UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

DEPARTAMENTO DE ESTRUCTURA DE LA MATERIA, FÍSICA TÉRMICA Y ELECTRÓNICA



TRABAJO DE FIN DE GRADO

Código TFG: EMFTEL-03

Diseño e implementación de un radar de efecto Doppler

Desing and implementation of a Doppler effect radar

Noelia de la Plaza Lafuente

Supervisor/es: Pedro Antoranz Canales

Grado en Ingeniería Electrónica de Comunicaciones
Curso académico 2023-2024
Convocatoria Julio

Autorización de difusión

Plaza Lafuente, Noelia de la

Madrid, a 30 de enero de 2024

Los abajo firmantes, matriculados en el Grado de Ingeniería Electrónica de Comunicaciones de la Facultad de Ciencias Físicas, autorizan a la Universidad Complutense de Madrid (UCM) a difundir y utilizar con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a su autor el presente Trabajo Fin de Grado: "Diseño e implementación de un radar de efecto Doppler", realizado durante el curso académico 2023-2024 bajo la dirección de Pedro Antoranz Canales en el Departamento de Estructura de la Materia, física térmica y electrónica, y a la Biblioteca de la UCM a depositarlo en el Archivo Institucional E-Prints Complutense con el objeto de incrementar la difusión, uso e impacto del trabajo en Internet y garantizar su preservación y acceso a largo plazo.

The undersigned, enrolled in the Degree of Electronic Engineering of Communications of the Faculty of Physical Sciences, authorize the Universidad Complutense de Madrid (UCM) to disseminate and use for academic, non-commercial purposes and expressly mentioning the the present Final Degree Project: "Design and implementation of a Doppler effect radar", carried out during the academic year 2023-2024 under the direction of Pedro Antoranz Canales in the Department of STRUCTURE OF MATTER, THERMAL PHYSICS AND ELECTRONICS, and to the the UCM Library to deposit it in the E-Prints Complutense Institutional Archive with the aim of increasing the dissemination, use and impact of the work on the Internet and guarantee its long-term preservation and access.



Esta obra está bajo una
Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID

Declaración Responsable sobre Autoría y Uso Ético de Herramientas de Inteligencia Artificial (IA)

Yo, **NOELIA DE LA PLAZA LAFUENTE**

Con DNI/NIE/PASAPORTE: 51011949-L

declaro de manera responsable que el/la presente:

- [X] Trabajo de Fin de Grado (TFG)
- [ ] Trabajo de Fin de Máster (TFM)
- [ ] Tesis Doctoral

Titulado/a en

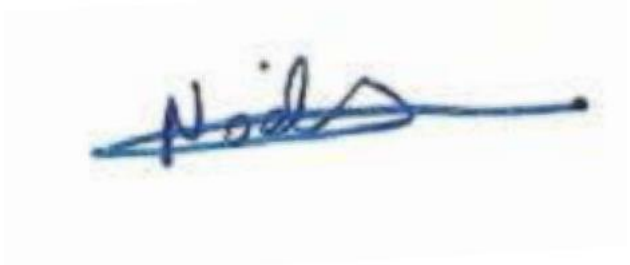
INGENIERÍA ELECTRÓNICA DE COMUNICACIONES.

es el resultado de mi trabajo intelectual personal y creativo, y ha sido elaborado de acuerdo con los principios éticos y las normas de integridad vigentes en la comunidad académica y, más específicamente, en la Universidad Complutense de Madrid.

Soy, pues, autor del material aquí incluido y, cuando no ha sido así y he tomado el material de otra fuente, lo he citado o bien he declarado su procedencia de forma clara -incluidas, en su caso, herramientas de inteligencia artificial-. Las ideas y aportaciones principales incluidas en este trabajo, y que acreditan la adquisición de competencias, son mías y no proceden de otras fuentes o han sido reescritas usando material de otras fuentes.

Asimismo, aseguro que los datos y recursos utilizados son legítimos, verificables y han sido obtenidos de fuentes confiables y autorizadas. Además, he tomado medidas para garantizar la confidencialidad y privacidad de los datos utilizados, evitando cualquier tipo de sesgo o discriminación injusta en el tratamiento de la información.

