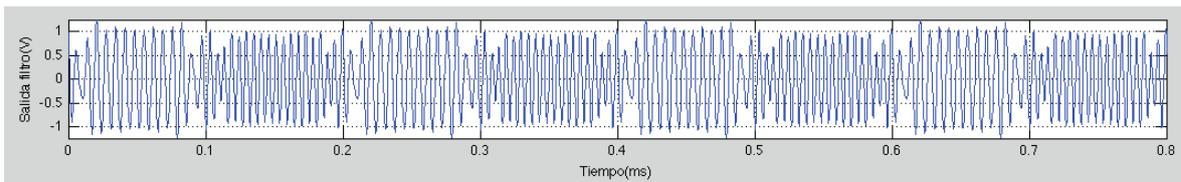


Figura 88 – Señal FI a la salida del filtro

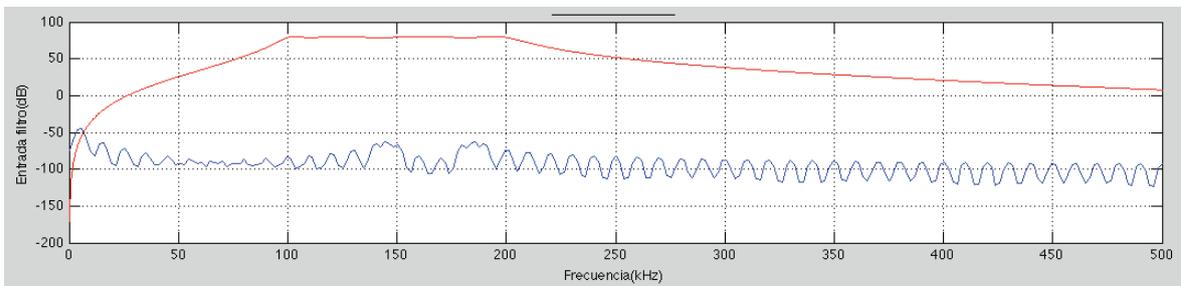


Figura 89 – Espectro de la entrada del filtro

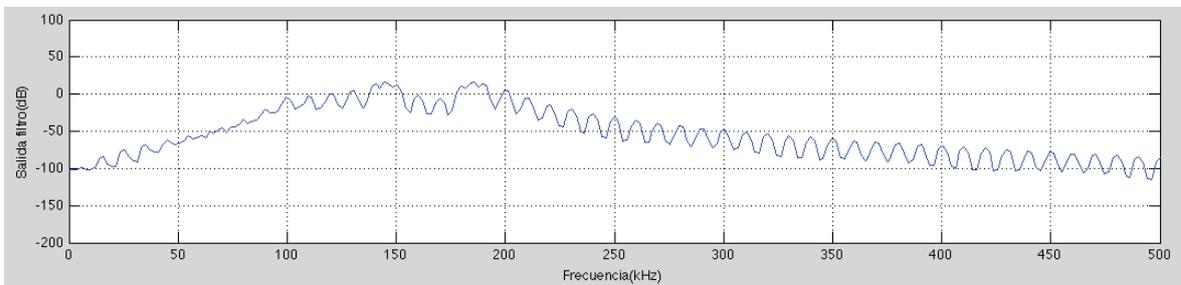


Figura 90 – Espectro de la salida del filtro

3.2 Contador de pulsos

A continuación se ilustran unas tablas que recogen el número de pulsos contados por el programa en Matlab en diferentes condiciones.

Forma de onda: Triangular

Rampa de subida: 50%

Distancia al blanco: 5 m

fm \ fd	4 kHz	5 kHz	6 kHz	7 kHz	8 kHz	9 kHz
0	10	12	13	14	19	20
+20 kHz	10	12	12	13	17	18
+40 kHz	12	14	13	15	13	17
+60 kHz	16	16	19	18	12	13
+80 kHz	17	19	20	17	11	11
+100 kHz	19	20	19	17	14	11
+120 kHz	20	18	16	14	10	13
+140 kHz	17	16	15	12	12	13
+160 kHz	15	14	13	12	12	12
Media	15,1	15,6	15,5	14,6	13,3	14,2

Forma de onda: Triangular

Rampa de subida: 45%

Distancia al blanco: 5 m

fm \ fd	4 kHz	5 kHz	6 kHz	7 kHz	8 kHz	9 kHz
0	10	11	13	15	17	17
+20 kHz	10	11	13	15	17	19
+40 kHz	11	13	13	15	17	17
+60 kHz	13	14	16	15	14	15
+80 kHz	15	17	19	16	11	13
+100 kHz	17	20	20	18	12	11
+120 kHz	20	20	17	16	13	11
+140 kHz	19	19	14	13	13	12
+160 kHz	18	16	12	13	13	12
Media	14,7	15,6	15,2	15,1	14,1	14,1

