

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN



**SISTEMA DE DETECCIÓN DE APNEA EN
RECIÉN NACIDOS BASADO EN MEDIDAS
DE DISTANCIAS EN MICROONDAS**

TRABAJO FIN DE GRADO

Septiembre - 2021

AUTOR: Rubén Alarcón Calero

DIRECTOR/ES: Ernesto Ávila Navarro

Carolina Blanco Angulo

AGRADECIMIENTOS.

En primer lugar, me gustaría transmitir mis más sinceros agradecimientos a mis compañeros que me han acompañado a lo largo del Grado, así como a mis directores Ernesto Ávila Navarro y Carolina Blanco Angulo por su tiempo y dedicación en enseñarme y ayudarme a lo largo del Trabajo Fin de Grado. Gracias a Ernesto que a pesar de no tener mucho tiempo has podido sacar siempre algún hueco para poder explicarme todo lo que he necesitado y gracias a Carolina por su paciencia, que me ha ayudado y explicado en cada momento los requisitos necesarios conforme avanzaba y por estar supervisándome a lo largo del proyecto. También quería agradecer al área de Tecnología Electrónica por aportarme todos los materiales necesarios que se ha requerido en cada momento.

En segundo lugar, agradecer todo el apoyo recibido a mis amigos y amigas dentro y fuera de la universidad ya que lo han hecho todo más fácil para que pueda estar aquí.

Y por último, me gustaría agradecer a mis padres, María José y José María y a mi hermano ya que sin su sacrificio y apoyo diario no podría estar donde estoy. A mis abuelas, mis tíos y tías, y a Marta por toda la paciencia y apoyo recibido este tiempo y por animarme cada vez que lo necesitaba.

Este trabajo va dedicado a vosotros, muchas gracias.

ÍNDICE.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. ESTADO DEL ARTE	3
1.3. OBJETIVO PRINCIPAL.....	5
1.4. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	6
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	9
2.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	9
2.1.1. ONDAS DE RADIOFRECUENCIA Y MICROONDAS	9
2.1.2. PARÁMETROS S	10
2.1.3. FUNDAMENTOS ANTENAS	12
2.1.4. FUNDAMENTOS RADAR.....	12
2.1.5. TECNOLOGÍA MICROSTRIP	13
2.2. CONMUTADORES DE ALTA FRECUENCIA.....	14
2.3. ANALIZADOR DE REDES	15
2.4. SOFTWARE.....	16
2.4.1. EMPro.....	16
2.4.2. Advanced Design System (ADS)	17
2.4.3. MATLAB	18
2.4.4. EAGLE	18
2.4.5. ARDUINO.....	20
2.4.6. PYCHARM	21
2.5. CÁLCULO DE DISTANCIAS CON ANTENA DE BANDA ANCHA EN EL RANGO DE LAS MICROONDAS	22
2.5.1. PROGRAMACIÓN EN MATLAB	24
2.5.2. RESULTADOS	25

3. SIMULACIONES DEL SISTEMA.....	27
3.1. INTRODUCCIÓN DE LA ANTENA	27
3.2. SIMULACIONES Y RESULTADOS CON UNA ANTENA	31
3.3. SIMULACIONES Y RESULTADOS CON CUATRO ANTENAS	40
4. MEDIDAS EN EL SISTEMA FÍSICO.....	47
4.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA IMPLEMENTADO	47
4.2. HARDWARE	49
4.2.1. CONEXIÓN MEDIANTE EL VNA.....	49
4.2.2. CONMUTADOR DE ALTA FRECUENCIA	51
4.2.3. ANTENAS	56
4.2.4. ARDUINO UNO Y PLACA DE CONTROL.....	63
4.2.5. CONEXIONADO FINAL DEL SISTEMA	69
4.3. SOFTWARE EMPLEADO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS MEDIDAS A REALIZAR	73
4.4. MEDIDAS Y RESULTADOS	80
4.4.1. PLANCHA METÁLICA.....	80
4.4.2. PRUEBA REALISTA	83
5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	95
5.1. CONCLUSIONES	95
5.2. LÍNEAS FUTURAS	97
BIBLIOGRAFÍA	99
ANEXOS	103
ANEXO I: PRESUPUESTO DE LOS MATERIALES	103
ANEXO II: PRESUPUESTO DEL EQUIPAMIENTO NECESARIO	104
ANEXO III: DATASHEET DEL CONMUTADOR DE ALTA FRECUENCIA ...	105
ANEXO IV: FRAGMENTO DEL DATASHEET DEL REGULADOR DE TENSIÓN	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Radiografía del tórax [1].	2
Figura 1.2. Sistema de detección de apnea 1 [3].	3
Figura 1.3. Laboratorios especializados en apnea del sueño [6] [7].	4
Figura 1.4. Sistema de detección de apnea II [8].	4
Figura 1.5. Guías de ondas circulares [8].	5
Figura 2.1. Espectro electromagnético [9].	9
Figura 2.2. Señales incidentes, reflejadas y transmitidas de los Parámetros S [12].	11
Figura 2.3. Antenas impresas.	12
Figura 2.4. Funcionamiento del RADAR [13].	13
Figura 2.5. Línea de transmisión microstrip [15].	13
Figura 2.6. Diseño de filtros mediante tecnología microstrip.	14
Figura 2.7. Conmutador de RF [16].	14
Figura 2.8. Analizadores de Redes Vectoriales [18].	15
Figura 2.9. Pantalla principal de EMPro.	16
Figura 2.10. Esquemático en ADS.	17
Figura 2.11. Pestaña de simulación ADS.	17
Figura 2.12. Pantalla principal de MATLAB.	18
Figura 2.13. Pantalla principal a modo de ejemplo del esquemático de EAGLE.	19
Figura 2.14. Pantalla principal a modo de ejemplo para el diseño de una PCB de EAGLE.	19
Figura 2.15. Pantalla principal a modo de ejemplo de Arduino IDE.	21
Figura 2.16. Pantalla principal a modo de ejemplo de Pycharm.	21
Figura 2.17. Antena tipo Vivaldi.	22
Figura 2.18. Ensayo realizado para el cálculo de distancias.	23
Figura 2.19. Diagrama de flujo del procesado de las medidas.	24
Figura 2.20. Resultado obtenido en función del tiempo.	25
Figura 2.21. Resultado obtenido en función de la distancia.	26
Figura 3.1. Diseño de la antena banda ancha en EMPro.	28
Figura 3.2. Parámetro S11 de la antena de banda ancha.	28
Figura 3.3. Diagramas de radiación en simulación. a) Plano E. b) Plano H.	29
Figura 3.4. Distribuciones de corrientes. a) 3 GHz. b) 5 GHz. c) 10 GHz. d) 15 GHz. e) 20 GHz. f) 24.5 GHz.	30

Figura 3.5. Parámetro S11 hasta los 6 GHz.....	31
Figura 3.6. a) Posicionamiento de la plancha metálica. b) Asignación de material metálico.	32
Figura 3.7. Parámetro S11 hasta los 6 GHz con plancha metálica.....	32
Figura 3.8. Parámetro S11 con y sin plancha metálica.....	33
Figura 3.9. Resultado obtenido en función del tiempo para 10cm.....	34
Figura 3.10. Resultado obtenido en función de la distancia para 10cm.	34
Figura 3.11. Señales que se obtienen en diferente posición.	35
Figura 3.12. Resultado obtenido en función del tiempo para 1cm.....	36
Figura 3.13. Resultado obtenido en función de la distancia para 1cm.	36
Figura 3.14. Resultado obtenido en función del tiempo para 1mm. a) Señal original. b) Señal ampliada.....	37
Figura 3.15. Resultado obtenido en función de la distancia para 1mm. a) Señal original. b) Señal ampliada.	37
Figura 3.16. a) Posicionamiento del cubo de aire. b) Asignación de material.	38
Figura 3.17. Distribuciones de corrientes. a) 1 GHz. b) 6 GHz. c) 9 GHz. d) 12 GHz. e) 15 GHz. f) 18 GHz.	39
Figura 3.18. Posicionamiento de la plancha metálica y de las antenas.	40
Figura 3.19. Parámetro S11 hasta los 6 GHz de las cuatro antenas.	41
Figura 3.20. Resultado obtenido para las 4 antenas en función del tiempo para 10cm..	42
Figura 3.21. Resultado obtenido para las 4 antenas en función de la distancia para 10cm.	42
Figura 3.22. Señales que se obtienen en diferente posición.	43
Figura 3.23. Resultado obtenido para las 4 antenas en función del tiempo para 1cm....	44
Figura 3.24. Resultado obtenido para las 4 antenas en función de la distancia para 1cm.	44
Figura 3.25. Resultado obtenido para las 4 antenas en función del tiempo para 1mm. a) Señal original. b) Señal ampliada.....	45
Figura 3.26. Resultado obtenido para las 4 antenas en función de la distancia para 1mm. a) Señal original. b) Señal ampliada.....	45
Figura 4.1. Sistema físico final.....	48
Figura 4.2. Esquema del conexionado final.	48
Figura 4.3. Analizador de redes vectoriales [26].....	49

Figura 4.4. Kit de calibración del VNA [27].	50
Figura 4.5. Conmutador de RF [29].	51
Figura 4.6. Parámetros del conmutador para el puerto 1.	53
Figura 4.7. Parámetros del conmutador para el puerto 2.	53
Figura 4.8. Parámetros del conmutador para el puerto 3.	53
Figura 4.9. Parámetros del conmutador para el puerto 4.	54
Figura 4.10. Parámetros del conmutador.	54
Figura 4.11. Proceso de insolado de las antenas.	56
Figura 4.12. Proceso de revelado de las antenas.	56
Figura 4.13. Proceso de ataque químico y cortado de las antenas sin conector.	57
Figura 4.14. Diseño de antenas de banda ancha con conector.	57
Figura 4.15. Conectores de RF tipo SMA hembra [30].	58
Figura 4.16. Resultados obtenidos para la antena 1.	58
Figura 4.17. Resultados obtenidos para la antena 2.	59
Figura 4.18. Resultados obtenidos para la antena 3.	59
Figura 4.19. Resultados obtenidos para la antena 4.	60
Figura 4.20. Resultado de todas las antenas.	60
Figura 4.21. Antenas colocadas en el cristal de metacrilato.	61
Figura 4.22. Resultados obtenidos para la antena 1 y 2 en el cristal.	61
Figura 4.23. Resultados obtenidos para la antena 3 y 4 en el cristal.	62
Figura 4.24. Resultado de todas las antenas colocadas en el cristal.	62
Figura 4.25. Comparación de resultados.	63
Figura 4.26. Arduino Uno Rev3 SMD [31].	63
Figura 4.27. Pines del Arduino Uno Rev3 SMD [31].	64
Figura 4.28. PCB de control.	64
Figura 4.29. Esquemático completo de la PCB de control.	66
Figura 4.30. Diseño de la PCB de control.	67
Figura 4.31. Generación del Layout final de la placa de control.	68
Figura 4.32. Fabricación de PCB.	68
Figura 4.33. a) Taladro de agujeros e inserción del USB. b) Soldadura de todos los componentes.	69
Figura 4.34. Proceso de conexión PCB de control con el Arduino.	69
Figura 4.35. Cable coaxial de RF [32].	69

Figura 4.36. Aspecto interno de los cables de RF [32].....	70
Figura 4.37. Pérdidas de inserción de los cables de RF.	71
Figura 4.38. Materiales necesarios para fabricar el cable. a) cable USB [33]. b) DB9 + carcasa [34].....	71
Figura 4.39. Cable fabricado.	72
Figura 4.40. Diagrama de flujo de Arduino.....	74
Figura 4.41. Iluminación de LEDs en la PCB de control. a) Ninguna antena. b) Antena 1. c) Antena 2. d) Antena 3. e) Antena 4.	75
Figura 4.42. Diagrama de flujo de Python.....	76
Figura 4.43. Calibración de la antena 1.	77
Figura 4.44. Realización de la señal de referencia.	81
Figura 4.45. Señales de referencia obtenidas.	81
Figura 4.46. Medidas realizadas a diferentes alturas. a) 6.7 cm. b) 11.3 cm. c) 19 cm..	82
Figura 4.47. Resultado obtenido en función del tiempo para nuestro set-up.	82
Figura 4.48. Resultado obtenido en función de la distancia para nuestro set-up.	83
Figura 4.49. Sistema implementado para medidas reales.....	84
Figura 4.50. Realización de las medidas. a) Antenas 1 y 3. b) En medio. c) Antenas 2 y 4.	85
Figura 4.51. Señales de referencia obtenidas.	85
Figura 4.52. Señales obtenidas en función del tiempo cuando el bebé está en medio. ..	86
Figura 4.53. Señales obtenidas en función del tiempo cuando el bebé está en las antenas 1 y 3.	87
Figura 4.54. Señales obtenidas en función del tiempo cuando el bebé está en las antenas 2 y 4.	87
Figura 4.55. Señales obtenidas en función de la distancia cuando el bebé está en medio.	88
Figura 4.56. Señales obtenidas en función de la distancia cuando el bebé está en las antenas 1 y 3.	89
Figura 4.57. Señales obtenidas en función de la distancia cuando el bebé está en las antenas 2 y 4.	89
Figura 4.58. Señales de referencia obtenidas.	90
Figura 4.59. Señales obtenidas en función del tiempo cuando el bebé está en medio. ..	91
Figura 4.60. Señales ampliadas obtenidas en función del tiempo cuando el bebé está en	

medio.....	91
Figura 4.61. Señales obtenidas en función del tiempo cuando el bebé está en las antenas 1 y 3.....	92
Figura 4.62. Señales obtenidas en función del tiempo cuando el bebé está en las antenas 2 y 4.....	92
Figura 4.63. Señales obtenidas en función de la distancia cuando el bebé está en medio.....	93
Figura 4.64. Señales obtenidas en función de la distancia cuando el bebé está en las antenas 1 y 3.....	93
Figura 4.65. Señales obtenidas en función de la distancia cuando el bebé está en las antenas 2 y 4.....	94



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Relación de los Parámetros S.	11
Tabla 4.1. Tabla de verdad [16].....	55
Tabla 4.2. Conexión de pines [16].....	72



1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de señales electromagnéticas de alta frecuencia viene dado a mediados del siglo XX con la Segunda Guerra Mundial donde las microondas fueron utilizadas por primera vez para los sistemas RADAR, en este siglo se utilizaban las señales electromagnéticas en diversos ámbitos en los que se aprovechan la radiación electromagnética tanto para transmitir como recibir información además de suministrar gran parte de la energía. El término microondas o radiofrecuencia (RF) son todas aquellas ondas electromagnéticas con frecuencias en el rango de 300 MHz hasta los 300 GHz, aunque para las radiocomunicaciones el rango de frecuencias es de 2 MHz hasta los 2 GHz, estas ondas pueden emplearse para la transmisión de información.

Hay diferentes aplicaciones de las microondas que se han ido descubriendo con el paso del tiempo, así como en las ramas de la ciencia y la tecnología, como son las aplicaciones médicas, industriales, agricultura etcétera.

En la actualidad, la teoría de las microondas además de estar impulsada en el área de la industria aeroespacial para las comunicaciones con los satélites, también está siendo demandada en las comunicaciones inalámbricas, de voz, vídeo, etcétera, estas comunicaciones permiten la conectividad en cualquier momento y en cualquier lugar como lo son por vía Wi-Fi, Bluetooth, etcétera, todo esto está causando una gran demanda por lo que es necesario disponer de un gran ancho de banda, esto está impulsando las comunicaciones hacia frecuencias de microondas para satisfacer y dar prestaciones de las máximas velocidades a todo el mundo. En el área de las telecomunicaciones, las microondas se utilizan para la comunicación en largas distancias como sustituto de la

fibra óptica o del cable coaxial.

Además, hoy en día se están utilizando las señales de microondas para mejorar las aplicaciones médicas y así ver las ventajas que tienen estas señales con respecto a los rayos X en este campo, estos últimos son ionizantes. Estos rayos X, trabajan en un mayor rango frecuencial a partir de los 300 GHz y tienen una menor longitud de onda, cuanto menor es esta longitud de onda, más capacidad tiene de penetrar el material que se requiera en cada momento. Al introducir estas ondas de gran frecuencia a través del tejido humano, puede ocasionar que desarrolle algún tipo de enfermedad o daños en el tejido, por eso es conveniente estar el menor tiempo posible enfrentados a estas ondas. En las radiografías se pueden apreciar contrastes en el color en los cuales los rayos X atraviesan el cuerpo y dependiendo de la densidad tejido que atraviesan generan un color u otro, como por ejemplo, cuando la radiación es absorbida por materiales densos como son los huesos o metales se genera un tono de color blanco y cuando la radiación no es absorbida por algún material denso generarán un tono negro, esto se puede apreciar en la *Figura 1.1.*



Figura 1.1. Radiografía del tórax [1].

Con las señales de microondas no nos encontramos con este tipo de problema como es el tiempo de exposición ya que tienen un rango de frecuencias menor que los rayos X y una mayor longitud de onda, además, estas ondas no son ionizantes. Un ejemplo con este tipo de señales de microondas es el realizado por Carolina Blanco Angulo en su Trabajo Fin de Máster [2] con título “Sistema no invasivo basado en microondas para la medida de distancias en material biológico. Aplicación en la detección de brain-shift y de tumores en cáncer de mama”, en este trabajo se comentarán dos tipos de sistemas utilizando señales de microondas, uno se basa en detectar el efecto de brain-shift que se produce durante las operaciones de tumores cerebrales empleando 16 antenas tipo Vivaldi que se disponen alrededor del cráneo. El otro sistema en el que se basa dicho proyecto es en la

detección de tumores en cáncer de mama empleando el mismo sistema que para el que se ha comentado anteriormente.

También, otro de los puntos a tratar en este apartado es hacer una introducción a la apnea¹ en recién nacidos y prematuros, estos, normalmente se consideran prematuros cuando nacen con menos de 36 semanas donde cada año aproximadamente nacen alrededor de 20 millones de niños prematuros que pesan menos de 1500 g [3]. Los estudios clínicos que hay hoy en día suelen ser caros porque requieren noches de evaluación al paciente mediante sistemas específicos y personal especializado.

1.2. ESTADO DEL ARTE

En este apartado se van a explicar los sistemas que hay actualmente para detectar la apnea prematura ya que es un problema que ha estado siempre vigente, incluido en la actualidad, además, también se comentará el sistema que se va a tratar a lo largo de este proyecto.

Algunos de los sistemas que se han implementado en este campo han sido por ejemplo, utilizando un estímulo vibrotáctil a través de una malla ortopédica localizada en el tórax para así, poder corregir esta situación, este proceso se basa en un estímulo manual con vibraciones a 250 Hz durante cuatro segundos [3]. En la *Figura 1.2* se puede observar los materiales y conexionado necesarios para este proceso.

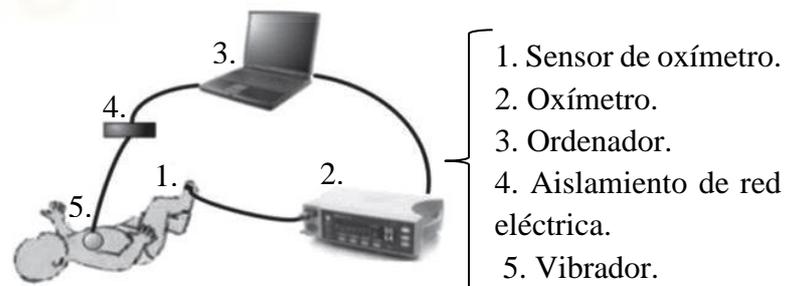


Figura 1.2. Sistema de detección de apnea 1 [3].

Otros de los sistemas que se ha estudiado ha sido a partir de características de la señal electrocardiograma, estos sistemas no son invasivos y tienen un reducido precio [4], a pesar de esto, uno de los inconvenientes de estos sistemas es el abundante empleo de cables que se le conectan a los pacientes.

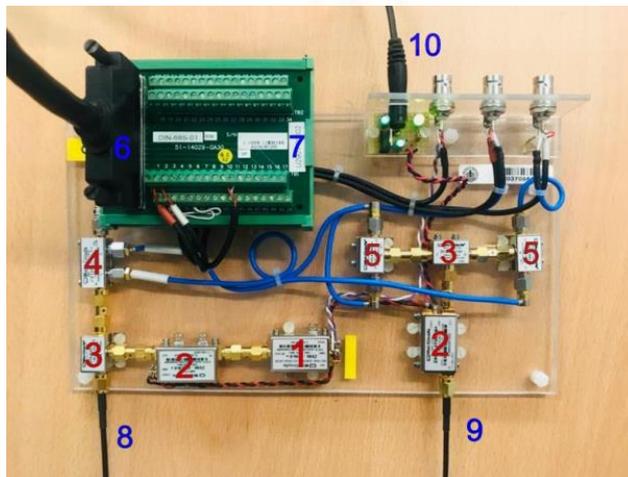
¹ El episodio de la apnea se define como una pausa intermitente de la respiración que puede durar unos segundos además de una disminución en la frecuencia cardiaca.

Otros de los sistemas que se han encontrado han sido mediante un sistema de registro portátil, en el que se mide el flujo nasobucal, saturación de oxígeno y pulso arterial. Este sistema como se ha comentado anteriormente se realiza en laboratorios de sueño, donde hay investigadores y personal especificado para vigilar este tipo de datos [5], lo cual le hace ser más caro en cuanto al valor del mercado, uno de los inconvenientes de estos sistemas es que son invasivos y pueden llegar a ser incómodos ya que se le conectan a los pacientes números cables. Estos sistemas se pueden ver en la *Figura 1.3*.



Figura 1.3. Laboratorios especializados en apnea del sueño [6] [7].

Por último, antes de introducir al sistema que se va a llevar a cabo para este proyecto, se va a ver otra forma de detectar apnea en recién nacidos utilizando la tecnología RADAR. Esta tecnología está relacionada con nuestro proyecto ya que se va a encargar de detectar la frecuencia cardíaca y respiratoria sin estar en contacto con el paciente a través de unas guías de ondas circulares. Este sistema se puede ver en la *Figura 1.4* y en la *Figura 1.5*.



1. VCO (Oscilador controlado por tensión).
2. Amplificador.
3. Divisor de potencia.
4. Divisor de potencia-desfasador.
5. Mezclador.
6. Conexión ADC.
7. Placa de conexiones.
8. Conexión antena emisora.
9. Conexión antena receptora.
10. Conexión a alimentación.

Figura 1.4. Sistema de detección de apnea II [8].



Figura 1.5. Guías de ondas circulares [8].

El sistema físico que se va a tratar en el proyecto está compuesto por 4 antenas impresas de banda ancha que trabajan en el rango de las microondas (no son ondas perjudiciales para el tejido humano) y que irán colocadas en la parte superior del sistema, con esto, se podrá simular un diseño de una incubadora y poder detectar la variación de la respiración en recién nacidos. Este sistema está compuesto por, además de las 4 antenas de banda ancha, de una placa de Arduino que mediante su programación y una PCB diseñada en el laboratorio de la Universidad Miguel Hernández se procederá al manejo de las antenas por medio de un conmutador de alta frecuencia, que este a su vez, estará conectado mediante cables de alta frecuencia a las antenas y al Analizador de Redes Vectorial (VNA), este último nos permitirá poder realizar y mostrar las medidas. Todo este proceso de diseño, medidas y procesado de estas, se irán explicando a lo largo del proyecto.

1.3. OBJETIVO PRINCIPAL

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado como se ha comentado anteriormente es detectar la apnea prematura en recién nacidos colocados en una incubadora por medio de señales de microondas mediante el diseño de un sistema compuesto por 4 antenas que se van a encargarse de medir la diferencia de distancias para detectar la respiración en recién nacidos. Las antenas que se van a mostrar más adelante a lo largo del proyecto son unas antenas de banda ancha hasta aproximadamente 25 GHz, estas se van a encargarse de emitir y recibir señales que posteriormente serán medidas mediante el VNA y procesadas por el software de MATLAB. Para poder seguir este proceso, se han marcado una serie de objetivos que previamente hay que cumplir como son los que se muestran a continuación.

- Análisis de la documentación necesaria para abarcar los conocimientos básicos.
- Simulaciones, diseños y pruebas del sistema mediante el software de EMPro antes de la fabricación del mismo.
- Fabricación del set-up final del sistema para poder realizar medidas, explicando todo el sistema hardware del que se compone nuestro sistema.

Con todo esto y una vez realizado el conexionado del sistema, se procederá a obtener las medidas realistas del sistema basado en microondas para la detección de apnea. Para llevar a cabo unas medidas más realistas se ha utilizado un muñeco simulando a un bebé, el cual se irá variando la posición de este para ver si nuestro sistema detecta dicho desplazamiento.

1.4. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

Este Trabajo Fin de Grado que se ha llevado a cabo, está compuesto por 5 apartados además de las bibliografías necesarias y anexos. A continuación, se explicarán cada uno de estos apartados por separado.

- **Capítulo 1:** En este primer apartado, se va a realizar la introducción del proyecto, el cual contendrá además de esta introducción, un estado del arte en el cual se explicarán los sistemas que hay actualmente para detectar apnea y por último, contendrá también unos objetivos que se marcan al comienzo del proyecto.
- **Capítulo 2:** En este apartado, se van a introducir todos los conceptos necesarios, así como el software que se ha utilizado para poder entender bien el proyecto. Por último, se hará una introducción a una prueba que se ha realizado con una antena exclusivamente para ese apartado para ver el procedimiento que se va a seguir en nuestro proyecto, ya sea desde la obtención de las medidas como su procesado con el software de MATLAB.
- **Capítulo 3:** En este apartado se ha llevado a cabo el proceso de simulaciones y pruebas con la antena del proyecto con ayuda del software de EMPro. Al comienzo se hace una descripción de la antena que se va a utilizar, así como sus parámetros más importantes para tener en cuenta. Seguidamente, se harán pruebas colocando un objeto en frente de la antena para ver si su respuesta varía y poder observar que, variando el objeto de distancia, seremos capaces de detectar dicho movimiento, esto último lo podremos obtener gracias al software de MATLAB. Por último, se va a realizar el mismo procedimiento, pero en este caso se van a disponer de 4 antenas separadas a las mismas distancias unas respecto a las otras, con esto podremos realizar, obtener y comparar las simulaciones antes de proceder al diseño del set-up final.

- **Capítulo 4:** En este apartado se va a hacer una descripción de las partes que componen el set-up final, así como el diseño de las antenas de banda ancha, materiales utilizados y software implementado para llevar a cabo la automatización del sistema. También se procederá hacer medidas realistas con el sistema finalizado, así como su posterior procesado y comparación con las medidas simuladas.
- **Capítulo 5:** Por último, se van a exponer las conclusiones del proyecto, así como las líneas futuras en las que el proyecto puede mejorar en ciertas partes.
- **La bibliografía y los anexos** que se van a localizar al final del documento corresponde a toda la información extraída por fuentes externas ya sea internet, libros, etcétera, así como la hoja de datos del fabricante.





2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado se van a describir todos los materiales, métodos y conceptos teóricos que se han utilizado para la realización del Trabajo Fin de Grado. A continuación, se contemplarán los fundamentos teóricos, en los que se tratará de explicar los conceptos más importantes para poder asimilar cada apartado. Una vez visto esto, se explicarán cada uno de los materiales que se van a utilizar en el proyecto, tanto los sistemas físicos como los programas.

2.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1.1. ONDAS DE RADIOFRECUENCIA Y MICROONDAS

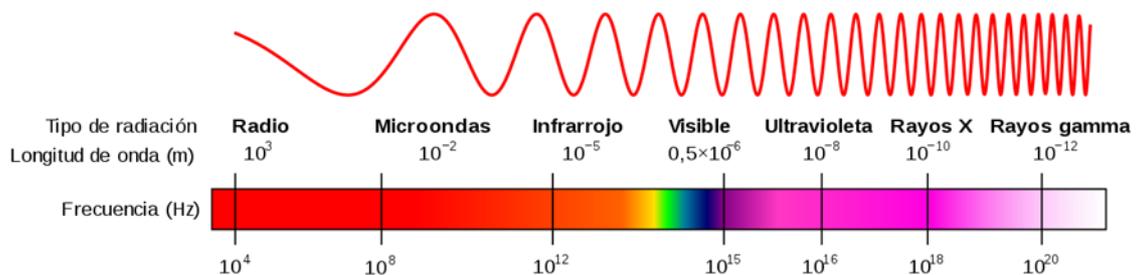


Figura 2.1. Espectro electromagnético [9].

El término de radiofrecuencia (RF) se corresponde a la parte del espectro electromagnético que abarca desde los 3 kHz hasta los 300 GHz, como se sabe, el hercio es la unidad de medida de la frecuencia de las ondas que corresponde a un ciclo por segundo. Estas frecuencias se utilizan para señales FM, AM, etcétera [10].

El término de microondas tiene una longitud de onda aproximadamente de 1 m – 10 mm en un intervalo de frecuencias de 300 MHz – 300 GHz. Son ondas no invasivas gracias a

su reducida longitud de onda, de tal forma que se utiliza en aplicaciones como la telefonía, sistemas de radar, aplicaciones médicas, etcétera. Estas ondas electromagnéticas son no ionizantes, por lo que emiten potencias muy bajas y presentan una alta capacidad de penetración en los tejidos humanos. En el caso de este proyecto, nos centraremos en este tipo de ondas ya que en los últimos años están siendo más importantes ya sea en el campo de la medicina como en la caracterización de materiales biológicos. Esta importancia viene dada a que actualmente en el campo de la medicina la mayoría de los procesos utilizan sistemas invasivos como lo son los rayos X que, como se muestra en la *Figura 2.1*, tienen una mayor frecuencia y se consideran ondas ionizantes, pudiendo dañar el tejido humano.

2.1.2. PARÁMETROS S

Los parámetros S, son conocidos como parámetros de Scattering o de dispersión, están compuestos por [11]:

- Coeficiente de reflexión a la entrada (S_{11}): Cantidad de potencia reflejada que recibe el puerto 1 cuando se transmite una onda incidente en ese mismo puerto.
- Ganancia de transmisión inversa (S_{12}): Cantidad de potencia incidente que recibe el puerto 1 cuando la onda se transmite por el puerto 2.
- Ganancia de transmisión directa (S_{21}): Cantidad de potencia incidente que recibe el puerto 2 cuando la onda se transmite por el puerto 1.
- Coeficiente de transmisión a la salida (S_{22}): Cantidad de potencia reflejada que recibe el puerto 2 cuando se transmite una onda incidente en ese mismo puerto.

Estos parámetros se utilizan para caracterizar un dispositivo de 1 o más puertos como se puede apreciar en la *Figura 2.2*, el modo de funcionamiento es que se realizan diferentes tipos de mediciones y luego se calcula el conjunto de parámetros en relación con cada uno de los puertos involucrados, estas relaciones son las que se muestran en la *Tabla 2.1*.

Parámetros	Relación
S_{11}	$S_{11} = \frac{\text{Reflejada}}{\text{Incidente}} = \frac{b_1}{a_1}$, cuando $a_2=0$
S_{12}	$S_{12} = \frac{\text{Transmitida}}{\text{Incidente}} = \frac{b_1}{a_2}$, cuando $a_1=0$
S_{21}	$S_{21} = \frac{\text{Transmitida}}{\text{Incidente}} = \frac{b_2}{a_1}$, cuando $a_2=0$
S_{22}	$S_{22} = \frac{\text{Reflejada}}{\text{Incidente}} = \frac{b_2}{a_2}$, cuando $a_1=0$

Tabla 2.1. Relación de los Parámetros S.

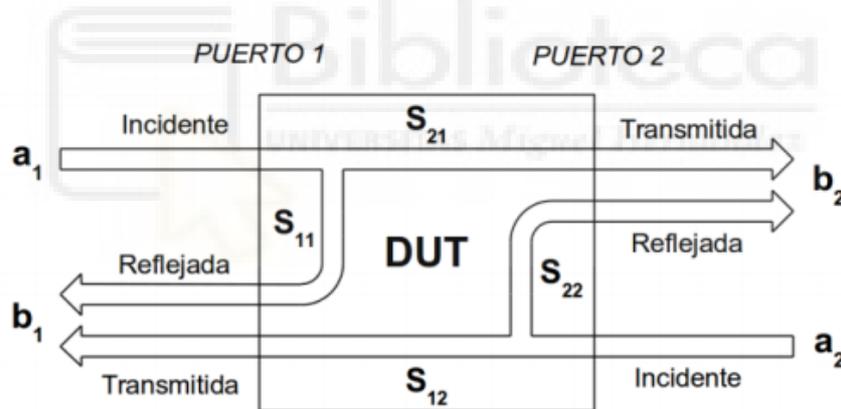


Figura 2.2. Señales incidentes, reflejadas y transmitidas de los Parámetros S [12].

En la *Figura 2.2* se puede ver claramente los parámetros que relacionan las ondas incidentes, reflejadas y transmitidas para dispositivos de alta frecuencia. Para este proyecto, es conveniente tener en cuenta el coeficiente de reflexión (S_{11}) para entender el funcionamiento de las antenas y el coeficiente de transmisión (S_{21}) que serán necesarios cuando se vean los conmutadores de alta frecuencia.

2.1.3. FUNDAMENTOS ANTENAS

Las antenas pueden considerarse sistemas de comunicaciones basados en emitir y recibir ondas electromagnéticas en un determinado rango de frecuencias. Mediante los parámetros S introducidos en el apartado anterior, podemos caracterizar dichas antenas ya sea mediante su impedancia, reflexión, eficiencia de radiación, ganancia, etcétera. El parámetro S_{11} es importante en la caracterización de las antenas debido a que mediante este parámetro podemos conocer el ancho de banda en el que trabaja la antena que queremos utilizar.

Para el proyecto se utilizarán antenas impresas, estas antenas tienen la ventaja de que son de pequeño tamaño y peso, son fáciles de fabricar y son más económicas. Algunos de los inconvenientes de estas antenas es que incorporan un ancho de banda y ganancia más reducidos. Se pueden ver diferentes tipos de antenas impresas en la *Figura 2.3*.



Figura 2.3. Antenas impresas.

2.1.4. FUNDAMENTOS RADAR

Este proyecto utiliza el funcionamiento RADAR ya que se encargan de enviar señales las cuales son rebotadas en el objetivo y retornan a la antena. Con esto se puede determinar velocidades, así como el tiempo que ha tardado la onda en ser recibida y por lo tanto la distancia a la que se encuentra la antena. Hay radares de diferentes tipos de ondas como las señales de microondas, que trabaja en la banda de longitudes de onda muy pequeñas. Se emplean en diversos tipos de aplicaciones como son en tierra, mar, aire y espacio.

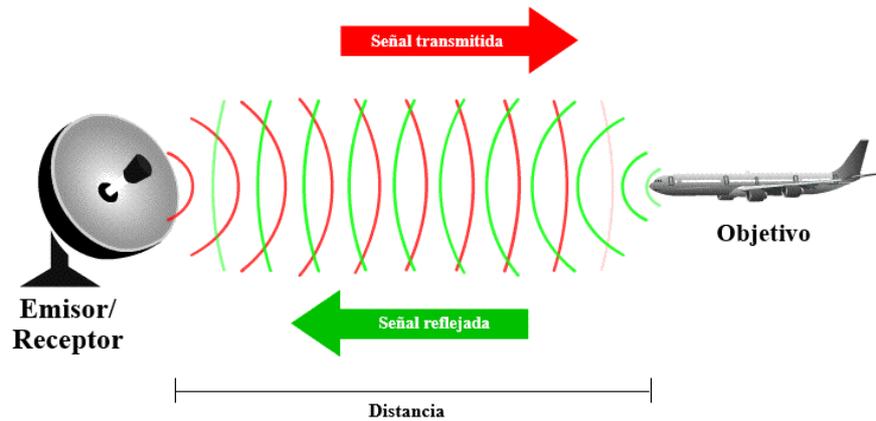


Figura 2.4. Funcionamiento del RADAR [13].

2.1.5. TECNOLOGÍA MICROSTRIP

La tecnología microstrip suele estar formada por un parche radiante normalmente de cobre y un plano de masa separados por un dieléctrico, podemos encontrarnos con distintas geometrías ya que esta tecnología nos permite variar la forma de estas [14]. Se puede ver un ejemplo de una línea de transmisión en la Figura 2.5.

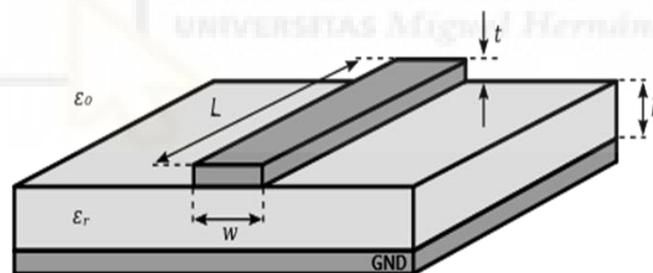


Figura 2.5. Línea de transmisión microstrip [15].

Siendo cada una de las partes:

- ϵ_0 : Permitividad en el vacío.
- ϵ_r : Permitividad relativa del dieléctrico.
- L: Longitud de la línea de transmisión.
- w: Anchura de la línea de transmisión.
- t: Espesor de la línea de transmisión.
- h: Espesor del dieléctrico.

Con esta tecnología, también se puede implementar distintos tipos de filtros (paso-alto, paso-bajo, etcétera), antenas, resonadores y muchos otros tipos de aplicaciones. En una

de las asignaturas del Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación, se implementan filtros de este tipo como se puede ver en la *Figura 2.6*.

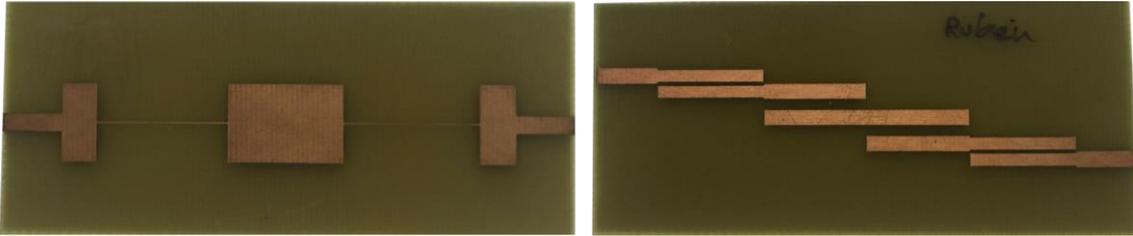


Figura 2.6. Diseño de filtros mediante tecnología microstrip.

2.2. CONMUTADORES DE ALTA FRECUENCIA

Los conmutadores de alta frecuencia se utilizan para seleccionar el canal deseado entre las diferentes entradas y salidas que posee el dispositivo, esto se hace aplicando tensiones que controlan a los interruptores internos que se encuentran en el conmutador como se puede ver en la *Figura 2.7*, en el caso de este proyecto, servirá para elegir una de las 4 antenas que disponemos y además nos permitirá la conexión al VNA para así, poder visualizar los resultados obtenidos.

Hay diversos tipos de conmutadores dependiendo de su frecuencia, la terminación de contacto de los conectores externos, tensión de control, etcétera.

También, se debe tener en cuenta las pérdidas en el conmutador, esto se debe a que hay capacidades internas en el interior del conmutador, lo cual hace que aumente las pérdidas conforme aumentamos la frecuencia.

El rendimiento de los conmutadores viene dado por varios parámetros, como son el voltaje de alimentación, la temperatura, la frecuencia, etcétera.

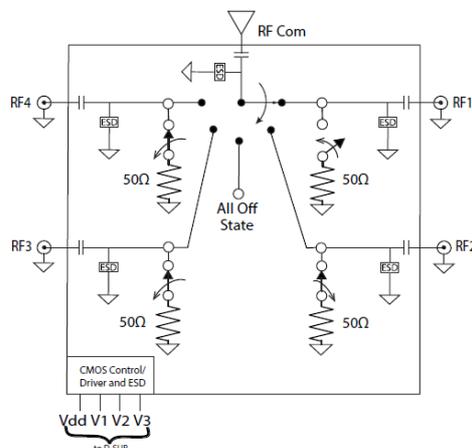


Figura 2.7. Conmutador de RF [16].

Se puede apreciar en la *Figura 2.7* como es internamente un conmutador de alta frecuencia de una entrada y cuatro salidas, dependiendo de la salida que se quiera escoger, activará una salida y la otra la dejará en abierto, esto permite reducir las pérdidas de conmutación que se han comentado anteriormente.

2.3. ANALIZADOR DE REDES

Los analizadores de redes son equipos que se encargan de medir los Parámetros-S [17] que se explicaron con anterioridad, de los diferentes circuitos de alta frecuencia. Estos equipos abarcan diferentes rangos de frecuencia, cuanto mayor es el rango de frecuencias más aumenta el precio.

Hay dos tipos de analizador de redes:

- Analizadores de redes vectorial o **Vector Network Analysers (VNA)** se encarga de medir las propiedades de amplitud y fase. Este analizador es el que se va a usar para este proyecto ya que permite medir señales de microondas y analizar diferentes parámetros. Nos ofrecen excelentes prestaciones ya que se pueden encontrar con o sin pantalla táctil, programables o no programables, con diferentes números de puertos, etcétera. Estos equipos también llevan incorporados accesorios como por ejemplo kits de calibración automáticos, atenuadores y otros tipos de accesorios.



Figura 2.8. Analizadores de Redes Vectoriales [18].

- Analizador de redes Escalar o **Scalar Network Analysers (SNA)** se encarga de medir las propiedades de amplitud.

2.4. SOFTWARE

A continuación, se van a presentar los programas que intervienen en el Trabajo Fin de Grado. Se han manejado desde entornos de diseño, fabricación y simulación hasta entornos de programación.

2.4.1. EMPro

EMPro es un software de simulación electromagnética (EM) profesional en 3D de Keysight Technologies [19] en el cual, se pueden implementar diferentes tipos de circuitos, ya sean filtros, antenas, etcétera.

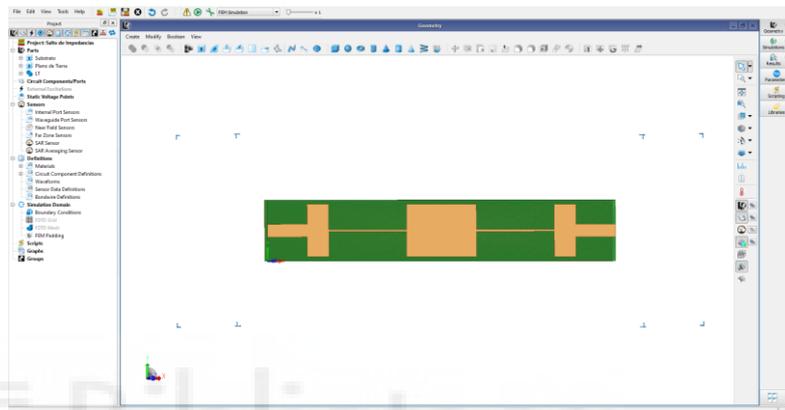


Figura 2.9. Pantalla principal de EMPro.

El programa permite realizar simulaciones de dos métodos:

- FEM: Método de elementos finitos, en el que se resuelven numéricamente ecuaciones diferenciales, mediante esta simulación se puede obtener la transferencia de calor, el flujo de fluidos, etcétera.
- FDTD: Método de dominio del tiempo de diferencias finitas, en el que es una técnica de análisis numérico, se resuelven las ecuaciones de Maxwell sin ningún tipo de aproximación.

Las principales ventajas de este software son que, a la hora de simular, se puede elegir el rango de frecuencias que se desee en cada caso, el número de puntos que se quieren simular y los pasos, también, se puede elegir el tipo de mallado que se quiere realizar. Alguna de sus desventajas es que, al aumentar el número de puntos y el incremento del rango de frecuencias, el tiempo de simulación aumenta considerablemente pudiendo durar algunos días en realizar las simulaciones. Esta desventaja es común en todos los software que utilicen métodos numéricos.