En Madrid a 25 de junio de 2024



Diseño e implementación de un radar de efecto Doppler

Resumen:

En este trabajo de Fin de grado se ha desarrollado el diseño e implementación de un radar de Efecto Doppler, el cual puede determinar la velocidad de un objeto en movimiento, es el sistema que se emplea en los radares de tramo. Se han diseñado y construido uno a uno cada uno de los componentes de esta implementación, posteriormente, si el tiempo lo permite, se probarán tanto individualmente como en su conjunto, siguiendo siempre las reglas de diseño para asegurar su correcto funcionamiento.

A parte del diseño e implementación de los componentes, se cuenta con un sistema cuya entrada es una señal analógica con una frecuencia determinada y cuya salida es otra señal analógica con una frecuencia determinada, siendo la relación lineal entre estas frecuencias la velocidad que se desea obtener. Para trabajar con estas señales se ha introducido, como bloque de conversión y muestreo, una placa de Arduino UNO REV3 con pantalla LCD programada acordemente para caracterizar la velocidad y devolverla por la pantalla LCD.

Abstract:

This work describes the design and implementation of a Doppler effect Radar, which can determine the speed of a moving object, this is the kind of system used in stretch radars. Each of the components of this implementation have been designed and were there enought time, build one by one, then tested both individually and as a whole, always following the design rules to ensure the proper operation.

After the design and implementation of each component, the final result is a system whose input is an analog signal with a certain frequency and whose output is another analog signal with a certain frequency, being the linear relation between these frequencies the measurement of the speed to be obtain. To be able to work with these signals, an Arduino UNO REV3 board with LCD display programmed accordingly to characterize the speed and return it through the LCD display has been introduced as a conversion and sampling block

Índice general

Página

Índice de figuras **2**

Índice de tablas **3**

Glosario de Términos **4**

1. Introducción **5**
1.1. Motivación . . . 5
1.2. Objetivos . . . 6
1.3. Relación con las competencias de la titulación . . . 6

2. Radar de Efecto Doppler **8**
2.1. Historia del radar . . . 8
2.2. Funcionamiento del radar . . . 9
2.2.1. Efecto Doppler . . . 11

3. Diseño **14**
3.1. Frecuencia de Trabajo . . . 14
3.2. Organización del diseño . . . 15

4. Etapa de transmisión **17**
4.1. Generador de de RF . . . 17
4.2. Divisor de tensión . . . 19
4.2.1. Diseño . . . 20
4.2.2. Montaje y Pruebas . . . 23
4.3. Antena en transmisión . . . 27
4.3.1. Diseño . . . 27
4.3.2. Montaje y Pruebas . . . 31
4.4. Amplificador de potencia . . . 32

5. Etapa de Recepción **35**
5.1. Antena en Recepción . . . 35
5.1.1. Diseño . . . 35
5.2. Pre-Amplificado, Amplificador de alta frecuencia y amplificador en banda base 35
5.2.1. Elección y diseño de la red de adaptación . . . 36
5.3. Mezclador . . . 40
5.3.1. Diseño . . . 41
5.4. Filtro Paso Baja . . . 45
5.4.1. Diseño . . . 45

6. Procesamiento de datos **49**

7. Conclusiones y Trabajo Futuro **51**
7.1. Conclusiones 51
7.1.1. Problemas encontrados 51
7.1.2. Resultados obtenidos 51
7.2. Trabajo Futuro 52
7.3. Diagrama de Grant 52

Bibliografía **54**

A. Diseño en PCB **56**

B. Código de Recepción en Arduino **58**

Índice de figuras

2.1. Chain Home [10][11] 9
2.2. Funcionamiento de un radar básico[14] 10
2.3. Esquema de un radar de onda pulsada[15] 11
2.4. Efecto Doppler[17] 12
2.5. Cambio de fase en la señal receptora[13] 13