Forma de onda: Triangular Rampa de subida: 40% Distancia al blanco: 5 m

fm \ fd	4 kHz	5 kHz	6 kHz	7 kHz	8 kHz	9 kHz
0	10	12	13	16	15	17
+20 kHz	10	11	13	15	18	18
+40 kHz	11	12	13	15	18	19
+60 kHz	13	13	11	15	17	18
+80 kHz	15	14	18	14	15	16
+100 kHz	17	19	20	17	10	14
+120 kHz	19	20	18	15	11	11
+140 kHz	19	19	17	15	11	11
+ 160 kHz	19	17	14	14	12	12
Media	14,7	15,2	15,2	15,1	14,1	15,1

Forma de onda: Triangular Rampa de subida: 50% Distancia al blanco: 8,5 m

fm \ fd	4 kHz	5 kHz	6 kHz	7 kHz	8 kHz	9 kHz
0	14	16	19	20	17	18
+20 kHz	13	17	19	19	16	17
+40 kHz	15	16	17	19	18	17
+60 kHz	20	12	15	17	20	20
+80 kHz	20	13	13	14	19	19
+100 kHz	18	14	10	13	15	20
+120 kHz	16	14	11	10	13	18
+140 kHz	15	14	12	11	12	15
+ 160 kHz	12	13	12	11	10	13
Media	15,9	14,3	14,2	14,9	15,5	17,4

Forma de onda: Triangular

Rampa de subida: 45%

Distancia al blanco: 8,5 m

$\frac{f_m}{f_d}$	4 kHz	5 kHz	6 kHz	7 kHz	8 kHz	9 kHz
0	13	17	19	19	19	15
+20 kHz	13	16	19	21	18	14
+40 kHz	13	17	19	19	17	14
+60 kHz	15	15	17	20	18	15
+80 kHz	19	10	14	18	19	16
+100 kHz	19	12	12	15	19	18
+120 kHz	18	13	10	13	17	19
+140 kHz	17	14	11	11	15	18
+160 kHz	16	12	12	10	13	17
Media	15,9	14	14,7	16,2	17,2	16,2

Forma de onda: Senoidal

Distancia al blanco: 5 m

$\frac{f_m}{f_d}$	4 kHz	5 kHz	6 kHz	7 kHz	8 kHz	9 kHz
0	11	13	17	18	16	14
+20 kHz	12	13	16	16	16	17
+40 kHz	12	13	14	16	18	14
+60 kHz	12	14	14	16	18	16
+80 kHz	13	14	14	16	14	16
+100 kHz	14	14	15	14	15	16
+120 kHz	14	15	15	15	12	16
+140 kHz	15	15	14	15	13	15
+160 kHz	15	14	15	13	14	13
Media	13,1	13,9	14,9	15,4	15,1	15,2

Forma de onda: Senoidal

Distancia al blanco: 8,5 m

fm \ fd	4 kHz	5 kHz	6 kHz	7 kHz	8 kHz	9 kHz
0	16	16	17	17	14	16
+20 kHz	15	16	16	15	15	15
+40 kHz	14	16	17	15	16	16
+60 kHz	15	17	15	15	16	17
+80 kHz	15	16	16	14	16	16
+100 kHz	14	15	17	14	15	16
+120 kHz	14	16	16	15	14	16
+140 kHz	15	15	15	15	13	16
+ 160 kHz	15	15	15	16	15	16
Media	14'7	15'7	16	15,1	14,9	16

Anexo 4: Medidas del sistema de caracterización instrumental

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 50%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 3'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 7 m ($L_{\phi}=10m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	0'8	95	0'6	95	9
+20	-	-	2'1	105	9
+40	-	-	2'1	120	10
+60	-	-	2'2	140	11
+80	-	-	2'6	160	13
+100	-	-	3'4	180	13
+120	-	-	2'6	200	14
+140	-	-	1'4	220	13
+160	-	-	0'75	240	16

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 50%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 4'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 7 m ($L_{\phi}=10m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	2'4	100	2'6	100	11
+20	1'1	90	2'1	120	11
+40	-	-	2'3	140	13
+60	-	-	2'8	160	14
+80	-	-	3'5	180	14
+100	-	-	2'6	200	15
+120	-	-	1'4	220	15
+140	-	-	0'8	240	15