Una vez realizadas las simulaciones, se pueden exportar los resultados al programa que se va a explicar a continuación ya que son de la misma compañía.

2.4.2. Advanced Design System (ADS)

ADS es un software de Keysight Technologies de diseño de circuitos electrónicos, en el que se puede implementar cualquier tipo de circuitos de radiofrecuencia y microondas además, permite realizar una

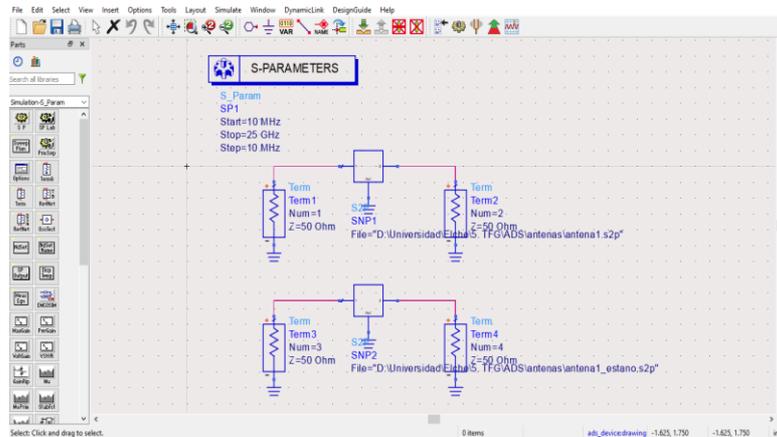


Figura 2.10. Esquemático en ADS.

simulación de estos muy rápida. También permite instalar una gran variedad de librerías de componentes como se ve en la asignatura de cuarto curso ‘Sistemas electrónicos de comunicaciones’ del Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación en la Universidad Miguel Hernández de Elche.

Como se ha comentado en el software anterior, EMPro permite extraer los resultados de las simulaciones a ADS en formato .S2P, de tal manera, se pueden abrir insertando los componentes como se muestra en la Figura 2.10.

Una vez aplicadas las condiciones de simulación, se procederá a ir a la pestaña de simulaciones como se muestra en la Figura 2.11.

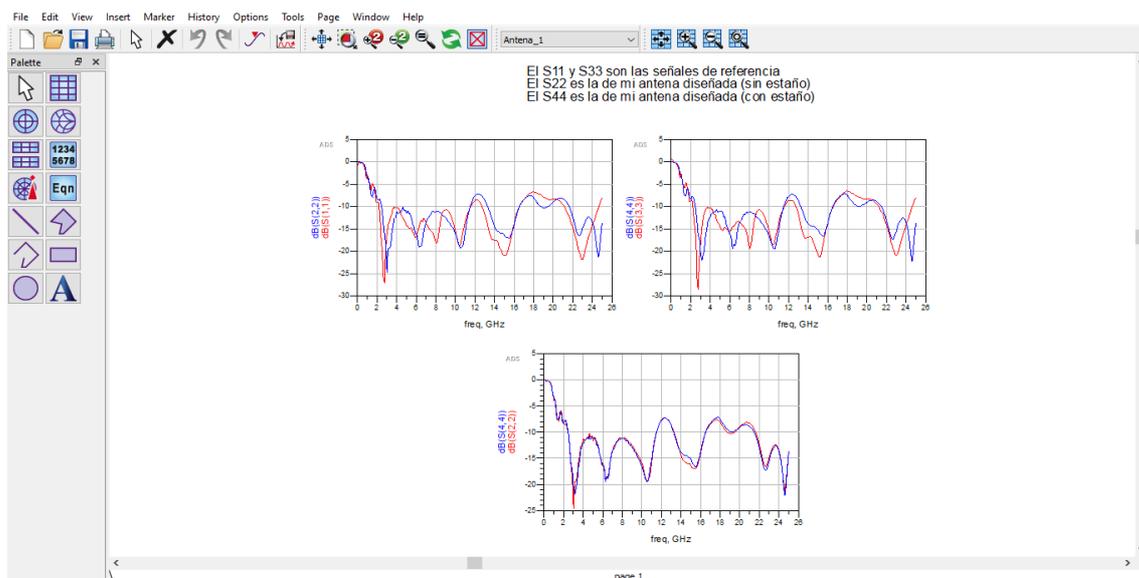


Figura 2.11. Pestaña de simulación ADS.

Como se puede observar, se pueden comparar los archivos que se han obtenido en el

programa de EMPro. Otra de las funciones que permite ADS es generar layout del circuito diseñado para su futura implementación y fabricación en el laboratorio.

2.4.3. MATLAB

MATLAB es un software de MathWorks basado en la programación y en cálculos numéricos (vectores, matrices, funciones, etcétera). Es un software muy completo ya que permite realizar el procesamiento de las señales de comunicaciones, además de las gráficas de cada una de las medidas, también permite añadir funciones y herramientas que se pueden visualizar en 2D y 3D. Este software se utiliza frecuentemente en el Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación. En la *Figura 2.12* se puede observar la pantalla principal del software MATLAB.

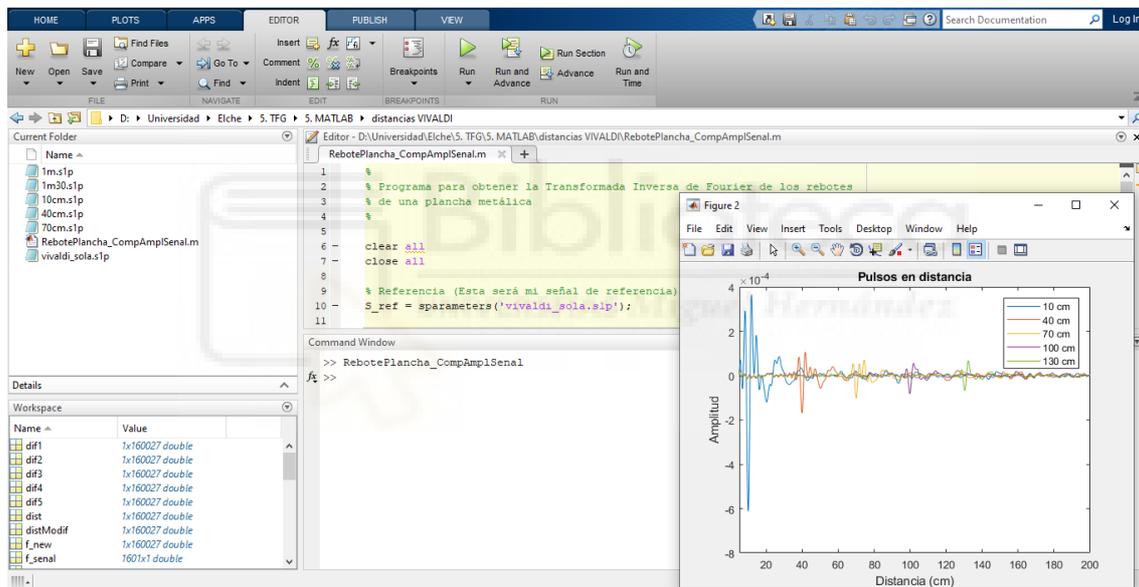


Figura 2.12. Pantalla principal de MATLAB.

2.4.4. EAGLE

Eagle es un software de Autodesk basado en el diseño de placas de circuito impreso (PCB) además de todas las librerías que ya incorpora el programa, se pueden instalar alguna más por si fuera necesario en el caso de no disponer de algún componente que sea necesario. Con este programa se ha trabajado en el tercer curso del Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación y será necesario para realizar la placa de alimentación que estará conectada a nuestro Arduino directamente a través de unos pines

como se explicará más adelante.

Este programa consta de dos partes, una es la encargada del diseño del esquemático como se ve en la *Figura 2.13* y la otra es la encargada del diseño de la PCB como se ve en la *Figura 2.14*.

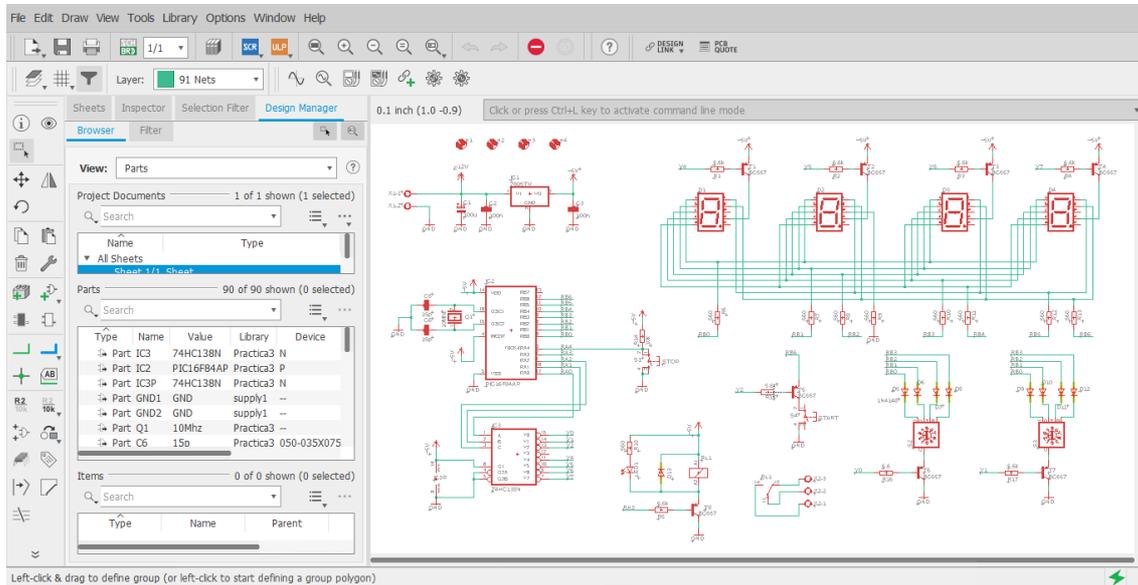


Figura 2.13. Pantalla principal a modo de ejemplo del esquemático de EAGLE.

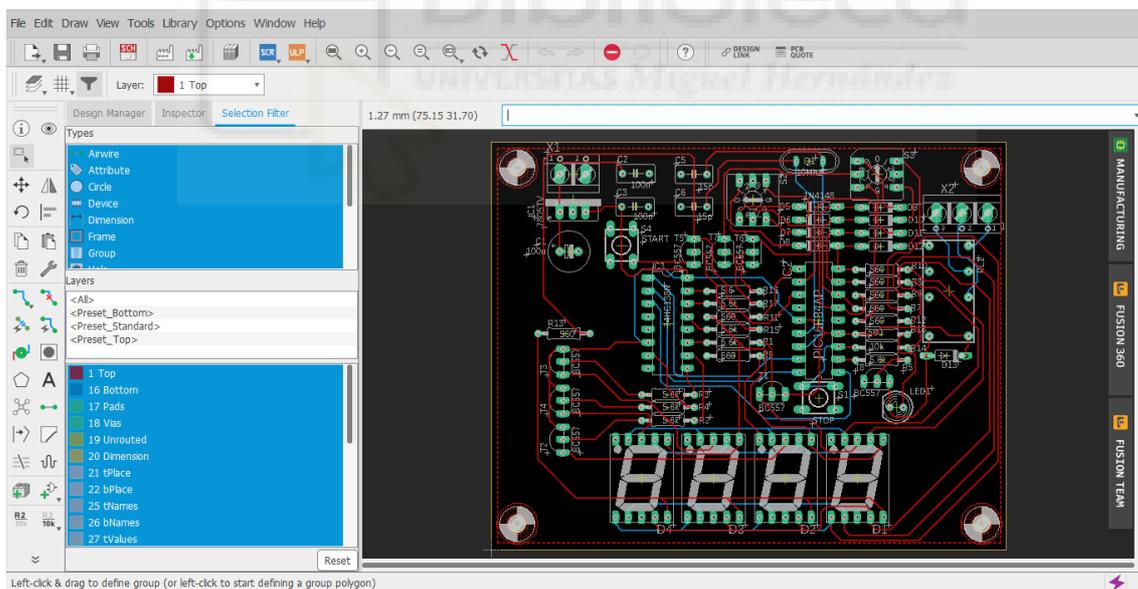


Figura 2.14. Pantalla principal a modo de ejemplo para el diseño de una PCB de EAGLE.

2.4.5. ARDUINO

El Arduino es una plataforma de creación de código abierto, la cual está basada en hardware y software libres² [20].

Arduino ofrece una plataforma de programación ‘Arduino IDE’ (Entorno de Desarrollo Integrado) escrita mediante el lenguaje JAVA, que se encarga de escribir programas y cargarlos en el microcontrolador que lleva incorporado la placa de Arduino.

Alguna de las ventajas por la cual se utiliza el Arduino son [21]:

- Es económico.
- El entorno de programación es sencillo.
- Código abierto (accesible a todos los públicos).

Hay diferentes tipos de Arduino, algunos son los siguientes:

- Arduino UNO [22]: El sistema hardware consta de 14 pines digitales que funcionan como I/O (Input/Output) y 6 pines analógicos. Este hardware es el que se utilizará para llevar a cabo este Trabajo Fin de Grado.
- Arduino MEGA [23]: El sistema hardware consta de 54 pines digitales que funcionan como I/O y 16 entradas analógicas, este dispositivo es el más potente de Arduino.
- Arduino NANO [24]: El sistema hardware consta de 14 pines digitales que funcionan como I/O y 6 entradas analógicas. Este tiene un pequeño tamaño y una de las principales ventajas es que se puede insertar directamente en la protoboard.

Todos estos tipos de Arduino, con compatibles con el lenguaje de programación ‘Arduino IDE’ comentado con anterioridad. En la *Figura 2.15* se puede ver la pantalla principal que ofrece este programa:

² Se denomina hardware y software libre a todos aquellos dispositivos, diagramas, códigos informáticos, etcétera que son de acceso público.

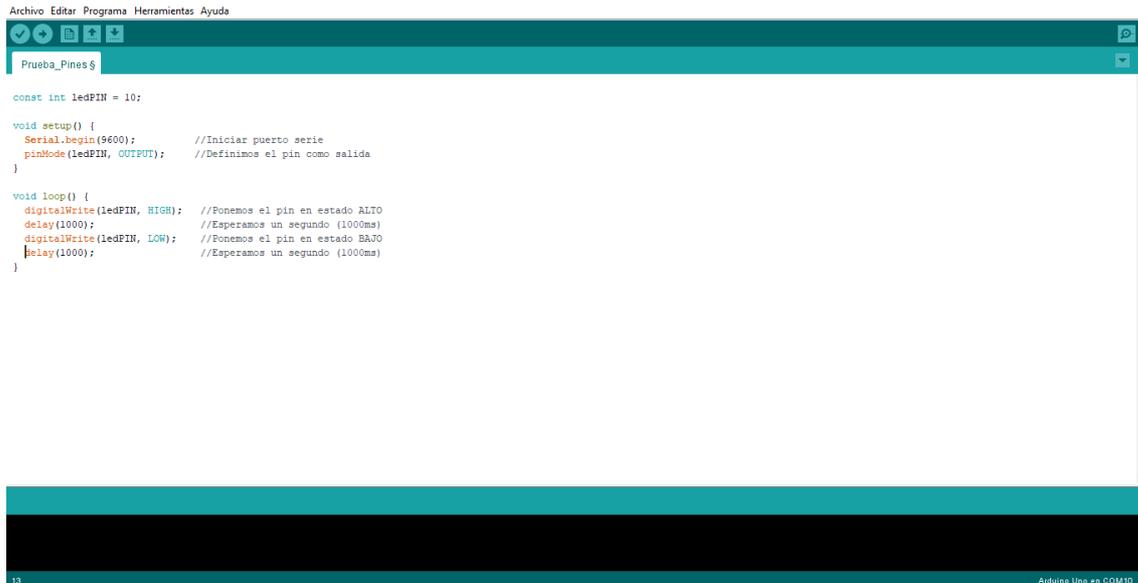


Figura 2.15. Pantalla principal a modo de ejemplo de Arduino IDE.

2.4.6. PYCHARM

Pycharm es un software de JetBrains basado en la creación de códigos de forma clara y sencilla además de que es un programa muy fácil de aprender. Este software proporciona inspecciones del código, indicación de errores en el caso de que los hubiera y soluciones ante estos errores [25]. Es un software que es compatible con Python, JavaScript, etcétera.

En la *Figura 2.16* se puede ver que aspecto tiene la pantalla principal del software:

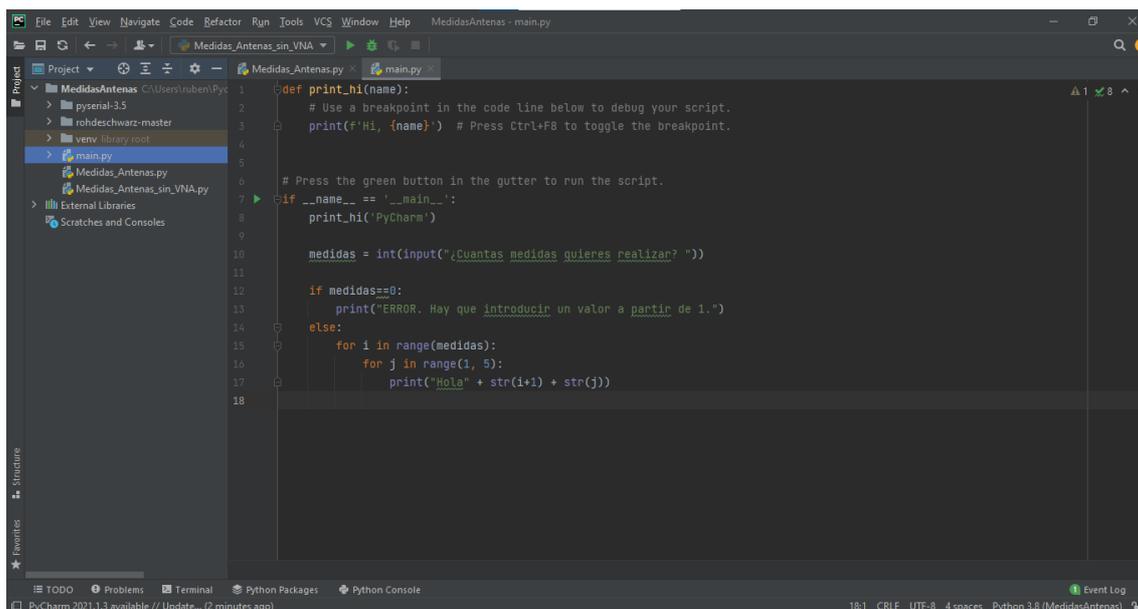


Figura 2.16. Pantalla principal a modo de ejemplo de Pycharm.

2.5. CÁLCULO DE DISTANCIAS CON ANTENA DE BANDA ANCHA EN EL RANGO DE LAS MICROONDAS

En este apartado se va a explicar el procedimiento el cual se seguirá para la implementación del Trabajo Fin de Grado. Primero, se comentará un tipo de antena que se va a utilizar exclusivamente en este apartado y se mostrará alguna figura en la cual se podrá ver como se tomaron las medidas para después, explicar la conversión y el procesamiento de estas medidas en el software de MATLAB. Con esto último, se conseguirá calcular la distancia a la que se sitúa el objeto que queremos medir y para ello, se va a utilizar una plancha metálica situada frente a la antena la cual se hará variar su posición para detectar los diferentes cambios. Se utiliza este material debido a que gracias a anteriores pruebas de sistemas de medidas RADAR, caracterización de antenas, etcétera, se ha visto que se pueden obtener buenos resultados de rebotes de ondas enviadas por la antena para posteriormente ser procesados estos datos. Con esto se conseguirá ver si se pueden detectar los cambios de posición del objeto ya que este proyecto se basa en detectar estos movimientos pero en bebés. Más adelante, se realizarán pruebas más realistas y con otro tipo de materiales, llegando a utilizar un muñeco simulando a un bebé. La antena que se va a utilizar para este apartado es una adaptación de una antena microstrip de substrato FR4 tipo Vivaldi como se pueden apreciar ambas caras en la *Figura 2.17*.

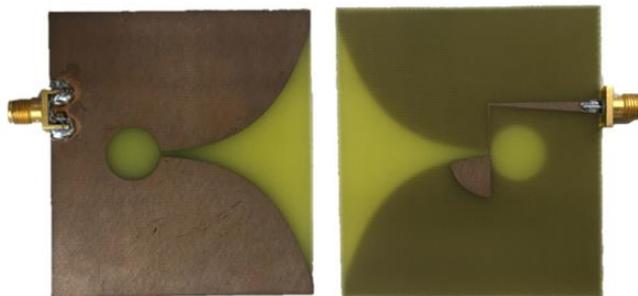


Figura 2.17. Antena tipo Vivaldi.

Esta antena tiene un ancho de banda desde 1.1 GHz hasta 5.4 GHz aproximadamente (considerando que el rango de funcionamiento está por debajo de los -10 dB) y para su medida se utilizará un Analizador de Redes conectado al conector que sobresale de la antena. Este Analizador de Redes Vectorial es el modelo ZNLE6 de Rohde & Schwarz, que se encarga de medir los Parámetros-S en el intervalo de frecuencias de 1 MHz a 6 GHz.

Además de este equipo y de la antena, también se utilizará una plancha metálica que se encuentre posicionada perpendicularmente a la antena para que esta pueda emitir y recibir las ondas electromagnéticas resultantes del rebote producido en la plancha.

Una vez comentado esto, se procederá a realizar los ensayos necesarios. Estos ensayos consisten, como se ha comentado anteriormente en, conectar la antena al Analizador de Redes Vectorial y de forma perpendicular, posicionar la plancha metálica, en este caso lo hacemos con ayuda de un soporte para poder sostenerla y poder variar su posición de manera sencilla. Quedando así como se ve en la *Figura 2.18*.



Figura 2.18. Ensayo realizado para el cálculo de distancias.

Cuando esté todo preparado, en primer lugar, se realizará una calibración del VNA para evitar posibles errores que aparezcan en los resultados. Una vez hecho esto, se procederá a realizar las medidas en diferentes distancias y posteriormente se guardarán una a una en el Analizador de Redes Vectorial y seguidamente, las exportaremos a nuestro ordenador para pasar al procesado de estas medidas. Es importante comentar que solo nos hará falta el coeficiente de reflexión a la entrada de la antena, es decir, el parámetro S_{11} .

2.5.1. PROGRAMACIÓN EN MATLAB

A continuación, se facilitará un diagrama de flujo como se puede ver en la *Figura 2.19* en el cual se explica el procesado de las medidas obtenidas.

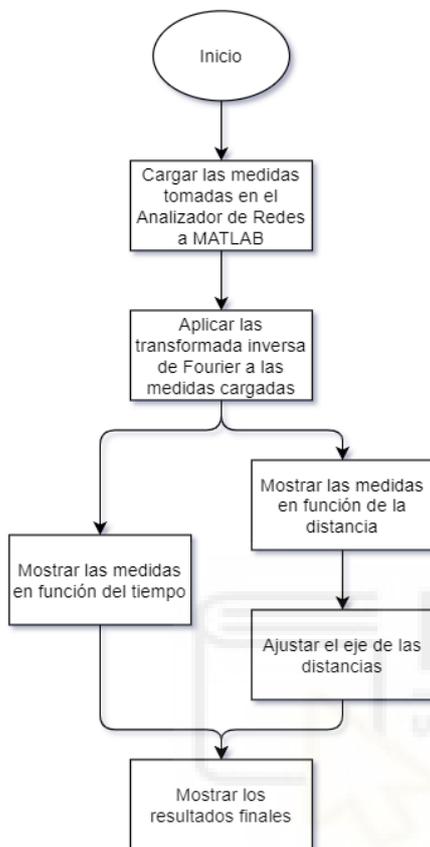


Figura 2.19. Diagrama de flujo del procesado de las medidas.

Como se ha comentado anteriormente, antes de proceder a realizar las medidas, se deberá calibrar el Analizador de Redes Vectorial con la antena conectada para así, evitar las posibles reflexiones que se puedan producir en los cables de medida.

Para la conversión de las medidas, es necesario disponer de una señal de referencia (sin plancha metálica) y las demás medidas a diferentes distancias. Una vez exportadas estas medidas, el software de MATLAB se va a encargar de realizar todo el procesado de la medida, incluyendo una transformada inversa de Fourier. Con esto, se conseguirá obtener la medida en el dominio del tiempo y de aquí, también poder convertirla al dominio de la distancia. Para convertir al dominio de la distancia, se deberá de restar la señal de referencia tomada al comienzo de las medidas sin ningún tipo de objeto con la medida real que se ha realizado.

Cuando se obtenga la resta, se deberá de ajustar el eje de distancias ya que al comienzo de la medida hay un cierto error que se deberá corregir.

Finalmente, se va a mostrar los resultados obtenidos como se puede ver en el apartado que se va a introducir a continuación.

2.5.2. RESULTADOS

En este apartado se mostrarán los resultados que se han obtenido en las medidas que se han realizado alejando cada vez más la plancha de la antena, estas medidas han sido a: 10 cm, 40 cm, 70 cm, 100 cm y 130 cm, además de una medida de referencia sin ningún objeto.

En función del tiempo, se han obtenido los siguientes resultados:

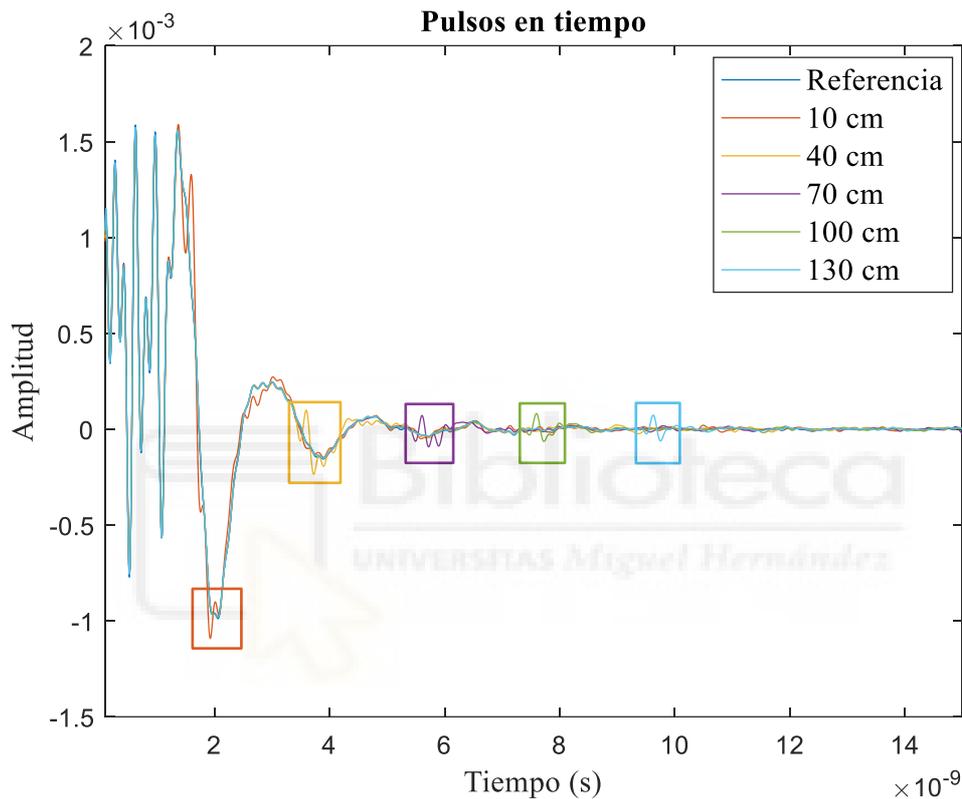


Figura 2.20. Resultado obtenido en función del tiempo.

Como se muestra en la *Figura 2.20* se pueden ver pequeños picos de señales, estas señales son las que son recibidas por la antena tras rebotar en la plancha metálica en diferentes posiciones. Se han señalado con un recuadro de cada color la señal correspondiente a cada distancia.

Una vez mostrado esto, se procederá a realizar la resta y el ajuste del eje para poder representarlo en el dominio de la distancia como se puede ver en la *Figura 2.21*.

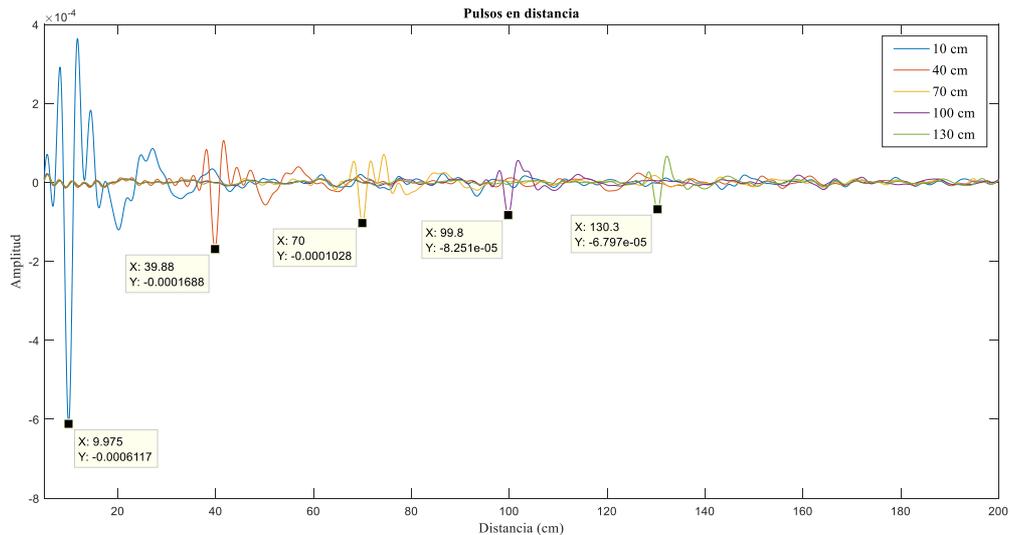


Figura 2.21. Resultado obtenido en función de la distancia.

Cabe comentar que la señal de referencia en este caso no aparece en la gráfica ya que a la hora de pasarlo al dominio de la distancia, se ha restado la señal de referencia con las medidas respectivamente. También es importante comentar que cuanto más cerca se obtenga el rebote, la resta con la señal de referencia es más complicada como ocurre en la señal a 10 cm.

Como se puede observar en la *Figura 2.21*, se han señalado los máximos de los picos de las señales rebotadas de las diferentes medidas y como se ve, sale un valor muy aproximado al que queremos medir, este pequeño error que sufre puede deberse a que la plancha metálica no se ha situado en el sitio justo y por eso hay una pequeña variación.

3. SIMULACIONES DEL SISTEMA

En este apartado se va a explicar el procedimiento seguido para este Trabajo Fin de Grado, en el cual, se ha utilizado diversos software, en este apartado especialmente se va a tratar el software de simulación de EMPro explicado en el [apartado 2.4.1](#) de este proyecto. Primero se hará una introducción de la antena que se va a utilizar a lo largo del proyecto en la cual, se explicará su rango de funcionamiento y donde se mostrarán sus características principales. Seguidamente, se mostrarán las simulaciones que se han llevado a cabo para 1 y 4 antenas.

3.1. INTRODUCCIÓN DE LA ANTENA

La antena que se va a utilizar en este proyecto ha sido desarrollada por Andrea Martínez en su Trabajo Fin de Máster con título “Diseño, simulación y medida de antenas monopolo impresas de banda ancha para la detección de tejido biológico” el cual defendió en marzo de 2020. Este tipo de antena se caracterizan por su gran ancho de banda, aproximadamente hasta los 25 GHz a pesar de su tamaño reducido. Este Trabajo Fin de Grado no se centra en el diseño de una nueva antena, por lo que se decidió en el laboratorio de alta frecuencia partir de estas antenas impresas de banda ancha ya desarrolladas para su utilización en el sistema propuesto.

Estas antenas de banda ancha han sido diseñadas y simuladas en el software de EMPro el cual permite realizar simulaciones con diferentes pasos frecuenciales en un intervalo frecuencial que se determine en cada momento. Una de las ventajas de este programa es que permite añadir diferentes objetos, los cuales se pueden variar su material, esto se hará cambiando la permitividad relativa (ϵ_r), así como su conductividad, etcétera. En nuestro

caso se han realizado diferentes tipos de simulaciones, primero se ha simulado la antena sola sin ningún tipo de material para obtener su respuesta en el vacío. Más adelante, se ha colocado una plancha metálica en el que se le ha asignado dicho material, asignándole las propiedades del cobre para más adelante hacer pruebas realistas con una plancha de este tipo.

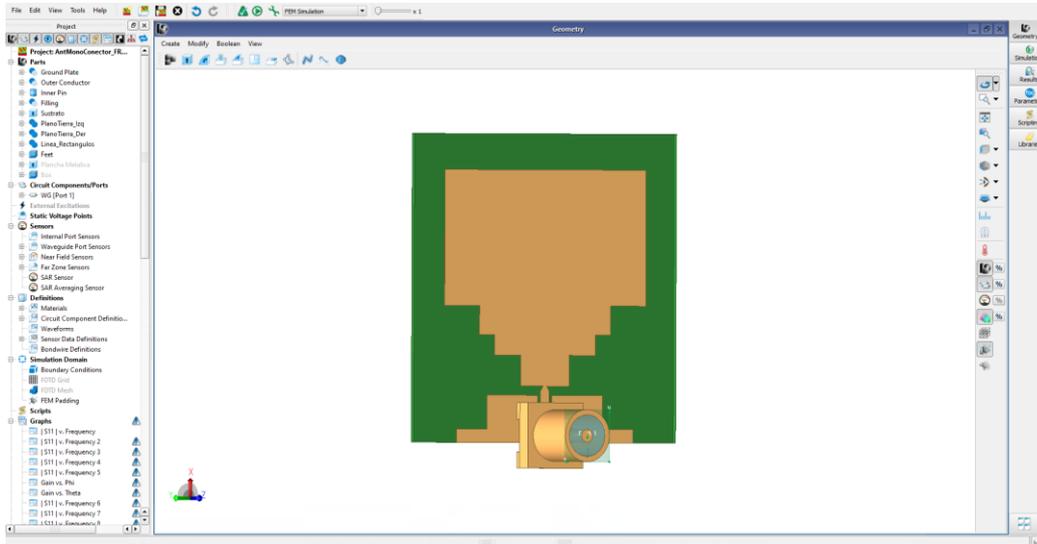


Figura 3.1. Diseño de la antena banda ancha en EMPro.

A continuación en una primera simulación donde solo se encuentra la antena sin ningún tipo de objeto, se obtiene el parámetro S_{11} que es el que se encarga de caracterizar la respuesta de la antena, que como se vio en el [apartado 2.1.2](#) va a representar el coeficiente de reflexión a la entrada de la antena.

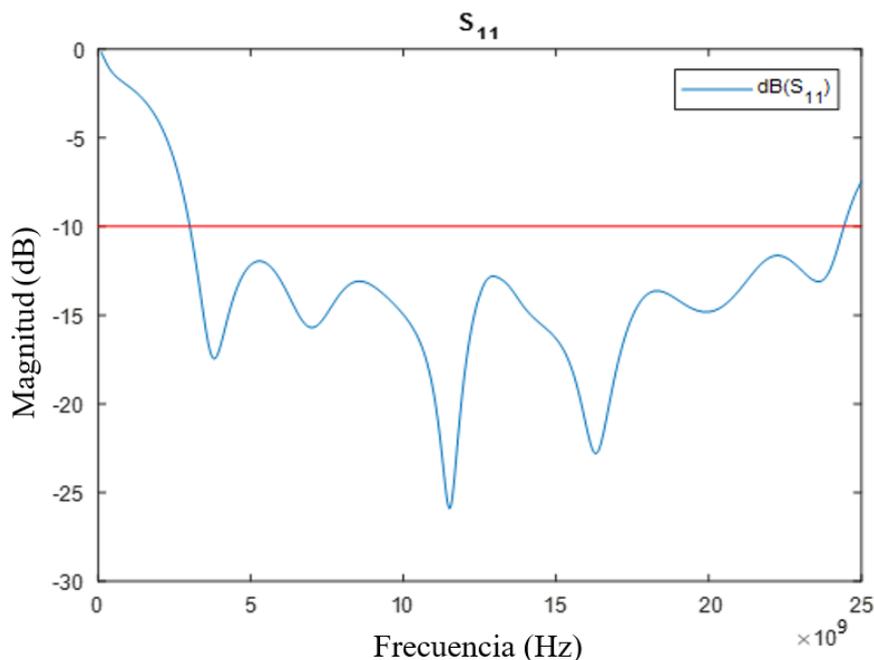


Figura 3.2. Parámetro S_{11} de la antena de banda ancha.

Como se puede apreciar en la *Figura 3.2*, el parámetro S_{11} nos muestra el ancho de banda en el que trabaja la antena, en cualquier caso, se considerará el rango de funcionamiento de la antena por debajo de los -10 dB (señalado con una línea en rojo en la figura), por lo que podemos decir que la antena trabaja en el rango desde 3 GHz hasta 24.5 GHz aproximadamente. En nuestro caso, interesa únicamente la respuesta que tiene la antena hasta los 6 GHz ya que el VNA y el conmutador de alta frecuencia solo obtienen respuestas hasta dicha frecuencia. Esta antena se ha hecho pensando que en un futuro podamos tener estos materiales e instrumentos con más ancho de banda y nos permita poder trabajar en todo su rango frecuencial.

Una vez comentado esto, se procederá a explicar los diagramas de radiación obtenidos de la antena, estos diagramas representan la radiación de la antena a diferentes frecuencias y en diferentes planos, en el plano E y en el plano H. En la *Figura 3.3*, se va a representar los diagramas de radiación para los diferentes campos que se han comentado para diferentes frecuencias en los que la antena de banda ancha trabaje, es decir, por debajo de los -10 dB para el parámetro S_{11} .

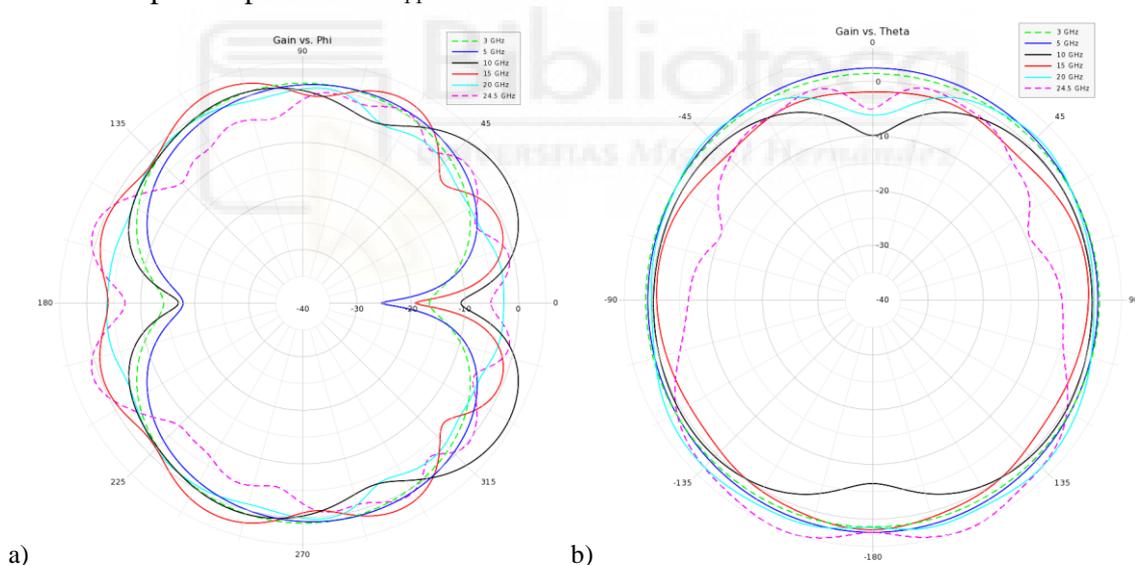


Figura 3.3. Diagramas de radiación en simulación. a) Plano E. b) Plano H.

Como se puede observar en el diagrama de radiación del plano H, el funcionamiento de la antena es omnidireccional, es decir, radia hacia los 360° en nuestro intervalo de frecuencias.

En cuanto a la distribución de corrientes de la antena que se va a utilizar en el proyecto, se ha simulado y se han obtenido los resultados que se muestran en la *Figura 3.4*. Estas distribuciones de corrientes nos ayudan a conocer el funcionamiento de la antena a diferentes frecuencias y también permite conocer mejor por donde radia más.

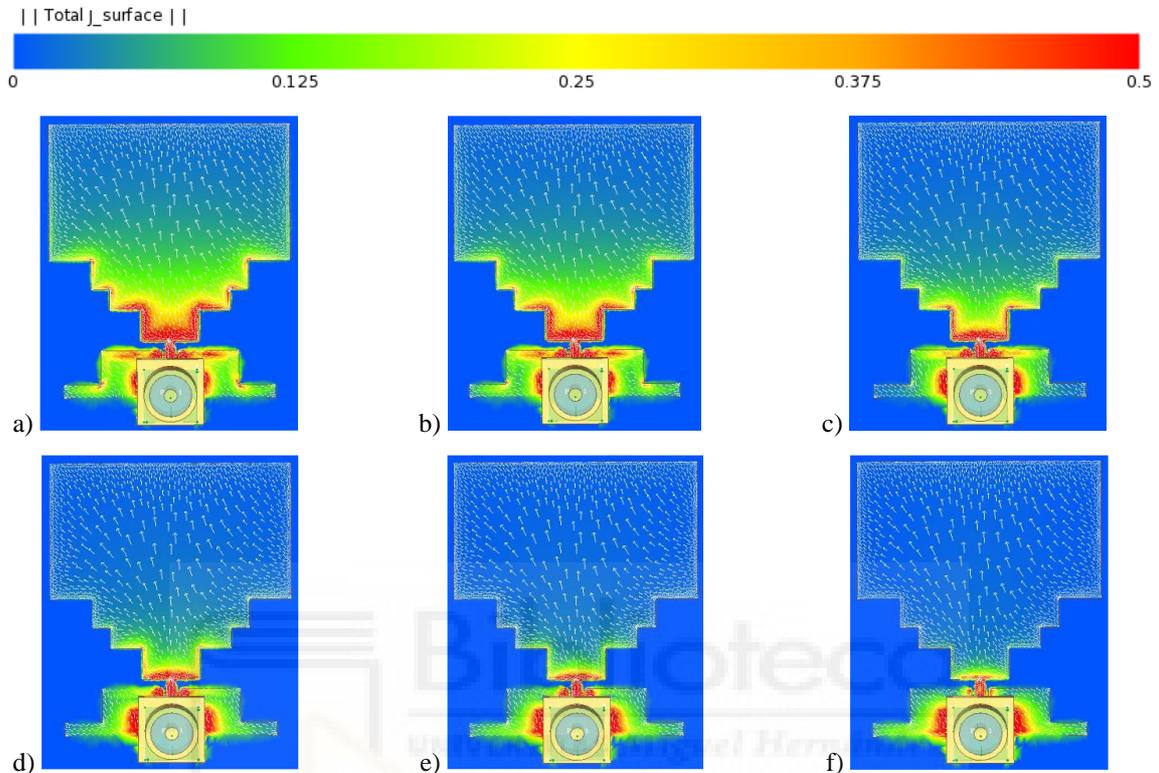


Figura 3.4. Distribuciones de corrientes. a) 3 GHz. b) 5 GHz. c) 10 GHz. d) 15 GHz. e) 20 GHz. f) 24.5 GHz.

Como se puede observar, a medida que la frecuencia aumenta, gran parte de radiación se concentra en el conector situado en la antena de banda ancha.