3.1. Diagrama de un radar mono-estable de onda continua[17] 15

4.1. Diseño interno de la placa STM32F411RE 17
4.2. Código de Labview 18
4.3. Salida por terminal 18
4.4. Geometria de un Puente de Wilkinson 20
4.5. Diseño del sustrato a emplear 21
4.6. Diseño del puente sin optimizar 22
4.7. Optimizador 22
4.8. Resultado de la simulación 22
4.9. Valores a emplear 23
4.10. Contruccion final de la placa 24
4.11. Resultados del puente real 26
4.12. Impedancias de entrada y salida del sistema 26
4.13. Diseño de una antena yagi 28
4.14. *P.Viezbicke de National Bureau of Standrds* en *Yagi Antenna Design*, 1968. . 29
4.15. Patrón de radiación frente al diseño de la antena 30
4.16. Resultados de la simulación 30
4.17. Diseño de la antena a realizar 31
4.18. Diseño final 32
4.19. Antenas resultantes 32
4.20. Funcionamiento ideal del atenuador 33
4.21. Funcionamiento real del atenuador 34
4.22. Funcionamiento del amplificador de potencia 34

5.1. Ganancia máxima de los amplificadores propuestos (MAG) 36
5.2. Estabilidad de los amplificadores propuestos (factor K) 37
5.3. Estabilidad de los amplificadores propuestos (factor B) 37
5.4. Estabilidad de los amplificadores propuestos 38
5.5. Estabilidad y ganancias a la salida y la entrada 39
5.6. Ganancia a la salida del circuito completo 40
5.7. Cirucito final 40
5.8. Funcionamiento del mezclador 41
5.9. Productos de intermodulación [27] 41
5.10. Red en H circuito 42

5.11. Red en H resultados 43
5.12. Diseño del mezclador 44
5.13. Comportamiento de un filtro paso bajo (Tipo Butterworth) 45
5.14. Coeficientes del filtro 46
5.15. Bode del filtro 47
5.16. Pérdidas de retorno 47
5.17. Diseño final del filtro 48

6.1. Definición de envolvente 49
6.2. Pinout Uno con LCD, la señal entra por el pin A0 49
6.3. Emulador de radar de efecto Doppler[32] 50
6.4. Salida 50

Índice de tablas

4.1. Características del generador de funciones RF MiniCircuits SSG-4000HP[20] 19
4.2. Valores de las líneas de transmisión propuestas 21
4.3. Características analizador vectorial de redes 24
4.4. Valores de las líneas de transmisión propuestas 29
4.5. Características amplificador de potencia 33

5.1. Características de los dos amplificadores propuestos 36
5.2. Características del diodo empleado 42
5.3. Componentes 46

Glosario de Términos

UCM	Universidad Complutense de Madrid
LCD	Liquid-Crystal Display
DGT	Dirección General de tráfico
RF	Radiofrecuencias
PCB y PCBs	Placas de Circuito Impreso
RADAR	RAdio Dectection And Ranging
RDF	Radio Detecton Finding
Mini-GATSO	Radar Doppler que emplea actualmente la DGT
ARDUINO UNO	Placa de procesamiento de datos
STM32F411RE	Placa de procesamiento de datos
FPGA	Field Programable Gate Array es un conjunto de circuitos integrados
STM32CubeIDE	Software para el control y programación de las placas de procesamiento de datos de la serie STM32
NI Labview	Software de programación gráfica no discreta
LINX	Herramienta de NI Labview para el control de tarjetas de procesamiento de datos y FPGAs
SMA	Tipo de conector roscado para cable coaxial utilizado en microondas
USB	Bus Serie Universal, es un bus de comunicaciones
AWR	Suite de programas del software de Microwave Office encargado del diseño de sistemas de microondas
KiCAD	Software libre para el diseño de sistemas en PCB
HF	High Frequency o alta frecuencia
UHF	Ultra High Frequency
Matlab	Suite de herramientas y software de programación con todo tipo de utilidades
PPR	Polipropileno Random, PP-R, es un polímero (plástico) para tubería
MIT	Massachusetts Institute of Technology
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio, el cual se refiere específicamente al comportamiento del voltaje (mínimos y máximos) en un fenómeno de onda estacionaria entre una línea de transmisión y su carga en el extremo. Y que es inversamente proporcional al cociente de reflexión de la línea
MAG	máxima ganancia que proporcionan a las distintas frecuencias
R_0	Resistencia característica de 50Ω

Capítulo 1

Introducción

El uso del radar no es algo nuevo, es más, los inicios del radar se remontan incluso a finales del siglo XIX, cuando al estudiar las propiedades de las señales electromagnéticas se observo que presentaban efectos de refracción y reflexión, de forma similar a la luz y al sonido. Desde entonces hasta ahora, los radares han ido mejorando de manera progresiva.