+160	-	-	-	-	12
------	---	---	---	---	----

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 50%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 5'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 7 m ($L_0=10m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	2'5	130	2'2	130	13
+20	2'2	110	2'5	150	13
+40	1'1	100	2'8	170	13
+60	-	-	3'5	190	14
+80	-	-	2'2	210	14
+100	-	-	1'2	230	14
+120	-	-	0'9	250	14
+140	-	-	-	-	10
+160	-	-	-	-	8

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 50%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 6'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 7 m ($L_0=10m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	2'6	150	2'5	150	15
+20	2'2	130	2'8	170	15
+40	2'3	110	3'7	190	16
+60	1'6	90	2'1	210	16
+80	-	-	1	230	16
+100	-	-	0'4	250	15
+120	-	-	-	-	6
+140	-	-	-	-	6
+160	-	-	-	-	5

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 50%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 7'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 7 m ($L_{\infty}=10m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	3'4	170	3'4	170	17
+20	2'6	150	3'1	190	18
+40	2'2	130	1'9	210	18
+60	2'1	110	1'1	230	17
+80	1'7	100	0'9	250	14
+100	-	-	-	-	12
+120	-	-	-	-	11
+140	-	-	-	-	10
+160	-	-	-	-	11

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 50%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 8'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 7 m ($L_{\infty}=10m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	2'8	200	3'4	200	20
+20	3'3	180	2	220	20
+40	1'3	160	-	-	18
+60	2'2	140	-	-	15
+80	2'2	120	-	-	13
+100	1'9	100	-	-	12
+120	-	-	-	-	12
+140	-	-	-	-	11
+160	-	-	-	-	11

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 45%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 3'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 7 m ($L_c=10m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	1'4	95	-	-	9
+20	-	-	1'5	95	10
+40	-	-	2'1	115	10
+60	-	-	2'1	135	12
+80	-	-	2'3	155	12
+100	-	-	2'9	175	14
+120	-	-	3'2	195	15
+140	-	-	1'7	215	15
+160	-	-	0'9	235	14

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 45%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 4'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 7 m ($L_c=10m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	2'1	120	1'4	100	11
+20	1'9	100	2'1	120	11
+40	-	-	2'1	140	12
+60	-	-	2'3	160	14
+80	-	-	3'1	180	15
+100	-	-	3'1	200	16
+120	-	-	1'8	220	16
+140	-	-	0'9	240	15
+160	-	-	0'5	260	13

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 45%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 5'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 7 m ($L_{\infty}=10m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	2'4	145	2'3	115	14
+20	2'1	125	2'1	135	14
+40	2'2	105	2'7	155	14
+60	-	-	3'1	175	14
+80	-	-	2'9	195	16
+100	-	-	1'8	215	16
+120	-	-	1	235	14
+140	-	-	0'6	255	12
+160	-	-	-	-	9

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 45%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 6'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 7 m ($L_{\infty}=10m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	3	175	2'3	140	16
+20	2'5	155	2'5	160	16
+40	2'5	135	3'2	180	16
+60	2'4	115	3	200	17
+80	1'4	95	1'8	220	17
+100	-	-	1	240	17
+120	-	-	-	-	14
+140	-	-	-	-	11
+160	-	-	-	-	10

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 45%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 7'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 7 m ($L_c=10m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	3'4	200	2'9	160	17
+20	3'5	180	3'5	180	18
+40	2'8	160	2'9	200	18
+60	2'3	140	1'4	220	18
+80	2'1	120	0'9	240	17
+100	1'8	100	0'6	260	13
+120	-	-	-	-	11
+140	-	-	-	-	11
+160	-	-	-	-	10

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 45%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 8'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 7 m ($L_c=10m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	1'3	215	3'2	175	20
+20	2'7	195	3'1	195	20
+40	3'1	175	1'6	215	20
+60	2'5	165	1	235	18
+80	2'3	145	-	-	15
+100	2'2	125	-	-	13
+120	1'9	105	-	-	12
+140	1'4	100	-	-	12
+160	-	-	-	-	10

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 40%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 3'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 7 m ($L_{\infty}=10m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	2'2	100	-	-	8
+20	-	-	1'1	90	9
+40	-	-	2	110	10
+60	-	-	2'1	130	11
+80	-	-	2'4	150	13
+100	-	-	2'7	170	14
+120	-	-	3'5	190	13
+140	-	-	2'1	210	15
+160	-	-	1'2	230	15

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 40%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 4'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 7 m ($L_{\infty}=10m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	2'1	135	1'1	90	11
+20	2'2	110	2'3	110	11
+40	1'6	90	2'1	130	12
+60	-	-	2'2	150	14
+80	-	-	2'6	170	15
+100	-	-	3'4	190	15
+120	-	-	2'1	210	16
+140	-	-	1'2	230	18
+160	-	-	0'7	250	16