3.2. SIMULACIONES Y RESULTADOS CON UNA ANTENA

Una vez explicado el funcionamiento de la antena, se van a mostrar los resultados obtenidos cuando simulamos la antena con plancha metálica, cabe comentar que estas simulaciones se han realizado hasta los 6 GHz ya que como se ha comentado anteriormente, el VNA y el resto de los dispositivos de RF que se van a utilizar para realizar las medidas reales funciona hasta dicha frecuencia. El parámetro S_{11} queda de la siguiente forma:

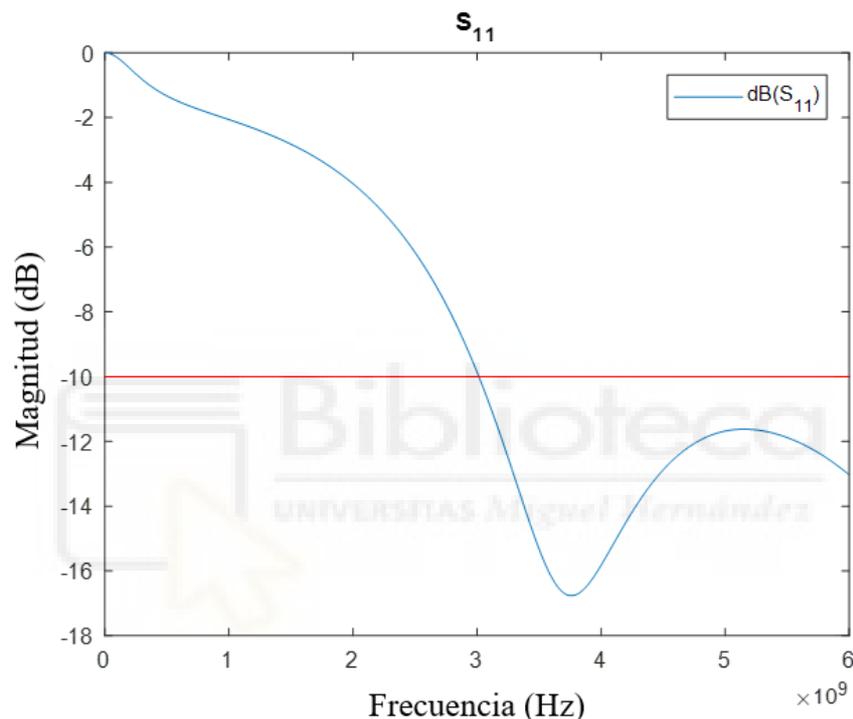


Figura 3.5. Parámetro S_{11} hasta los 6 GHz.

En este apartado se va a seguir el mismo procedimiento que se explicó en el [apartado 2.5](#) pero sin el procedimiento de realizar las medidas físicas, ya que utilizaremos el programa de EMPro para realizar estas simulaciones de medidas.

Lo primero, será colocar una plancha metálica a una cierta distancia como se puede ver en la *Figura 3.6a* y asignarle un material que sea similar al metal, en este caso, utilizaremos el conductor perfecto ya que para las medidas reales se ha utilizado una plancha metálica con características similares. Se ha escogido unas dimensiones para la plancha metálica de 7x7 cm, este tamaño se ha escogido debido a que se necesita una plancha que sea de mayor tamaño que la antena como en las medidas reales.

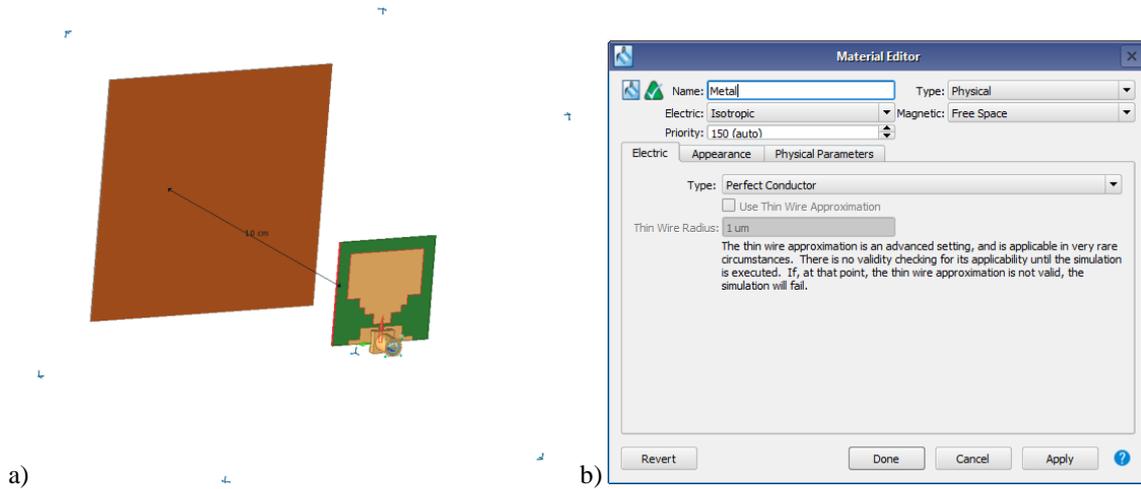


Figura 3.6. a) Posicionamiento de la plancha metálica. b) Asignación de material metálico.

Una vez creada la plancha metálica y asignado el material conductor, se procederá a configurar el intervalo y los pasos frecuenciales que se quieren simular. Al realizar la simulación con la plancha metálica colocada por ejemplo a 10 cm, se obtiene el siguiente parámetro S_{11} :

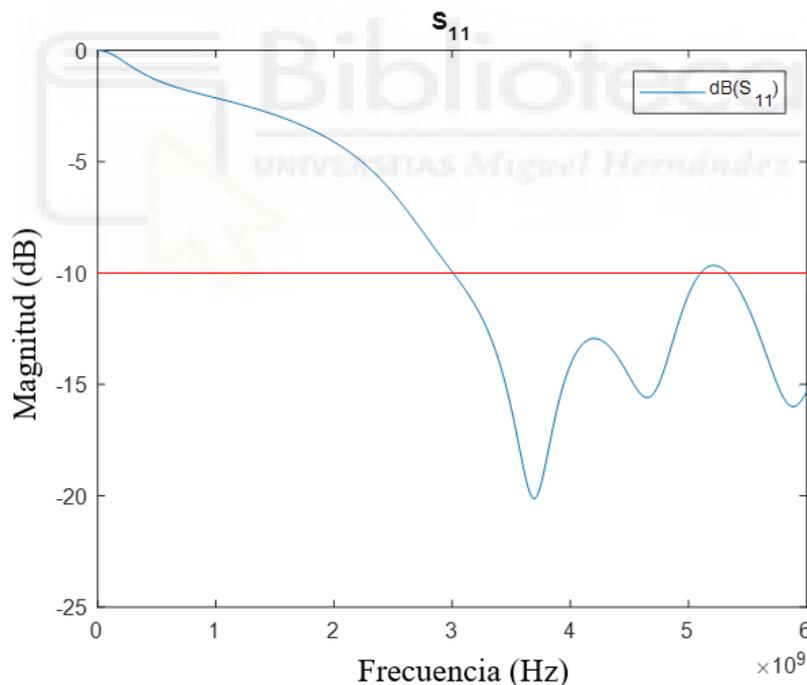


Figura 3.7. Parámetro S_{11} hasta los 6 GHz con plancha metálica.

Como se puede ver, se obtiene una señal con más oscilación con respecto a la que se vio sin la plancha metálica en la Figura 3.5, esto se debe al efecto de los rebotes de la señal en la plancha metálica respecto a la antena, si se quiere comparar ambas respuestas, se puede ver en la Figura 3.8.

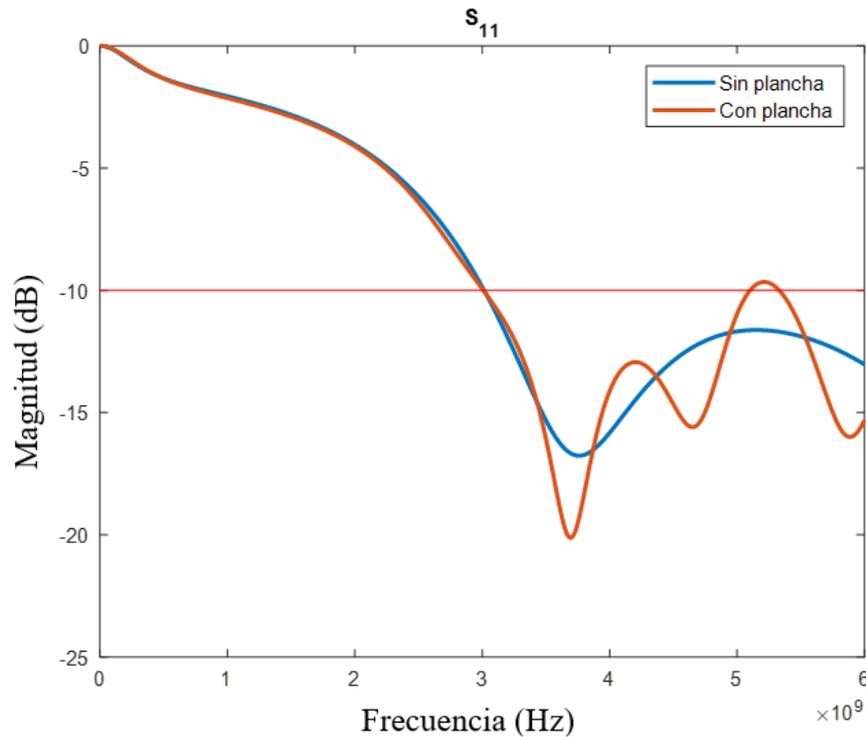


Figura 3.8. Parámetro S_{11} con y sin plancha metálica.

Una vez comentado todo esto, el objetivo que se quiere conseguir es colocar la plancha metálica a diferentes distancias para ver que somos capaces de detectar su posición y desplazamiento.

Las primeras simulaciones que se realizarán variando la plancha metálica son a 10 cm y 20 cm, para ver si podemos ser capaces de detectar cambios de posición de 10 cm. Se seguirá el mismo procedimiento que se explicó anteriormente, para conseguir las señales en función del tiempo se deberá aplicar la transformada inversa de Fourier y así se obtienen los siguientes resultados:

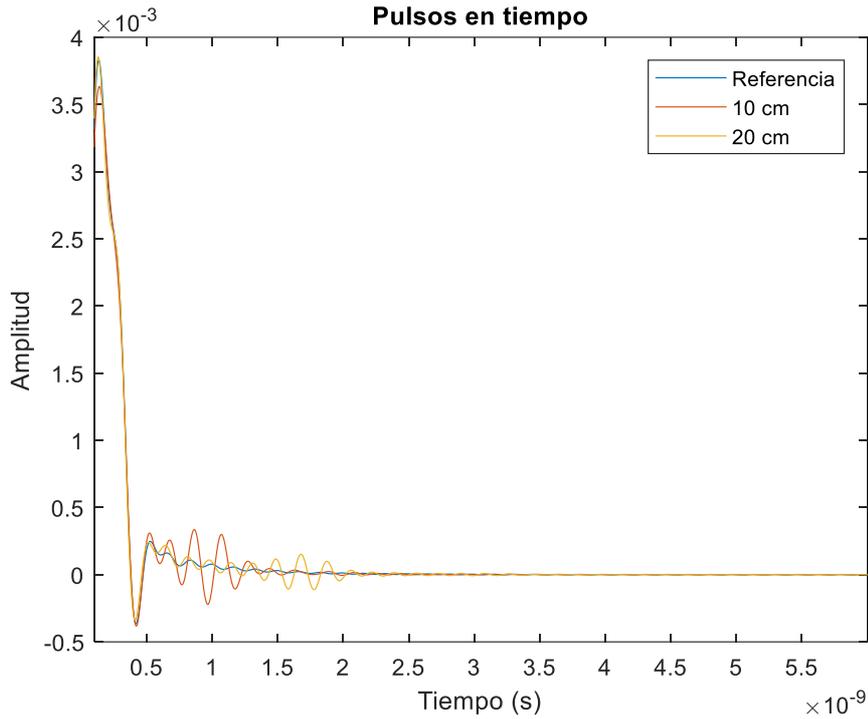


Figura 3.9. Resultado obtenido en función del tiempo para 10cm.

Como se puede ver en la *Figura 3.9*, hay dos señales separadas en tiempo, estas señales son las que detecta la antena una vez rebotada la señal en la plancha metálica, que si están en función de la distancia, se obtienen los siguientes resultados:

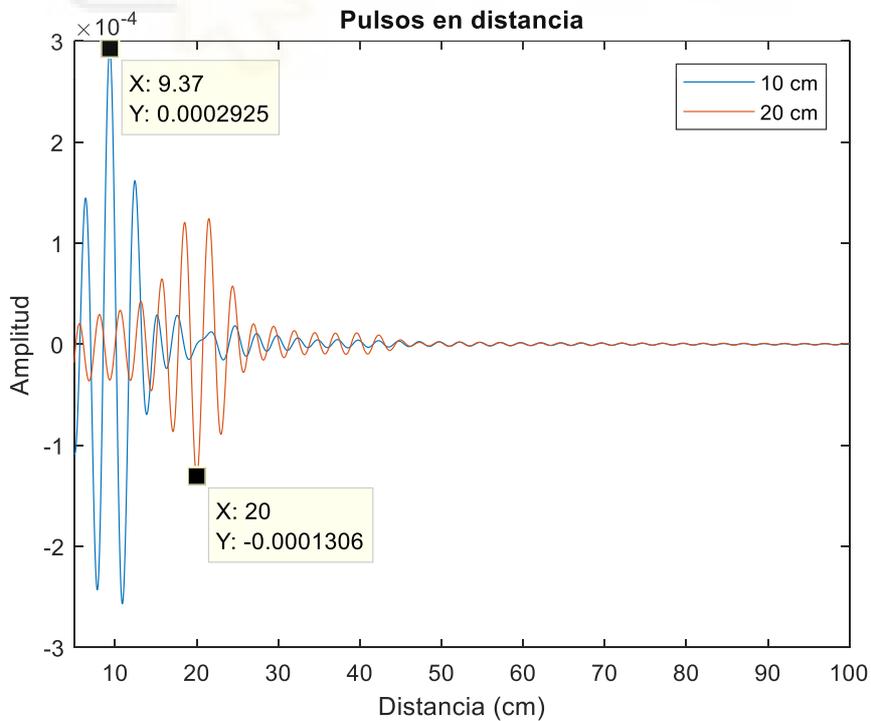


Figura 3.10. Resultado obtenido en función de la distancia para 10cm.

En el resultado que se puede apreciar en la *Figura 3.10* ya está realizada la resta para ajustar el eje de distancias para la señal de 20 cm, ya que más adelante queremos tener más precisión en esta medida debido a que se van a realizar medidas de 1 mm de diferencia a partir de esta señal. Como se puede ver también, las señales están separadas aproximadamente 10 cm como se esperaban en los análisis previos y en la gráfica, se han señalado los máximos de los picos de cada señal rebotada, este procedimiento lo utilizaremos para todas las medidas. En la *Figura 3.11* se puede ver cada señal por separado y con esto poder apreciar el pulso que recibe la antena independientemente para cada una de las diferentes distancias de la plancha metálica.

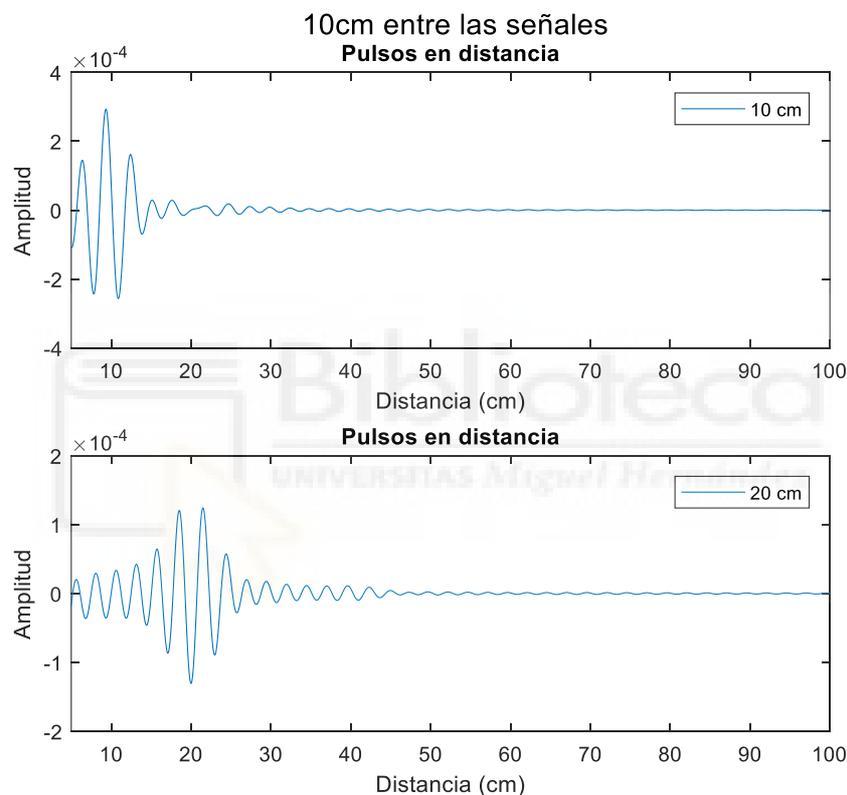


Figura 3.11. Señales que se obtienen en diferente posición.

Como se puede observar, seremos capaces de detectar una diferencia de 10 cm, pero esto, en las medidas realistas de apnea esta distancia es muy grande por lo que aproximaremos más las distancias y lo siguiente que se intentará será obtener diferencias de posición de 1 cm de diferencia. Antes de mostrar estos resultados, cabe comentar que se han realizado más medidas hasta finalmente llegar a la diferencia de 1 mm entre las señales rebotadas que se mostrarán al final de este apartado. Para calcular la diferencia de posición a 1 cm, se han realizado las medidas de 19.5 cm y 20.5 cm y se han obtenido los siguientes resultados en función del tiempo tras aplicar la transformada inversa de Fourier:

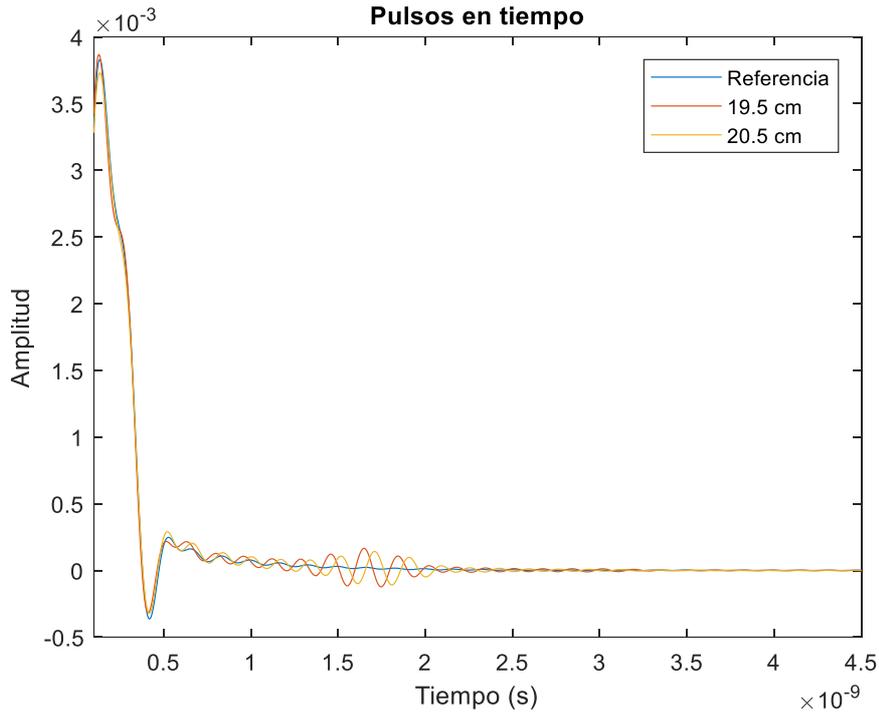


Figura 3.12. Resultado obtenido en función del tiempo para 1cm.

Como se puede observar en la *Figura 3.12*, las señales obtenidas entre el intervalo de 1.5ns a 2ns están más próximas que en la *Figura 3.9* que vimos anteriormente. Para este caso, como ya se ha ajustado el eje para las anteriores medidas, no hará falta volver a ajustarlo, entonces procederemos a pasarlo a función de la distancia:

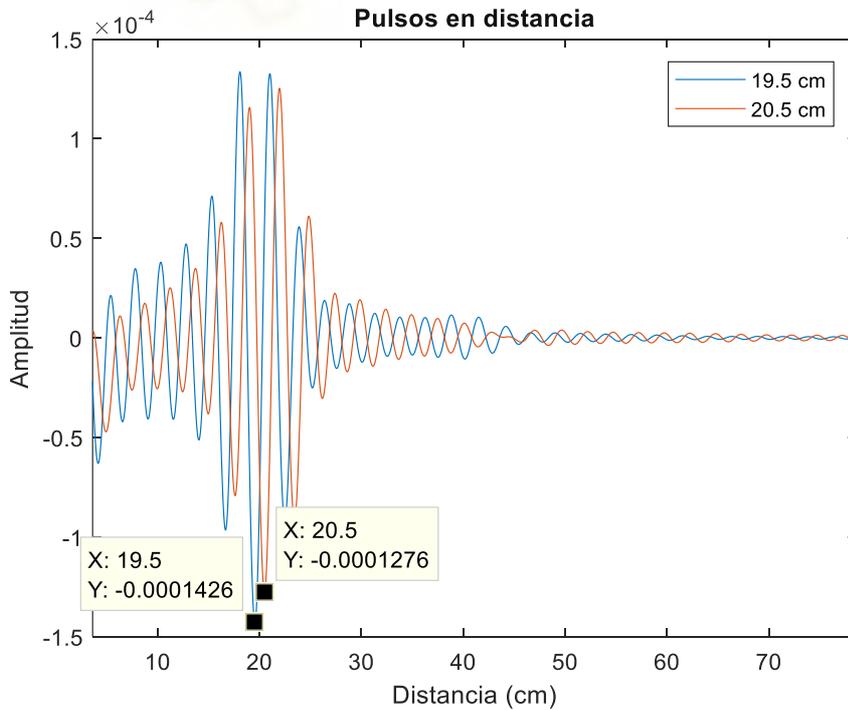


Figura 3.13. Resultado obtenido en función de la distancia para 1cm.

En la *Figura 3.13*, se puede observar mejor como las respuestas que obtenemos están separadas 1 cm entre ellas, por lo que se ha procedido a realizar unas medidas más realistas de nuestro sistema final para ver si podemos ser capaces de detectar diferencias de 1 mm entre las señales, para ello, se han realizado las medidas de 20.1 cm, 20.2 cm, 20.3 cm y 20.4 cm para ver si seremos capaces de detectar esta diferencia y en función del tiempo se obtienen los siguientes resultados:

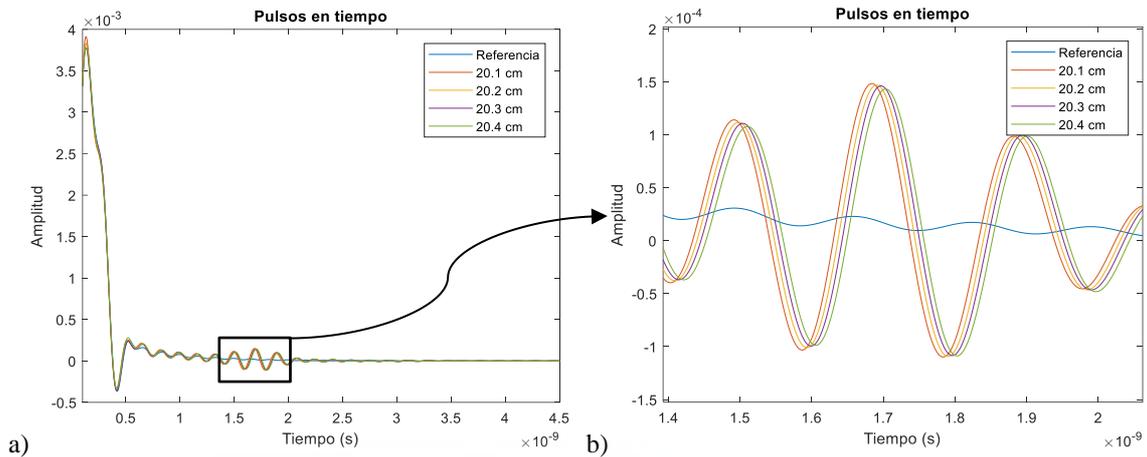


Figura 3.14. Resultado obtenido en función del tiempo para 1mm. a) Señal original. b) Señal ampliada.

En la *Figura 3.14a*, se puede ver la señal original, la cual se ha obtenido al simular las distancias ya comentadas, como la diferencia es muy pequeña se ha insertado otra gráfica (*Figura 3.14b*) donde se puede ver claramente cómo está cada señal desplazada y en el lugar correspondiente, es decir, la señal que primero rebota en la plancha metálica es la más cercana (20.1 cm), la segunda señal que rebota es la siguiente (20.2 cm) y así para las otras dos medidas.

Si se pasan a función de la distancia, se obtienen también señales muy aproximadas como se puede ver en la *Figura 3.15*.

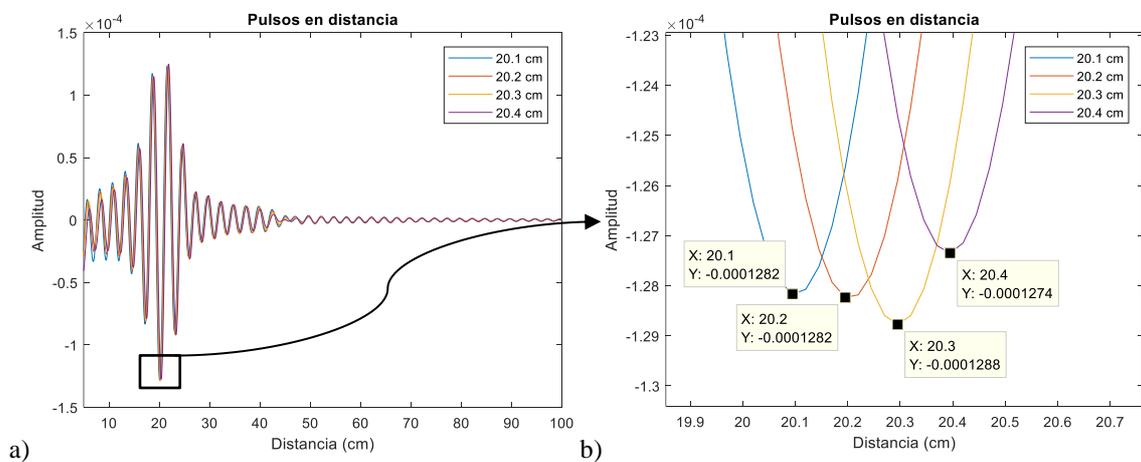


Figura 3.15. Resultado obtenido en función de la distancia para 1mm. a) Señal original. b) Señal ampliada.

Como se puede ver, obtenemos el resultado esperado y se pueden diferenciar las 4 señales que hemos simulado con diferencia de 1mm entre ellas.

Después de explicar todo este proceso, se ha llevado a cabo una nueva prueba que consiste en colocar un cubo entre la antena y la plancha metálica, esto se va a llevar a cabo por que vamos a introducir unos sensores entre estos objetos para poder apreciar la respuesta de la señal una vez sale de la antena y cuando llega a la plancha metálica ver cómo rebota. Tras unas simulaciones sin el cubo, se apreció que es necesario colocar este cubo entre los objetos como se puede ver en la *Figura 3.16a* ya que para colocar los sensores en el software de EMPro es necesario tener un volumen cerrado, el cual se le va a asignar un material que sea similar al aire para poder apreciar estos rebotes. A continuación, se puede observar cómo quedaría finalmente el cubo colocado entre la antena y la plancha.

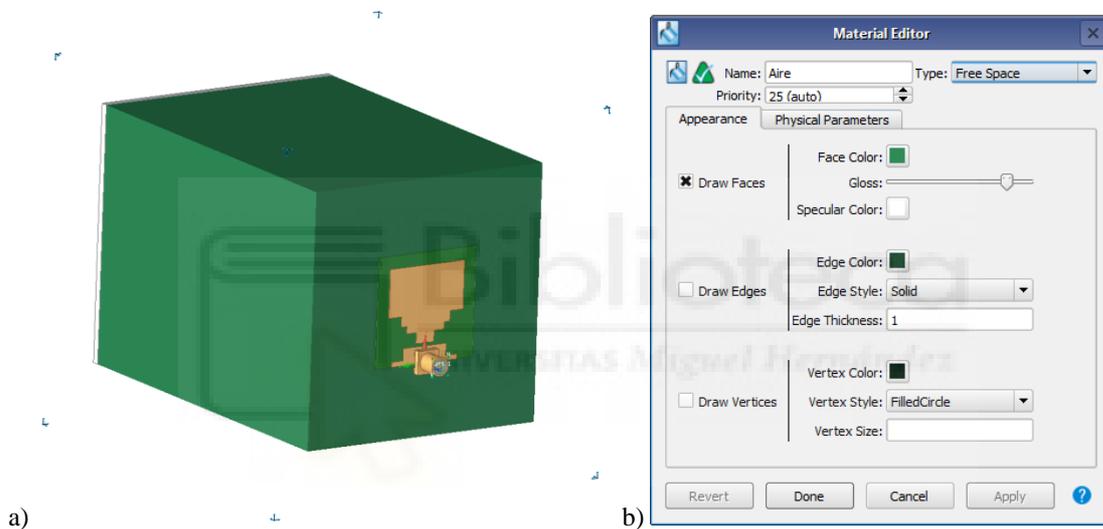


Figura 3.16. a) Posicionamiento del cubo de aire. b) Asignación de material.

Como se puede ver, en la *Figura 3.16b* el material del cubo se configura como “Free Space” esto es equivalente y tiene las mismas propiedades que el aire. En la *Figura 3.17*, se va a mostrar unos ejemplos sobre los resultados obtenidos a diferentes frecuencias.

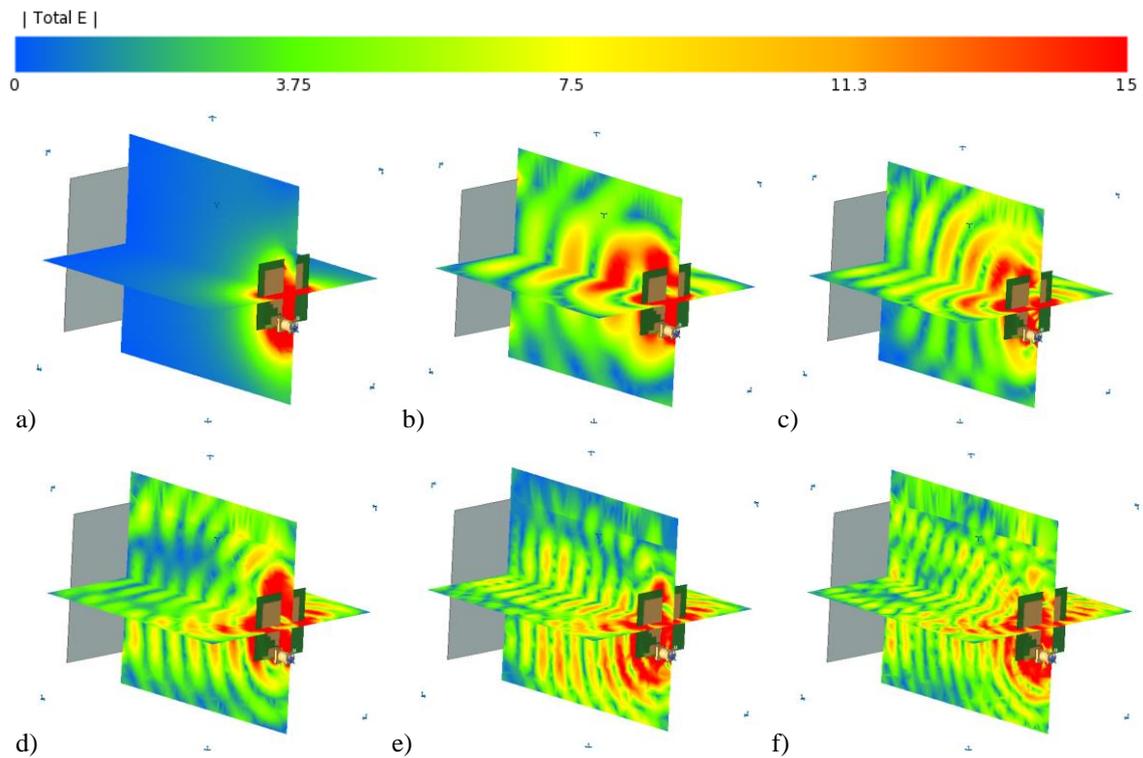


Figura 3.17. Distribuciones de corrientes. a) 1 GHz. b) 6 GHz. c) 9 GHz. d) 12 GHz. e) 15 GHz. f) 18 GHz.

Para este apartado se ha simulado todo el rango de frecuencias hasta los 25 GHz para que se pueda ver mejor el proceso de rebotes cuando la señal procedente de la antena rebota en la plancha metálica.

3.3. SIMULACIONES Y RESULTADOS CON CUATRO ANTENAS

En este apartado, se va a seguir el mismo procedimiento que se vio con anterioridad para una sola antena, en este caso, se van a realizar las simulaciones de la misma configuración que en nuestro sistema físico con cuatro antenas. De tal manera el sistema de simulación con cuatro antenas tiene la siguiente forma:

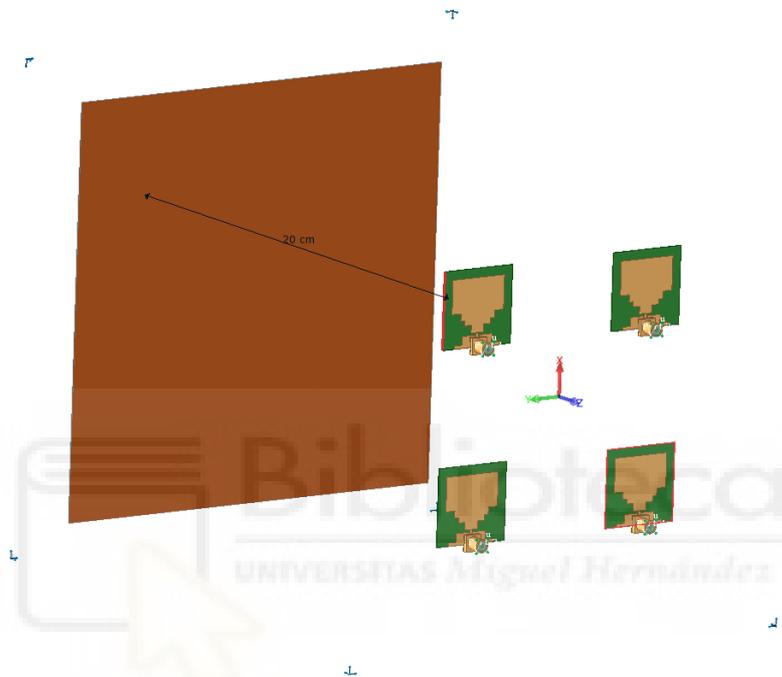


Figura 3.18. Posicionamiento de la plancha metálica y de las antenas.

Cabe comentar que la plancha metálica tiene las mismas propiedades que en el apartado anterior, lo único que se ha variado de esta es su tamaño, ya que la plancha metálica debe de ser lo suficientemente grande como para cubrir las cuatro antenas, en este caso, la plancha tiene un tamaño de 16x16 cm.

En cuanto al posicionamiento de las antenas, se han probado diferentes posiciones para que todas se queden a la misma distancia las unas a las otras y no interfieran las señales de unas con las otras, finalmente, todas las antenas están separadas entre sí unos 4.5 cm. Estas simulaciones al igual que las anteriores, se han realizado hasta los 6 GHz, quedando como se muestra en la *Figura 3.19* el parámetro S_{11} de las cuatro antenas.

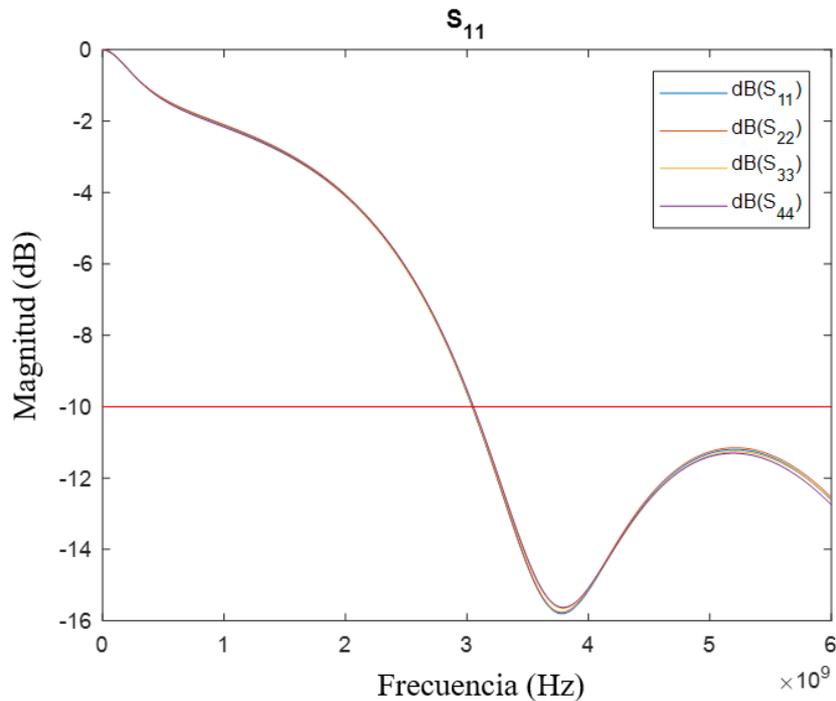


Figura 3.19. Parámetro S_{11} hasta los 6 GHz de las cuatro antenas.

Como se puede apreciar en la *Figura 3.19*, las 4 respuestas de las señales del parámetro S_{11} son muy aproximadas.

Una vez mostrado y comentado todo esto, nuestro objetivo es el mismo que en el apartado anterior, poder detectar la diferencia de posición de la plancha metálica, para ello, se han llevado a cabo diferentes simulaciones. Las primeras simulaciones que se han realizado han sido variando la plancha metálica de posición unos 10 cm, se han llevado a cabo las dos mismas medidas que en el apartado anterior, a 10 cm y a 20 cm de distancia respecto a la antena, debemos tener en cuenta de que ahora disponemos de cuatro antenas, por lo que se mostrarán las figuras para las cuatro.

En función del tiempo, una vez se ha aplicado todo el procesado de la señal y realizado la transformada inversa de Fourier, se obtienen los siguientes resultados:

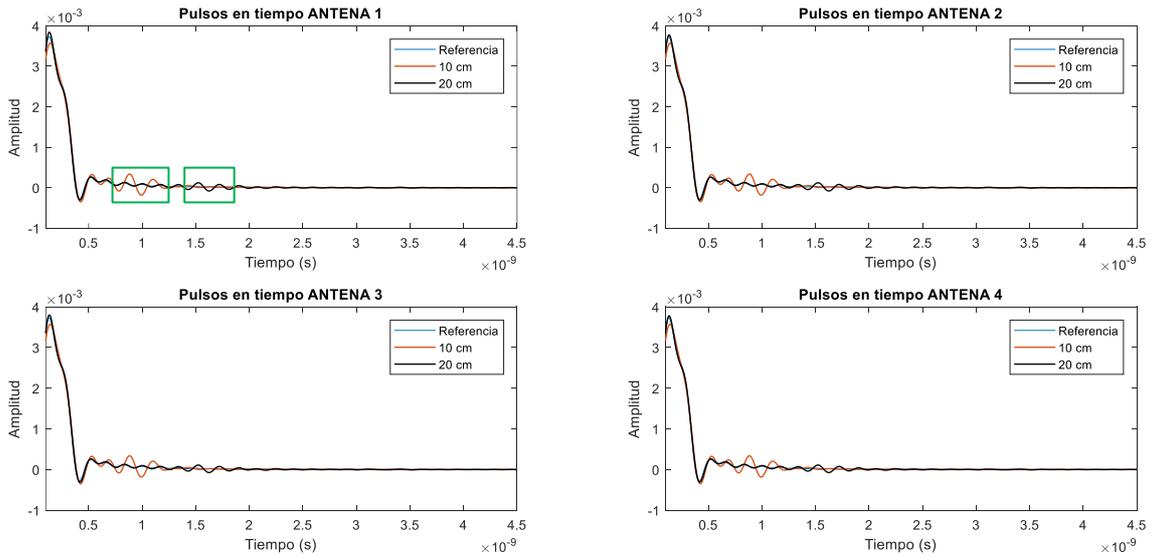


Figura 3.20. Resultado obtenido para las 4 antenas en función del tiempo para 10cm.

Como se puede ver en la *Figura 3.20*, hay dos señales distantes en tiempo (mostradas en la antena 1 con dos recuadros en verde) estas, son el resultado del rebote que se produce en la plancha metálica que finalmente llegan a las cuatro antenas y como se puede observar, tiene una respuesta muy parecida entre ellas. Cabe comentar que este resultado es la representación de las señales medidas de cada antena respecto a sus señales de referencia para cada una de ellas. Si estas dos medidas las pasamos al dominio de la distancia, se obtienen los siguientes resultados:

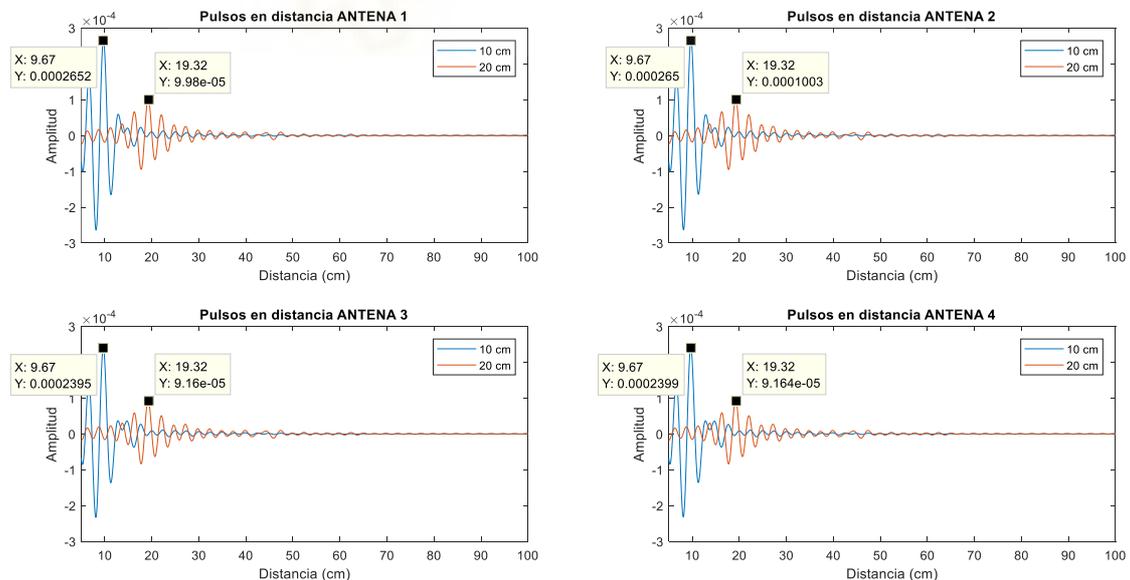


Figura 3.21. Resultado obtenido para las 4 antenas en función de la distancia para 10cm.

Como se puede observar en la *Figura 3.21*, se ha ajustado el eje de señales para un valor central y que las ambas señales estén cerca de su origen. También se puede decir que las señales están separadas aproximadamente 10 cm por lo que podemos ser capaces de

detectar variaciones de posición de la plancha en distancias grandes. En esta figura se han señalado los máximos de los picos de ambas señales rebotadas. También hay que comentar que para todas las antenas obtenemos respuestas muy parecidas, ya que si nos fijamos en el eje Y de los máximos que se han señalado salen valores aproximados para todas las antenas.