Un sistema radar, en esencia, tienen un origen militar, ya que los primeros ejemplos de radares modernos se emplearon en la segunda Guerra Mundial como elementos de detección de aeronaves y buques. Tener mejores equipos de detección que el enemigo era la diferencia entre una victoria y una derrota, es por ello que este es el ámbito en el que más se han desarrollado los radares, es casi imposible hoy en día encontrar un navío de guerra que no cuente con un radar de navegación.[1]

Sin embargo, estos sistemas a lo largo del tiempo fueron encontrando su hueco en el ámbito civil, es más, también es prácticamente imposible encontrar un buque mercante que no posea un radar de navegación o realizar un control aéreo optimo sin su empleo, pues son sistemas de posicionamiento muy eficientes.

Aparte de usos marítimos o aéreos, es posible encontrar estos radares en neutro día a día, ejemplos cotidianos son las puertas automáticas o los sistemas de detección de presencia. Pero hay otro uso, el cuál es el que se va a estudiar más a fondo en este trabajo.

El uso de radares como controladores de velocidad, como los radares de trafico que emplea la DGT[2], es el uso más típico de radares de efecto Doppler. Estos sistemas son capaces de emitir ondas y de recibirlas, es decir, no son capaces de procesarlas, para ello se requiere de un microcontrolador externo.

En este proyecto, se diseñará un radar de efecto Doppler acompañado de un microcontrolador de Arduino para procesar la información del radar y estimar la velocidad instantánea del objetivo.

1.1. Motivación

Este trabajo, que es meramente académico, busca mejorar la formación del autor, así como complementar sus estudios previos sobre sistemas radiantes. A lo largo de la carrera de *Ingeniería electrónica de Comunicaciones* se han observado algunos de los componentes propuestos durante este proyecto de forma individual e independiente, sin que su diseño afecte a un sistema real final, es por ello que este trabajo es altamente interesante a nivel académico, pues permite crear desde cero un sistema, donde cada fallo de diseño es acumulativo dándose entonces gran importancia a la hora de realizar las simulaciones del sistema, pues cuanto

más precisas y trabajadas sean menos posibilidades hay de que haya errores en el montaje del sistema real final. Es debido a esto que la mayoría de este trabajo se ha realizado de forma simulada, dejando el montaje y creación del sistema real final en un segundo plano si el tiempo y las condiciones personales del autor lo permiten.

A su vez, durante la realización del mismo se ha planteado la utilidad futura de este trabajo para que estudiantes puedan entender el funcionamiento de los componentes individuales de un radar de efecto Doppler.

Además, el autor tiene un interés particular en el funcionamiento y montaje de distintos radares, así como en el trabajo previo y diseño de los componentes, suponiendo a la vez un reto y una aventura emocionante para él.

1.2. Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es el de realizar un diseño de un radar de efecto Doppler, implementando cada uno de los componentes de forma individual partiendo del diseño más simple, el titulo de este trabajo es autoconcluso, pues *"Diseño e implementación de un radar de Efecto Doppler"* describe en esencia el objetivo principal del proyecto.

A continuación se van a listar los objetivos específicos de este trabajo:

1. Entender el funcionamiento de un radar de efecto Doppler
2. Caracterizar la frecuencia de trabajo de un radar de efecto Doppler.
3. Diseño componente a componente partiendo del diseño más simple.
4. Configuración de placa Arduino UNO REV3 para que actué como conversor analógico-digital y procese los datos de frecuencia obtenidos para determinar la velocidad del objetivo.
5. Diseño y cableado de placas PCB para los componentes.
6. Montaje básico y pruebas de funcionamiento en el laboratorio de los componentes del radar, tanto por separado como en su conjunto.
7. Pruebas de funcionamiento finales.