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 40%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 5'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 7 m ($L_c=10m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	2'6	165	2'3	105	13
+20	2'2	145	2'3	125	14
+40	2'2	125	2'3	145	14
+60	2'2	105	2'8	165	14
+80	-	-	3'4	185	15
+100	-	-	2'2	205	16
+120	-	-	1'3	225	16
+140	-	-	0'8	245	15
+160	-	-	-	-	12

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 40%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 6'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 7 m ($L_c=10m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	3'2	190	2'4	120	16
+20	3	170	2'5	140	16
+40	2'3	150	2'7	160	17
+60	2'2	130	3'4	180	17
+80	2'2	110	2'5	200	18
+100	1'4	90	1	225	18
+120	-	-	0'6	240	18
+140	-	-	-	-	12
+160	-	-	-	-	10

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 40%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 7'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 7 m ($L_{\infty}=10m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	1'6	215	2'4	150	17
+20	2'6	195	2'9	170	18
+40	3'3	180	3'7	190	19
+60	2'7	160	2'6	210	19
+80	2'4	140	1'5	230	18
+100	2'2	120	0'9	250	17
+120	1'9	100	-	-	13
+140	-	-	-	-	11
+160	-	-	-	-	10

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 40%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 8'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 7 m ($L_{\infty}=10m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	0'9	240	2'8	165	18
+20	1'4	220	3'4	185	20
+40	2'5	205	2'8	205	21
+60	3'1	190	1'3	225	20
+80	3'1	170	0'8	245	19
+100	2'3	145	-	-	15
+120	2'1	125	-	-	12
+140	2'1	110	-	-	11
+160	1'4	90	-	-	12

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 50%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 3'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 12 m ($L_c=17m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	1'2	120	1'2	120	13
+20	1	110	1'3	145	13
+40	0'5	90	1'4	150	13
+60	-	-	1'6	190	11
+80	-	-	0'9	200	12
+100	-	-	0'6	215	10
+120	-	-	-	-	6
+140	-	-	-	-	4
+160	-	-	-	-	4

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 50%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 4'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 12 m ($L_c=17m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	1'4	175	1'4	175	16
+20	1'4	155	1'7	180	17
+40	1'3	130	1'3	195	17
+60	0'9	115	0'8	210	15
+80	-	-	0'5	215	8
+100	-	-	-	-	6
+120	-	-	-	-	5
+140	-	-	-	-	4
+160	-	-	-	-	5

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 50%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 5'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 12 m ($L_{\infty}=17m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	1'1	200	1'5	200	20
+20	1'5	180	0'6	220	19
+40	1'4	160	0'4	240	15
+60	1'3	140	0'4	260	12
+80	1'2	120	-	-	11
+100	0'8	100	-	-	10
+120	-	-	-	-	8
+140	-	-	-	-	-
+160	-	-	-	-	-

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 50%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 6'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 12 m ($L_{\infty}=17m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	0'4	215	0'4	215	13
+20	0'7	215	-	-	16
+40	1'1	200	-	-	15
+60	1'5	180	-	-	14
+80	1'4	160	-	-	13
+100	1'3	140	-	-	12
+120	1'1	120	-	-	10
+140	0'8	110	-	-	10
+160	-	-	-	-	-

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 50%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 7'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 12 m ($L_c=17m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	-	-	-	-	8
+20	-	-	-	-	9
+40	0'5	225	-	-	12
+60	0'85	210	-	-	15
+80	1'35	190	-	-	15
+100	1'5	170	-	-	14
+120	1'5	150	-	-	14
+140	1'4	130	-	-	11
+160	1'2	110	-	-	11

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 50%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 8'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 12 m ($L_c=17m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	-	-	-	-	9
+20	-	-	-	-	9
+40	-	-	-	-	8
+60	0'3	240	-	-	11
+80	0'55	220	-	-	14
+100	0'9	200	-	-	15
+120	1'3	185	-	-	16
+140	1'6	175	-	-	14
+160	1'45	160	-	-	14

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 45%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 3'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 12 m ($L_{\infty}=17m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	1'4	140	1'2	115	14
+20	1'35	120	1'4	135	13
+40	0'9	100	1'5	155	14
+60	-	-	1'7	175	13
+80	-	-	1'7	195	12
+100	-	-	0'85	215	12
+120	-	-	0'55	235	9
+140	-	-	-	-	6
+160	-	-	-	-	4