Como se mostró en el apartado anterior para el primer caso, se añadirá una figura donde se puede apreciar que es la misma señal pero desplazada en distancia para la antena 1 como se puede ver en la *Figura 3.22*.

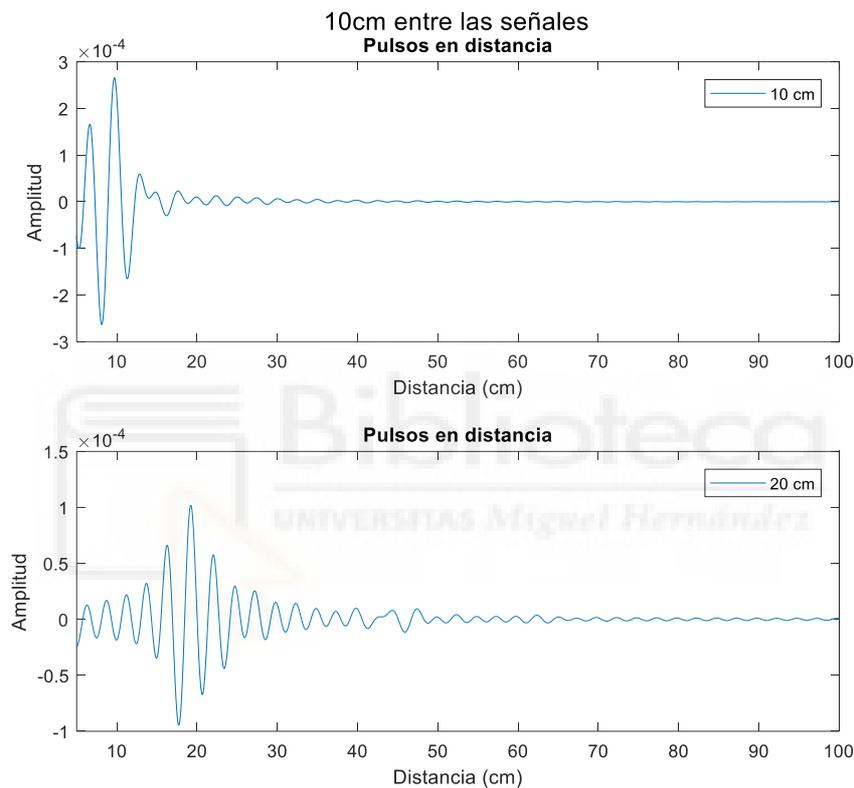


Figura 3.22. Señales que se obtienen en diferente posición.

A continuación, se mostrarán las medidas realizadas para intentar ser capaces de diferenciar variaciones de posiciones de 1 cm de diferencia, en este apartado también se han realizado más medidas hasta llegar a esta.

Para calcular esta diferencia de 1 cm, se han llevado a cabo dos medidas, una a 19 cm y otra a 20 cm, obtenido los siguientes resultados en función del tiempo tras aplicar la transformada inversa de Fourier:

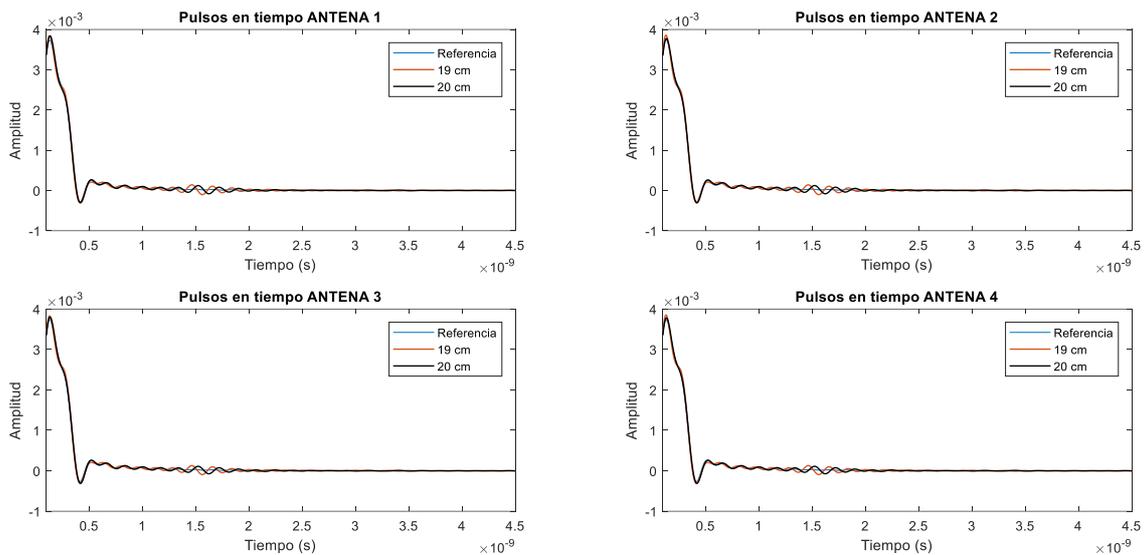


Figura 3.23. Resultado obtenido para las 4 antenas en función del tiempo para 1cm.

Como se puede observar en la *Figura 3.23*, las señales que se han obtenido entre el intervalo de 1.35ns a 1.85ns aproximadamente están más próximas que las que vimos en la *Figura 3.20* ya que hay una menor diferencia y era de esperar a la hora de realizar la simulación. Para este caso, no hará falta ajustar el eje de distancias como se vio en el [apartado 3.2](#) y partiremos del ajuste que hicimos para la anterior medida a 10 cm. Al pasarlo a función de la distancia, queda de la siguiente forma:

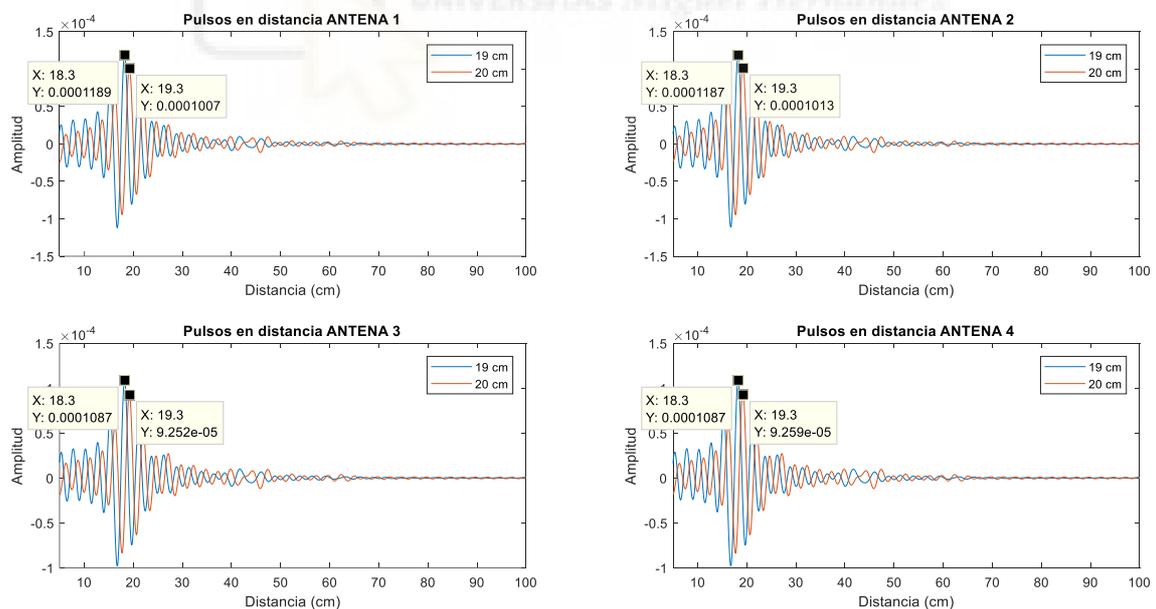


Figura 3.24. Resultado obtenido para las 4 antenas en función de la distancia para 1cm.

Como se puede apreciar, las señales tienen un cierto error como se ha comentado anteriormente debido a la simulación, pero se puede apreciar claramente como ambas señales están separadas a 1 cm de diferencia que era el resultado que esperábamos.

A continuación, para hacer unas medidas más realistas como hicimos en el apartado anterior, se intentará detectar la diferencia de distancias a 1 mm, para ello, se han llevado a cabo las siguientes medidas: 19.7 cm, 19.8 cm, 19.9 cm y 20cm. Estas medidas las mostraremos para la antena 1 ya que hay muy poca diferencia entre las señales y así se pueden apreciar mejor, pero se han comprobado para las otras 3 antenas y salen muy similar a estos resultados. En función del tiempo, se obtienen los siguientes resultados:

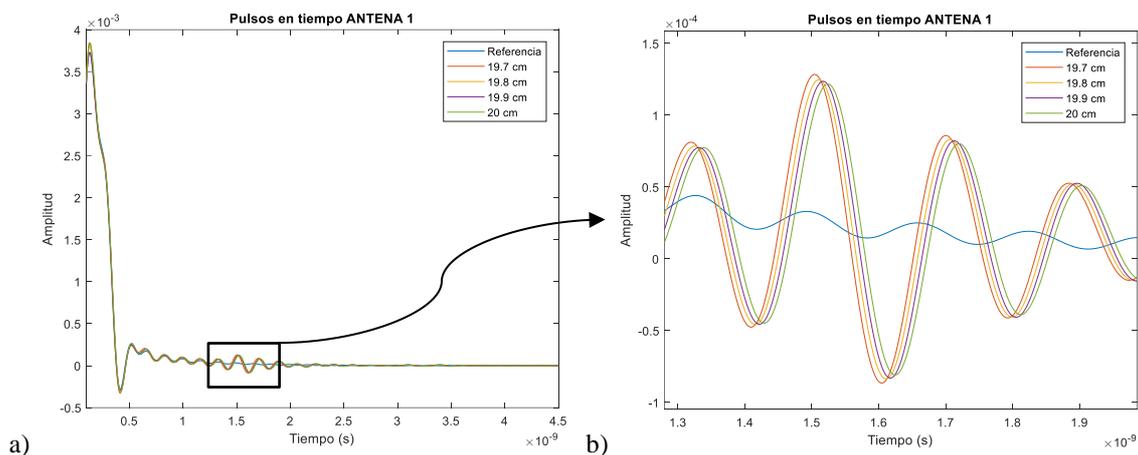


Figura 3.25. Resultado obtenido para las 4 antenas en función del tiempo para 1mm. a) Señal original. b) Señal ampliada

Como se puede apreciar en la Figura 3.25a, se muestra la señal original, la cual se ha obtenido al simular las distancias ya comentadas anteriormente, como la diferencia de estas señales es muy pequeña se ha insertado otra gráfica ampliada (Figura 3.25b) donde se puede ver claramente cómo está cada señal desplazada.

Si estos resultados se pasan a función de la distancia, se obtienen también señales muy aproximadas como se puede ver en la Figura 3.26.

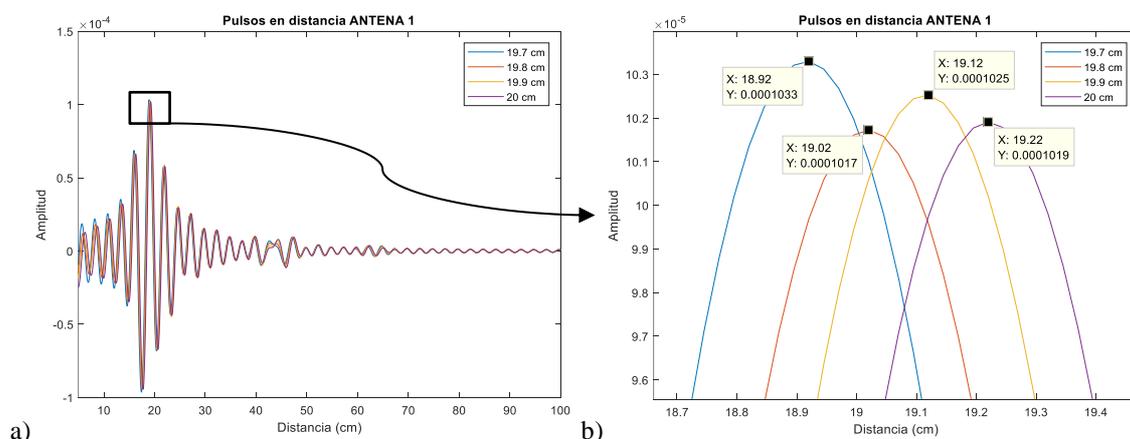


Figura 3.26. Resultado obtenido para las 4 antenas en función de la distancia para 1mm. a) Señal original. b) Señal ampliada

Como se puede observar en la *Figura 3.26b*, se han escogido los máximos de las señales donde se puede distinguir las diferencias entre las señales a 1 mm, pero al tener ajustado el eje de distancias como en la primera medida que realizamos para señales con una diferencia de 10 cm, hay un cierto error en la posición de las señales pero se puede apreciar claramente como la diferencias entre ellas es la esperada.



4. MEDIDAS EN EL SISTEMA FÍSICO

En este último apartado, se va a explicar el procedimiento que se ha seguido para la realización de este proyecto. Primero, se hará una descripción del sistema físico general en el cual, se irán explicando cada una de las partes físicas de nuestro sistema final. Seguidamente, se explicará el software que se ha implementado tanto como para el funcionamiento del Arduino y Python como para después realizar un procesado de las medidas que se realicen con el programa de MATLAB visto anteriormente. Este último programa tiene una programación más avanzada ya que nuestro sistema físico dispone de 4 antenas por lo que hay que realizar más operaciones. Y finalmente se mostrarán los resultados obtenidos una vez procesado las medidas realizadas, con diferentes tipos de materiales.

4.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA IMPLEMENTADO

En este apartado, se va a describir nuestro sistema físico mostrado en la *Figura 4.1*. Además, se va a adjuntar un esquema para ver el proceso de conexionado de cada una de las partes que lo componen. Todo esto se podrá apreciar en la *Figura 4.2*.

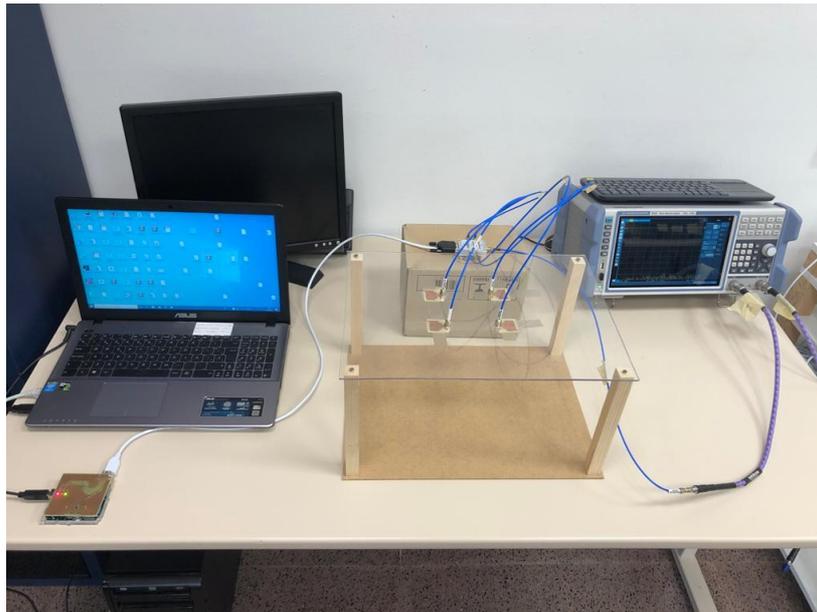


Figura 4.1. Sistema físico final.

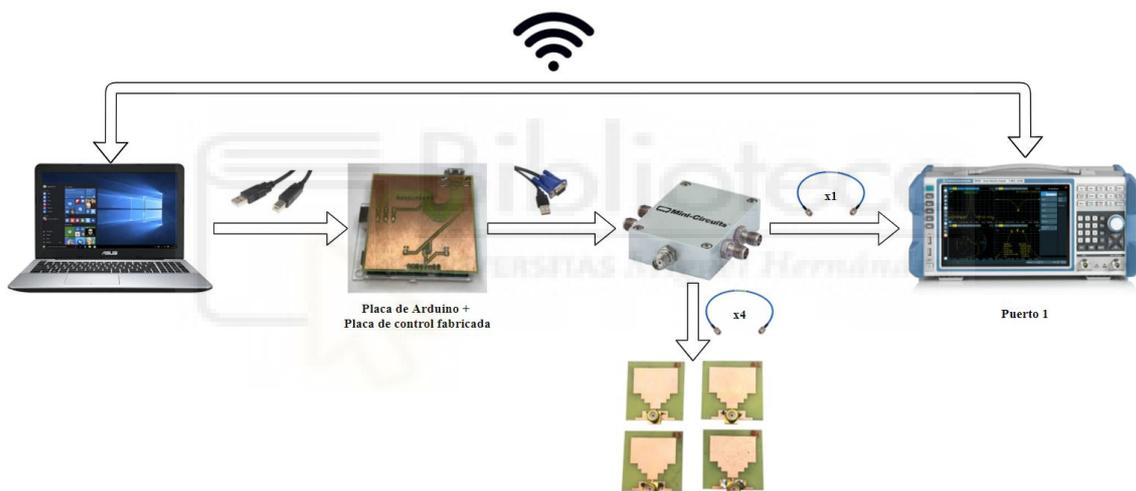


Figura 4.2. Esquema del conexionado final.

Una vez mostrado el esquema del conexionado final, se explicarán como se han conectado cada una de sus partes. Primero, a través del ordenador portátil y mediante una conexión WIFI preestablecida con el VNA mediante su dirección IP, nos permitirá obtener los resultados con ayuda del programa ya cargado de Python y también, a través del ordenador mediante una conexión USB para no requerir de una fuente de alimentación externa, alimentaremos el Arduino que está conectado por su parte superior a nuestra PCB diseñada de control mediante unas tiras de pines (más adelante se comentará el diseño de este proceso). Esta PCB ha sido diseñada para que, mediante tensiones de control que se generan en los pines del Arduino, se pueda controlar las antenas de forma automatizada mediante el conmutador de alta frecuencia (Arduino debe tener programado y cargado el

programa de Arduino que se mostrará en el [apartado 4.3](#) de este proyecto). Una vez realizada esta conexión, se procederá a conectar la PCB de control a la parte posterior del conmutador de alta frecuencia mediante un cable fabricado en el laboratorio cuyos extremos son USB y DB9³ (más adelante se procederá a explicar su proceso de fabricación). El conmutador de alta frecuencia a su vez está conectado a las cuatro antenas mediante sus cuatro puertos laterales que se pueden apreciar en el esquema con ayuda de cuatro cables coaxiales de alta frecuencia. Por último, se procederá a conectar mediante otro cable coaxial de alta frecuencia, el puerto común del conmutador ‘RF Com’⁴ con el puerto 1 del analizador de redes vectoriales (VNA).

4.2. HARDWARE

En este apartado se van a describir cada uno de los materiales que se han utilizado a lo largo del proyecto vistos en el esquema de la *Figura 4.2*, ya sea desde su proceso de fabricación si lo tuvieran hasta el proceso de realización de las medidas y posteriormente el procesado de estas.

4.2.1. CONEXIÓN MEDIANTE EL VNA

El Analizador de Redes Vectoriales (VNA) que se va a utilizar en este proyecto es el modelo ZNL6 de la empresa Rohde&Schwarz mostrado en la *Figura 4.3*.



Figura 4.3. Analizador de redes vectoriales [26].

Como se puede apreciar, este analizador de redes vectoriales trabaja en el rango de

³ Este tipo de conector pertenece a la familia de conectores D-Sub el cual está compuesto por 9 pines.

⁴ La entrada del conmutador ‘RF Com’ se puede ver en el esquemático de la *Figura 2.7* que se ha obtenido del datasheet del conmutador que se encuentra en el anexo III de este proyecto.

frecuencias desde 1 MHz hasta 6 GHz y está formado por una pantalla táctil, dos puertos para introducir el USB, dos puertos coaxiales para realizar mediciones bidireccionales además, dispone de una conexión a Internet mediante la cual, nos va a permitir comunicarnos y enviar los datos al ordenador. También dispone de diversas funciones como son especificar el ancho de banda, el rango de frecuencia de trabajo, número de puntos, etcétera. Estos equipos son fáciles de usar y tienen un buen rendimiento por lo que las mediciones que se realizan son rápidas y fiables, además, utiliza el sistema operativo de Windows 10. Este analizador de redes vectoriales se encarga de medir los parámetros S que se vieron y explicaron en el [apartado 2.1.2](#), en nuestro caso nos centraremos en medir el parámetro de reflexión S_{11} por lo que solo utilizaremos el puerto 1 de los dos que tenemos disponibles. Otra de sus características más importantes es que permite una conexión LAN⁵, lo cual permitirá poder establecer una conexión a nuestro ordenador mediante la dirección IP para así, poder recibir y transferir comandos de operación al analizador de redes.

Antes de realizar cada medida, se debe calibrar el sistema, para ello, se dispone de un kit de calibración cuyo modelo es el ZV-Z135 de la empresa Rohde&Schwarz como el que se muestra en la *Figura 4.4*.



Figura 4.4. Kit de calibración del VNA [27].

Este kit de calibración se utiliza para poder corregir ciertos efectos que se producen en el equipo, cables, conectores, etcétera para así obtener unas medidas más precisas. Se pueden realizar multitud de calibraciones, las cuales el analizador de redes nos permite guardarlas y establecerles el nombre que se requiera para que si alguna vez se requiere utilizar la misma calibración, solo tener que buscarla y seleccionarla. Esto nos ayudará a la hora de realizar una calibración para cada una de nuestras 4 antenas para así, eliminar las reflexiones no deseadas.

⁵ Conexión de red de área local.

En cuanto a la conexión del VNA se va a llevar a cabo de dos formas, mediante cables de alta frecuencia que es como vamos a comunicar el VNA con el conmutador de alta frecuencia y mediante la conexión LAN al ordenador como se ha comentado anteriormente. En esta última conexión se establece mediante el software de Python, en el que se debe introducir las librerías necesarias y la dirección IP del analizador de redes como se puede ver en el siguiente fragmento de código.

```
#Importamos estas librerías
from rohdeschwarz import *
from rohdeschwarz.instruments.vna import *

#VNA es el analizador de redes que se va a utilizar para medir
las antenas
vna = Vna()

vna.open('TCPIP', '10.1.8.55') #Debemos mirar la dirección
cada vez que conectemos el equipo
```

Con esto conseguiremos conectarnos mediante una conexión LAN al analizador de redes desde nuestro ordenador, el siguiente paso sería enviarle instrucciones desde el software de Python para así, conseguir establecer las medidas de todas las antenas automáticamente. Estas librerías se han obtenido de la plataforma denominada GitHub [28] en la cual hay diversos ejemplos sobre como comunicarse mediante el VNA con nuestro ordenador, para utilizar estos ejemplos, serán necesarias instalar las librerías pathlib y pyvisa.

4.2.2. CONMUTADOR DE ALTA FRECUENCIA

El conmutador de RF que se va a utilizar en este proyecto es el modelo ZSWA4-63DR+ de la empresa Mini-Circuits mostrado en la *Figura 4.5*.



Figura 4.5. Conmutador de RF [29].

Este conmutador de alta frecuencia nos va a permitir medir las diferentes antenas de las que disponemos, eligiendo un canal u otro a través de las instrucciones que se generen en el ordenador con el programa de Python. Este dispositivo está adaptado a impedancias de 50Ω , trabaja en un rango de frecuencias desde 1 MHz hasta los 6 GHz y funciona con una tensión de alimentación entre 2.3 V y 3.6 V, teniendo un coste unitario de 169.95 €. Este conmutador de alta frecuencia está compuesto por un puerto de entrada con el que lo conectaremos al VNA mediante el conector SMA hembra, 4 puertos también del tipo SMA hembra los cuales estarán conectados a las 4 antenas y un conector tipo DB9 que está disponible en la parte trasera de este dispositivo, cuyo proceso de fabricación se explicará en el [apartado 4.2.5](#). Este último cable irá conectado también a la PCB de control que se ha diseñado.

Para elegir este conmutador, nos hemos basado en el voltaje máximo y mínimo, la alimentación a la que hay que conectarlo, el rango de frecuencias de trabajo y en el aislamiento entre los distintos puertos. Este último parámetro es muy importante ya que no debe haber ningún fallo a la hora de seleccionar un canal u otro ya que con esto vamos a elegir la antena que se requiere medir en cada momento. Además, se ha elegido este conmutador porque en el laboratorio de alta frecuencia ya se ha utilizado y se tenía experiencia sobre este, como es en el caso del Trabajo Fin de Máster que realizó Carolina Blanco Angulo con título “Sistema no invasivo basado en microondas para la medida de distancias en material biológico. Aplicación en la detección de brain-shift y de tumores en cáncer de mama”, este proyecto fue presentado en marzo de 2020.

Una vez comentado esto y aunque el fabricante nos proporcione las gráficas con las pérdidas y aislamiento entre los puertos, hemos procedido a comprobarlo mediante el VNA y con ayuda de los cables de alta frecuencia antes de colocarlo en el sistema final para ver si el conmutador está en buen estado y presenta lo que nos proporciona el fabricante. Antes de mostrar los resultados, cabe comentar que los parámetros S_{21} y S_{12} son las pérdidas de transmisión producidas por ambos puertos y los parámetros S_{11} y S_{22} es la reflexión que se producen en estos puertos. Para mostrar estos resultados, hemos exportado los archivos $.S2P^6$ al software de ADS y hemos obtenido los siguientes resultados.

⁶ Este término es utilizado cuando utilizamos 2 puertos para la medida en el VNA, en este caso el puerto 1 del VNA estará conectado al puerto común del conmutador y el puerto 2 del VNA estará conectado a uno de los cuatro posibles puertos del conmutador que se utilice para medir una de las antenas.

- Para el *puerto 1* del conmutador, se han obtenido los siguientes resultados:

Los parámetros S11 y S22 son las reflexiones que se producen en el puerto 1 y en el común.
 Los parámetros S21 y S12 son las pérdidas de transmisión que se producen entre el puerto 1 y el común.

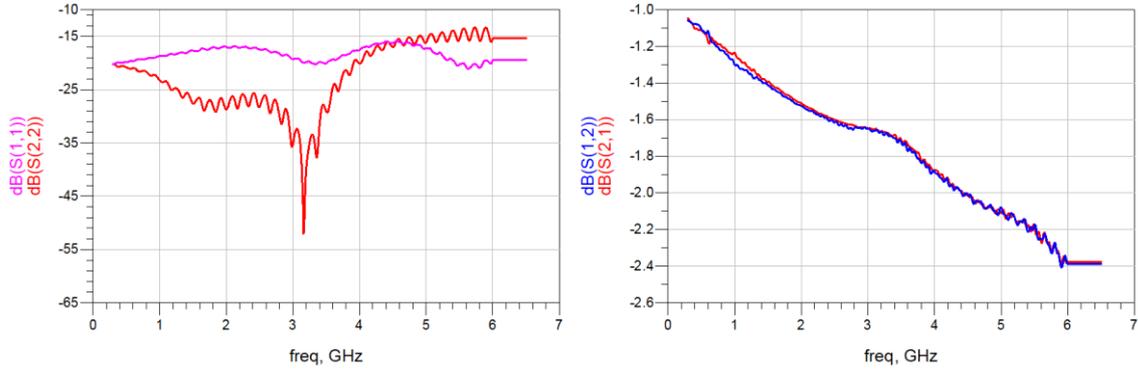


Figura 4.6. Parámetros del conmutador para el puerto 1.

- Para el *puerto 2* del conmutador, se han obtenido los siguientes resultados:

Los parámetros S11 y S22 son las reflexiones que se producen en el puerto 2 y en el común.
 Los parámetros S21 y S12 son las pérdidas de transmisión que se producen entre el puerto 2 y el común.

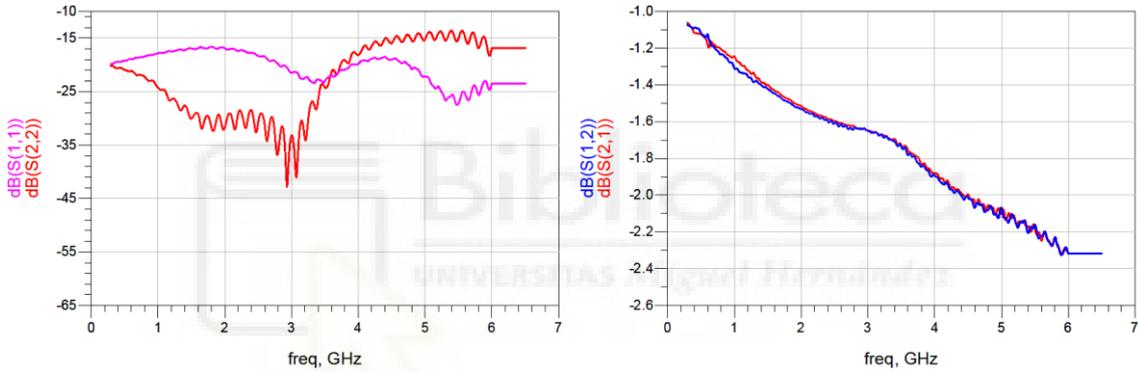


Figura 4.7. Parámetros del conmutador para el puerto 2.

- Para el *puerto 3* del conmutador, se han obtenido los siguientes resultados:

Los parámetros S11 y S22 son las reflexiones que se producen en el puerto 3 y en el común.
 Los parámetros S21 y S12 son las pérdidas de transmisión que se producen entre el puerto 3 y el común.

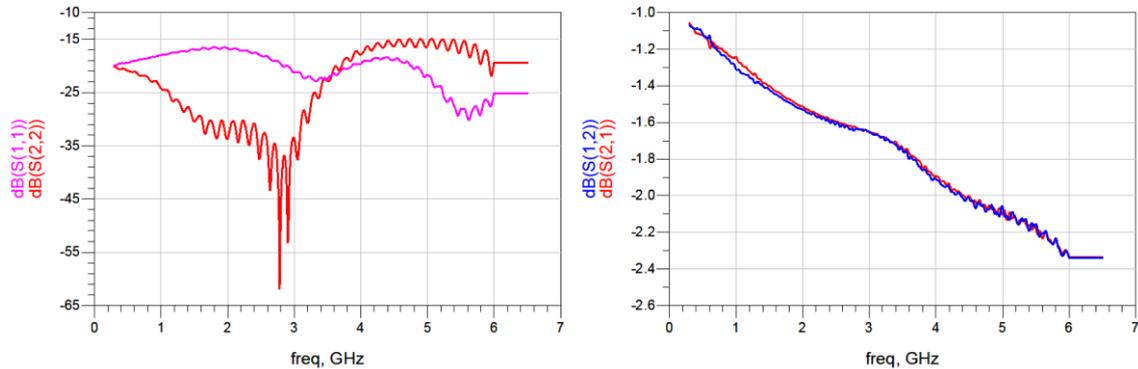


Figura 4.8. Parámetros del conmutador para el puerto 3.

- Para el *puerto 4* del conmutador, se han obtenido los siguientes resultados:

Los parámetros S_{11} y S_{22} son las reflexiones que se producen en el puerto 4 y en el común.
 Los parámetros S_{21} y S_{12} son las pérdidas de transmisión que se producen entre el puerto 4 y el común.

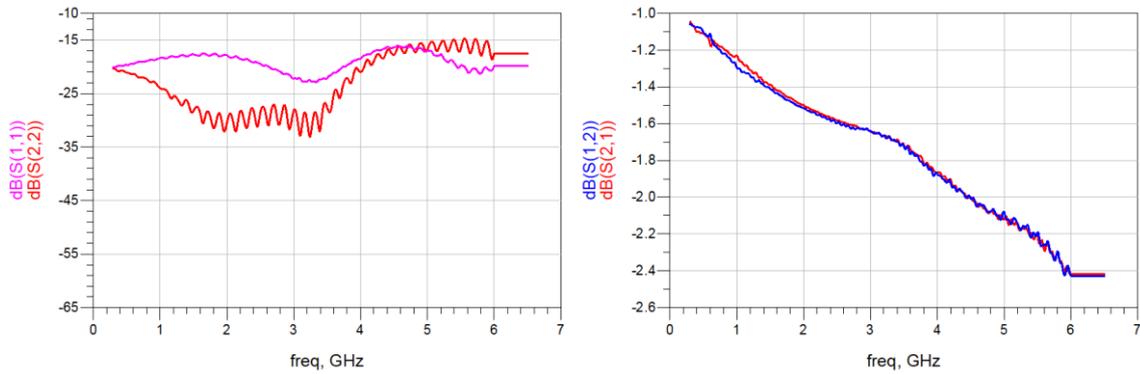


Figura 4.9. Parámetros del conmutador para el puerto 4.

Para poder comparar mejor unos parámetros con otros y ver que son similares a los que el fabricante nos proporciona en su hoja de datos, se mostrará en la *Figura 4.10* cada uno de los parámetros por separados.

La línea en rojo corresponde al puerto 1.
 La línea en azul corresponde al puerto 2.
 La línea en rosa corresponde al puerto 3.
 La línea en azul claro corresponde al puerto 4.

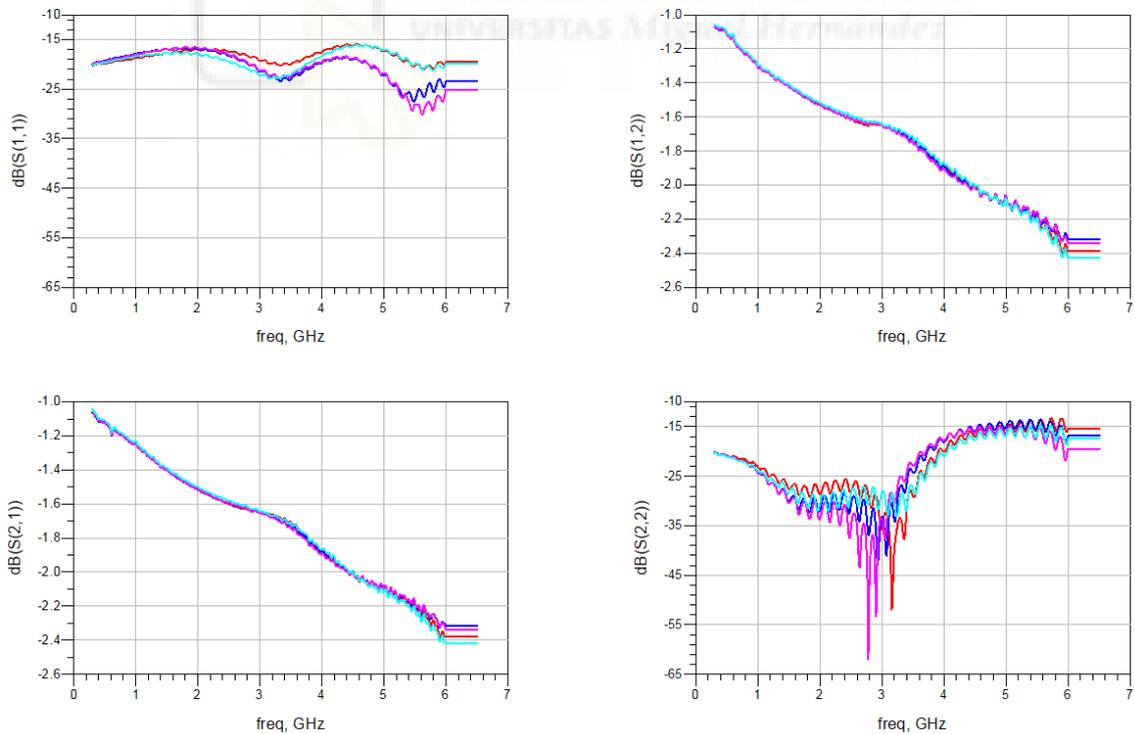


Figura 4.10. Parámetros del conmutador.

Como se puede ver, todos los parámetros son similares entre ellos y si nos vamos y comparamos los valores que nos proporciona el fabricante en sus tablas de especificaciones, cumplen todos los puertos los valores que se nos facilitan. Por ejemplo, para los parámetros cuya reflexión se origina en los puertos respectivamente, como son el S_{11} y S_{22} , el rango de funcionamiento del primero está entre -16 dB y -30 dB y el rango de funcionamiento del segundo está entre -8 dB y -62 dB aproximadamente. Y para el parámetro de pérdidas de transmisión como es el S_{21} , se puede apreciar que estas pérdidas están entre -1 dB y -2.4 dB aproximadamente y si nos fijamos en la hoja de datos que nos proporciona el fabricante, tenemos valores aproximados.

Una vez mostrado esto, se pasará a comentar cómo se conectan al VNA cada una de las cuatro antenas para su posterior medida. Esto se realizará mediante tres tensiones de control que tiene el conmutador además de la tensión de alimentación. Estas tensiones de control vienen dadas por una tabla de verdad que nos proporciona el fabricante en su hoja de datos como se puede ver en la *Tabla 4.1*.

State	V3	V2	V1	RF COM-RF1	RF COM-RF2	RF COM-RF3	RF COM-RF4
1	Low	Low	Low	OFF	OFF	OFF	ON
2	Low	Low	High	ON	OFF	OFF	OFF
3	Low	High	Low	OFF	ON	OFF	OFF
4	Low	High	High	OFF	OFF	ON	OFF
5	High	Low	Low	OFF	OFF	OFF	ON
6	High	Low	High	All Off (disconnected state)			
7	High	High	Low	All Off (disconnected state)			
8	High	High	High	Unsupported			

Tabla 4.1. Tabla de verdad [16].

Las tensiones de control V1, V2 y V3 que se han escogido para la programación en Arduino están marcadas mediante un recuadro en naranja, estas tensiones están gobernadas por los pines digitales del Arduino y controladas por la PCB diseñada, es decir, cuando se requiera una tensión alta (High) en el conmutador, la PCB de control sacará 3.3V y cuando se requiera una tensión baja (Low) en el conmutador, la PCB de control sacará 0V. En el [apartado 4.3](#) se explicará cómo se ha subido esta tabla al programa de Arduino.

Para poder conectar el Arduino y la placa de control con el conmutador, será necesario un cable cuyos extremos sean USB y D-Sub 9 pines, se verá su proceso de fabricación en el [apartado 4.2.5](#).

4.2.3. ANTENAS

Las antenas de banda ancha que se van a utilizar para este proyecto han sido fabricadas e impresas en el “Laboratorio de Tecnología Electrónica 1” del edificio Arenals de la Universidad Miguel Hernández de Elche. El procedimiento de fabricación ha sido:

- *Insolado*: El insolado consiste en colocar el fotolito que se ha obtenido de la antena en su proceso de diseño sobre un sustrato, en este caso, FR4 con una $\epsilon_r = 4.4$ y un espesor de 0.4 mm. Al aplicarle luz ultravioleta al sustrato mediante tubos fluorescentes se quedará grabado la forma de la antena.



Figura 4.11. Proceso de insolado de las antenas.

- *Revelado*: Este proceso se realiza para eliminar la resina sobrante y dejar el cobre expuesto al ataque químico. Para eliminar esta resina, se deberá sumergir la placa insolada en un disolvente, quedando como se ve en la Figura 4.12.



Figura 4.12. Proceso de revelado de las antenas.

- *Ataque químico*: El ataque químico consiste en eliminar las partes de cobre que se quedan desprotegidas mediante una solución ácida. Se deberá de hacer lo mismo que se ha comentado en el revelado, sumergir la placa y aplicarle ligeramente movimiento. Una vez hecho esto, se procederá a aplicarle acetona pulverizada y su posterior secado. Quedando como se ve en la Figura 4.13.

- *Cortado*: Este proceso consiste en cortar los bordes sobrantes con ayuda de una guillotina para reducir y ajustar las dimensiones, quedando así, como se ve en la *Figura 4.13*.

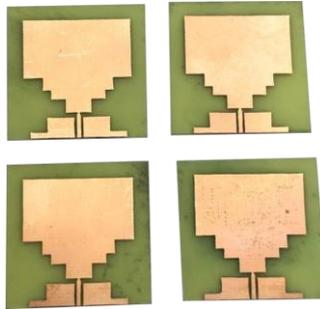


Figura 4.13. Proceso de ataque químico y cortado de las antenas sin conector.

- *Soldadura*: Para este proceso se ha utilizado una estación de soldadura y estaño para poder ensamblar el conector necesario para la conexión entre el VNA y la antena, quedando como se puede ver en el proceso final de la *Figura 4.14*.

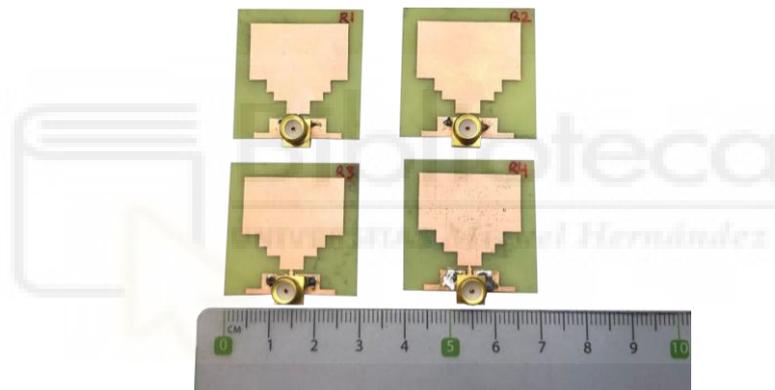


Figura 4.14. Diseño de antenas de banda ancha con conector.

Todas estas técnicas de fabricación se han adquirido a lo largo del Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación.

En cuanto al conector de RF que se ha utilizado para las 4 antenas, han sido de tipo SMA hembra, permiten una frecuencia máxima de hasta 18 GHz y están adaptados a impedancias de 50Ω además, estos conectores tienen una dificultad al ensamblarlos mayor debido a su montaje superficial (SMD), se pueden comprar en la página de la empresa Mouser Electronics por un precio unitario de 3.79 €. En la *Figura 4.15* se puede ver como son estos conectores.



Figura 4.15. Conectores de RF tipo SMA hembra [30].

Una vez comentado todo el proceso de fabricación, se va a mostrar las medidas de las antenas fabricadas, para ello, estas antenas se han medido con ayuda del VNA y se han exportado los archivos para poder abrirlos mediante el software ADS, quedando el esquemático como se aprecia en la *Figura 2.10*. Cabe comentar que estas simulaciones se han realizado hasta los 25 GHz para ver todo el ancho de banda de nuestra antena aunque más adelante, nos centraremos hasta los 6 GHz. A continuación, se va a mostrar el parámetro S_{11} obtenido por cada una de las antenas en la cual, se añadirán dos figuras, una tras haber soldado superficialmente el conector y otra tras haber aplicado estaño para fijar el conector que nos permite una mayor sujeción para la posterior conexión al VNA para así ver si la respuesta de la antena ha variado.