1.3. Relación con las competencias de la titulación

Este es un trabajo muy completo que abarca varias rama de la ingeniería y que esta relacionado de forma intrínseca y directa con muchas las asignaturas de la carrera de *Ingeniería electrónica de Comunicaciones* de la *Universidad Complutense de Madrid* (plan a extinguir)[3] ya que se van a diseñar y construir distintos elementos que se han estudiado en distintos niveles de profundidad a los largo de la carrera, por ejemplo, en el caso de los amplificadores, los cuales son parte troncal en asignaturas como análisis de circuitos, electrónica analógica, electrónica de potencia, radiofrecuencia... Así como el caso concreto

de estudio de un radar se da en Sistemas Radiantes requiriendo un alto conocimiento de Electromagnetismo.

Otro ejemplo destacable es el uso de procesamiento y discretización de los datos, temas que se estudian en asignaturas cómo Sistemas lineales, Procesamiento de Señales y Control de Sistemas.

También se va a trabajar con programas de diseño de PCBs y con Arduino, temas que se observan en Instrumentación Electrónica y Diseño de Sistemas Digitales.

Finalmente se trata temario de las asignaturas de Redes y Teoría de la Comunicación, para explicar todos los procesos de emisión y transmisión así como posibles modulaciones.

Este trabajo, por lo tanto es una culminación del proceso de aprendizaje de su autor, demostrando y poniendo en practica de manera efectiva los conocimientos que ha ido adquiriendo a lo largo de los años.

Capítulo 2

Radar de Efecto Doppler

Antes de estudiar el radar de efecto Doppler es interesante analizar la historia y el contexto de la tecnología asociada a los radares.

La RAE define el **RADAR** cómo *"Sistema que utiliza radiaciones electromagnéticas reflejadas por un objeto para determinar la localización o velocidad de este."* [4].

A su vez, la palabra **RADAR** proviene de *"RAdio Detection And Ranging"*, un método que permite conocer la localización y velocidad de objetos.[5]

2.1. Historia del radar

El inicio del desarrollo tecnológico del radar se remonta al año 1864, cuando, el inglés James Clerk Maxwell describe las leyes del electromagnetismo [1]. Años más adelante, en 1866, el físico Heinrich Herz demuestra que las ondas electromagnéticas se reflejan en objetos sólidos.[6][7]

En el año 1904, un investigador alemán llamado Christian Hulsmeyer, desarrolló un equipo conocido cómo *"Telemobiloskop"*, este dispositivo era capaz de detectar las ondas electromagnéticas que se reflejaban en los buques, pero no era capaz de detectar la posición del objetivo, y en sus primeras pruebas de campo demostró tener un alcance limitado, de aproximadamente 1 milla.[5][6][7]

En el año 1917, el científico Nikola Tesla platea las bases de los primeros radares modernos sugiriendo un sistema sin cables que podría reflejar señales de radio para localizar objetos e incluso medir la distancia a estos *"[...] por su [de pie ondas electromagnéticas] utilizamos podemos producir a voluntad, desde una estación de envío, un efecto eléctrico en ninguna región del globo; [con lo que] es posible determinar la posición relativa o curso de un objeto en movimiento, tal como un buque en el mar, la distancia recorrida por el mismo, o su velocidad "*. [7][8][9] Años más tarde, dos científicos americanos, Hoyt Taylor y L. Young realizaron un experimento basado en estas bases, emitieron una señal de onda continua y descubrieron que cuando pasaba un barco por delante se producían alteraciones en la señal recibida, solo quedaba descubrir la relación entre estas alteraciones y la posición o la velocidad del objetivo.[5][6][7]