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 45%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 4'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 12 m ($L_{\infty}=17m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	1'8	185	1'6	150	17
+20	1'6	165	1'6	170	17
+40	1'5	145	1'8	190	17
+60	1'45	125	1'5	210	17
+80	0'95	105	0'55	230	14
+100	-	-	-	-	8
+120	-	-	-	-	5
+140	-	-	-	-	4
+160	-	-	-	-	4

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 45%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 5'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 12 m ($L_e=17m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	0'7	215	1'8	185	19
+20	0'95	195	1'4	205	20
+40	1'7	180	0'7	225	20
+60	1'6	165	0'4	245	13
+80	1'35	145	-	-	11
+100	1'3	125	-	-	8
+120	1	105	-	-	8
+140	-	-	-	-	6
+160	-	-	-	-	6

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 45%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 6'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 12 m ($L_e=17m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	-	-	1	220	14
+20	0'45	245	0'45	240	14
+40	0'6	225	-	-	14
+60	1	205	-	-	13
+80	1'5	185	-	-	14
+100	1'45	165	-	-	12
+120	1'4	145	-	-	11
+140	1'4	125	-	-	10
+160	1	105	-	-	9

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 45%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 7'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 12 m ($L_{\infty}=17m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	-	-	-	-	7
+20	-	-	-	-	7
+40	-	-	-	-	9
+60	0'5	245	-	-	9
+80	0'65	225	-	-	13
+100	1'1	205	-	-	13
+120	1'5	185	-	-	13
+140	1'6	165	-	-	12
+160	1'4	145	-	-	11

Moduladora: Triangular

Rampa de subida: 45%

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 8'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 12 m ($L_{\infty}=17m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	-	-	-	-	8
+20	-	-	-	-	8
+40	-	-	-	-	9
+60	-	-	-	-	8
+80	-	-	-	-	9
+100	0'5	245	-	-	11
+120	0'7	225	-	-	14
+140	1	205	-	-	14
+160	1'4	185	-	-	15

Moduladora: Senoidal

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 3'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 7 m ($L_c=10m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	2'1	125	2'2	125	11
+20	2	105	2'4	150	12
+40	1'1	100	2'6	170	11
+60	0'6	150	2'8	185	12
+80	0'6	150	2'6	190	13
+100	0'6	140	2'4	190	13
+120	0'5	130	2'5	200	14
+140	0'5	166	2'3	200	14
+160	0'5	125	2'1	185	14

Moduladora: Senoidal

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 4'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 7 m ($L_c=10m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	2	160	2	160	12
+20	1'8	140	2'5	180	13
+40	1'8	115	2'5	190	13
+60	1'6	110	2'4	190	14
+80	0'8	130	1'9	195	14
+100	0'6	150	2'1	200	14
+120	0'6	150	2'1	205	14
+140	1'7	105	2'1	180	15
+160	2	105	2'1	210	14

Moduladora: Senoidal

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 5'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 7 m ($L_{\infty}=10m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	3'2	195	3	195	16
+20	3	180	2'8	200	15
+40	2'3	155	2'3	210	15
+60	2'1	150	2'3	190	15
+80	2'1	110	2'2	195	15
+100	1'7	100	2'3	190	14
+120	0'8	115	2'1	180	14
+140	0'6	160	2'1	195	15
+160	0'5	160	2	190	15

Moduladora: Senoidal

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 6'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 7 m ($L_{\infty}=10m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	2	190	2'2	190	17
+20	2'7	200	2'2	195	18
+40	3'2	195	2'4	190	17
+60	2'7	170	2'2	190	16
+80	2'3	150	2	205	15
+100	2	125	1'9	190	15
+120	1'9	110	2	185	14
+140	1'2	105	1'8	200	15
+160	0'7	115	2	190	14

Moduladora: Senoidal

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 7'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 7 m ($L_c=10m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	1'8	170	2'1	190	18
+20	2	185	2'2	200	18
+40	2'4	195	2'2	185	18
+60	2'6	190	2'2	180	18
+80	3'2	185	2'2	180	17
+100	2'7	160	2	195	16
+120	2'2	140	2'2	190	15
+140	2'2	120	1'9	180	14
+160	1'9	110	2'1	170	15

Moduladora: Senoidal

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 8'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 7 m ($L_c=10m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	2	185	2'2	185	18
+20	1'9	190	2	175	18
+40	1'9	195	2	185	18
+60	2	195	2	170	17
+80	2'2	195	2	180	17
+100	3	185	2'2	180	17
+120	3	185	1'8	190	16
+140	2'5	160	2'2	190	15
+160	2'2	140	1'9	190	15