- Para la *antena 1*, se han obtenido los siguientes resultados:

**El S22 corresponde a la antena antes de fijar el conector.
 El S44 corresponde a la antena tras haber fijado el conector.**

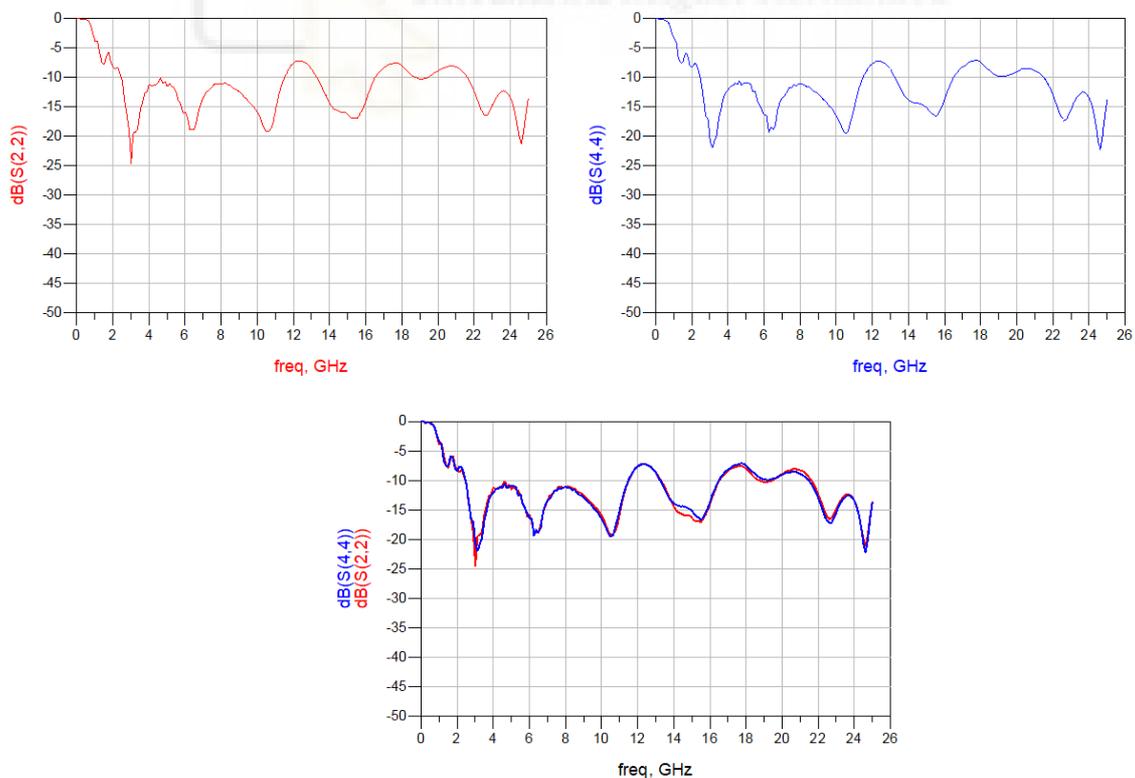


Figura 4.16. Resultados obtenidos para la antena 1.

- Para la *antena 2*, se han obtenido los siguientes resultados:

**El S22 corresponde a la antena antes de fijar el conector.
El S44 corresponde a la antena tras haber fijado el conector.**

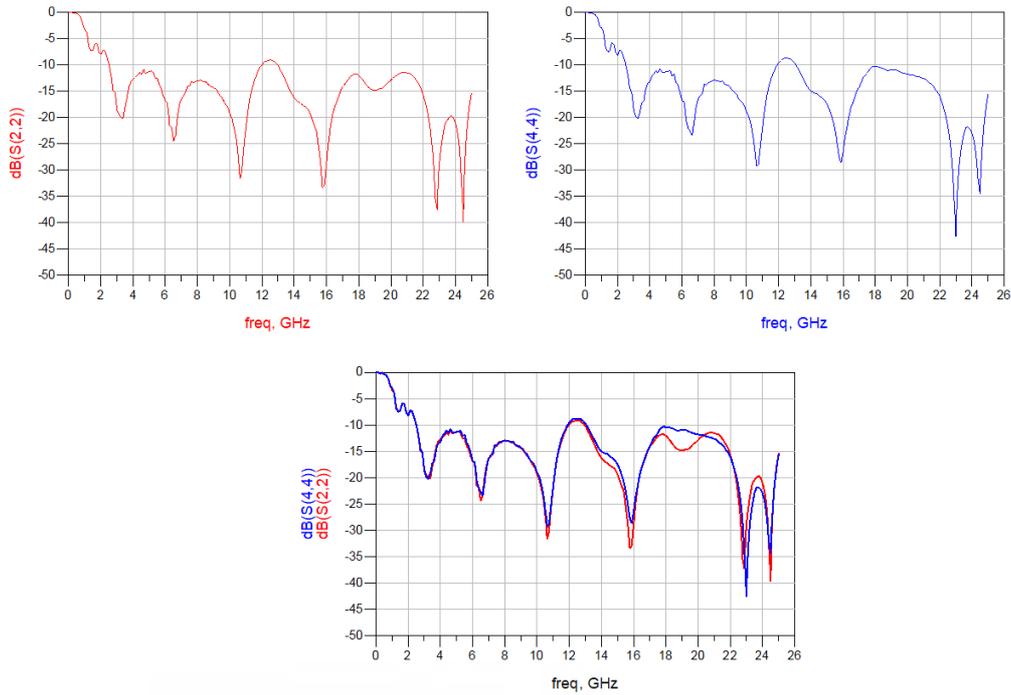


Figura 4.17. Resultados obtenidos para la antena 2.

- Para la *antena 3*, se han obtenido los siguientes resultados:

**El S22 corresponde a la antena antes de fijar el conector.
El S44 corresponde a la antena tras haber fijado el conector.**

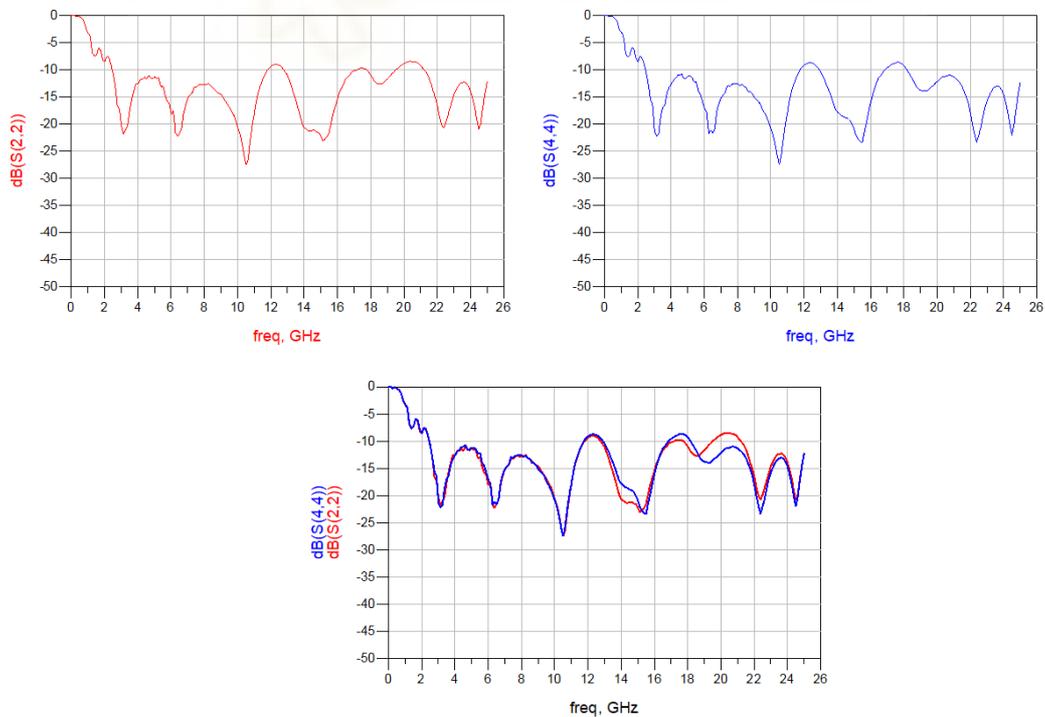


Figura 4.18. Resultados obtenidos para la antena 3.

- Para la *antena 4*, se han obtenido los siguientes resultados:

El S22 corresponde a la antena antes de fijar el conector.
El S44 corresponde a la antena tras haber fijado el conector.

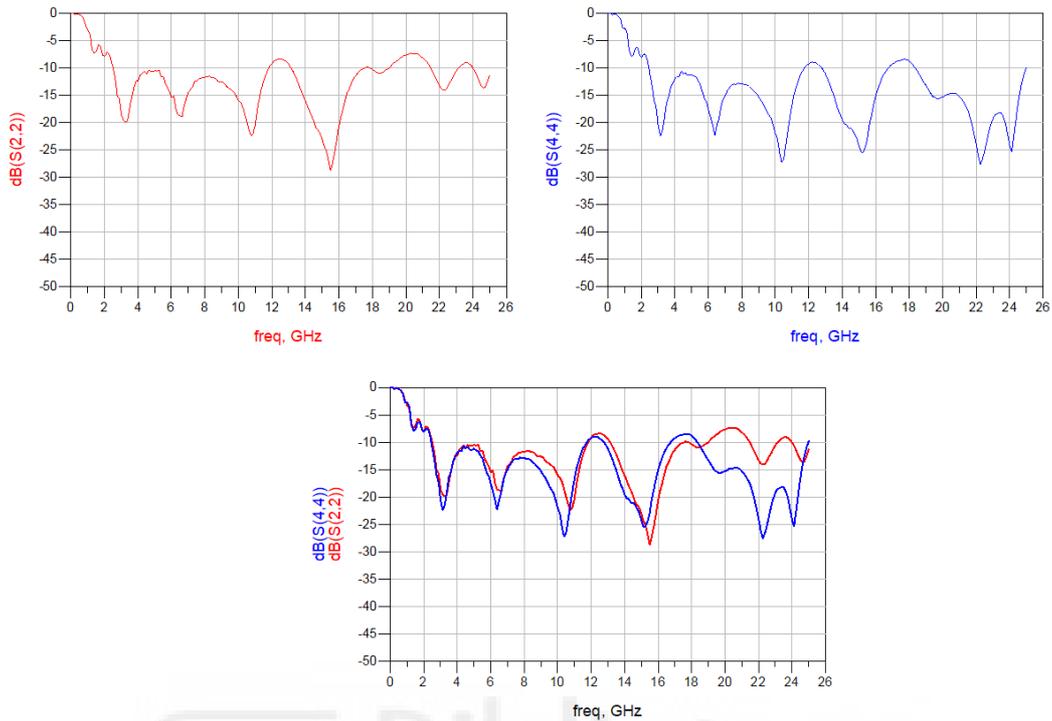


Figura 4.19. Resultados obtenidos para la antena 4.

Para poder apreciar mejor las respuestas de las diferentes antenas, se procederá a añadir una figura donde se muestren todas las respuestas de las 4 antenas juntas, como se puede ver en la *Figura 4.20*.

La línea en rojo corresponde a la antena 1.
La línea en azul corresponde a la antena 2.
La línea en rosa corresponde a la antena 3.
La línea en azul claro corresponde a la antena 4.

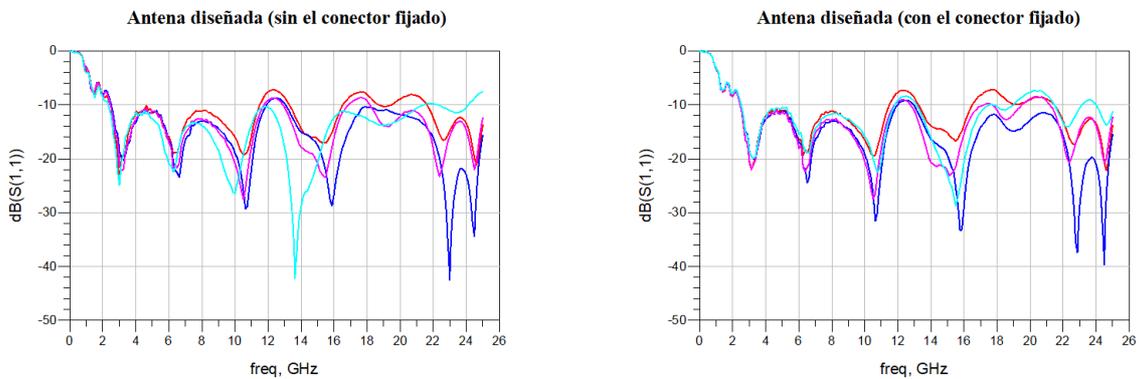


Figura 4.20. Resultado de todas las antenas.

Como se puede observar en la *Figura 4.20*, una vez soldado el conector se puede ver que las respuestas de las antenas son similares hasta los 6 GHz que es hasta el intervalo que se va a trabajar en el proyecto.

Una vez comentado esto, se va a mostrar el resultado que se han obtenido del parámetro S_{11} de las antenas por separado una vez colocadas en la superficie del cristal de metacrilato como se ve en la *Figura 4.21*.

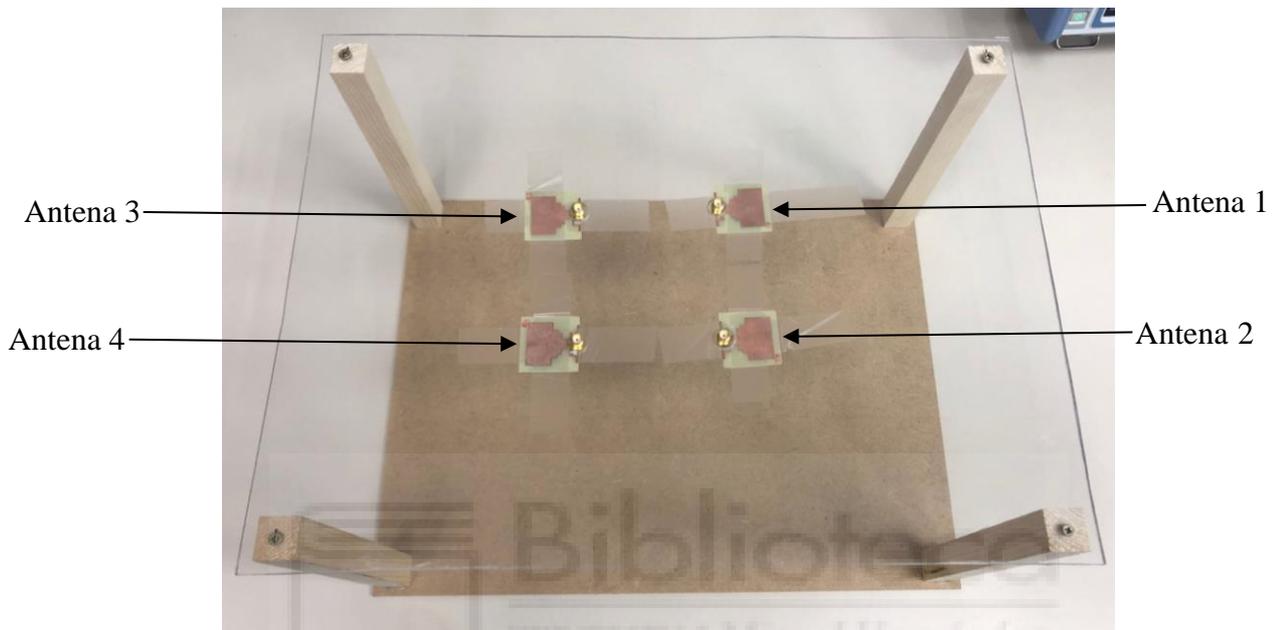


Figura 4.21. Antenas colocadas en el cristal de metacrilato.

- Para la *antena 1* y *2*, se han obtenido los siguientes resultados:

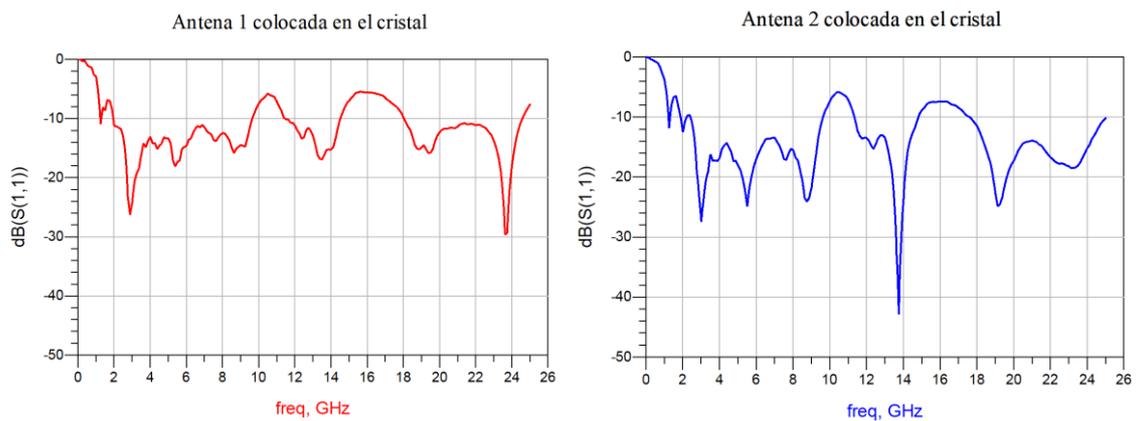


Figura 4.22. Resultados obtenidos para la antena 1 y 2 en el cristal.

- Para la *antena 3* y *4*, se han obtenido los siguientes resultados:

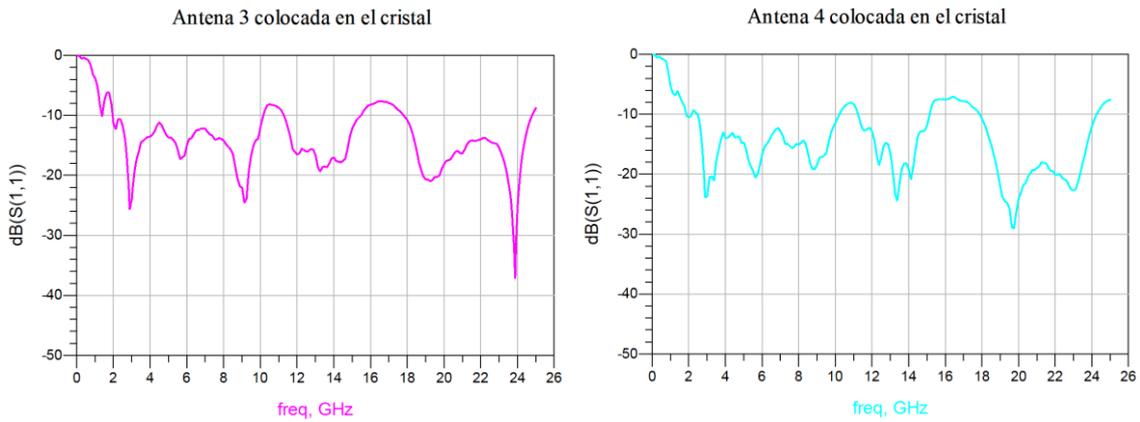


Figura 4.23. Resultados obtenidos para la antena 3 y 4 en el cristal.

Para poder apreciar mejor las respuestas de las diferentes antenas, se procederá a añadir una figura donde se muestren todas las respuestas de las 4 antenas juntas, como se puede ver en la *Figura 4.24*.

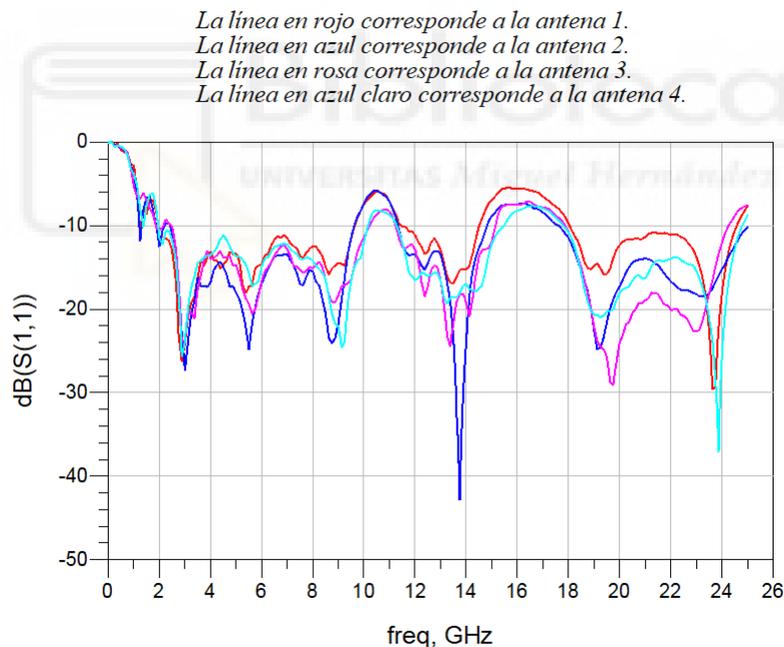


Figura 4.24. Resultado de todas las antenas colocadas en el cristal.

En la *Figura 4.25* se puede observar las señales cuando las antenas están colocadas en la superficie del cristal y cuando no lo están en dicha superficie. Con esto, se puede ver que hay una ligera diferencia hasta los 6 GHz entre estas dos gráficas, esto se debe a la influencia de la propia superficie de metacrilato donde se localizan las antenas las cuales, como se comentó anteriormente, son omnidireccionales.

La línea en rojo corresponde a la antena 1.
 La línea en azul corresponde a la antena 2.
 La línea en rosa corresponde a la antena 3.
 La línea en azul claro corresponde a la antena 4.

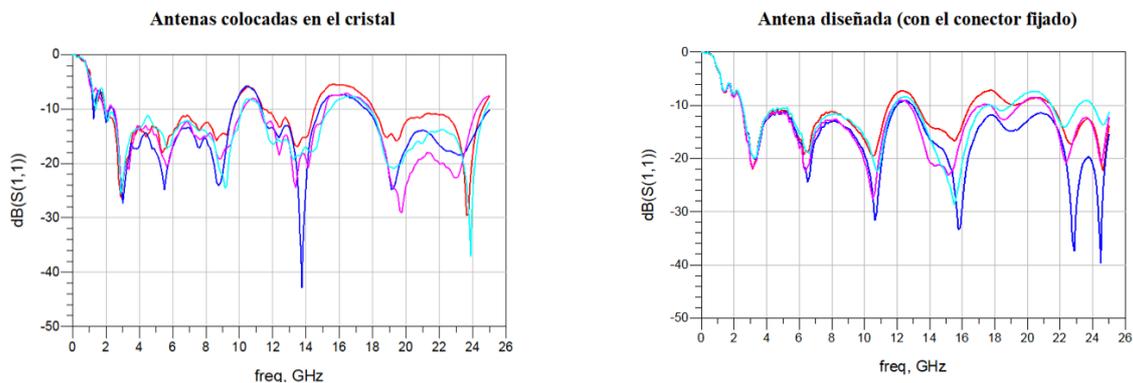


Figura 4.25. Comparación de resultados.

4.2.4. ARDUINO UNO Y PLACA DE CONTROL

El Arduino que se ha utilizado para llevar a cabo este proyecto ha sido el modelo Arduino Uno Rev3 SMD como el que se muestra en la Figura 4.26.



Figura 4.26. Arduino Uno Rev3 SMD [31].

Esta placa de Arduino está compuesta por 14 pines de entrada/salida digitales de los cuales 6 pueden utilizarse como salidas PWM en el caso que se requiera y 6 entradas analógicas, además también incluye un microcontrolador basado en ATmega328-SMD⁷ y un conector de alimentación. La tensión de funcionamiento de este Arduino es de 5V y tiene un precio de 19.00 €. El microcontrolador se va a controlar mediante el programa

⁷ Este microcontrolador de 8 bits de alto rendimiento utiliza una arquitectura RISC y es utilizado por Arduino [37].

‘Arduino IDE’ como se vio en el [apartado 2.4.5](#) de este proyecto el cual se va a basar en utilizar la tabla de verdad que se vio del conmutador de RF para elegir una de las antenas mediante las tensiones de control.

En el caso de este proyecto nos harán falta 3 entradas digitales para el control del conmutador, se han elegido los pines 8, 9 y 10 de la placa de Arduino y como se va a realizar una conexión mediante USB al ordenador portátil el cual sacará 5V, también será necesario utilizar este pin en la placa de Arduino ya que también es su tensión de funcionamiento, estos pines que se van a utilizar, se pueden ver claramente en la *Figura 4.27*.



Figura 4.27. Pines del Arduino Uno Rev3 SMD [31].

Esto se va a tener en cuenta a la hora de diseñar nuestra PCB que se va a encargar del control del conmutador, esta PCB se puede apreciar en la *Figura 4.28*.

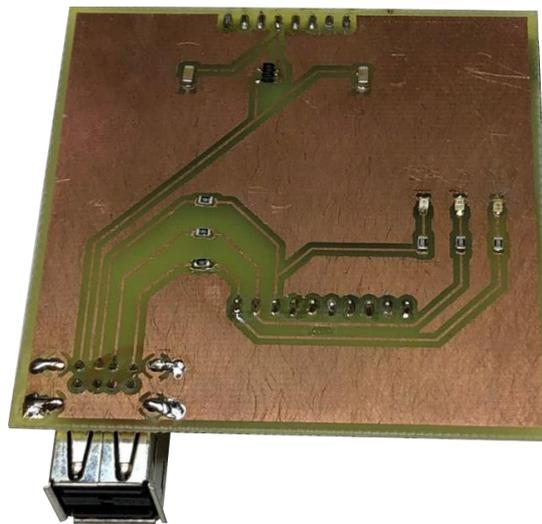


Figura 4.28. PCB de control.

Esta placa de substrato FR4 ha sido fabricada en el “Laboratorio de Tecnología Electrónica 1” del edificio Arenals de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

Para llevar a cabo el diseño del circuito, se ha utilizado el software de EAGLE que se vio en el [apartado 2.4.4](#), por lo que primero, se deberá de implementar un esquemático en el cual, vamos a importar librerías de los componentes que nos serán necesarios para esta y realizar las conexiones y seguidamente después de esto, haremos el diseño de la PCB que tiene la forma que se ha visto en la *Figura 4.28*.

Antes de comenzar a explicar el esquemático, se van a comentar los componentes que deberán tenerse en cuenta para la implementación del esquemático y durante el proceso de fabricación se explicarán.

- *Tira de pines*, estos pines nos permitirán conectar la PCB diseñada con nuestro Arduino, harán falta una tira de 8 y otra de 10 pines.
- *Regulador*, este componente es el modelo TLV73333PDBVT que funciona con un voltaje de entrada entre 1.4 V a 5.5 V para poder sacar una tensión de salida entre el rango de 1 V a 3.3 V.
- *Conector apilado USB*, este componente es el modelo 5787617-4, está compuesto por 8 vías en su parte inferior y tiene un coste de 5.06 € por unidad.
- *6 resistencias* (3x1 k Ω , 1x165 Ω , 1x150 Ω , 1x140 Ω), *3 leds* (3x100 k Ω) y *2 condensadores* (2x1000 nF).

A continuación, se va a mostrar paso a paso como ha sido la implementación de la PCB, comenzaremos con el esquemático como se puede ver en la *Figura 4.29*. Todas las conexiones se han llevado a cabo siguiendo cada uno de la hoja de datos proporcionados por los fabricantes que se pueden ver adjuntos en el anexo de este proyecto.

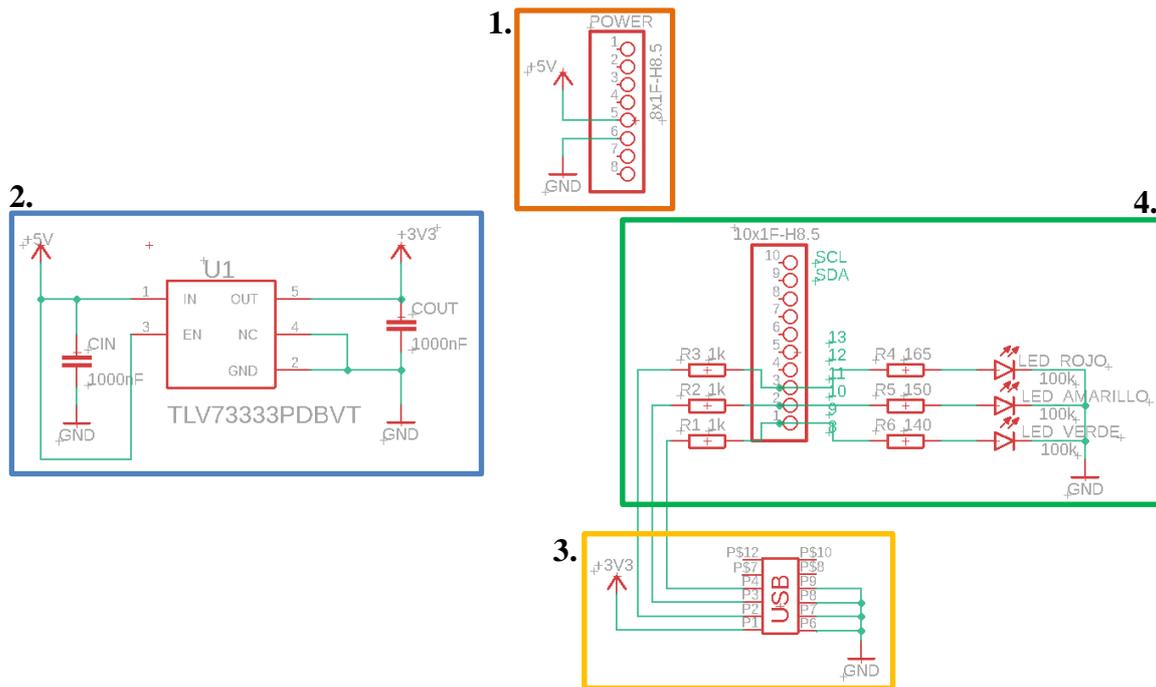


Figura 4.29. Esquemático completo de la PCB de control.

1. En este punto se va a comentar la conexión que se realizará entre la tira de 8 pines y el Arduino. En este caso, se utilizarán los pines 5 y 6 por los cuales, mediante el pin 5 se va a introducir la tensión procedente de los 5 V del Arduino que viene dada por el USB del ordenador y tierra (GND) mediante el pin 6.
2. En este segundo punto, se va a explicar la conexión que se va a realizar con el regulador que será necesario porque como se ha visto en el punto 1 se introducen 5 V suministrados por el Arduino a través del USB, este componente se va a encargar de convertir esta tensión de entrada a una de 3.3 V como se comentó anteriormente y no saturar al resto de los componentes. Mediante la hoja de datos que nos proporciona el fabricante, se han seguido sus recomendaciones por lo que se procederá a conectar los pines 1 y 3 del regulador a los 5 V de entrada y un condensador, estos últimos componentes son los encargados de proteger al circuito. El pin 5 se puede apreciar cómo está conectado a los 3.3 V de salida que esperábamos y al segundo condensador.
3. En este tercer punto, se puede ver como al pin 1 de nuestro USB le llega la tensión de 3.3 V suministrados por el regulador, esta tensión es la máxima permitida que deberá admitir y suministrar el USB, ya que está conectado al conmutador mediante este cable y como se vio anteriormente, la tensión de funcionamiento que admite el conmutador de alta frecuencia está entre 2.3 V y 3.6 V. Los otros 3 pines del USB pertenecen a las 3 tensiones de control del conmutador que deberán ir conectados a tres resistencias que se verán en el siguiente punto y seguidamente, a la otra tira de

pinos que estará conectada por su parte inferior al Arduino que, en este caso, se han elegido los pines digitales 8, 9 y 10 como se vio en la *Figura 4.27*. Esto lo hemos sacado de la tabla que nos proporciona el fabricante en su hoja de datos. Los 4 pines restantes del USB estarán conectados a tierra.

4. En este último punto, se van a ver las conexiones a partir del puerto USB que se vio en el apartado anterior, para conectar el USB con los pines del Arduino. Se han añadido por medio 3 resistencias con valor de $1\text{ k}\Omega$ las tres para proteger a los pines de la PCB. Cada uno de los pines, va asociado a una resistencia y se ha de tener en cuenta que los LEDs tienen valores de $100\text{ k}\Omega$, por lo que se elegirán unos valores de resistencia para el LED rojo de $165\ \Omega$, para el LED amarillo de $150\ \Omega$ y para el LED verde de $140\ \Omega$. Estos LEDs se utilizarán para revisar que se cumple la codificación de la tabla de verdad introducida al Arduino.

Una vez visto todos los componentes de nuestro esquemático, se procederá a ver la creación de la PCB en el software de EAGLE, la cual se mostrará en la *Figura 4.30*.

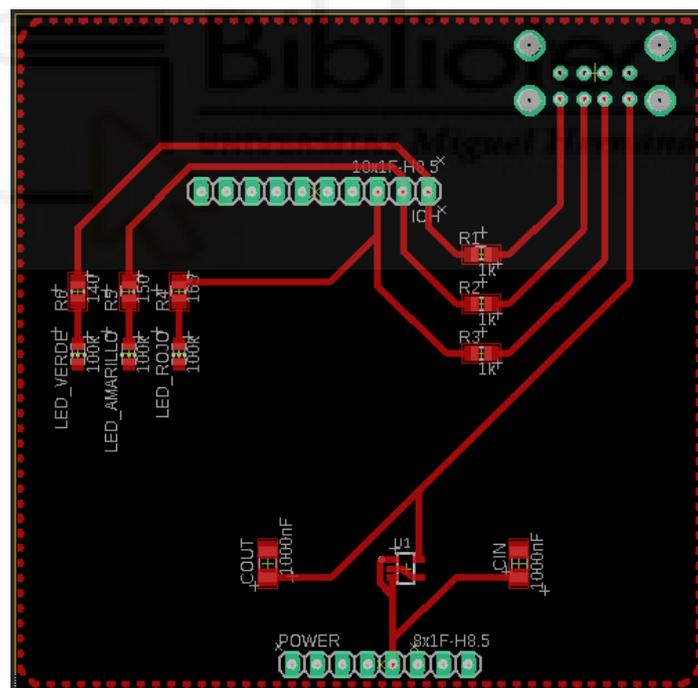


Figura 4.30. Diseño de la PCB de control.

El tamaño de esta PCB es de $6.9 \times 6.9\text{ cm}$ y como se puede apreciar, las dos tiras de pines se han situado en el mismo lugar donde se encuentran en el Arduino Uno Rev3 SMD para que así, cuando se suelden los componentes, coincidan los pines con el Arduino y encajen perfectamente. Una vez se hayan conectado todos sus componentes correctamente, se

procederá a generar el fotolito correspondiente para su posterior fabricación. En la *Figura 4.31* se puede ver cómo queda el Layout.

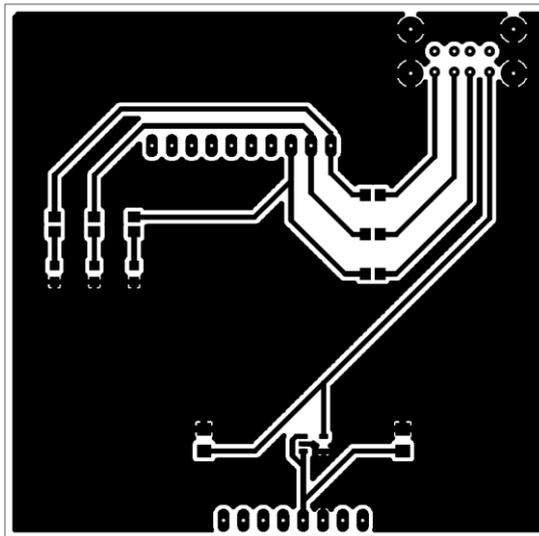


Figura 4.31. Generación del Layout final de la placa de control.

Una vez obtenido este fotolito se procederá a realizar la fabricación de la PCB como se vio paso a paso en el [apartado 4.2.3](#) en el diseño de las antenas, quedando como se muestra en la *Figura 4.32*.

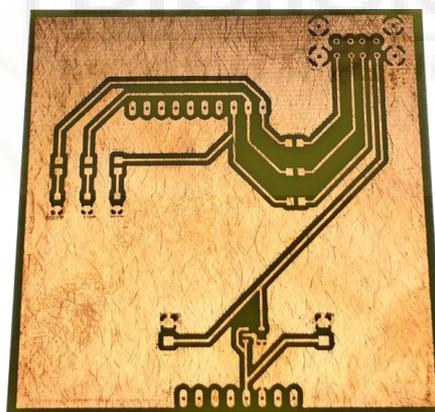


Figura 4.32. Fabricación de PCB.

Una vez hecho esto, se procederá a hacer el taladrado de todos los agujeros para así poder insertar el USB y los pines que nos permitirán la conexión con el Arduino, este proceso se puede ver en la *Figura 4.33a*, además, se procederá a realizar la soldadura de cada uno de los componentes, este último proceso se puede apreciar en la *Figura 4.33b*.

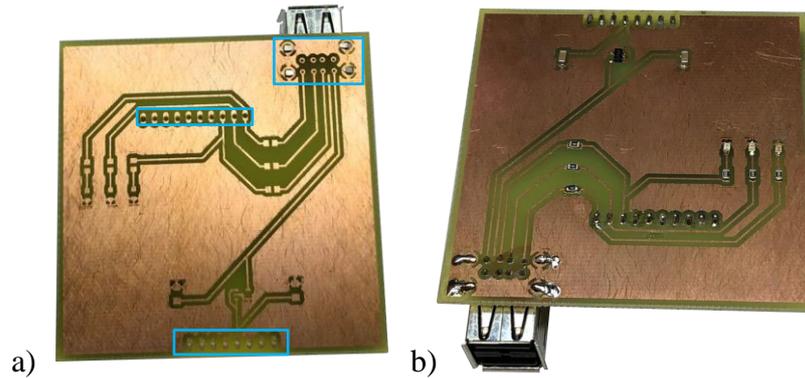


Figura 4.33. a) Taladro de agujeros e inserción del USB. b) Soldadura de todos los componentes.

Cuando se haya realizado este proceso, solo quedará unir la tira de pines soldada en la PCB con los pines digitales del Arduino, esto se puede ver en la *Figura 4.34*.

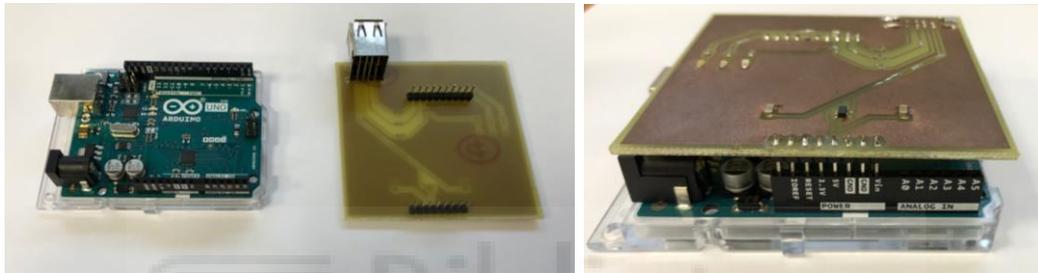


Figura 4.34. Proceso de conexión PCB de control con el Arduino.

Como se ve en la *Figura 4.34*, se debe tener en cuenta el tamaño de la PCB diseñada para que encajen perfectamente las tiras de pines y para que el USB no toque los pines digitales del Arduino ya que si no, no se podría realizar esta conexión.

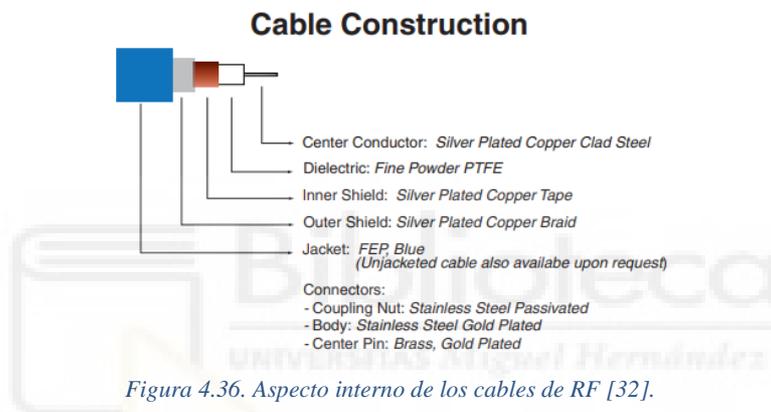
4.2.5. CONEXIONADO FINAL DEL SISTEMA

En este apartado, se va a explicar los diferentes tipos de cables que se han utilizado para este proyecto, así como su proceso de fabricación en el caso que lo tuvieran. Se comenzará explicando los cables coaxiales de RF cuyo modelo es el FL086-24SM+ de la empresa Mini-Circuits, los cuales se pueden ver en la *Figura 4.35*.



Figura 4.35. Cable coaxial de RF [32].

Existe variedad entre sus longitudes, como por ejemplo 6'' (15.24 cm), 9'' (22.86 cm), 12'' (30.48 cm) y 24'' (60.96 cm), en este proyecto únicamente utilizaremos los de 24'' o 60.96 cm, cuyo coste es 19.95 € por unidad. Estos cables tienen la característica de que están adaptados a 50 Ω además de que nos permiten una flexibilidad a la hora de realizar sus conexiones en los diferentes equipos y el rango de frecuencia de trabajo que soporta va desde continua hasta los 18 GHz aunque para nuestro sistema únicamente sea necesario hasta los 6 GHz. En la hoja de datos que nos proporciona el fabricante, también nos describe sus pérdidas de inserción y de retorno, las cuales deberemos tener en cuenta para que no se produzca ningún error en el sistema, además, también nos facilita un esquema explicativo del aspecto que hay en cada uno de los extremos del cable como se puede apreciar en la *Figura 4.36*.



Estos cables se van a utilizar para el conexionado entre el VNA y el conmutador de alta frecuencia y seguidamente, desde este conmutador hasta las 4 antenas por sus 4 puertos ya que a ambos extremos del cable tenemos un conector tipo SMA macho y nos permite un buen acoplamiento en los equipos. Antes de proceder al conexionado entre estos equipos, se ha procedido a realizar la medida mediante el VNA de cada uno de estos cables. A continuación, en la *Figura 4.37* se podrá apreciar el parámetro S_{21} en el software de ADS de los 5 cables (4 de las antenas y 1 del VNA) ya que lo que nos importa de los cables son las pérdidas de inserción que tienen y ver si cumple con lo que el fabricante nos facilita.

Representamos el S21 para ver las pérdidas del cable

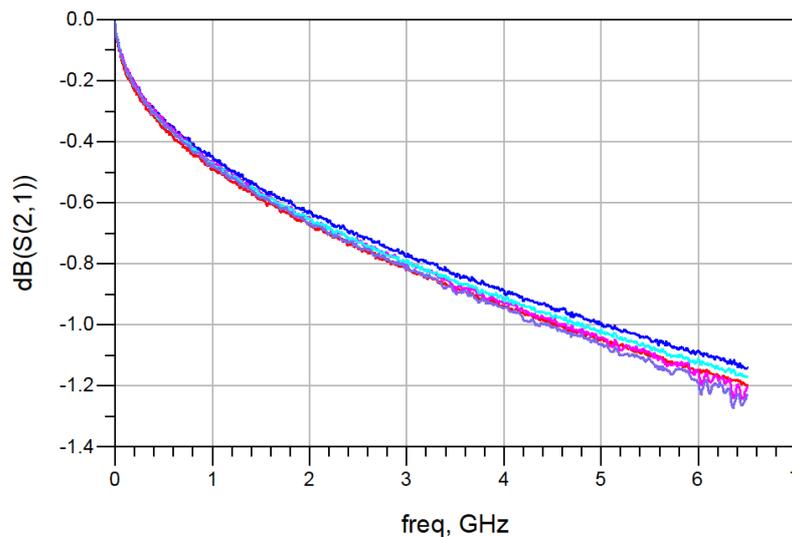


Figura 4.37. Pérdidas de inserción de los cables de RF.

Como se puede observar en la *Figura 4.37*, las pérdidas de inserción que aparecen en la gráfica están entre 0 dB y -1.3 dB aproximadamente, mientras que si se procede a ir a la hoja de datos que el fabricante nos proporciona, estas pérdidas oscilan entre 0 dB y -1 dB. Esta diferencia puede deberse a las dos transiciones hembra-hembra que se utiliza en el conexionado a la hora de medir estos cables.

A continuación, se procederá a mostrar otro cable el cual se ha fabricado a lo largo del proyecto, este cable nos va a permitir la conexión entre el USB de nuestra PCB de control y el puerto D-Sub de 9 pines del conmutador de alta frecuencia. Para llevar a cabo este proceso de fabricación, se han utilizado los siguientes materiales.