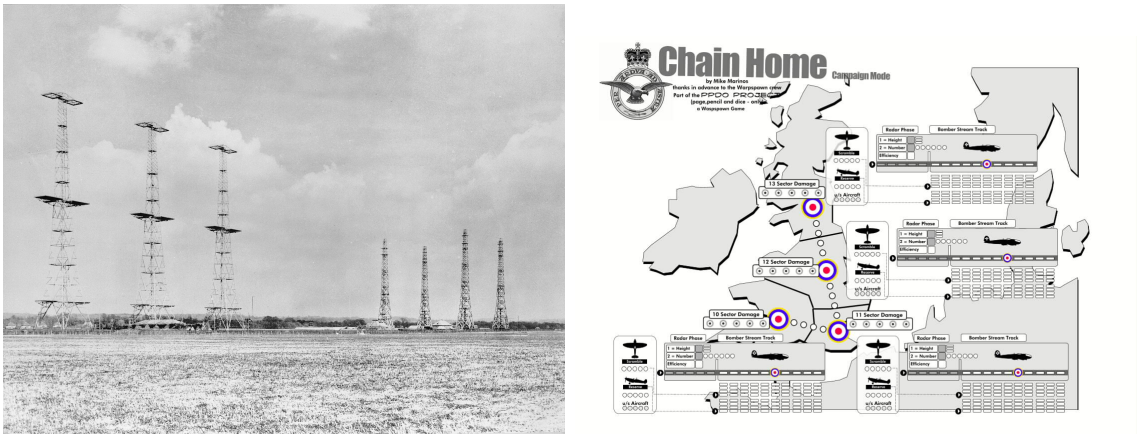
Posteriormente, en el año 1935, un ingeniero inglés llamado Watson-Watt logro realizar la primera detección de un avión a aproximadamente 15 millas de distancia del emisor. En ese mismo año, logró aumentar esta distancia hasta las 40 millas. El dispositivo que diseño y que le permitió realizar estas medidas se llamó **RDF** (*Radio Dectection Finding*).[5][6][7]

[1] Conocidas como las leyes de Maxwell

Un año más tarde, en el año 1936, los norteamericanos Page y Young desarrollan lo que se convertirá en el primer radar pulsado, al enviar pulsos de señales en vez de una onda continua, este dispositivo llego a alcanzar una distancia de 25 millas. Estos sistemas de detección son los que le dan nombre de **RADAR** (*"RAdio Detection And Ranging"*).[5]

En los años previos a la Segunda guerra mundial, Winston Churchill aprueba el traspaso de tecnología con EEUU, consiguiendo grandes avances en cuanto a la optimización de los sistemas y a la distancia de medida.[5][6][7]

En el años 1937, dos científicos ingleses consiguen montar un radar a bordo de una aeronave, permitiendo la detección de aviones enemigos y abriendo paso en unos años a un nuevo sistema de control aéreo mediante radares. Un año más tarde, el ejercito ingles instaló en sus costas este y sur una cadena de antenas conocidas como *"Chain Home"* (*"Figura 2.1"*). Fue el primer radar funcional de vigilancia aérea de la historia y fue crucial en la *"Batalla por Ingraterra"*, ya que este nuevo sistema era superior en precisión a los sensores alemanes.[7]



(a) Fotografía Real del sistema (b) Mapa de cobertura del radar

Figura 2.1: Chain Home [10][11]

En el año 1940, tras el inicio de la guerra, los científicos Henrry Boot y John Randall crean un oscilador resonante para ondas de microondas, a su vez, el físico Roger Sutton inventa un amplificador que trabaja con este tipo de ondas.[5]

Con el avance de la Segunda Guerra Mundial, las diferentes potencias mundiales fueron aportando poco a poco innovaciones sobre esta tecnología, aunque en esencia los sistemas que se emplean actualmente se basan en el mismo funcionamiento que los radares empleados a finales de los años 40 con la implementación de osciladores y amplificadores para facilitar el tratamiento de la onda.[8]

2.2. Funcionamiento del radar

El radar basa su funcionamiento en aprovechar el principio de reflexión de las ondas electromagnéticas. *Cuando se produce un cambio significativo de las componentes dieléctricas*

o diamagnéticas, las ondas electromagnéticas se ven afectadas. [12][13] Esto, quiere decir que las ondas electromagnéticas rebotan en objetos sólidos.