Moduladora: Senoidal

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 3'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 12 m ($L_{\infty}=17m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	1'3	190	1	160	12
+20	1'2	180	1	170	12
+40	1'1	165	0'9	180	11
+60	0'9	140	0'8	185	9
+80	0'8	120	0'7	180	7
+100	0'7	115	0'7	180	7
+120	0'9	130	1	170	5
+140	0'8	155	0'8	200	4
+160	0'6	125	0'6	200	5

Moduladora: Senoidal

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 4'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 12 m ($L_{\infty}=17m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	1'2	105	1'1	185	10
+20	1'2	190	1'1	161	10
+40	1'3	165	1'2	163	10
+60	1'6	190	1'2	168	10
+80	1'3	160	1'2	181	9
+100	1'3	145	1'2	162	8
+120	1'2	135	1'2	135	7
+140	1'1	100	1'1	165	6
+160	1'3	165	1'1	160	6

Moduladora: Senoidal

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 5'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 12 m ($L_c=17m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	1'3	160	1	160	8
+20	1	170	1'1	160	8
+40	1	160	1'3	165	9
+60	1'2	160	1'2	160	8
+80	1'2	160	1'1	150	9
+100	1'2	165	1'1	155	10
+120	1'5	170	1	185	9
+140	1'6	170	1	160	8
+160	1'3	155	1'1	155	8

Moduladora: Senoidal

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 6'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 12 m ($L_c=17m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	1'1	155	1'1	155	8
+20	1	165	1	160	8
+40	1	150	1	175	7
+60	1	160	1	170	8
+80	1	170	1	170	8
+100	1	170	1	170	8
+120	1'1	155	1'2	165	8
+140	1'2	180	1	175	9
+160	1'2	160	1'2	160	9

Moduladora: Senoidal

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 7'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 12 m ($L_{\infty}=17m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	1'2	160	1'2	150	8
+20	1	170	1	170	7
+40	1'2	155	1'2	155	7
+60	1'2	155	1	175	7
+80	1'1	150	1	165	7
+100	1'3	165	1'1	165	8
+120	0'9	170	1	170	7
+140	1'2	155	1	175	8
+160	1	160	1	160	8

Moduladora: Senoidal

DC: 2'7V

Frecuencia moduladora: 8'5 kHz

Amplitud: 1'8Vpp

Cable de: 12 m ($L_{\infty}=17m$)

Fdoppler (kHz)	Amp.-up (Vpp)	Frec.-up (kHz)	Amp.-down (Vpp)	Frec.-down (kHz)	Nº pulsos divisor (1ms)
0	0'8	150	0'8	170	8
+20	0'7	145	0'6	135	8
+40	0'8	165	0'6	175	8
+60	0'8	155	0'6	165	8
+80	0'8	165	0'7	160	8
+100	0'9	150	0'6	170	8
+120	0'8	170	0'6	160	8
+140	0'8	160	0'5	150	9
+160	0'8	165	0'6	180	9

Bibliografía

- [1] Introduction to radar systems / Merrill I. Skolnik / Boston : McGraw-Hill, 2001.
- [2] High-resolution radar / Donald R. Wehner / Boston : Artech House, 1995.
- [3] Fundamentos de radar / Francisco Eugenio González, F. Javier Marcello Ruiz / Las Palmas de Gran Canaria : Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2002.
- [4] Simulación y evaluación didáctica de subsistemas radar mediante MATLAB / Marcos Antonio González Concepción ; Francisco Eugenio González / Las Palmas de Gran Canaria : Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Telecomunicación, 1999.
- [5] An Introduction to guided waves and microwave circuits / Robert S. Elliott / Englewood Cliffs (NJ) : Prentice Hall, 1993.
- [6] Microwave engineering / David M. Pozar / Hoboken (NJ) : John Wiley & Sons, cop. 2005.
- [7] Radar Handbook / Merril Skolnik / McGraw-Hill, 1990
- [8] Principles of modern radar / Mark A. Richards, James A. Scheer, William A. Hol. / Scitech publishing, 2010
- [9] CW and Doppler radar / David K. Barton / Artech Radar Library, 1978
- [10] Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands / J. A. Bruder / IEEE Aerospace & Electronic Systems Society, 2002

PLIEGO DE CONDICIONES

1. Pliego de mínimos técnicos

Para aceptar como válido el sistema de caracterización ha de cumplir como mínimo con las siguientes características técnicas:

- Potencia de salida de $-87 \text{ dBm} \pm 1 \text{ dB}$
- Salida retardada $3,33 \times 10^{-8}$ segundos (5 metros)
- Desplazamiento doppler de 0 a +160 kHz en saltos de +20 kHz
- Espurios a -16 dBc como mínimo en un ancho de banda de 3,5 MHz