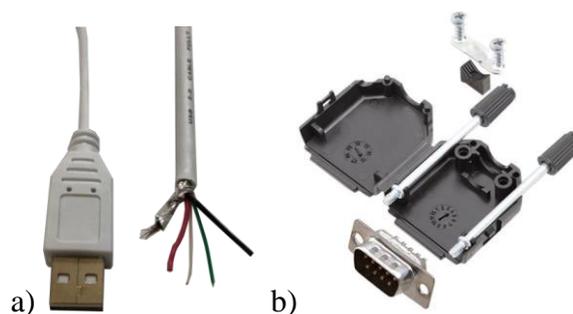


Figura 4.38. Materiales necesarios para fabricar el cable. a) cable USB [33]. b) DB9 + carcasa [34].

El conector USB que se muestra en la *Figura 4.38a*, dispone de 5 hilos (las tres tensiones de control, alimentación y tierra), este cable se ha cortado por la mitad para poder obtener y manejar cada uno de estos hilos para así poder soldarlos en el conector D-Sub de la *Figura 4.38b* el cual contiene 9 pines macho por su parte posterior. Este último conector lleva incorporado una carcasa, los cuales pertenecen a la empresa Farnell y tienen un

precio conjunto de 2.68 € la unidad. El proceso de fabricación del cable conjunto ha sido siguiendo la hoja de datos que nos proporciona el fabricante del conmutador, el cual nos facilita la siguiente *Tabla 4.2*.

PIN Number	Function	
1	NC	
2	V3	→ Cable verde
3	V2	→ Cable blanco
4	V1	→ Cable rojo
5	Vdd	→ Cable negro
6 - 9	GND	→ Malla metálica

Tabla 4.2. Conexión de pines [16].

Para la realización de estas conexiones y saber cuál es cada uno de los cables del USB, nos hemos ayudado de un multímetro digital, para así, poder asignarle a cada una de las tensiones de control un cable de estos, quedando como se muestra en la *Tabla 4.2*. Cada uno de estos cables, han sido soldados con un cable de estaño fino mediante una estación de soldadura de la parte trasera de nuestro conector DB9 quedando finalmente como se muestra en la *Figura 4.39*.



Figura 4.39. Cable fabricado.

Una vez se tenga este cable fabricado, se procederá a su colocación entre el USB de la PCB de control y el puerto D-Sub 9 del conmutador de alta frecuencia.

4.3. SOFTWARE EMPLEADO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS MEDIDAS A REALIZAR

En este apartado vamos a tratar como es el proceso desde la solicitud de antenas mediante los diferentes estados del conmutador con el software de Arduino, selección de las antenas y realización de medidas para cada una estas con el software de Python y posteriormente el procesado de estas medidas con el programa de MATLAB. También he de comentar que gran parte de las líneas de código se han extraído del laboratorio de alta frecuencia, en concreto del Trabajo Fin de Máster que realizó Carolina Blanco Angulo con título “Sistema no invasivo basado en microondas para la medida de distancias en material biológico. Aplicación en la detección de brain-shift y de tumores en cáncer de mama” que presentó en marzo de 2020 y a partir de las líneas presentadas en este proyecto, se han ido realizando modificaciones, se han añadido otras líneas de código diferentes ya que no es la misma finalidad de trabajo ni está compuesto por la misma cantidad de materiales.

Como se sabe de la conexión del USB que se vio en el apartado anterior, los 3 pines de las tensiones de control en nuestra placa de Arduino que se van a utilizar quedan como se pudo apreciar en la *Figura 4.27*.

Una vez comentado esto, se procederá a ver como se realizan la selección de antenas desde el software de Arduino, para ello, se mostrará un diagrama de flujo donde se puede ver el proceso completo.

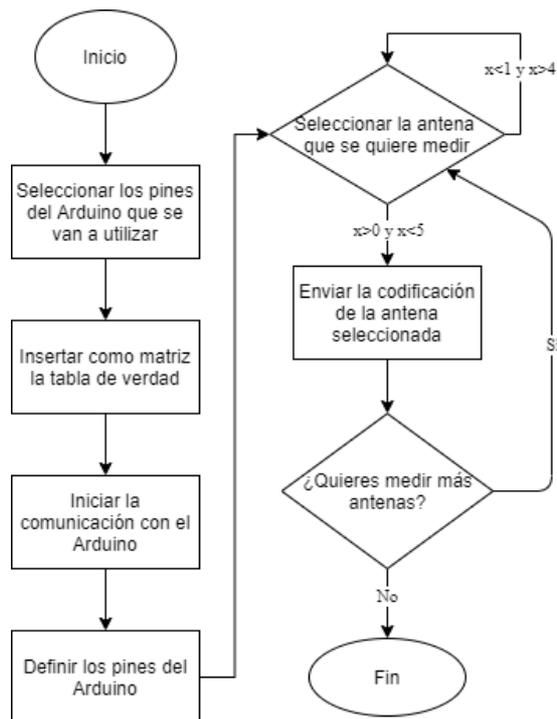


Figura 4.40. Diagrama de flujo de Arduino.

Como se puede observar en la *Figura 4.40* del diagrama de flujo para el software de Arduino, inicialmente es necesario establecer qué pines se van a utilizar en la placa de Arduino. Como se vio anteriormente, se van a utilizar los pines 8, 9 y 10 para controlar las tensiones de control y con esto el conmutador. Mediante la siguiente línea de código se mostrará como realizamos la asignación de estos pines.

```
const int PinLeds[]={10, 9, 8};
```

Una vez seleccionado los pines que se van a utilizar, se procederá a insertar la tabla de verdad que nos proporciona el fabricante como se vio en la *Tabla 4.1*.

```
int matriz[5][3]={{HIGH,LOW,HIGH}, //NINGUNA ANTENA
                 {LOW,LOW,HIGH}, //ANTENA 1
                 {LOW,HIGH,LOW}, //ANTENA 2
                 {LOW,HIGH,HIGH}, //ANTENA 3
                 {HIGH,LOW,LOW}};
```

Como se puede observar se ha insertado la tabla de verdad la cual está compuesta por 5 estados, uno para cada antena y otro para cuando no hay ninguna antena seleccionada (estado de reposo del sistema). Esto se podrá apreciar mediante los LEDs que se encuentran en nuestra PCB de control, según estén encendidos sabremos que antena se está midiendo en cada caso (si está en estado ‘High’ significará que el led está encendido,

si está en el estado ‘Low’ el led estará apagado). Este proceso se puede ver en la *Figura 4.41*.

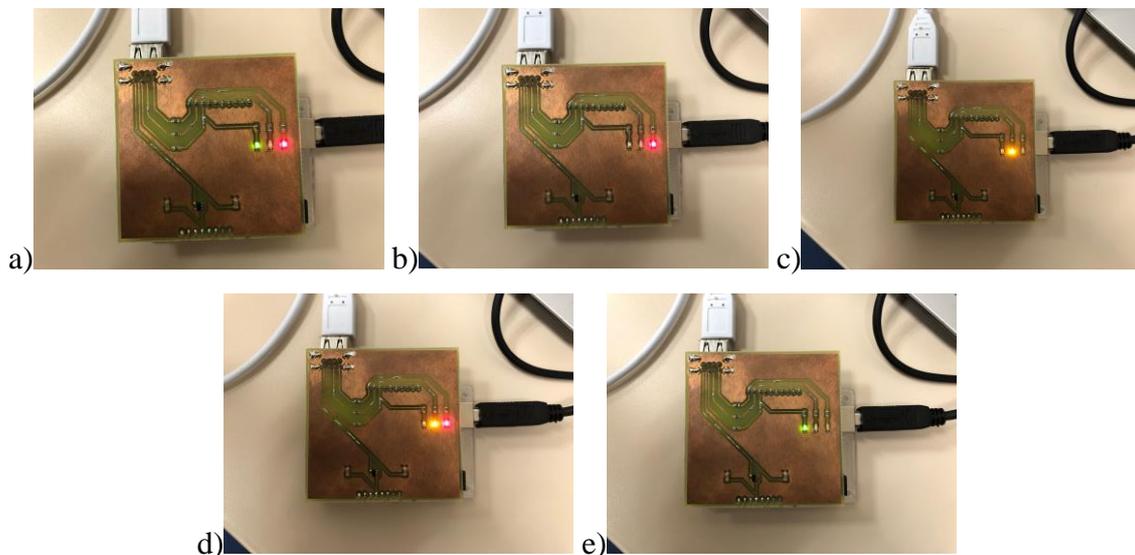


Figura 4.41. Iluminación de LEDs en la PCB de control. a) Ninguna antena. b) Antena 1. c) Antena 2. d) Antena 3. e) Antena 4.

Como se vio en el [apartado 2.4.5](#), el software de ‘Arduino IDE’ está compuesto por dos funciones, `setup()` y `loop()`. La primera de ellas se encarga de inicializar la comunicación con el Arduino, cuya velocidad viene dada en baudios y de definir en este caso los pines digitales de tipo salida (output), esto último se realizará mediante un bucle con ayuda de una variable determinada que se vaya actualizando en el rango de uno a cuatro ya que disponemos de este número de antenas.

La función ‘`loop()`’ se va a utilizar para conectarse a cada una de las antenas, es decir, a la hora de elegir una de ellas, establecer la conexión. Para ello, primero se comprueba si el Arduino está disponible mediante la siguiente función.

```
Serial.available();
```

Una vez hecho esto, se procederá a ver si el número de antenas introducido es correcto o no, es decir, si está en el rango de entre uno y cuatro antenas, si es así, mediante un bucle se procede a asignar la antena escogida.

Una vez hecho esto, se procederá a pedir otra antena y realizar el mismo proceso. Este proceso, cuando todo el sistema este montado y conectado, se deberán cargar los programas a la placa de Arduino y con esto se conseguirá que el programa de Python se encargue de automatizar este proceso, por lo que el número de antena que espera el programa de Arduino va a venir dado por el programa de Python.

A continuación, se va a explicar el programa de Python que, como se puede ver en la *Figura 4.42* se muestra el diagrama de flujo de este programa en el cual se puede ver el proceso completo.

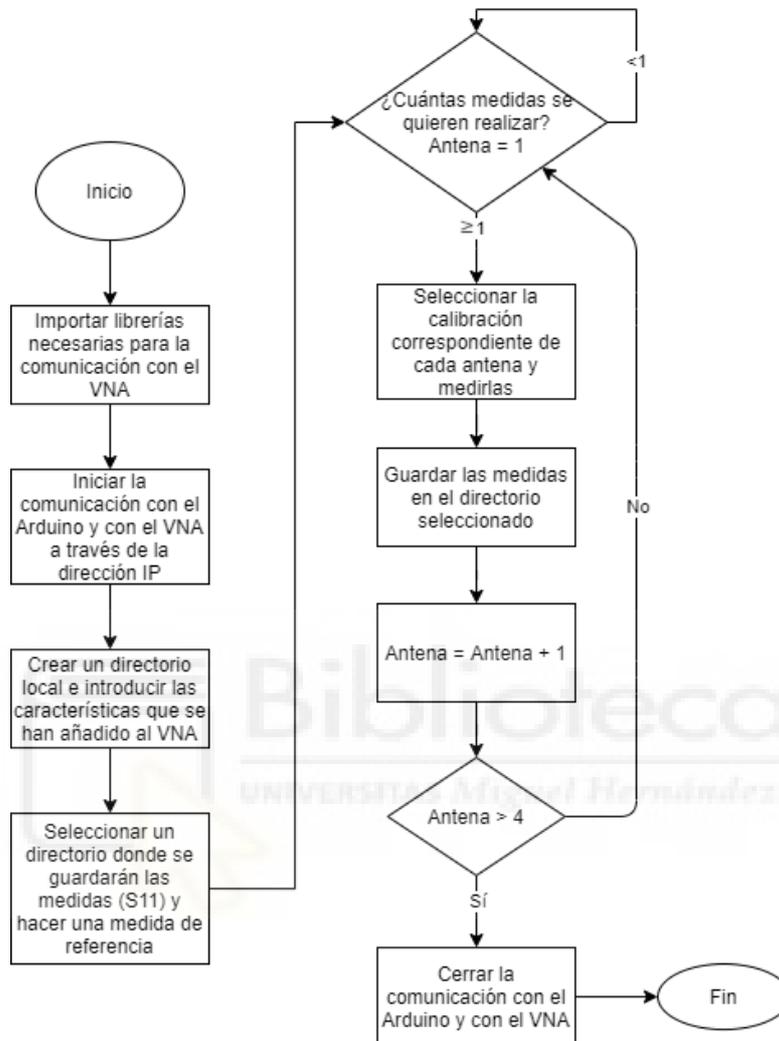


Figura 4.42. Diagrama de flujo de Python.

Antes de comenzar a explicar el software implementado, cabe comentar que es necesario proceder a la calibración de cada una de las antenas para evitar futuros errores en las medidas a la hora del procesado, en la *Figura 4.43* se puede observar un ejemplo sobre cómo se debe calibrar la antena deseada.

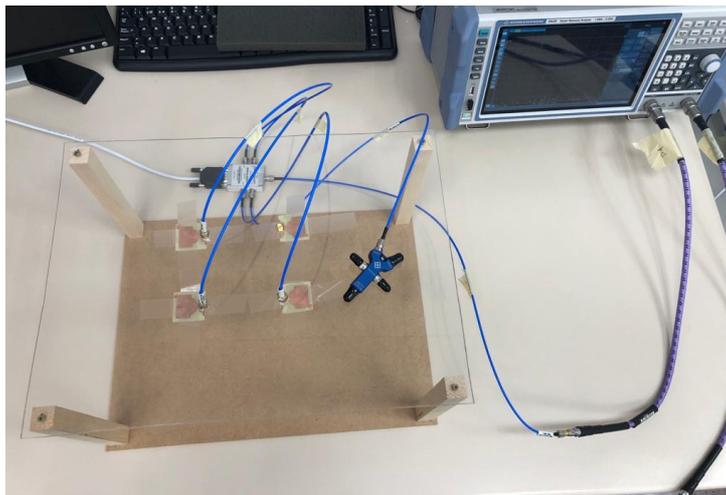


Figura 4.43. Calibración de la antena 1.

Como se puede ver en la *Figura 4.43* el kit de calibración se coloca en el lugar donde iría la antena que se quiere calibrar una vez nuestro sistema esté conectado mediante el conmutador de alta frecuencia. Esto se debe a que así el sistema corrige el error que tenemos desde que sale desde el VNA hasta que llega a la antena que se quiere calibrar en cada caso.

En este software implementado en Python como se puede observar en la *Figura 4.42*, al inicio del programa será necesario importar todas las librerías necesarias para poder permitir la comunicación entre el VNA y el ordenador, será necesario importar las librerías `pathlib` y `pyvisa` como se comentó anteriormente. Una vez hecho esto, se procederá a establecer comunicación con el Arduino mediante el número de puerto que utiliza y en el cual, se deberá seleccionar su velocidad también en baudios y por otra parte, también será necesario establecer conexión con el VNA para poder mostrar las respuestas y posteriormente guardarlas en el ordenador. Esto se realizará mediante la función `vna.open()` que se mostró en el [apartado 4.2.1](#).

Una vez hecho esto y creado un directorio de referencia en el VNA, se va a introducir en el programa de Python las características que se han introducido anteriormente para realizar las calibraciones en el VNA como son el intervalo de frecuencia a simular, el número de puntos, etcétera.

A continuación, se procederá a establecer un directorio para guardar las medidas que se obtengan en nuestro ordenador y posteriormente, se deberá indicar que curva queremos ver, en este caso, nos importa el parámetro S_{11} de las diferentes antenas para ver como varía en el caso de que coloquemos un objeto, para esto, serán necesarias funciones las cuales nos dibujen las trazas en formato de decibelios para ambos ejes. Para cada medida,

será necesario borrar las trazas ya realizadas para que no se solapen unas con las otras. Después de todo esto se procederá a ver el bucle principal del programa, el cual se va a encargar de realizar las medidas necesarias. Para ello, cada vez que se ejecute o se reinicie el programa nos va a mostrar un mensaje el cual nos pregunta sobre cuantas medidas queremos realizar, si se introduce un 0 saltará un error y se saldrá del programa, y si es mayor o igual que 1 entrará en el bucle el cual se recorrerá tantas veces como medidas hayamos introducido, es recomendable que siempre haya una señal de referencia (sin ningún objeto dentro del sistema) para luego a la hora del procesado tengamos una señal con la que referenciarla a cada antena. Esto se hará con ayuda de las siguientes instrucciones.

```
medidas = int(input("¿Cuantas medidas quieres realizar? "))  
for i in range(medidas):
```

Una vez dentro de este bucle, nos pedirá que le introduzcamos el nombre para una nueva carpeta, la cual tendrá la primera medida de las 4 antenas para así, en el caso de que se realicen más medidas, se cree otra carpeta diferente y no se reemplacen las nuevas medidas. Una de las ventajas de este sistema, es que cada vez que se vayan a realizar más de una medida, antes de comenzar la siguiente medida nos preguntará que si el sistema está preparado y antes de indicarle que sí, se procederá a modificar el sistema variando la posición del objeto y una vez hecho esto, ya se le podrá indicar que el sistema sí está preparado. Durante todo este proceso, también se ha añadido una función para poner al Arduino en modo reposo para que no tenga ninguna antena seleccionada, todo esto lo hemos realizado mediante las siguientes líneas de código.

```
ser.write(str.encode(str(0))) #Ponemos el Arduino en modo reposo  
print('Nombre subcarpeta:')  
carpeta2 = input()  
os.mkdir() #En esta función se insertará el directorio el cual  
nos servirá para guardar las nuevas subcarpetas  
print('Pulsar intro cuando el sistema esté preparado') #Así nos  
dará tiempo a modificar nuestro sistema  
b = input()  
if b == '': #A partir de aquí, entraremos al bucle para recorrer  
las antenas
```

Para recorrer cada una de las antenas entraremos en otro bucle el cual se encuentra dentro del que acabamos de comentar, este proceso se denomina ‘bucle anidado’⁸ y este se recorrerá 4 veces debido a que son 4 antenas las que disponemos, cada vez para una de ellas como se puede ver en la siguiente línea de código.

```
for j in range(1,5):
```

Lo primero que se hará será escoger la calibración que se ha realizado para cada antena antes de comenzar a realizar las medidas, después le enviará al Arduino que antena se va a medir. Este proceso se podrá apreciar en nuestra PCB de control la cual está conectada al Arduino y según estén los LEDs encendidos sabremos que antena se mide, también, a través de un mensaje que nos mostrará por pantalla en el ordenador, nos dirá que antena se está midiendo. Además, a esta instrucción se le ha insertado un tiempo de duración, la cual cambiará después de 3 segundos y pasará a la siguiente antena como se puede ver en las siguientes instrucciones.

```
print("Midiendo con antena número: ", j)  
time.sleep(3)
```

Una vez hecho esto se procederá a guardar las medidas, las cuales se descargarán en el directorio especificado del ordenador.

Por último, se tendrá que cerrar la conexión con el Arduino y con el VNA ya que si no podría haber futuros problemas a la hora de volver a establecer conexión con estos equipos. Esto se hará a través de las siguientes funciones.

```
ser.write(str.encode(str(0))) #Se escribe un 0 en el Arduino  
para ponerlo en el estado de reposo  
ser.close() #Cerramos comunicación con el Arduino  
vna.close_log()  
vna.close() #Cerramos comunicación con el VNA
```

Una vez hecho esto, se procederá a exportar estos resultados y procesarlos en el programa de MATLAB como se vio en el [apartado 2.5.1](#). La única diferencia de dicho apartado con respecto al actual es que ahora disponemos de 4 antenas y por lo tanto, de 4 parámetros pero el procedimiento es el mismo.

⁸ Este término se utiliza cuando tenemos unas funciones dentro de otras.

En las siguientes líneas de código se puede ver como disponemos de 4 señales de referencia, una para cada antena.

```
% Referencia (Esta serán mis señales de referencia)
S_ref=sparameters('medidasplancha210721/referencia/Antena1.slp');
S_ref2=sparameters('medidasplancha210721/referencia/Antena2.slp');
S_ref3=sparameters('medidasplancha210721/referencia/Antena3.slp');
S_ref4=sparameters('medidasplancha210721/referencia/Antena4.slp');
```

Una vez hecho esto e introducido todas las medidas, se hará el procesado de estas medidas para las 4 antenas mediante la transformada inversa de Fourier.

4.4. MEDIDAS Y RESULTADOS

En este apartado, se van a mostrar los resultados obtenidos en nuestro sistema final mostrado en la *Figura 4.1*, para este apartado se han llevado a cabo dos tipos de pruebas, una con la plancha metálica para comparar los resultados reales con los resultados simulados vistos en el [apartado 3.3](#) donde se trabajaba en un entorno ideal en el que se disponía de una superficie plana, esto nos ayudará a hacer una primera prueba del sistema físico. Otra prueba más realista en la cual se ha utilizado un muñeco simulando a un bebé ya que la finalidad de nuestro sistema es detectar apnea para recién nacidos. A pesar de ser un muñeco y no moverse, se le variará la altura para así, ver si podemos ser capaces de detectar estos cambios. Hay que comentar que para estas medidas solo vamos a utilizar un puerto con el VNA, por lo que cuando exportemos las medidas al software de MATLAB, los parámetros que se van a utilizar son de tipo .S1P.

4.4.1. PLANCHA METÁLICA

A continuación, se va a explicar el procedimiento seguido para la realización de cada una de las medidas. En primer lugar, se deberá hacer la calibración de cada una de las antenas como se ha comentado anteriormente, para así, evitar posibles errores que puedan interferir en nuestro sistema ya que, se deberá tener en cuenta que ya no estamos trabajando con simulaciones, por lo que los resultados que obtengamos tendrán más ruido y no sea tan preciso. Una vez hecho esto, se procederá a obtener una señal de referencia para cada antena, para ello procedemos a hacer una medida con nuestro sistema sin tener ningún tipo de objeto en el sistema como se puede observar en la *Figura 4.44*.

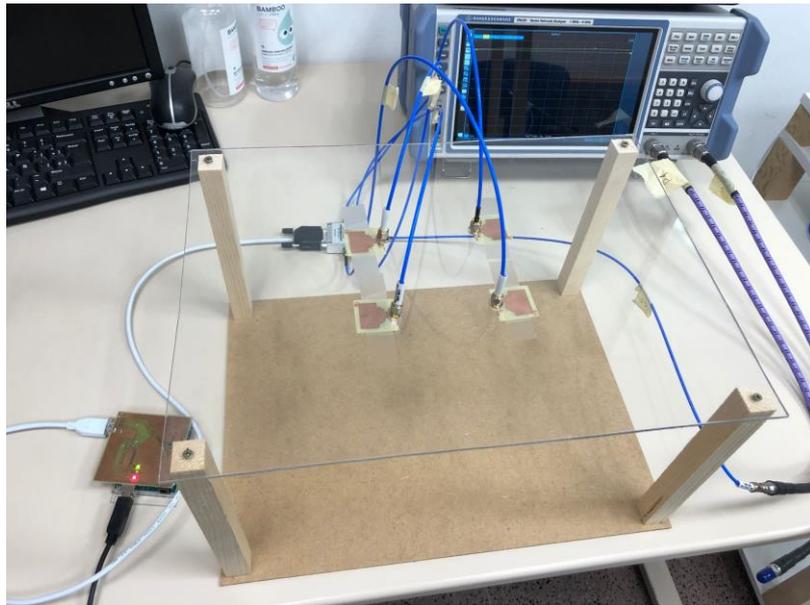


Figura 4.44. Realización de la señal de referencia.

Una vez hecha esta medida, ya se tendrán las señales de referencia para las 4 antenas, cada una su correspondiente y se procederá a añadir la plancha metálica a diferentes alturas, para ello nos hemos ayudado de diferentes objetos no metálicos. A continuación, se va a mostrar la gráfica obtenida con las 4 señales de referencias obtenidas, esto se puede ver en la *Figura 4.45*.

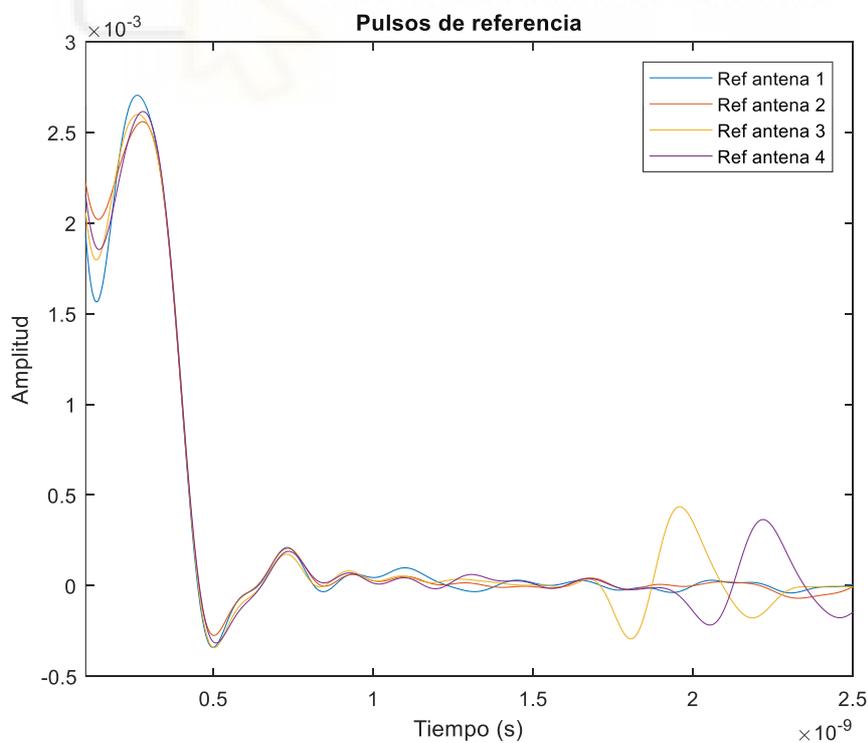


Figura 4.45. Señales de referencia obtenidas.

Como se puede observar, las señales de referencia que se han obtenido son similares unas con respecto a las otras como era de esperar excepto en el intervalo de 1.7ns y 2.4ns aproximadamente que aparecen para la antena 3 y 4 dos pulsos de señal, esto se debe a que se han detectado algún objeto o movimiento a la hora de realizar las medidas en el laboratorio. A la hora de representar los resultados, estos picos de señales no influyen ya que se encuentran en el intervalo de 1.7ns y 2.4ns, si lo pasamos al dominio de la distancia obtenemos un intervalo entre 25.5cm y 36cm, y nosotros vamos a realizar diferencias de como mucho 21 cm que es lo que mide de alto nuestro sistema diseñado.

A continuación, se mostrarán 3 medidas que se han llevado a cabo con la plancha metálica a diferentes alturas como son a 6.7 cm, 11.3 cm y 19 cm. Estas distancias son la diferencia desde la antena hasta donde se ha situado el objeto como se pueden ver en la *Figura 4.46*.

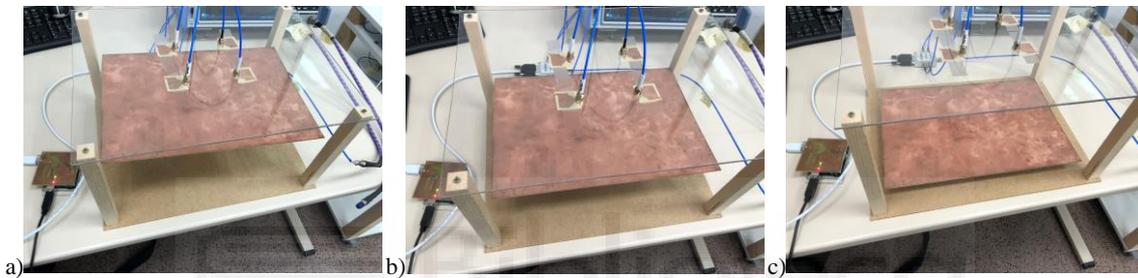


Figura 4.46. Medidas realizadas a diferentes alturas. a) 6.7 cm. b) 11.3 cm. c) 19 cm.

Una vez mostrado las diferentes medidas que se van a realizar, se procederá a su medida para posteriormente exportarlas y llevar a cabo su procesado para así, ver si somos capaces de detectar la diferencia entre estas alturas.

En función del tiempo y una vez realizado todo el procesado de la señal y realizado la transformada inversa de Fourier, se obtienen los siguientes resultados:

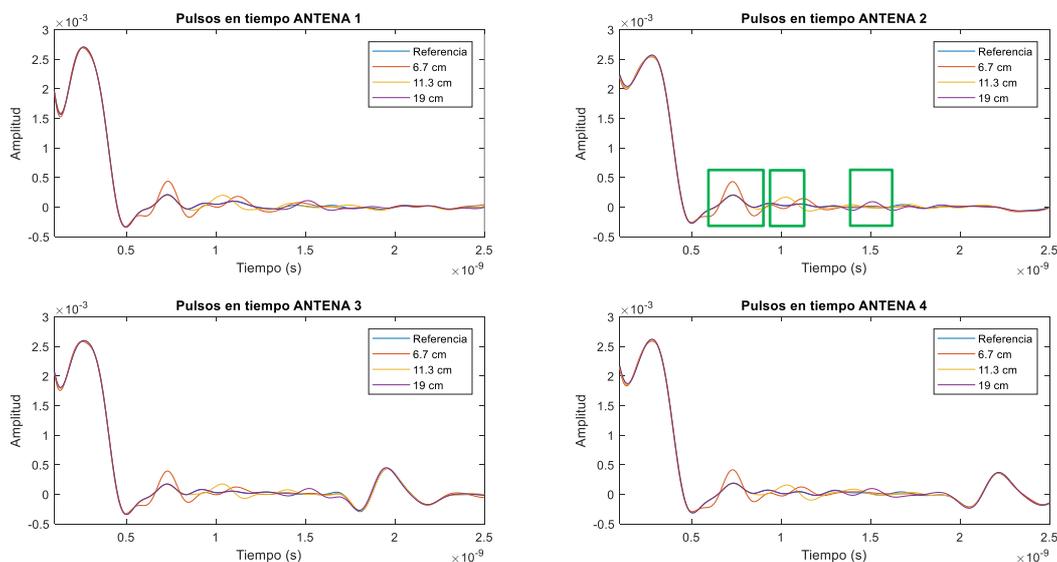


Figura 4.47. Resultado obtenido en función del tiempo para nuestro set-up.

Como se puede apreciar para el caso de la antena 2 por ejemplo, se ha señalado las 3 diferentes señales que se obtienen mediante unos recuadros en verde. La señal a 19 cm se ve más atenuada debido a que al estar más lejos de las antenas, el rebote que se produce llega con menor potencia a dichas antenas. También hay que comentar que como era de esperar, para las antenas 3 y 4 aparece un pico de señal en el instante 2ns aproximadamente debido a lo que se ha comentado anteriormente cuando se mostraban las señales de referencia. Lo importante es que parece que nuestro sistema será capaz de detectar la diferencia de distancias.

Si estas medidas las pasamos al dominio de la distancia, se obtienen los siguientes resultados:

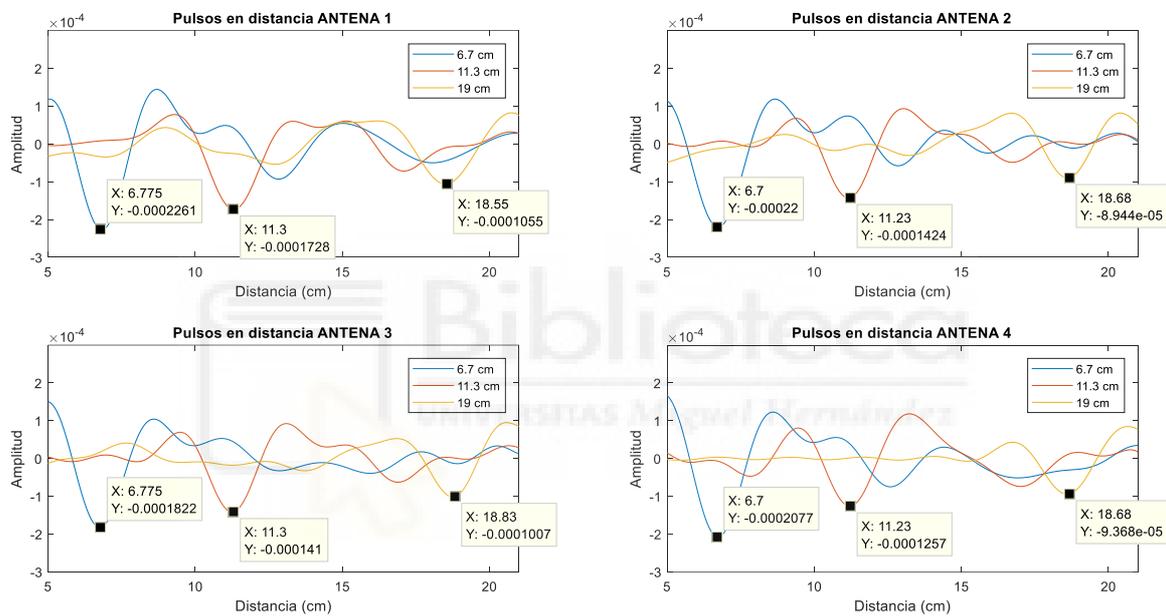


Figura 4.48. Resultado obtenido en función de la distancia para nuestro set-up.

Como se puede observar en la *Figura 4.48*, se ha ajustado el eje para un valor central para que se obtengan valores similares a los esperados. Como era de esperar no salen los valores exactos para todas las antenas ya que siempre debemos tener un cierto error entre las medidas. También, en esta figura se han señalado los máximos de las señales obtenidas. Como se puede observar también, seremos capaces de medir diferencias de posición entre las diferentes alturas a la que situamos una plancha metálica.

4.4.2. PRUEBA REALISTA

En esta segunda y última prueba que se ha llevado a cabo, se ha procedido a introducir en el interior de nuestro sistema un muñeco simulando a un bebé para ver si nuestro sistema

es capaz de detectar la diferencia de posición entre las variaciones de altura de este muñeco ya que, al no tener un sistema que le permita hacer respirar al muñeco, se ha procedido a introducir pequeñas variaciones de altura como se va a ver más adelante para ver si se pueden apreciar estas variaciones. En la *Figura 4.49* se puede observar el sistema que se va a utilizar para este apartado.



Figura 4.49. Sistema implementado para medidas reales.

Una vez visto esto, se han llevado a cabo diversas medidas en las que, después de hacer varias de estas pruebas, nos dimos cuenta de que al ser un muñeco que está compuesto de plástico, obtenemos peores respuestas ya que las señales que rebotaban en dicho material no llegan a la antena con la misma intensidad que con la plancha metálica por lo que no se obtenían resultados tan claros. Entonces, se procedió a vestir al muñeco y por debajo de la ropa se ha insertado un trozo de papel de aluminio para obtener mejores respuestas. Esto en un sistema real no sería necesario ya que el tejido humano no tiene el mismo problema que el plástico, por lo que se apreciarán mejor las medidas. Además, en este caso también se podría vestir al bebé con algún tipo de prenda más reflectante y con esto obtener mejores resultados.

Una vez comentado esto, se va a comentar el proceso que se ha seguido para realizar las siguientes medidas. Para ello, se han utilizado para modificar la altura del bebé un taco de folios de aproximadamente 0.5 cm de grosor y una esponja cuyo grosor es de aproximadamente 2 cm, por lo que la diferencia entre estos objetos es de 1.5 cm aproximadamente. El proceso de medida que se ha implementado para este sistema es, realizar una medida **en medio** de la incubadora para cuando el bebé está encima del taco

de folios y de la esponja, otra medida será situarlo **debajo de las antenas 1 y 3** (a la derecha de la incubadora) para las mismas dos alturas y la última medida será situarlo **debajo de las antenas 2 y 4** (a la izquierda de la incubadora) para las mismas alturas. Con esto queremos ver que si el bebé que se encuentra en la incubadora se mueve, podremos ser capaces de detectar también los movimientos y diferencia de distancias únicamente con dos antenas. Como se puede ver en la *Figura 4.50*, se puede ver los 3 tipos de medidas que se van a llevar a cabo.



Figura 4.50. Realización de las medidas. a) Antenas 1 y 3. b) En medio. c) Antenas 2 y 4.

Como se puede observar en la *Figura 4.50*, se puede ver las 3 diferentes posiciones en las que vamos a realizar las medidas y a su vez, le vamos a variar la altura como se ha comentado anteriormente. En estas primeras medidas vamos a ver si conseguimos detectar la diferencia entre 1.5 cm.

A continuación, se procederá a realizar las medidas con ayuda del software de Python, ya que nos automatiza el sistema y nos permite hacer variaciones en nuestro sistema. Como se ha comentado anteriormente, es necesario hacer una medida de referencia en la que no situaremos ningún objeto en nuestro sistema. Esta señal de referencia se puede ver en la *Figura 4.51*.

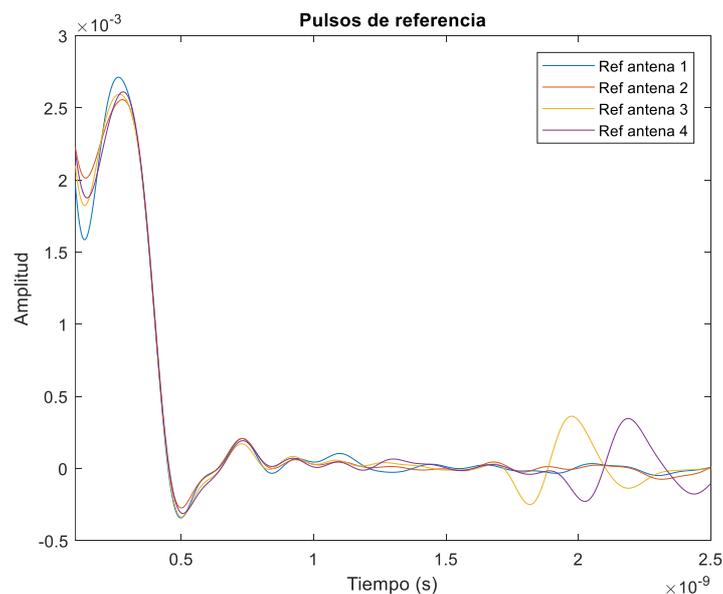


Figura 4.51. Señales de referencia obtenidas.

Como se puede observar, nos sale muy similar a la de la *Figura 4.45* incluso con el rizado en los instantes de tiempo 1.7ns y 2.4ns aproximadamente, esto se debe a lo comentado anteriormente.

Una vez tomadas realizado la señal de referencia y tomado las medidas que se han comentado anteriormente, se procederá a hacer el procesado mediante el software de MATLAB y una vez realizada la transformada inversa de Fourier, se procederá a representar las respuestas en función del tiempo como se puede ver en las siguientes 3 figuras.

- Cuando el bebé se encuentra en medio:

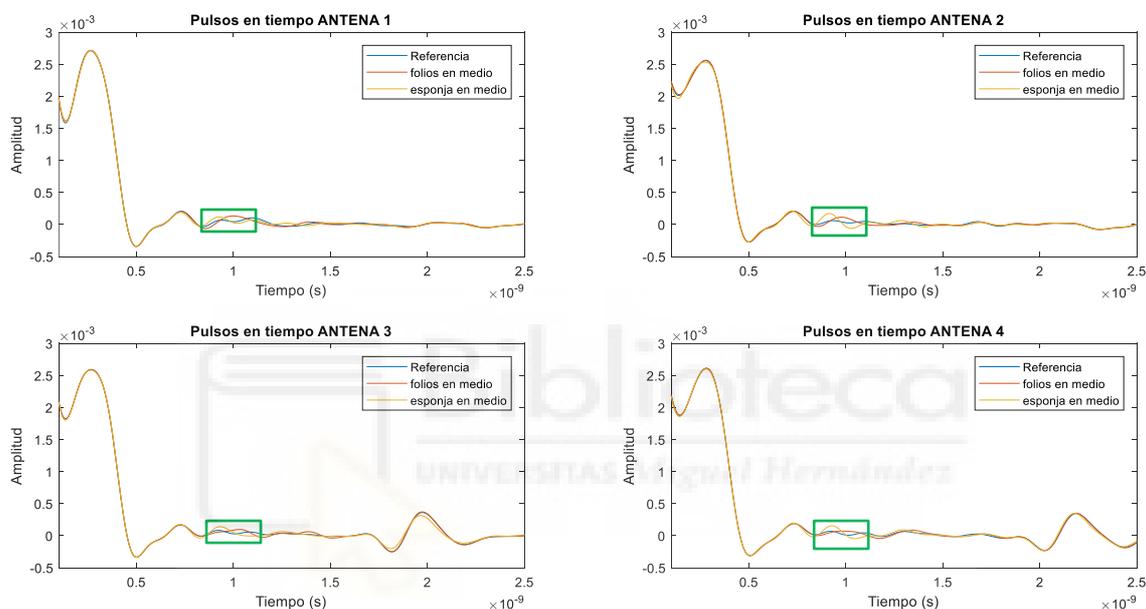


Figura 4.52. Señales obtenidas en función del tiempo cuando el bebé está en medio.

Como se puede apreciar en los recuadros en verde, se observa una pequeña diferencia entre las dos señales, están tan próximas ya que la distancia entre ellas es de 1.5 cm.

- Cuando el bebé se encuentra situado debajo de las antenas 1 y 3:

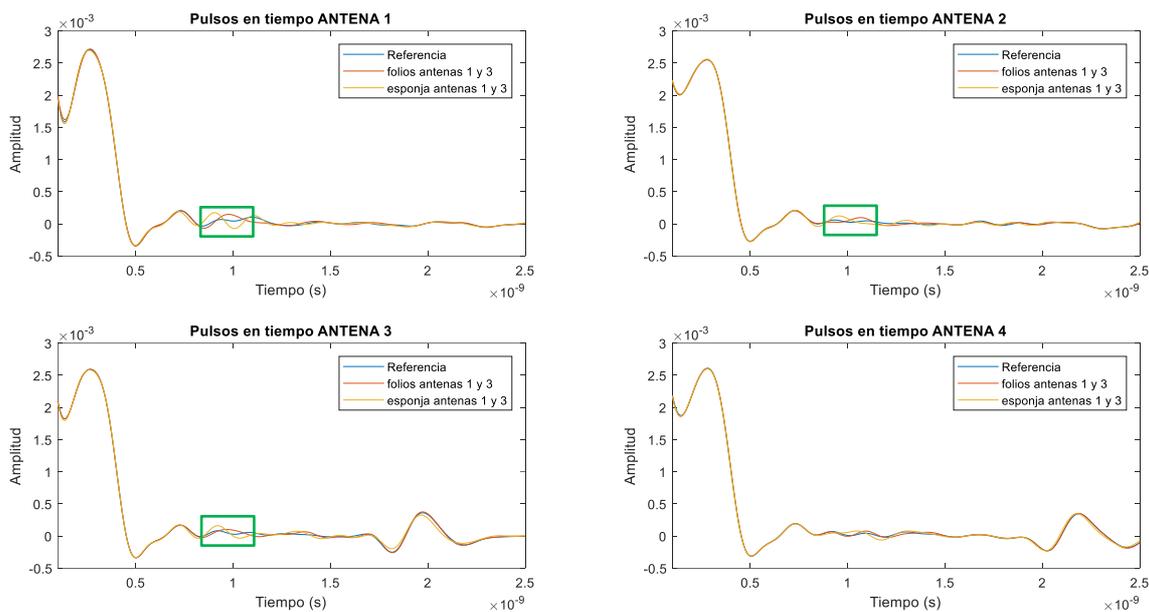


Figura 4.53. Señales obtenidas en función del tiempo cuando el bebé está en las antenas 1 y 3.

En la Figura 4.53 se puede observar que para la antena 2 también se obtiene una pequeña respuesta aunque se haya colocado el muñeco debajo de las antenas 1 y 3, esto se debe a que como se ha insertado un trozo de papel de aluminio en el muñeco, puede deberse a que las señales lleguen donde se encuentre este material, reboten y lleguen a esta antena.