En la *"Figura 2.2"* se puede observar el funcionamiento del radar de forma secuencial, es decir, primero el radar genera y emite una onda electromagnética, ya sea de forma continua o pulsada. A continuación, esta onda viaja por el medio hasta encontrarse con un objeto, es decir, esta onda se reflejará en los diferentes objetos que se encuentren en el alcance del radar. Por ultimo esta onda se reflejará y será detectada por el radar mediante un detector, lo que diferencia a un radar de otro es, el tipo de onda que emite (pulsada o continua) y que se hace después con la onda recibida. Algunos radares simplemente emplean el hecho de haber recibido una onda a modo de detección de presencia, otros, como el que se va a emplear en este trabajo, emplean y comparan la frecuencia recibida para obtener información del objeto, para esto se aprovecha de un fenómeno físico conocido como efecto Doppler.[12][13]

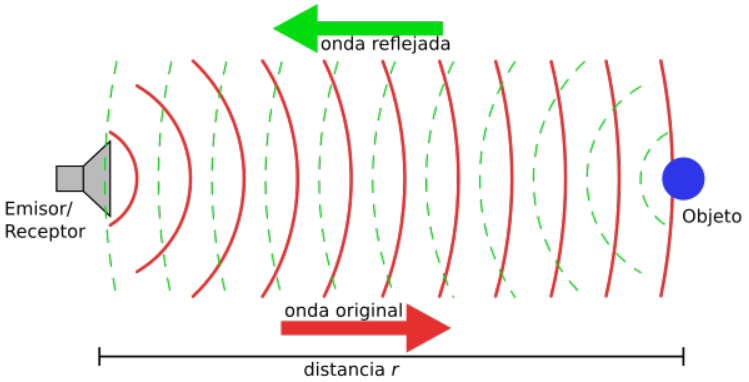


Figura 2.2: Funcionamiento de un radar básico[14]

Durante el camino que recorre la señal electromagnética, esta se atenúa, es decir, la potencia de la señal recibida es menor que la potencia de la señal transmitida, esta atenuación varia en función de las características del medio, las características de las antenas de transmisión y recepción, el material del objeto, la distancia al mismo... Es por ello que a la hora de construir un radar es necesario tener en cuenta estos factores, los cuales se pueden resumir en la ecuación fundamental del radar (*Ecuación 2.1*)

$$P_r = \frac{P_t G_t A_e \sigma}{(4\pi)^2 R^4} \tag{2.1}$$

Hay diversos tipos de radares, los cuales se pueden clasificar de diferentes maneras, a continuación se muestran las principales.

La clasificación mas importante es según el tipo de onda con la que el radar transmite.

- Onda Pulsada: Este tipo de radares emiten una señal electromagnética en pequeños pulsos, cuya duración es del orden de millonésimas de segundo. En el tiempo que hay entre pulso transmitido y pulso transmitido, el radar efectúa la recepción. Como se conoce la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas, es posible, midiendo el tiempo que pasa desde que se emite un pulso hasta que se recibe determinar la distancia a un blanco, además, emitiendo varios pulsos separados un determinado periodo

de tiempo, PRI ó *Pulse Repetition Interval*, el radar es capaz de hacer un seguimiento del objeto y así terminar su posición y su velocidad, este es el funcionamiento de los radares que se emplean en las torres de control aéreo. Este funcionamiento se ve reflejado en la *"Figura 2.3"*[15][12][13]

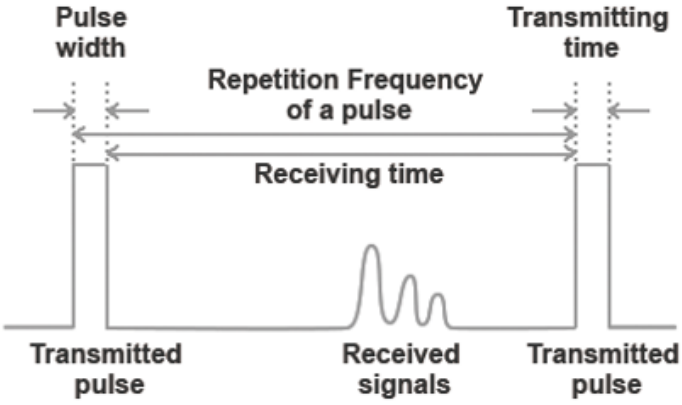


Figura 2.3: Esquema de un radar de onda pulsada[15]