2. Pliego de condiciones para la realización

Se recogen a continuación los equipos mínimos para la realización del trabajo:

- Fuente de alimentación con doble salida 0-24V con capacidad para 2 A por salida, con protección contra cortocircuito.
- Dos generadores de señal que alcancen al menos 10,2 GHz con una resolución en frecuencia de 20 kHz.
- Un osciloscopio con capacidad para visualizar señales de 100 MHz, de 4 canales.
- Un analizador de espectros que alcance los 40 GHz, con una resolución de al menos 100 Hz.
- Un PC que tenga al menos un microprocesador Intel Core I5, 4GB de RAM y 500GB de disco duro.
- Matlab R2010a o versión posterior.

3. Pliego de condiciones legales

El presente trabajo realizado forma parte de un proyecto del IDeTIC encargado por la empresa CSA (Consultores de Sistemas de Aeronáutica). Por ello, todos los datos, diseños, esquemas, imágenes, medidas, etc., que aparezcan en este documento están sujetos a acuerdos de confidencialidad.

PRESUPUESTO

Para la realización del presupuesto se han seguido las últimas recomendaciones del Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación (COIT) sobre los baremos orientativos para trabajos profesionales en 2011. El presupuesto se ha desglosado en varias secciones en las que se han separado los distintos costes asociados al desarrollo del trabajo. Estos costes se dividen en:

1. Recursos materiales
2. Trabajo tarifado por tiempo empleado
3. Costes de redacción del Trabajo Fin de Grado
4. Material fungible
5. Derechos de visado del COIT
6. Gastos de tramitación y envío
7. Aplicación de impuestos

1. Recursos materiales

Para la ejecución de este Trabajo Fin de Título han sido necesaria una serie de recursos materiales, entre los que se encuentran el software para las simulaciones, los materiales del sistema de caracterización, equipos de medida, herramientas, el paquete office para la redacción de la memoria y equipos hardware como el ordenador o la impresora.

La amortización se calcula sobre el tiempo útil del recurso material. El sistema de amortización se toma como lineal, asumiendo que el inmovilizado material se desprecia de forma constante a lo largo de su vida útil. La cuota de amortización anual se calcula usando la siguiente fórmula:

$$\text{Cuota} = \frac{\text{Valor de adquisición} - \text{Valor residual}}{\text{Tiempo de vida útil}}$$

1.1 Recursos materiales fungibles

Aquí se incluyen los materiales necesarios para la realización física del subsistema.

Referencia	Descripción	Unidades	Precio/unidad	Subtotal
EKIT01-HMC778LP6CE	- Kit de evaluación HMC778LP6CE (PLL fraccional)	2	740,00	1.480,00
110431-HMC516LC5	- Placa evaluación HMC516 Amplificador de bajo ruido, 9-18GHz	2	415,00	830,00
111227-HMC908LC5	- Placa evaluación HMC908LC5 I/Q Down-converter 9-12GHz	1	493,00	493,00
103350-HMC412AMS8GE	- Placa de evaluación HMC412AMS8G Mezclador doblemente balanceado	1	206,00	206,00
COMPONENTES			Total (€)	3009,00

Tabla 13 - Coste componentes

El coste de los componentes asciende a la cantidad de: *tres mil nueve euros (3009,00 €)*.

1.2 Recursos materiales amortizables

En este apartado se evalúa el coste previsto para cada uno de los elementos que son amortizables.

Recurso	Valor de adquisición (€)	Valor residual (€)	Vida útil (años)	Cuota anual	Uso (meses)	Cuota aplicable (€)
Fuente de alimentación	350	30	8	40	2	6,67
Generador f<20MHz	2000	150	15	123,34	2	20,55
Generador f<20GHz 1	24000	300	20	1185	2	197,5
Generador f<20GHz 2	24000	300	20	1185	2	197,5
Osciloscopio	2600	200	15	160	2	26,67
Analizador de espectros	42000	500	20	2075	2	345,84
Mezclador 1	200	20	5	36	2	6
Mezclador 2	200	20	5	36	2	6
Filtro	20	0	5	4	2	0,67
Bobina de cable 7 metros	50	0	6	8,33	2	1,38
Polímetro	90	0	8	11,25	2	1,88
Útiles varios (alicate, destornillador...)	100	0	2	50	2	8,34
Ordenador MacBook Pro 13" Intel Core i5 4GB de memoria RAM y 500 GB de disco duro	1000	400	5	120	4	40

Licencia Matlab R2010a	2000	0	5	400	2	66,67	
Licencia Paquete Office 2011 (Mac)	120	0	5	24	1	2	
MATERIALES AMORTIZABLES					TOTAL (€)		927,67

Tabla 14 - Recursos materiales amortizables

El coste de los materiales amortizables asciende a cantidad de: *novecientos veintisiete euros con sesenta y siete céntimos (927,67€)*.