- Cuando el bebé se encuentra situado debajo de las antenas 2 y 4:

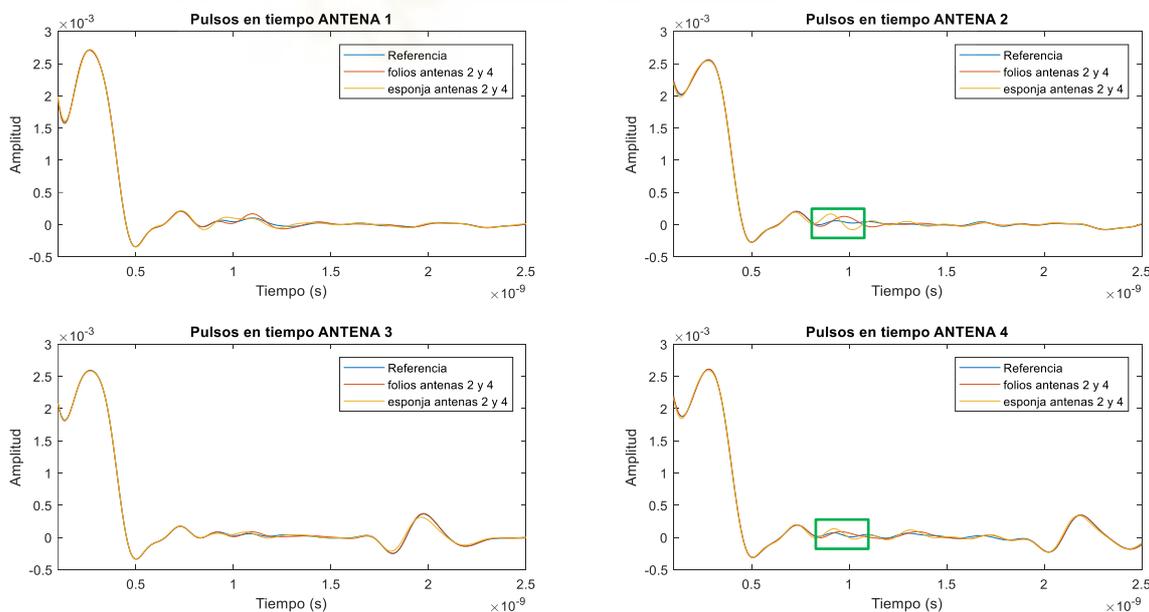


Figura 4.54. Señales obtenidas en función del tiempo cuando el bebé está en las antenas 2 y 4.

Como se puede observar, parece que seremos capaces de detectar diferencias de movimiento con dos antenas en el caso de que le bebé se mueva de posición.

Una vez comentado esto, se procederá a pasar estas medidas a función de la distancia como se pueden ver los siguientes resultados:

- Cuando el bebé se encuentra en medio:

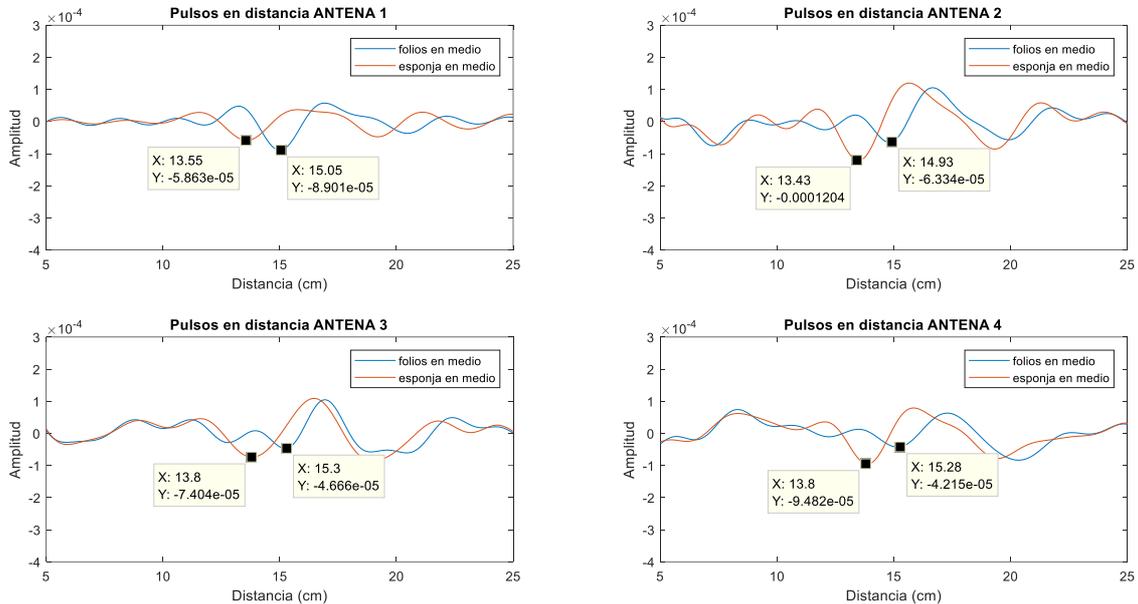


Figura 4.55. Señales obtenidas en función de la distancia cuando el bebé está en medio.

Como se puede observar, se obtienen buenos resultados ya que tenemos una diferencia entre las señales de 1.5 cm aproximadamente. Se han escogido esos valores ya que, en este caso, se debe tener en cuenta que el muñeco no tiene una forma uniforme, por lo tanto, los máximos y mínimos de las señales no coinciden por lo que es más complicado determinar cuáles escoger, por eso será necesario fijarse en el eje de distancias para ver que todas las antenas se encuentran a una distancia aproximada unas con las otras respecto al muñeco, como por ejemplo en este caso en el que la distancia varía entre 13cm y 15cm aproximadamente.

- Cuando el bebé se encuentra situado debajo de las antenas 1 y 3:

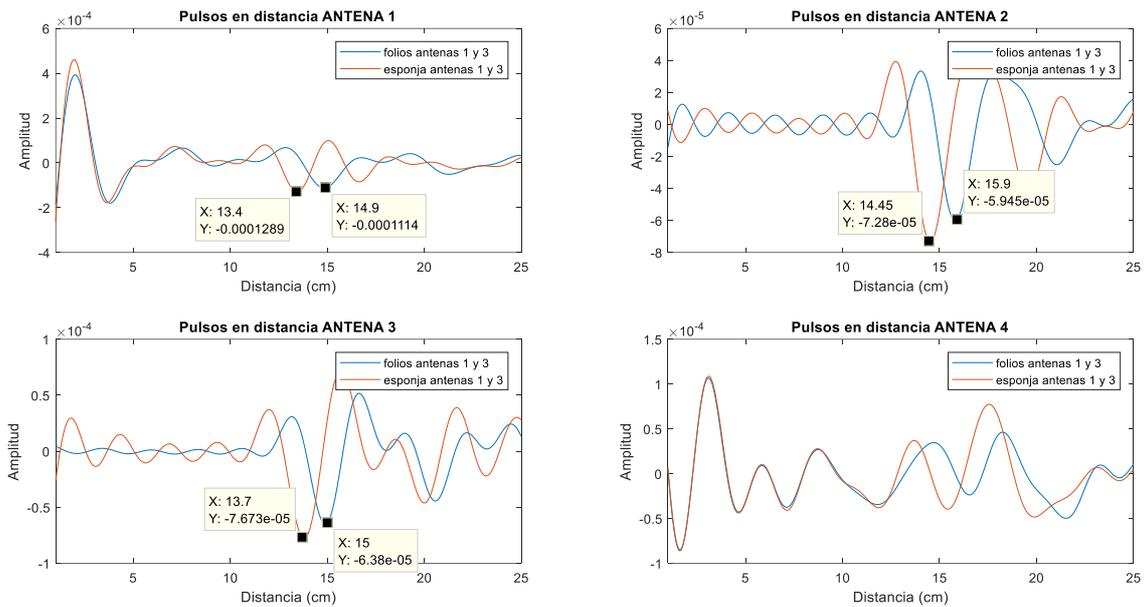


Figura 4.56. Señales obtenidas en función de la distancia cuando el bebé está en las antenas 1 y 3.

Como se puede observar, cuando el muñeco se dispone debajo de las antenas 1 y 3 se obtienen buenos resultados, ya que la diferencia entre las señales es de aproximadamente 1.5 cm para estas antenas. Si nos fijamos también para la antena 2, también vemos una cierta respuesta con una diferencia aproximada a la que se esperaba, esto se debe a que el muñeco puede quedar ligeramente colocado hacia esta antena y al llevar el recubrimiento con el papel de aluminio se obtiene las señales deseadas.

- Cuando el bebé se encuentra situado debajo de las antenas 2 y 4:

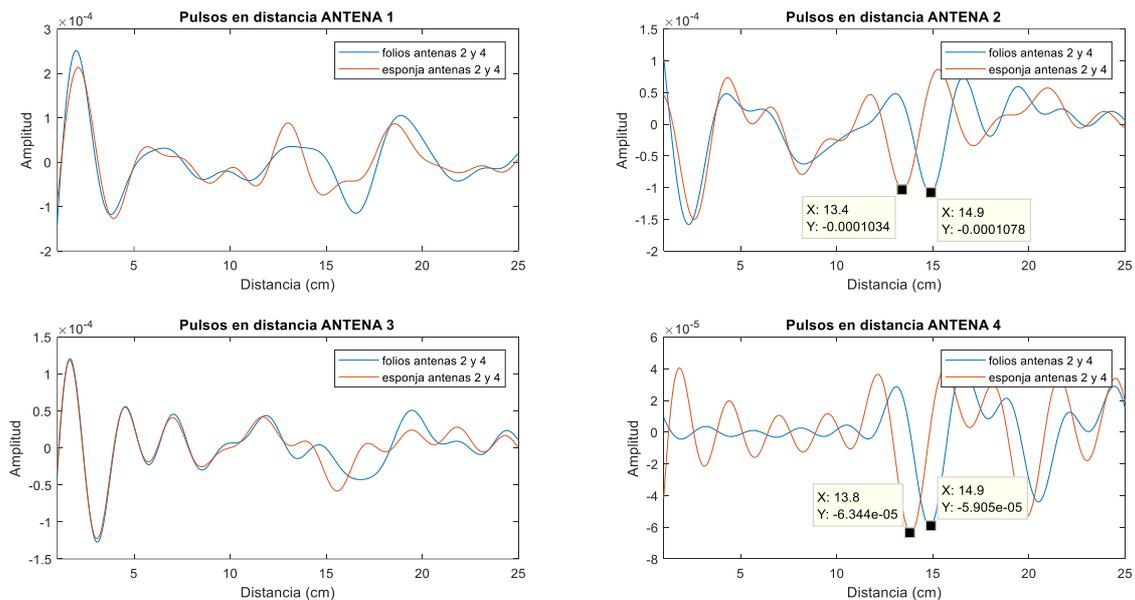


Figura 4.57. Señales obtenidas en función de la distancia cuando el bebé está en las antenas 2 y 4.

En este caso, cuando el muñeco está colocado debajo de las antenas 2 y 4 se obtienen buenas respuestas ya que la diferencia es aproximadamente la que queríamos medir, por lo que se puede decir que con dos antenas únicamente seremos capaces de medir la diferencia de señales. Como se ha comentado cuando el muñeco se localiza en medio de las antenas, se obtienen los picos de señales para todos los casos en un intervalo aproximado entre 13cm y 15cm.

Una vez explicado estas primeras medidas más realistas, se procederá a realizar unas medidas que se ajusten más a un sistema real, en este caso se va a ver si seremos capaces de detectar diferencias de 0.5 cm, esto lo haremos colocando al muñeco sobre nuestro sistema sin ningún material y posteriormente, se colocará el taco de folios de 0.5 cm que se utilizó para las medidas anteriores, para estas medidas que se van a realizar, se va a seguir el mismo procedimiento que para las anteriores medidas es decir, se procederá a colocar el muñeco en medio, debajo de las antenas 1 y 3 y posteriormente, debajo de las antenas 2 y 4. Para comenzar, lo primero de todo es realizar una medida en el que no haya ningún objeto, la cual será nuestra señal de referencia.

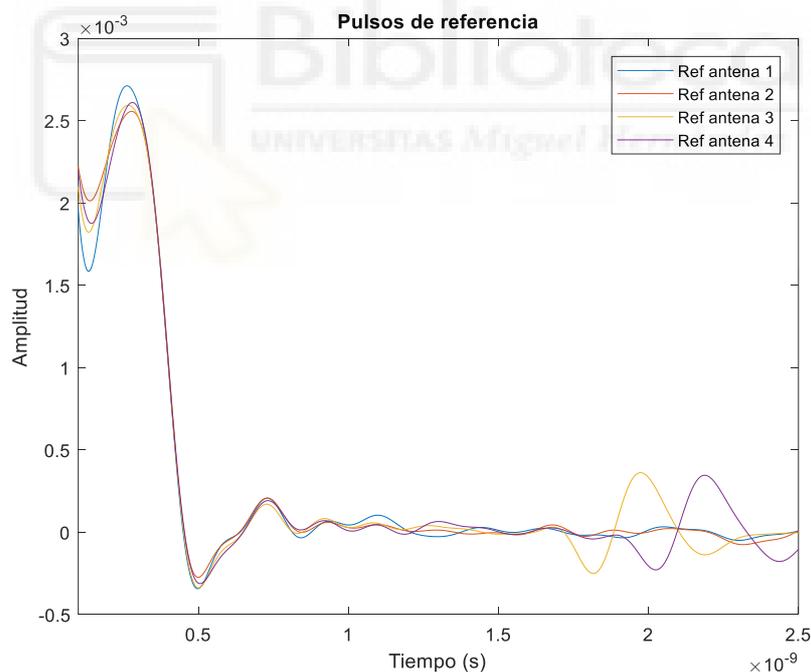


Figura 4.58. Señales de referencia obtenidas.

Una vez hecho esto se procederá a realizar las medidas que se han comentado con ayuda del software de Python, después de exportar estas medidas se realizará el procesado mediante el software de MATLAB y una vez realizada la transformada inversa de Fourier, se procederá a representar las respuestas en función del tiempo como se puede ver en las siguientes 3 figuras.

- Cuando el bebé se encuentra en medio:

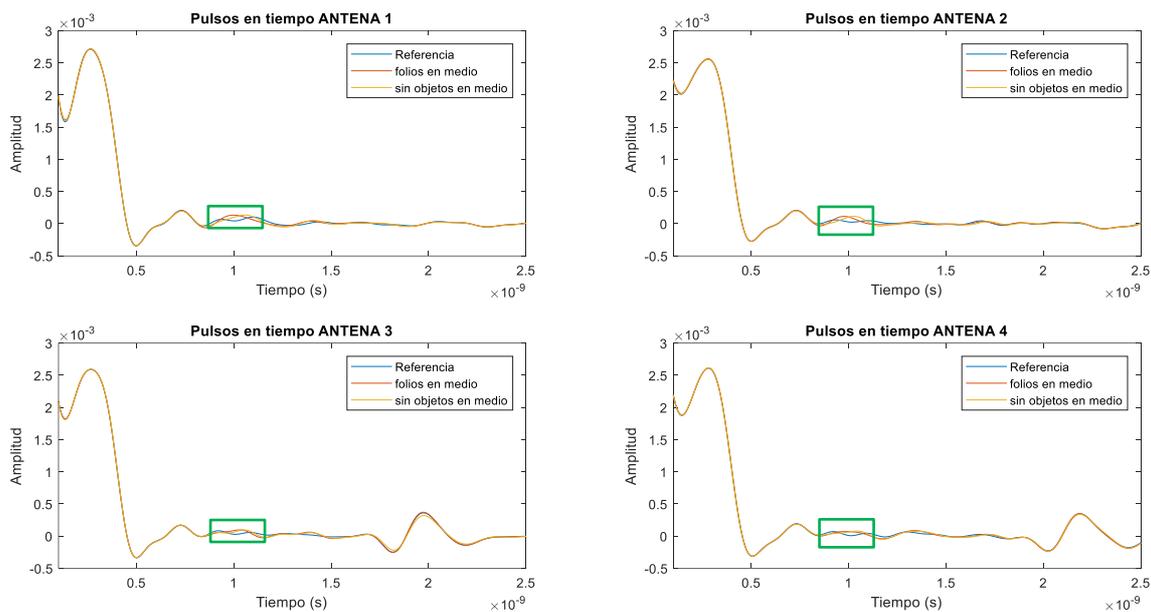


Figura 4.59. Señales obtenidas en función del tiempo cuando el bebé está en medio.

En esta figura no se puede apreciar bien las diferencias entre las señales por lo que se va a ampliar estas señales como se puede ver en la *Figura 4.60*.

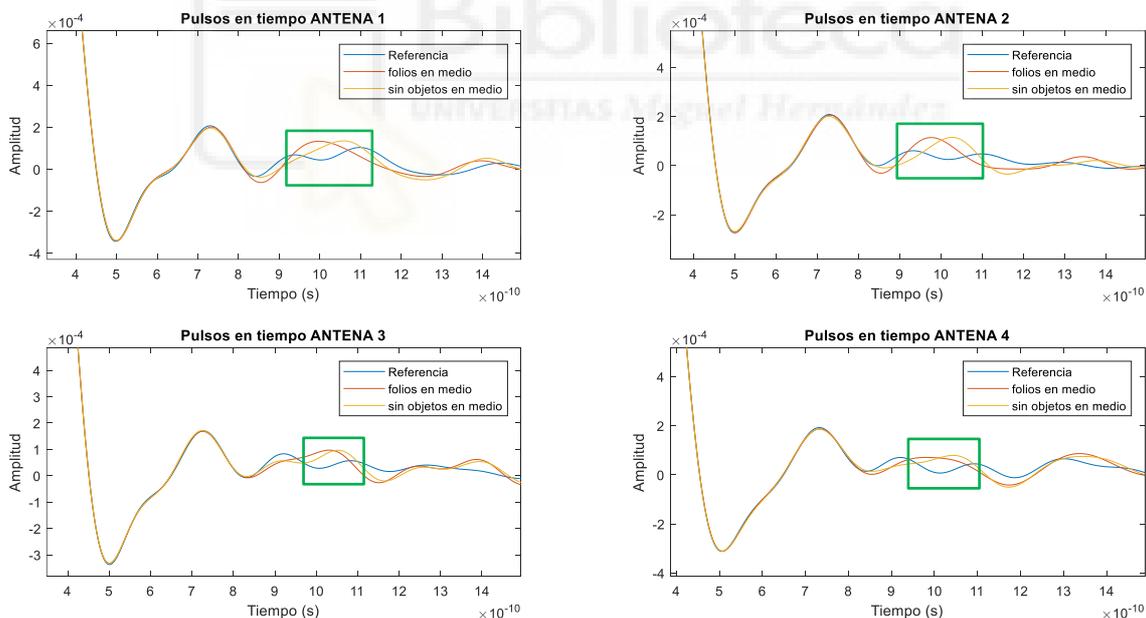


Figura 4.60. Señales ampliadas obtenidas en función del tiempo cuando el bebé está en medio.

Como se puede apreciar en los recuadros en verde, se observa una pequeña diferencia entre las dos señales y como parece ser, para las antenas 1 y 2 que es donde las antenas detectan el papel de aluminio, tendremos mejores respuestas. Para las antenas 3 y 4 se diferencian peor las pequeñas diferencias de señales, esto se debe a que en la parte donde se sitúan estas antenas no se detecta el papel de aluminio, ya que están posicionadas en la

cara del muñeco el cual no está recubierta por este material.

- Cuando el bebé se encuentra situado debajo de las antenas 1 y 3:

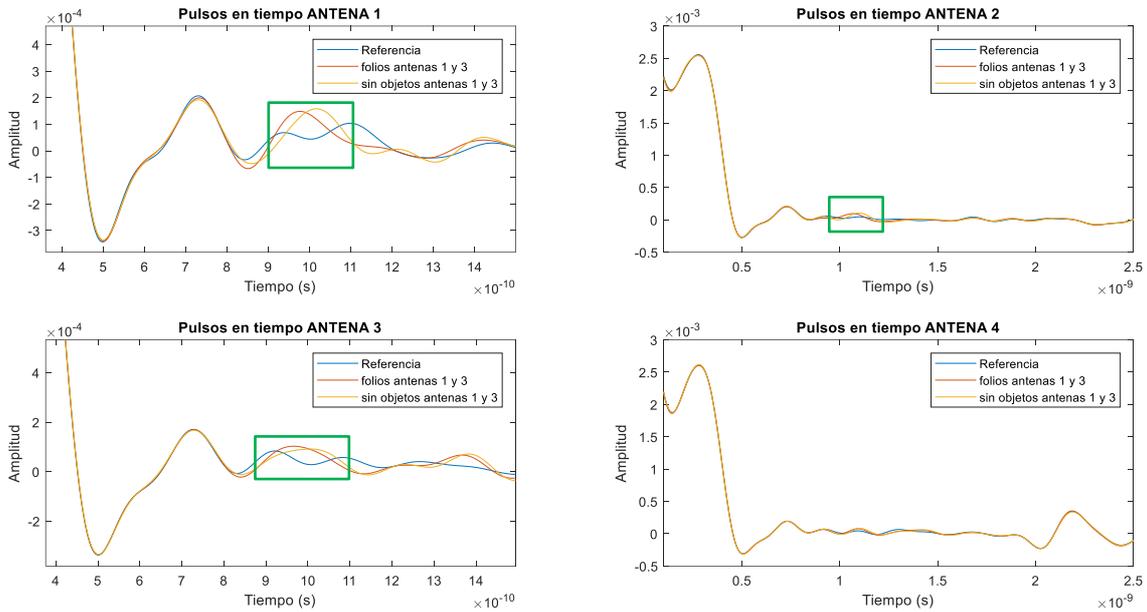


Figura 4.61. Señales obtenidas en función del tiempo cuando el bebé está en las antenas 1 y 3.

Se puede observar que se obtiene una pequeña diferencia entre ambas señales para estas antenas, así como para la antena 2 que, como se puede apreciar, se puede ver una pequeña diferencia entre ambas señales.

- Cuando el bebé se encuentra situado debajo de las antenas 2 y 4:

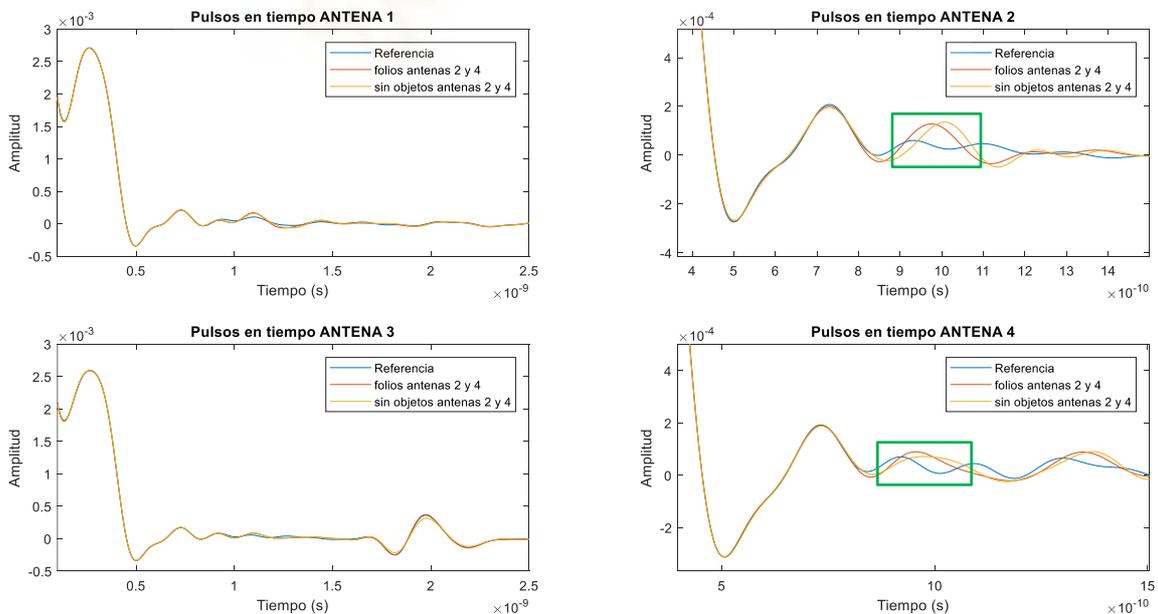


Figura 4.62. Señales obtenidas en función del tiempo cuando el bebé está en las antenas 2 y 4.

Como se puede observar, parece que seremos capaces de detectar estas pequeñas diferencias de movimiento con dos y cuatro antenas.

Una vez comentado esto, se procederá a pasar estas medidas a función de la distancia como se pueden ver los siguientes resultados:

- Cuando el bebé se encuentra en medio:

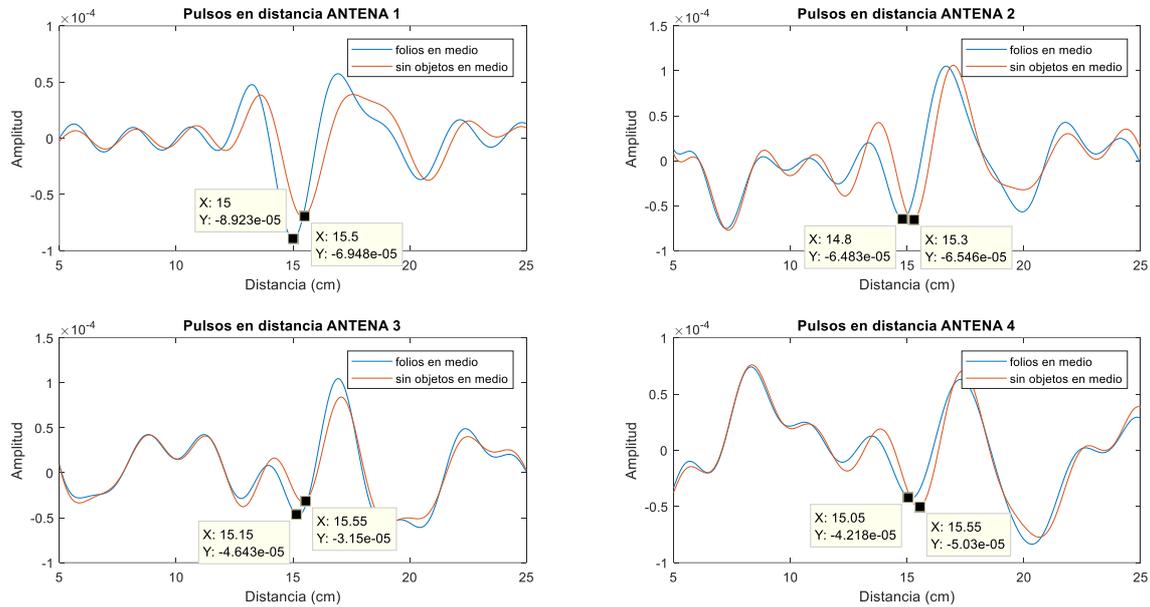


Figura 4.63. Señales obtenidas en función de la distancia cuando el bebé está en medio.

Como se puede observar para las 4 antenas, la diferencia de las señales es aproximadamente de 0.5 cm, por lo que parece que nuestro sistema será capaz de detectar estas pequeñas diferencias más reales. Además, cabe comentar que se han escogido las señales para cuyos picos en los instantes de tiempo coinciden, por ejemplo, en este caso el pico de señales obtenidas está entre 14.8cm y 15.55cm.

- Cuando el bebé se encuentra situado debajo de las antenas 1 y 3:

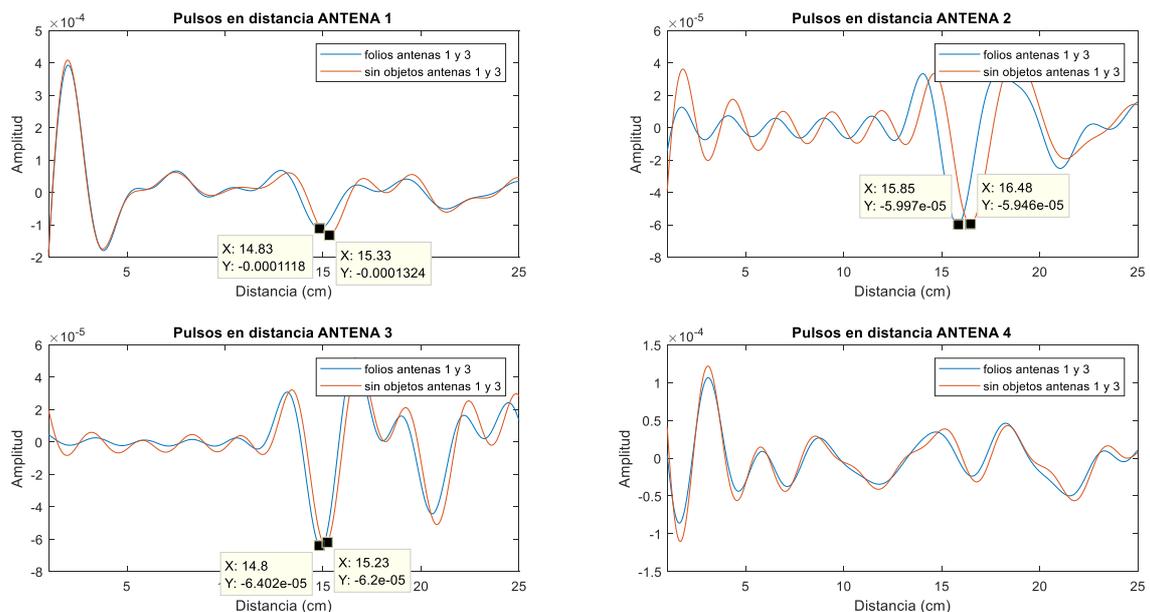


Figura 4.64. Señales obtenidas en función de la distancia cuando el bebé está en las antenas 1 y 3.

Como se puede observar, cuando el muñeco se coloca debajo de las antenas 1 y 3 se obtienen buenos resultados ya que la diferencia que hay entre ambas señales es de aproximadamente 0.5 cm. Para la antena 2 también vemos una pequeña diferencia entre las señales, esto se debe a lo que se ha ido comentando anteriormente.

- Cuando el bebé se encuentra situado debajo de las antenas 2 y 4:

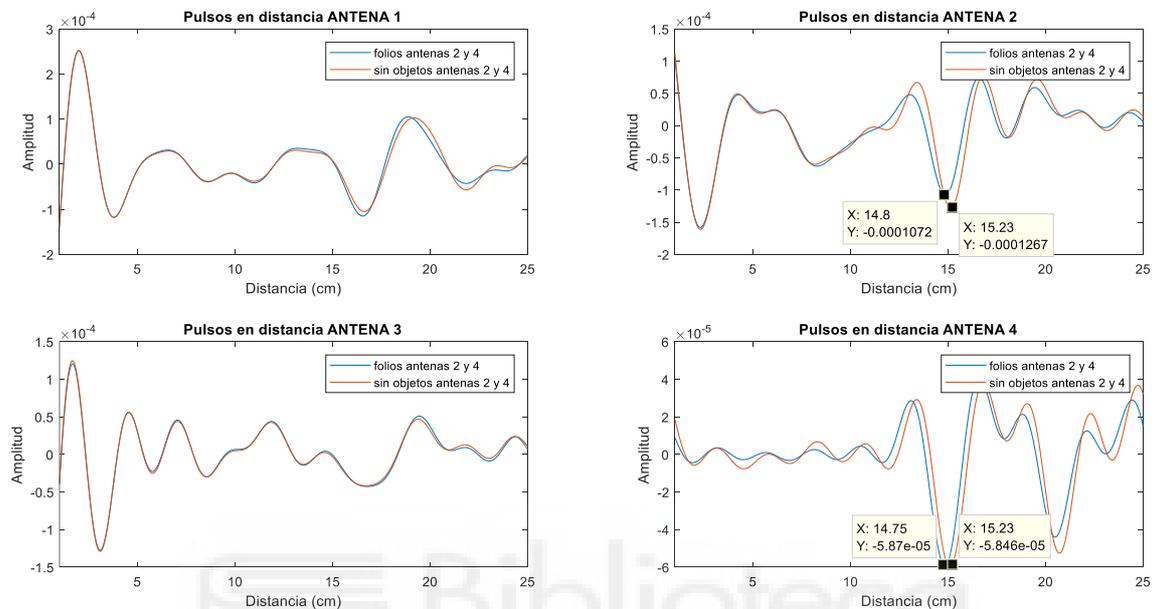


Figura 4.65. Señales obtenidas en función de la distancia cuando el bebé está en las antenas 2 y 4.

Para estos últimos resultados, se puede ver que también seremos capaces de detectar pequeñas diferencias de señales.

En este último apartado de las pruebas realistas, no hemos ajustado el eje de distancias para las medidas ya que lo que nos interesaba en este caso es detectar si nuestro sistema será capaz de medir pequeñas variaciones de posiciones y por lo tanto, que las medidas de distancia fueran precisas.

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

A continuación, en este último apartado del proyecto se van a introducir las conclusiones que se pueden extraer del Trabajo Fin de Grado y posteriormente, se comentarán las líneas futuras en las cuales se verán las partes que se pueden avanzar del proyecto.

5.1. CONCLUSIONES

Como conclusión final del proyecto, se puede decir que se ha podido llevar a cabo el proyecto establecido, tanto a la hora de las simulaciones como con pruebas realistas que se han implementado gracias a la ayuda de un muñeco.

En el proyecto, también se ha utilizado otro tipo de antenas como es el ejemplo de la antena impresa de tipo vivaldi, la cual tiene un diferente ancho de banda a la antena que se ha utilizado para implementar el proyecto. Esta antena nos ayudó a la hora de entender mejor el procesamiento de las medidas con ayuda del software de MATLAB así como la realización de diferentes medidas a diferentes distancias y ver que lo que queríamos buscar con el proyecto se podría realizar sin problemas.

En el apartado de simulaciones, con ayuda de los software de ADS, nos ha permitido poder extraer los resultados medidos en nuestro sistema, tanto real como en simulación y así conseguir que podamos comparar unos resultados con otros. Además, también hemos utilizado el software de MATLAB que ha sido muy importante para poder llevar a cabo las medidas mediante su procesamiento y posterior transformada inversa de Fourier. Otro software que también nos ha permitido estudiar todas las respuestas de la antena ha sido el software de EMPro, en el que se pudo simular una antena impresa con un gran ancho de banda y a partir de sus simulaciones obtener el parámetro S_{11} así como su distribución

de corrientes a las diferentes frecuencias que se disponen y su diagrama de radiación con el cual, se pudo concluir que la antena que se iba a implementar era omnidireccional. Esto nos iba ayudar bastante a la hora de pasar a la implementación y colocación del set-up final, ya que antes de proceder al montaje se llevó a cabo mediante este programa diferentes pruebas con 4 antenas y con diferentes posiciones en las que finalmente, vimos a qué distancia podríamos colocarlas sin que interfirieran unas antenas con otras.

En cuanto al apartado del diseño y montaje de nuestro sistema final, se ha de comentar que gracias a la ayuda de los materiales aportados por el laboratorio de alta frecuencia se ha podido llevar a cabo el montaje del sistema, como por ejemplo el conmutador de alta frecuencia que nos ha simplificado el trabajo ya que gracias a él, el proceso de selección de las 4 antenas de las que disponemos se ha podido realizar automáticamente. Además de los cables de alta frecuencia los cuales nos han permitido el conexionado de todas las partes de nuestro sistema, desde el conmutador de alta frecuencia con las diferentes antenas como con el Analizador de Redes Vectoriales (VNA). Este VNA nos ha permitido obtener y visualizar los diferentes resultados obtenidos con cada una de las antenas mediante los datos previamente introducidos sobre el número de puntos, rango de frecuencia, ancho de banda, etcétera. Por último, se ha de comentar que gracias a los conocimientos adquiridos en el Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación, se ha procedido a llevar a cabo la fabricación de las antenas, así como el diseño y fabricación de la PCB de control compuestos del substrato FR4, además de la programación de cada una de las partes, como Arduino ya que utiliza un lenguaje de programación C++ y MATLAB visto a lo largo del grado.

Para este proyecto como se muestra en el anexo I, se han utilizado una serie de materiales los cuales tienen un coste total de 339,73 € sin I.V.A, en este anexo se ve más detalladamente el precio unitario de cada material. Cabe comentar que, además del presupuesto del material, se han utilizado otros equipos como el analizador de redes vectorial, el kit de calibración y el ordenador portátil que ya se localizaban en el laboratorio de alta frecuencia, estos equipos tienen un coste total de 15.754,00 € sin I.V.A, en el anexo II se puede ver más detalladamente.

5.2. LÍNEAS FUTURAS

En este proyecto han quedado algunas líneas futuras en lo que se podría mejorar o avanzar ciertas partes del mismo en cuanto a sus líneas de investigación como a su diseño. A continuación, se van a comentar estas líneas de mejora.

- En cuanto al diseño de nuestro sistema, se disponen de componentes que trabajan hasta los 6 GHz como el analizador de redes vectorial, conmutador y cables de alta frecuencia (estos cables trabajan hasta los 18 GHz en el rango de frecuencias). Como se ha comentado anteriormente, en este proyecto se dispone de una antena de banda ancha hasta aproximadamente los 25 GHz por lo que, una de las líneas futuras del proyecto es emplear diferentes componentes que trabajen en torno a este rango de frecuencias para poder apreciar mejor las respuestas de las antenas y obtener un mejor funcionamiento.
- Otra de las posibles líneas futuras que se quería llevar a cabo en nuestro sistema es el poder transportarlo, el cual por falta de tiempo no se ha podido llevar a cabo. Esto se quería hacer con ayuda de unos soportes los cuales dispongan de ruedas para poder desplazarlo sin ningún tipo de problemas, esto nos ayudaría a probarlo en cualquier lugar.
- Otra línea futura podría ser, añadirle a nuestro sistema una alarma o luz de emergencia que esté conectada a nuestro set-up para que así, en el momento en el que el bebé deje de respirar salte esta alarma o luz de emergencia y el personal sanitario pueda intervenir rápidamente. Esto se puede conseguir automatizando el sistema a través del programa de Python y MATLAB.
- En cuanto a la línea de investigación me hubiera gustado poder realizar medidas con diferentes tipos de materiales de los cuales no disponíamos y por falta de tiempo no se ha podido llevar a cabo, ya que con el material del plástico (en el caso del muñeco) las respuestas eran peores por lo que tuvimos que colocar un cierto material de aluminio para que mejoraran estas respuestas. También, me hubiera gustado haberlo probado en bebés para ver si somos capaces de detectar el movimiento que, observando los resultados obtenidos, soy optimista ya que el tejido humano tiene mejores propiedades conductoras que el plástico.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Guía básica de interpretación de la radiología de tórax». Disponible en: https://www.neumosur.net/files/Moodle/RADIO-2017/UD1_Fundamentos_Rx-toracica.pdf. [Último acceso: Agosto 2021].
- [2] C. Blanco Angulo, «Sistema no invasivo basado en microondas para la medida de distancias en material biológico. Aplicación en la detección de brain-shift y de tumores en cáncer de mama» 2020.
- [3] V. C. Camargo, S. Honorato da Silva, P. Nohama y M. de Freitas Amorim, «Desarrollo de una tecnología para la detección e interrupción del episodio de apnea prematura» 2009.
- [4] L. Hernández Herrera, «Detección de apnea del sueño a partir de la señal electrocardiográfica» 2013.
- [5] A. Jiménez Gómez, R. Golpe Gómez, R. Carpizo Alfayate, C. Roza Fernández, S. Fernández Rozas y M. M. García Pérez, «Portal Regional da BVS». Disponible en: <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/ibc-3577>. [Último acceso: Agosto 2021].
- [6] «Laboratorio del sueño de Zúrich». Disponible en: <https://www.schlafapnoe.com/es/laboratorio-del-sueno/>. [Último acceso: Agosto 2021].
- [7] «El laboratorio del sueño». *HOY*.
- [8] Á. García Balsa, «Diseño de un sistema radar IQ para la detección de la frecuencia cardiaca y respiratoria.» Valladolid, 2020.
- [9] G. Fernández, «El espectro electromagnético». Disponible en: <http://www.quimicaorganica.org/espectroscopia-visible-ultravioleta/725-el-espectro-electromagnetico.html?tmpl=component>. [Último acceso: Julio 2021].
- [10] «Definición.de». Disponible en: <https://definicion.de/radiofrecuencia/>. [Último acceso: Julio 2021].
- [11] C. Bendito Guerrero, «Vida Teleco» 16 Febrero 2009. Disponible en: <https://vidateleco.wordpress.com/2009/02/16/parametros-s-y-carta-de-smith-parte-1/>. [Último acceso: Julio 2021].

- [12] J. Amado, F. Bianco y G. Naldini, «Caracterización de amplificadores de microondas: de los Parámetros-S a los Parámetros-X» *FCEFYN*, p. 10, 2016.
- [13] S. Kartheek, «Quora» 2017. Disponible en: <https://www.quora.com/What-is-the-mechanism-of-stealth-aircraft>. [Último acceso: Julio 2021].
- [14] C. H. Perdomo Cortes y C. Vivas Homez, «TECNICA MICROSTRIP. CONCEPTOS, APLICACIONES Y SOFTWARE DE DISEÑO». Disponible en: <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/bitstream/handle/123456789/2083/TECNICA%20MICROSTRIP%20CONCEPTOS%2C%20APLICACIONES%20Y%20SOFTWARE%20DE%20DISE%C3%91O.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: Julio 2021].
- [15] «Wikiwand». Disponible en: <https://www.wikiwand.com/es/Microstrip>. [Último acceso: Julio 2021].
- [16] «Mini-Circuits». Disponible en: <https://www.minicircuits.com/pdfs/ZSWA4-63DR+.pdf>. [Último acceso: Agosto 2021].
- [17] «WayBack Machine» 23 Diciembre 2005. Disponible en: <https://web.archive.org/web/20051223172124/http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5965-7917E.pdf>. [Último acceso: Julio 2021].
- [18] «Rohde&Schwarz». Disponible en: https://www.rohde-schwarz.com/es/productos/test-y-medida/analyzers/analizadores-de-redes/pg_64043.html. [Último acceso: 08 2021].
- [19] «KEYSIGHT TECHNOLOGIES» Disponible en: <https://www.keysight.com/es/en/lib/resources/technical-specifications/empro-key-features-1741565.html>. [Último acceso: Julio 2021].
- [20] «Xataka». Disponible en: <https://www.xataka.com/basics/que-arduino-como-funciona-que-puedes-hacer-uno>. [Último acceso: Julio 2021].
- [21] «Arduino». Disponible en: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. [Último acceso: Julio 2021].
- [22] «Arduino UNO». Disponible en: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>. [Último acceso: Julio 2021].
- [23] «Arduino MEGA». Disponible en: <https://store.arduino.cc/arduino-mega-2560-rev3>. [Último acceso: Julio 2021].