2. Trabajo tarificado por tiempo empleado

En este apartado se calculan los honorarios tomando las recomendaciones del COIT.

Mediante la siguiente expresión se calculan los honorarios totales:

$$H = 74,88 \cdot C_t \cdot H_n + 96,72 \cdot C_t \cdot H_e$$

- H: Honorarios totales por el tiempo dedicado
- H_n: Horas normales trabajadas dentro de la jornada laboral
- H_e: Horas especiales trabajadas
- C_t: Factor de corrección en función del número de horas trabajadas

Horas trabajadas	Factor de corrección
Hasta 36 horas	1
Entre 36 y 72 horas	0,9
Entre 72 y 108 horas	0,8
Entre 108 y 144 horas	0,7
Entre 144 y 180 horas	0,65
Entre 180 y 360 horas	0,6
Entre 360 y 540 horas	0,55

Tabla 15 - Factor de corrección según el COIT

El tiempo necesario para el desarrollo del trabajo ha sido de 300 horas, por lo que se aplica un coeficiente de 0,6:

$$H = 74,88 \cdot 0,6 \cdot 300 + 96,72 \cdot 0,6 \cdot 0 = 13478,40 \text{ €}$$

El coste de trabajo tarificado por tiempo de trabajo asciende a la cantidad de: *trece mil cuatrocientos setenta y ocho euros con cuarenta céntimos* (**13478,40€**)

3. Costes de redacción del Trabajo Fin de Grado

La redacción del trabajo tiene un coste asociado que se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$R = 0,07 \cdot P \cdot C_h$$

- P: Presupuesto del trabajo obtenido
- C_h: Coeficiente de ponderación en función del presupuesto

El presupuesto calculado hasta el momento asciende a 17415,07 €. Como el coeficiente de ponderación para presupuestos menores de 30.050 € viene definido por COIT con un valor de 1,00 el coste derivado de la redacción del trabajo es de:

$$R = 0,07 \cdot 17415,07 \cdot 0,5 = 609,53 \text{ €}$$

El importe por redacción de trabajo asciende a la cantidad de: *seiscientos nueve euros con cincuenta y tres céntimos* (**609,53€**)

4. Material fungible

Los gastos de edición de documentos así como los gastos de oficina se muestran en la tabla 16

Descripción	Coste (€)
Papel, tóner de impresora, encuadernación, etc.	80 €

Tabla 16 - Material fungible

Los gastos en material fungible ascienden a la cantidad de: *ochenta euros* (**80€**)

5. Derechos de visado del COIT

El cálculo de los gastos de visado se calculan mediante la siguiente expresión:

$$V=0,006 \cdot P \cdot C_v$$

- P: Presupuesto de ejecución material
- C_v : Coeficiente reductor en función de P_1

El presupuesto de ejecución material, calculado hasta el momento asciende a la cantidad de: 18104,60 €

El coeficiente C_v dado por el COIT para presupuestos menores de 30050 € tiene el valor de 1,00 por lo que:

$$V=0,006 \cdot 18104,60 \cdot 1=108,62€$$

El coste de los derechos de visado del trabajo asciende a la cantidad de: *ciento ocho euros con sesenta y dos céntimos (108,62€)*.

6. Gastos de tramitación y envío

Los gastos de tramitación y envío son fijos y se estipulan por el COIT en 6,01 €.

7. Aplicación de impuestos

Para la actividad económica del presente trabajo el valor del Impuesto General Indirecto Canario (I.G.I.C.) graba el presupuesto con un 7%. El coste total del trabajo con el I.G.I.C incluido se desglosa en la siguiente tabla:

Descripción	Subtotal (€)
Recursos materiales	
Materiales fungibles	3009,00
Materiales amortizables	927,67
Trabajo tarificado por tiempo empleado	13478,40
Costes de redacción del trabajo	609,53
Material fungible	80

Derechos de visado del COIT	108,62
Gastos de tramitación y envío	6,01
Suma (€)	18219,23
IGIC 7% (€)	1275,35
TOTAL (€)	19493,58

Tabla 17 - Coste total del trabajo

El importe final al que asciende el presupuesto de este trabajo es de: *diecinueve mil cuatrocientos noventa y tres euros con cincuenta y ocho céntimos (19493,58€)*.

Las Palmas de Gran Canaria a 6 de junio de 2014

Fdo.: Abel García Castellano