- [24] «Arduino NANO». Disponible en: <https://store.arduino.cc/arduino-nano>. [Último acceso: Julio 2021].
- [25] «Escuela de Python». Disponible en: <https://www.escuelapython.com/pycharm-uno-de-los-mejores-ide-para-python/>. [Último acceso: Julio 2021].
- [26] «Rohde&Schwarz». Disponible en: https://www.rohde-schwarz.com/es/producto/znl-pagina-de-inicio-producto_63493-432704.html. [Último acceso: Agosto 2021].
- [27] «Rohde&Schwarz». Disponible en: https://www.rohde-schwarz.com/es/producto/networkanalyzer_acc-pagina-de-inicio-producto_63493-415488.html. [Último acceso: Agosto 2021].
- [28] N. Lalic, «GitHub». Disponible en: <https://github.com/Terrabits/rohdeschwarz>. [Último acceso: Agosto 2021].
- [29] «Mini-Circuits». Disponible en: <https://www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=ZSWA4-63DR%2B>. [Último acceso: Agosto 2021].
- [30] «Mouser Electronics». Disponible en: https://www.mouser.es/ProductDetail/Molex/73251-1352?qs=6HwkpcDWLScmvlAo7PIS1A==&mgh=1&vip=1&gclid=CjwKCAjwyIKJBhBPEiwAu7zllz6my0U28C32ja2sWIHQQLxf3ChTsNm4yBfWLv9EMD0abWKzm7QshoCkJ4QAvD_BwE. [Último acceso: Agosto 2021].
- [31] «Arduino Store». Disponible en: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3-smd>. [Último acceso: Agosto 2021].
- [32] «Mini-Circuits». Disponible en: <https://www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=FL086-24SM%2B>. [Último acceso: Agosto 2021].
- [33] «Farnell». Disponible en: <https://es.farnell.com/pro-signal/psg91452/lead-usb2-0-a-male-a-male-white/dp/3403149>. [Último acceso: Agosto 2021].
- [34] «Farnell». Disponible en: <https://es.farnell.com/amphenol-icc-commercial-products/117dppk09-bk-l717sde09p/conector-sub-d-macho-9pos-soldadura/dp/2920914>. [Último acceso: Agosto 2021].
- [35] B. Schweber, «Digi-Key» 8 Enero 2015. Disponible en:

<https://www.digikey.com/es/articles/semiconductor-rf-switches-small-but-high-performing-circuit-components>. [Último acceso: Julio 2021].

[36] «Digi-Key». Disponible en: <https://www.digikey.es/es/resources/conversion-calculators/conversion-calculator-led-series-resistor>. [Último acceso: Agosto 2021].

[37] «Naylamp Mechatronics». Disponible en: <https://naylampmechatronics.com/microcontroladores/262-atmega328p-smd.html>. [Último acceso: Agosto 2021].



ANEXOS

ANEXO I: PRESUPUESTO DE LOS MATERIALES

En este anexo se van a adjuntar los precios unitarios y totales del material que ha sido utilizado para este proyecto.

Material	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total (Sin I.V.A)
Substrato FR4 (1,52 mm) 10x10cm	1	4,23 €	4,23 €
Substrato FR4 (0,4 mm)	1	3,46 €	3,46 €
Conectores para las antenas	4	3,79 €	15,16 €
Cables de alta frecuencia 24"	5	19,95 €	99,75 €
Cable USB	1	1,84 €	1,84 €
Conector D-Sub9 + Carcasa trasera	1	2,68 €	2,68 €
Conmutador de alta frecuencia	1	169,95 €	169,95 €
Arduino Uno Rev3 SMD	1	19,00 €	19,00 €
LEDs de 100 kΩ	3	0,40 €	1,19 €
Resistencias	6	0,09 €	0,54 €
Condensadores de 1000 nF	2	0,18 €	0,36 €
Tira de pines 32 contactos	2	4,88 €	9,76 €
Regulador de tensión	1	0,55 €	0,55 €
Conector USB	1	5,06 €	5,06 €
Cristal de metacrilato (m ²)	1	1,20 €	1,20 €
Estructura de madera	1	5,00 €	5,00 €
		TOTAL	339,73 €

ANEXO II: PRESUPUESTO DEL EQUIPAMIENTO NECESARIO

En este anexo se van a adjuntar los precios totales equipamiento que ha utilizado para este proyecto.

Material	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total (Sin I.V.A)
Analizador de Redes Vectorial (VNA)	1	13.280,00 €	13.280,00 €
Kit de calibración	1	2.125,00 €	2.125,00 €
Ordenador portátil ASUS R510J	1	349,00 €	349,00 €
		TOTAL	15.754,00 €



ANEXO III: DATASHEET DEL CONMUTADOR DE ALTA FRECUENCIA



Solid state

SP4T RF Switch

ZSWA4-63DR+

50 Ω Absorptive RF switch 1 to 6000 MHz
Internal driver, Single Supply Voltage 2.3V to 3.6V

The Big Deal

- High isolation, 57 dB up to 2.7 GHz
- High linearity, IP3 +58 dBm at 1900 MHz
- High speed switching (320 ns)
- High power handling (+33 dBm)
- Low DC Voltage 2.3 to 3.6 V

Applications

- 3G/4G wireless infrastructure
- Automated Test equipment
- Switch matrices
- Defense

Product Overview

Mini-Circuits' ZSWA4-63DR+ is an SP4T absorptive, solid-state switch with an internal driver, designed for wideband operation from 1 MHz to 6 GHz supporting many applications requiring high performance from 3G/4G infrastructure to automated test equipment and various defense applications. The switch provides excellent isolation, fast switching speed and high linearity. It operates on a single 2.3 to 3.6V supply.

The switch comes housed in a rugged, compact, aluminum alloy case (2.00 x 1.5 x 0.6") with 5 SMA-F connectors at all RF ports and a 9-pin D-sub connector for DC power and control signals.



Case Style: QV2425

Connectors	Order P/N
SMA	ZSWA4-63DR+
	ZSWA4-63DRB+(with bracket)

RoHS Compliant

See our web site for RoHS Compliance methodologies and qualifications

Key Features

Feature	Advantages
Wideband, 1 to 6000 MHz	One model can be used in many applications, saving component count. Also ideal for wideband applications such as military and instrumentation.
Absorptive switch	In the off condition, RF output ports which are not switched ON are terminated into 50 Ω . This enables proper impedance termination of the circuitry following the RF output ports, preventing any unintended action such as oscillation.
High isolation, 58 dB @ 2700 MHz	High isolation significantly reduces leakage of power into OFF ports.
High linearity, <ul style="list-style-type: none">• +58 dBm IIP3• +97 dBm IIP2	High linearity minimizes unwanted intermodulation products which are difficult or impossible to filter in multi-carrier environments, or in the presence of strong interfering signal from adjacent circuitry or received by antenna.
Two or three pin control logic	Provides increased flexibility, allowing the model to be operated using two pin control, or three pin control if All Off state is required (RF COM not connected to any port).
Low operating power <ul style="list-style-type: none">• 2.3 to 3.6V• 0.1mA typ.	Allows the switch to be used in battery-operated systems

Electrical Specifications @ +25°C, Vdd=3.3V unless specified otherwise

Parameter	Port	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units	
Operating Frequency			1		6000	MHz	
Insertion Loss	RF COM to any active port	1-2700 MHz	-	1.3	2	dB	
		2700-5000 MHz	-	1.7	2.4		
		5000-6000 MHz	-	2.2	3		
Isolation ¹	Between ports RF1,RF2,RF3, and RF4 @ All states	1-1000 MHz	51	73	-	dB	
		1000-2700 MHz	43	57	-		
		2700-4000 MHz	37	48	-		
		4000-6000 MHz	26	36	-		
	RF COM to any terminated port @ All states	1-1000 MHz	55	80	-		
		1000-2700 MHz	44	58	-		
		2700-4000 MHz	37	45	-		
	RF COM to any terminated port	@ Active states	4000-6000 MHz	27	36		-
		@ All Off state	4000-6000 MHz	24	35		-
VSWR	RF COM port ^{2,3}	1-4000 MHz	-	1.25	-	:1	
		4000-6000 MHz	-	1.3	-		
	Any port connected to RF COM	1-4000 MHz	-	1.25	-		
		4000-6000 MHz	-	1.3	-		
	Any terminated port ³	1 to 6000 MHz	-	1.25	-		
Power Input @0.1 dB Compression ⁴	RF COM to any active port	900 MHz	-	+35	-	dBm	
IP2 ⁵	RF COM to any active port	1900 MHz	-	+97	-	dBm	
IP3 ⁵	RF COM to any active port	1900 MHz	-	+58	-	dBm	
Operating RF Input Power @ -40° to +85°	Any terminated (OFF) port ³	1-30 MHz	-	-	See figure 1	dBm	
		30-6000 MHz	-	-	+24		
	RF COM @ All Off state	1-30 MHz	-	-	See figure 1		
		30-6000 MHz	-	-	+24		
	Through path	1-30 MHz	-	-	See figure 1		
		30-6000 MHz	-	-	+33		

¹ See truth table on page 3 for list of states.

² VSWR defined for RF COM only at active state.

³ RF COM port is not terminated internally in All Off state.

⁴ Note absolute maximum ratings in table on page 3.

⁵ IP2 and IP3 are tested with +15 dBm per tone.

DC Electrical Specifications

Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
V _{DD} , Supply Voltage	2.3	—	3.6	V
Supply Current ⁶	—	0.1	0.4	mA
Control Voltage Low	0	—	0.2xVDD (max 0.6V)	V
Control Voltage High	0.8xVDD	—	5.5	V
Control Current (per pin)	—	0.015	—	mA

⁶ Supply current may reach 3 mA at startup

Switching Parameters

Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Switching time 50% trigger to 10/90% signal level	Pulse rate =12.5 kHz, RF freq. =501 MHz	—	320	400	ns
Video feedthrough @ all ports	V _{ctrl} =0/3V, Duty Cycle= 50%	—	0.1	—	mVpp
Non harmonic spur		—	-120	—	dBm
Switching frequency		—	—	12.5	kHz

Absolute Maximum Ratings ^{7,8}

Operating Temperature	-40°C to 85°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C
Vdd, supply voltage.	-5V to 3.6V
Control voltage	-0.3V to 5.5V
RF input power 1-30 MHz	See Figure 1
RF input power 30-6000 MHz	+34 dBm
DC voltage @ RF Ports	8V
ESD @ (HBM) D-SUB pins	1.5kV
ESD @ (HBM) RF ports	4kV

⁷. Operation of this device above any of these conditions may cause permanent damage.

⁸. Operation in the range between the max operating power and the absolute maximum rating for extended periods of time may result in reduced life and reliability.

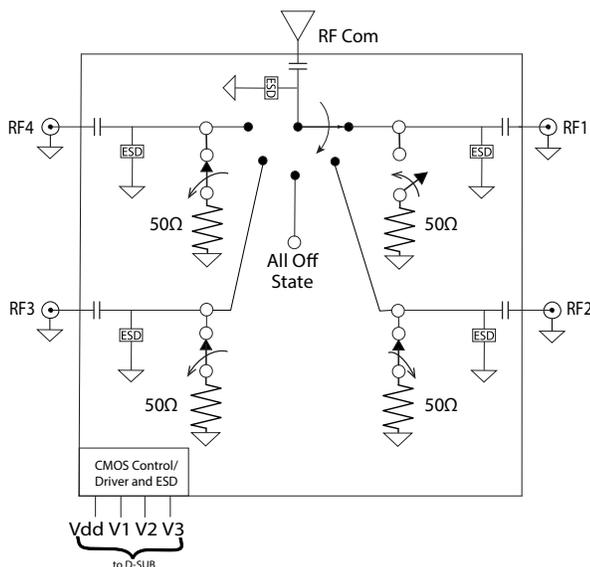
Truth Table ^{9,10}

State	V3	V2	V1	RF COM-RF1	RF COM-RF2	RF COM-RF3	RF COM-RF4
1	Low	Low	Low	OFF	OFF	OFF	ON
2	Low	Low	High	ON	OFF	OFF	OFF
3	Low	High	Low	OFF	ON	OFF	OFF
4	Low	High	High	OFF	OFF	ON	OFF
5	High	Low	Low	OFF	OFF	OFF	ON
6	High	Low	High	All Off (disconnected state)			
7	High	High	Low	All Off (disconnected state)			
8	High	High	High	Unsupported			

⁹. All controls have internal 100 kΩ pull down resistor.

¹⁰. For two pin logic use V1 & V2 with V3 either open or GND.

Simplified Schematic



Maximum Power at low frequency

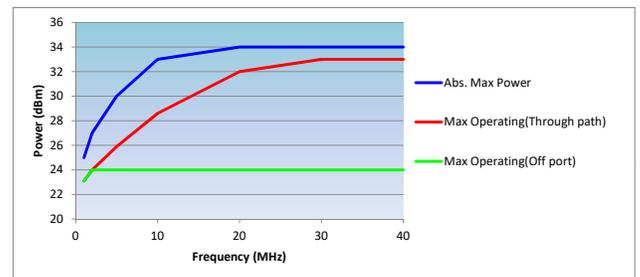
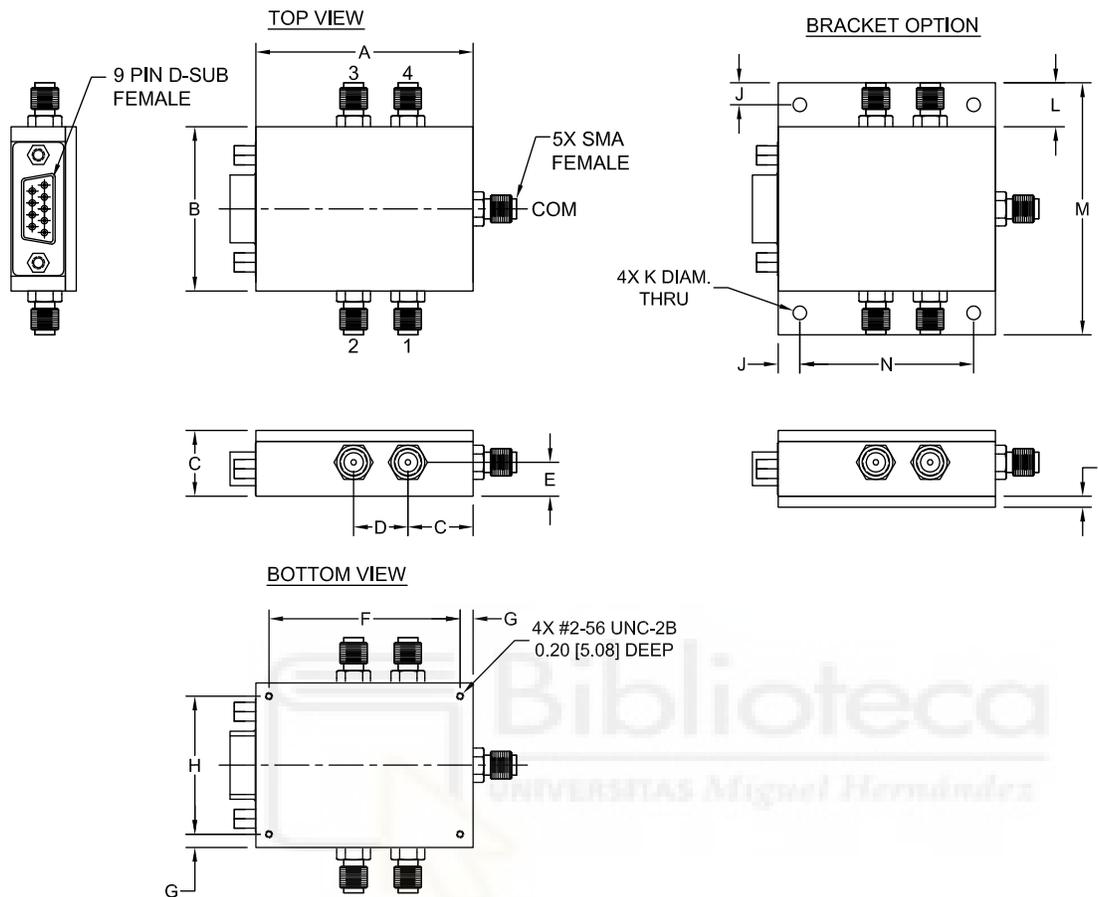


Figure 1

Outline Drawing (QV2425)



Outline Dimensions ($\frac{\text{inch}}{\text{mm}}$)

A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	WT. GRAMS
2.00	1.50	.60	.500	.31	1.760	.120	1.260	.200	.125	.40	2.30	1.600	.100	70
50.8	38.1	15.24	12.7	7.87	44.7	3.05	32.0	5.08	3.18	10.16	58.4	40.64	2.54	

Connections

RF ports (RF1, RF2, RF3, RF4, RF COM)	(SMA female)
Supply & control port*	(9 pin D-Sub female)

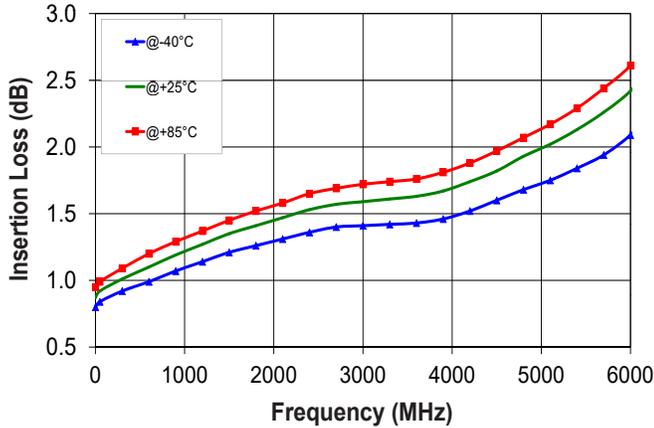
*9 Pin D-Sub Pin Connections

PIN Number	Function
1	NC
2	V3
3	V2
4	V1
5	Vdd
6 - 9	GND ¹¹

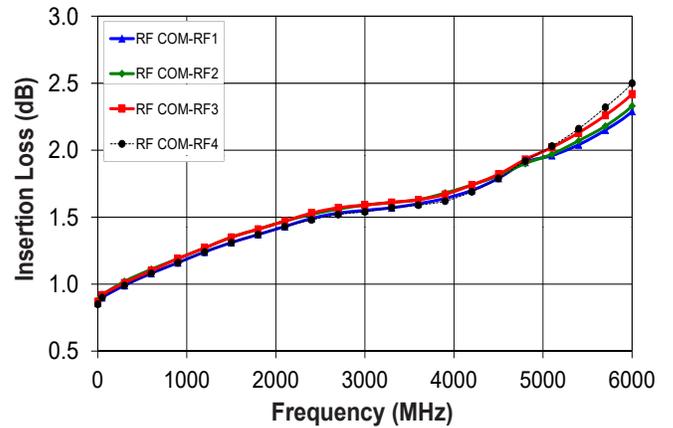
¹¹. Only one of the GND pins is required for proper operation

Typical Performance Curves

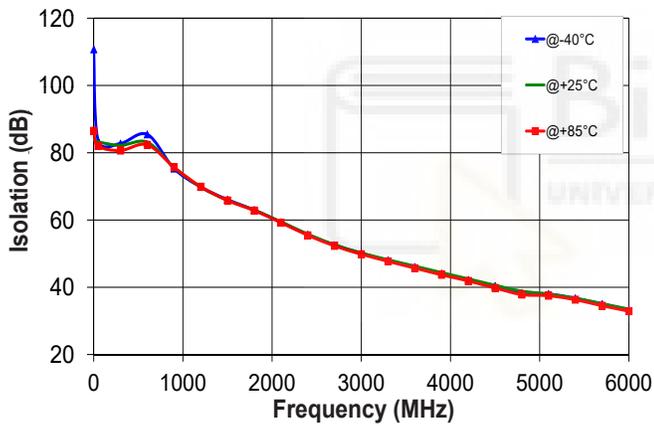
Insertion Loss over Temperature



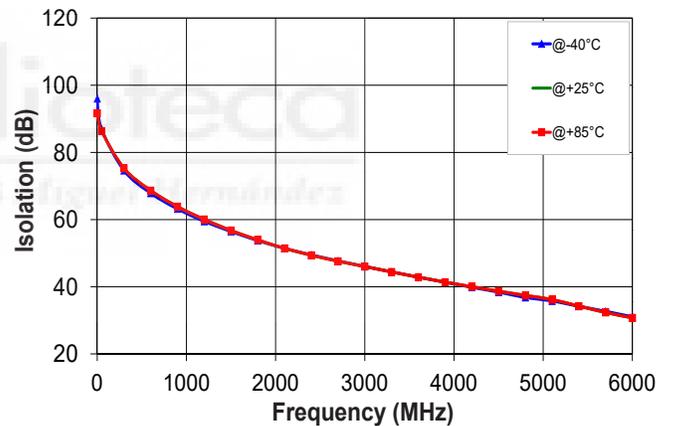
Insertion Loss at RF1- RF4 vs. Frequency



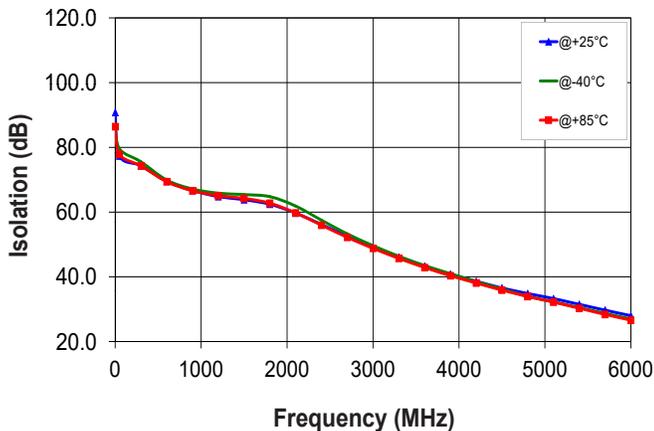
Isolation RF Com to RF1 with RF4 active



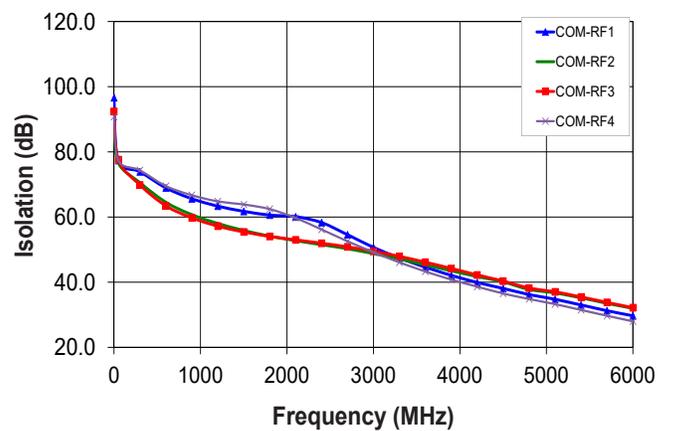
Isolation RF Com to RF4 with RF3 active



Isolation RF COM to RF4 at All Off State

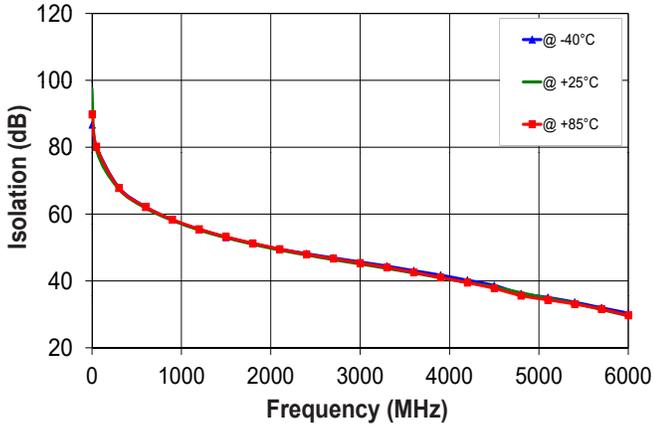


Isolation at All Off State

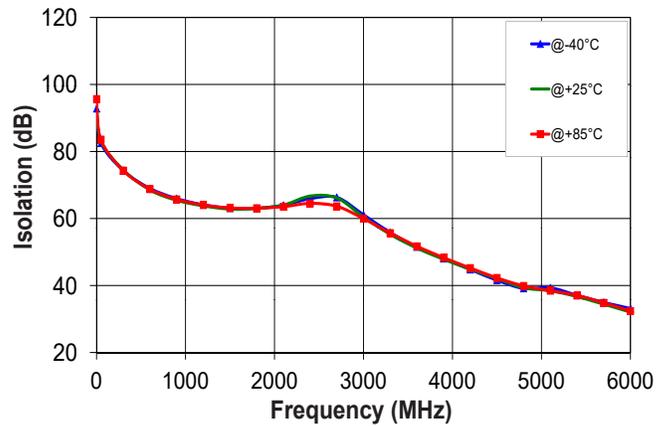


Typical Performance Curves (Continued)

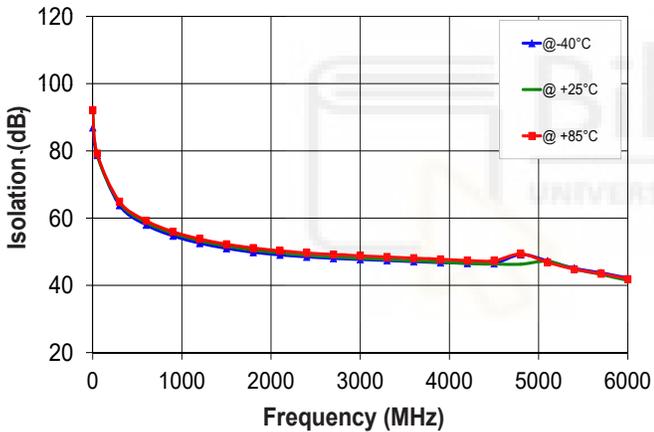
Isolation RF2 to RF3 with RF3 active



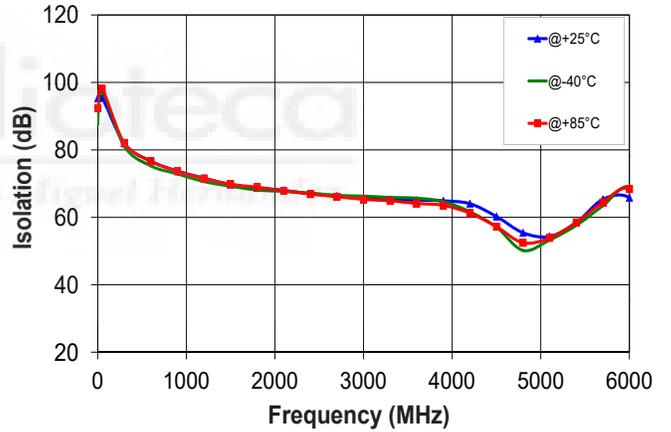
Isolation RF1 to RF4 with RF1 active



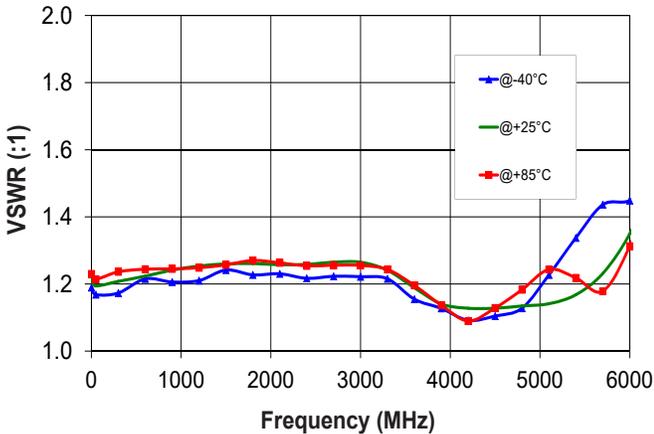
Isolation RF2 to RF3 with RF4 active



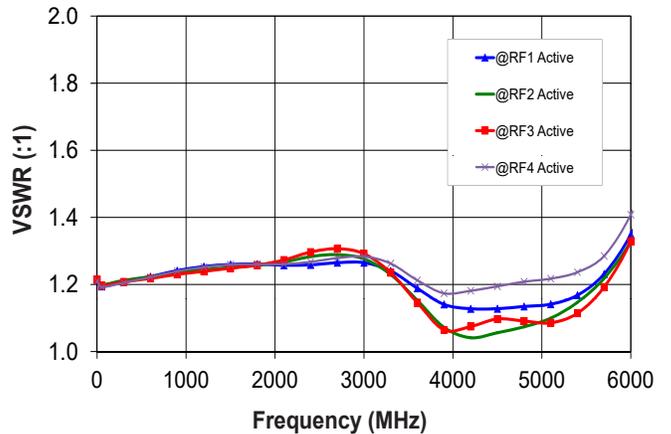
Isolation RF2 to RF4 with RF1 active



VSWR RF Com over Temperature

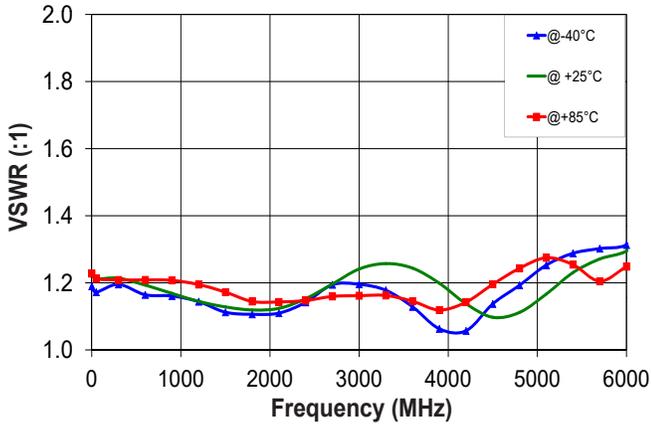


VSWR RF Com vs Frequency

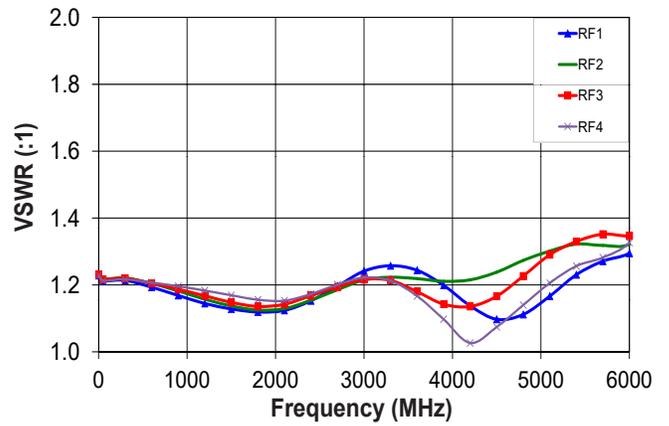


Typical Performance Curves (Continued)

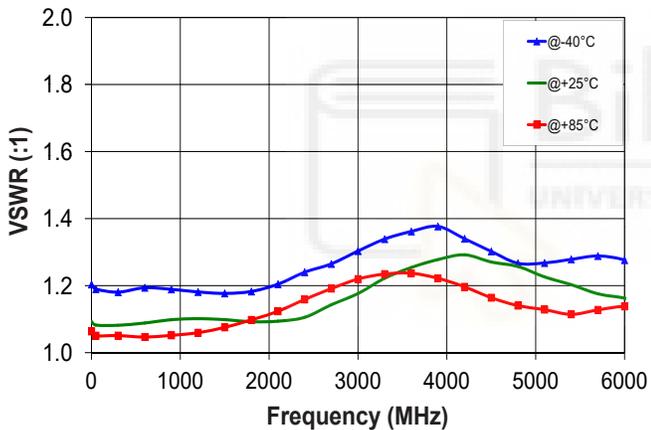
VSWR active Port over Temperature



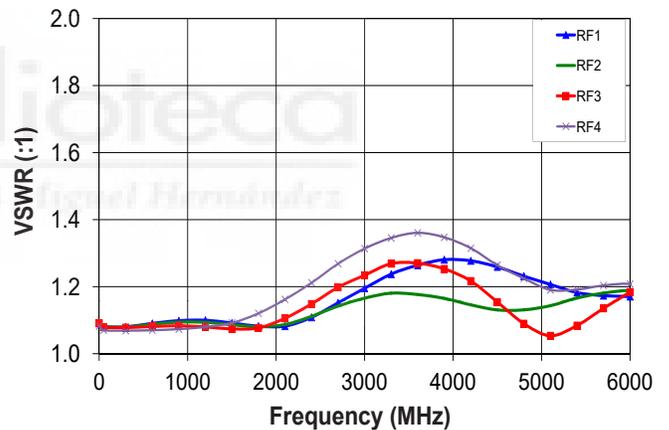
VSWR active Port vs Frequency



VSWR internal Term. over Temperature



VSWR terminated port vs. Frequency



ANEXO IV: FRAGMENTO DEL DATASHEET DEL REGULADOR DE TENSION



TLV733P Capacitor-Free, 300-mA, Low-Dropout Regulator in 1-mm x 1-mm X2SON Package

1 Features

- Input Voltage Range: 1.4 V to 5.5 V
- Stable Operation With or Without Capacitors
- Foldback Overcurrent Protection
- Packages:
 - 1.0-mm x 1.0-mm X2SON (4)
 - SOT-23 (5)
- Very Low Dropout: 125 mV at 300 mA (3.3 V_{OUT})
- Accuracy: 1% typical, 1.4% maximum
- Low I_Q: 34 μA
- Available in Fixed-Output Voltages: 1.0 V to 3.3 V
- High PSRR: 50 dB at 1 kHz
- Active Output Discharge

2 Applications

- Tablets
- Smartphones
- Notebook and Desktop Computers
- Portable Industrial and Consumer Products
- WLAN and Other PC Add-On Cards
- Camera Modules

3 Description

The TLV733 series of low-dropout linear regulators (LDOs) are ultra-small, low quiescent current LDOs that can source 300 mA with good line and load transient performance. These devices provide a typical accuracy of 1%.

The TLV733 series is designed with a modern capacitor-free architecture to ensure stability without an input or output capacitor. The removal of the output capacitor allows for a very small solution size, and can eliminate inrush current at startup. However, the TLV733 series is also stable with ceramic output capacitors if an output capacitor is necessary. The TLV733 also provides foldback current control during device power-up and enabling if an output capacitor is used. This functionality is especially important in battery-operated devices.

The TLV733 provides an active pull-down circuit to quickly discharge output loads when disabled.

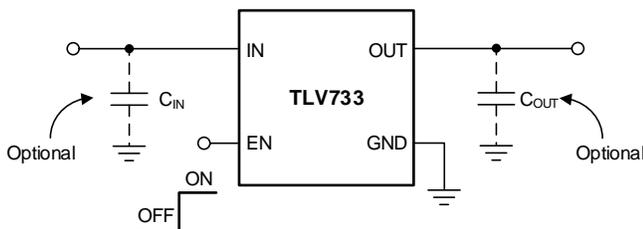
The TLV733 series is available in standard DBV (SOT-23) and DQN (X2SON) packages.

Device Information⁽¹⁾

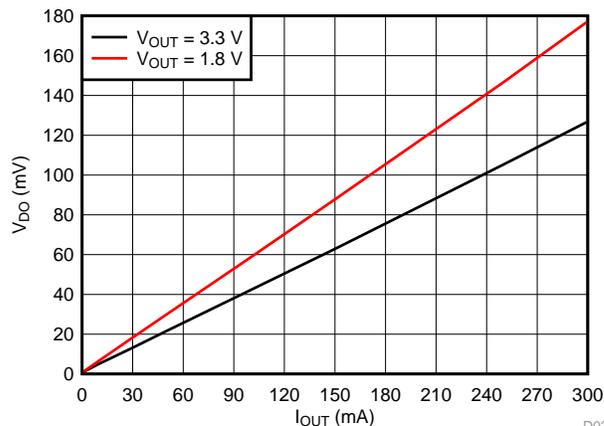
PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
TLV733P	SOT-23 (5)	2.90 mm x 1.60 mm
	X2SON (4)	1.00 mm x 1.00 mm

(1) For all available packages, see the package option addendum at the end of the data sheet.

Typical Application Circuit



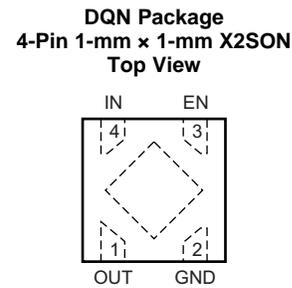
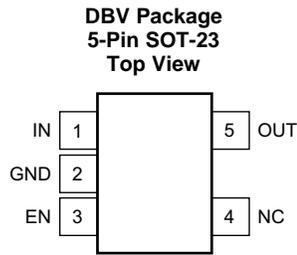
Dropout Voltage vs Output Current



D020



5 Pin Configuration and Functions



Pin Functions

NAME	PIN NO.		I/O	DESCRIPTION
	DQN	DBV		
EN	3	3	I	Enable pin. Drive EN greater than $V_{EN(HI)}$ to turn on the regulator. Drive EN less than $V_{EN(LO)}$ to put the LDO into shutdown mode.
GND	2	2	—	Ground pin
IN	4	1	I	Input pin. A small capacitor is recommended from this pin to ground. See the Input and Output Capacitor Selection section for more details.
NC	N/A	4	—	No internal connection
OUT	1	5	O	Regulated output voltage pin. For best transient response, use a small 1- μ F ceramic capacitor from this pin to ground. See the Input and Output Capacitor Selection section for more details.
Thermal pad	—	—	—	The thermal pad is electrically connected to the GND node. Connect to the GND plane for improved thermal performance.

6 Specifications

6.1 Absolute Maximum Ratings

over operating junction temperature range (unless otherwise noted); all voltages are with respect to GND⁽¹⁾

		MIN	MAX	UNIT
Voltage	V _{IN}	-0.3	6.0	V
	V _{EN}	-0.3	V _{IN} + 0.3	
	V _{OUT}	-0.3	3.6	
Current	I _{OUT}	Internally limited		A
Output short-circuit duration		Indefinite		
Temperature	Operating junction, T _J	-40	150	°C
	Storage, T _{stg}	-65	160	

(1) Stresses beyond those listed under *Absolute Maximum Ratings* may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, which do not imply functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under *Recommended Operating Conditions*. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

6.2 ESD Ratings

			VALUE	UNIT
V _(ESD)	Electrostatic discharge	Human-body model (HBM), per ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 ⁽¹⁾	±2000	V
		Charged-device model (CDM), per JEDEC specification JESD22-C101 ⁽²⁾	±500	

(1) JEDEC document JEP155 states that 500-V HBM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

(2) JEDEC document JEP157 states that 250-V CDM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

6.3 Recommended Operating Conditions

over operating junction temperature range (unless otherwise noted)

	MIN	NOM	MAX	UNIT
Input range, V _{IN}	1.4		5.5	V
Output range, V _{OUT}	1.0		3.3	V
Output current, I _{OUT}	0		300	mA
Enable range, V _{EN}	0		V _{IN}	V
Junction temperature, T _J	-40		125	°C

6.4 Thermal Information

THERMAL METRIC ⁽¹⁾		TLV733P		UNIT
		DQN (X2SON)	DBV (SOT-23)	
		4 PINS	5 PINS	
R _{θJA}	Junction-to-ambient thermal resistance	218.6	228.4	°C/W
R _{θJC(top)}	Junction-to-case (top) thermal resistance	164.8	151.5	°C/W
R _{θJB}	Junction-to-board thermal resistance	164.9	55.8	°C/W
ψ _{JT}	Junction-to-top characterization parameter	5.6	31.4	°C/W
ψ _{JB}	Junction-to-board characterization parameter	163.9	54.8	°C/W
R _{θJC(bot)}	Junction-to-case (bottom) thermal resistance	131.4	N/A	°C/W

(1) For more information about traditional and new thermal metrics, see the [Semiconductor and IC Package Thermal Metrics application report](#).

6.5 Electrical Characteristics

At operating temperature range ($T_J = -40^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$), $V_{IN} = V_{OUT}(\text{nom}) + 0.5\text{ V}$ or 2.0 V (whichever is greater), $I_{OUT} = 1\text{ mA}$, $V_{EN} = V_{IN}$, and $C_{IN} = C_{OUT} = 1\text{ }\mu\text{F}$ (unless otherwise noted). All typical values at $T_J = 25^\circ\text{C}$.

PARAMETER		TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
V_{IN}	Input voltage			1.4		5.5	V
	DC output accuracy	$T_J = 25^\circ\text{C}$		-1%		1%	
		$-40^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$		-1.4%		1.4%	
UVLO	Undervoltage lockout	V_{IN} rising			1.3	1.4	V
		V_{IN} falling			1.25		
$\Delta V_{O(\Delta V)}$	Line regulation	$\Delta VI = V_{IN}(\text{nom})$ to $V_{IN}(\text{nom}) + 1$			1		mV
$\Delta V_{O(\Delta IO)}$	Load regulation	$\Delta IO = 1\text{ mA}$ to 300 mA	DQN package		16		mV
			DBV package		25		
V_{DO}	Dropout voltage ⁽¹⁾	$V_{OUT} = 0.98 \times V_{OUT}(\text{nom})$, $I_{OUT} = 300\text{ mA}$	$V_{OUT} = 1.1\text{ V}$, $-40^\circ\text{C} \leq T_J \leq 85^\circ\text{C}$			460	mV
			$1.2\text{ V} \leq V_{OUT} < 1.5\text{ V}$, $-40^\circ\text{C} \leq T_J \leq 85^\circ\text{C}$			420	
			$1.5\text{ V} \leq V_{OUT} < 1.8\text{ V}$, $-40^\circ\text{C} \leq T_J \leq 85^\circ\text{C}$			370	
			$1.8\text{ V} \leq V_{OUT} < 2.5\text{ V}$, $-40^\circ\text{C} \leq T_J \leq 85^\circ\text{C}$			270	
			$2.5\text{ V} \leq V_{OUT} < 3.3\text{ V}$, $-40^\circ\text{C} \leq T_J \leq 85^\circ\text{C}$			260	
			$V_{OUT} = 3.3\text{ V}$, $-40^\circ\text{C} \leq T_J \leq 85^\circ\text{C}$		125	220	
			$1.2\text{ V} \leq V_{OUT} < 1.5\text{ V}$, $-40^\circ\text{C} \leq T_J \leq 125^\circ\text{C}$			450	
			$1.5\text{ V} \leq V_{OUT} < 1.8\text{ V}$, $-40^\circ\text{C} \leq T_J \leq 125^\circ\text{C}$			400	
			$1.8\text{ V} \leq V_{OUT} < 2.5\text{ V}$, $-40^\circ\text{C} \leq T_J \leq 125^\circ\text{C}$			300	
			$2.5\text{ V} \leq V_{OUT} < 3.3\text{ V}$, $-40^\circ\text{C} \leq T_J \leq 125^\circ\text{C}$			290	
			$V_{OUT} = 3.3\text{ V}$, $-40^\circ\text{C} \leq T_J \leq 125^\circ\text{C}$		125	270	
I_{GND}	Ground pin current	$I_{OUT} = 0\text{ mA}$			34	60	μA
I_{SHDN}	Shutdown current	$V_{EN} \leq 0.35\text{ V}$, $2.0\text{ V} \leq V_{IN} \leq 5.5\text{ V}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$			0.1	1	μA
PSRR	Power-supply rejection ratio	$V_{OUT} = 1.8\text{ V}$, $I_{OUT} = 300\text{ mA}$	$f = 100\text{ Hz}$		68		dB
			$f = 10\text{ kHz}$		35		
			$f = 100\text{ kHz}$		28		
V_n	Output noise voltage	BW = 10 Hz to 100 kHz, $V_{OUT} = 1.8\text{ V}$, $I_{OUT} = 10\text{ mA}$			120		μV_{RMS}
$V_{EN(\text{HI})}$	EN pin high voltage (enabled)			0.9			V
$V_{EN(\text{LO})}$	EN pin low voltage (disabled)					0.35	V
I_{EN}	EN pin current	$V_{EN} = 5.5\text{ V}$			0.01		μA
t_{STR}	Startup time	Time from EN assertion to $98\% \times V_{OUT}(\text{nom})$, $V_{OUT} = 1.0\text{ V}$, $I_{OUT} = 0\text{ mA}$			250		μs
		Time from EN assertion to $98\% \times V_{OUT}(\text{nom})$, $V_{OUT} = 3.3\text{ V}$, $I_{OUT} = 0\text{ mA}$			800		
	Pull-down resistor	$V_{IN} = 2.3\text{ V}$			120		Ω
I_{LIM}	Output current limit			360		700	mA
I_{OS}	Short-circuit current limit	V_{OUT} shorted to GND, $V_{OUT} = 1.0\text{ V}$			150		mA
		V_{OUT} shorted to GND, $V_{OUT} = 3.3\text{ V}$			170		
T_{sd}	Thermal shutdown	Shutdown, temperature increasing			160		$^\circ\text{C}$
		Reset, temperature decreasing			140		

(1) Dropout voltage for the TLV73310P is not valid at room temperature. The device engages undervoltage lockout ($V_{IN} < UVLO_{\text{FALL}}$) before the dropout condition is met.