- Onda Continua: "*Radar en el cual un transmisor envía un flujo continuo de energía de radio; el blanco reemite la radiación de una pequeña fracción de esta energía a una antena receptora separada*"[16], y se basa principalmente en el efecto Doppler.*(ver punto 2.2.1)*[12][13]

También es importante para este trabajo organizar los radares en función del número de antenas que emplean:

- Mono-estáticos: "*Radar convencional, en el cual el transmisor y el receptor están en el mismo lugar y comparten la misma antena; en contraste con el radar biestático.*"[16]
- Bi-estáticos: "*Radar en el cual el receptor está a alguna distancia del transmisor, con antenas separadas para cada uno.*"[16]
- Multi-estaticos: "*Radar en el cual los lóbulos sucesivos de la antena están conectados secuencial mente para proporcionar una capacidad de rastreo sin movimiento físico de la antena.*"[16]

2.2.1. Efecto Doppler

El efecto Doppler, descubierto y caracterizado por primera vez en el año 1842 por Christian Andreas Doppler [17] se define como la diferencia que se produce entre la frecuencia con la que se emite una onda electromagnética y la frecuencia con la que se recibe tras haberse reflejado sobre un objeto. [13]

De esta forma, cuando la velocidad del objetivo es de acercamiento, la frecuencia de la onda recibida será mayor que la de la onda transmitida. Si, por el contrario, es de alejamiento, la frecuencia recibida será menor que la transmitida, este efecto se observa en la *Figura 2.4*

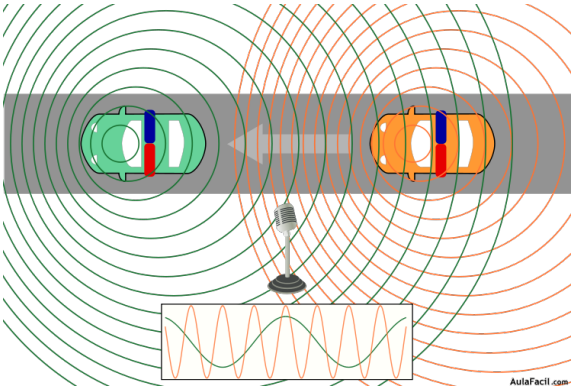


Figura 2.4: Efecto Doppler[17]

La diferencia entre las frecuencias de transmisión y recepción será la frecuencia Doppler.

En física clásica, donde las velocidades del emisor[2] y del receptor[3] con respecto al medio son inferiores a la velocidad de las ondas en el propio medio, la relación entre la frecuencia observada f_{rx} y la frecuencia emitida f_{tx} viene dada por la *Ecuación 2.2* [17]

$$f_{rx} = \frac{v + v_r}{v + v_s} f_{tx} \tag{2.2}$$

Siendo:

- f_{rx}: la frecuencia observada. $[Hz]$
- f_{tx}: la frecuencia emitida. $[Hz]$
- v: velocidad de las ondas en el medio. $[\frac{m}{s}]$
- v_r: velocidad del receptor en relación con el medio; positiva si el receptor se está moviendo hacia el emisor, negativa en caso contrario. $[\frac{m}{s}]$
- v_s: velocidad de la fuente en relación con el medio; positiva si la fuente se aleja del receptor (y negativa en la dirección contraria). $[\frac{m}{s}]$

Si se considera que la velocidad v_s es pequeña en comparación con la velocidad de la onda, siendo la velocidad de la onda la velocidad de la luz, al considerarse un observador en reposo, entonces, se puede asegurar que la frecuencia observada será:

$$f_{tx} = 1 + \frac{2v}{\lambda} f_{rx} \tag{2.3}$$

Expresándolo como la frecuencia relativa al receptor, donde la longitud de onda es $\lambda = \frac{f_{rx}}{c_0}$

$$\Delta f_{tx} = \frac{2\Delta v_r}{c_0} f_{rx} \tag{2.4}$$

[2]También denominado fuente
[3]También denominado Observador

Esto, quiere decir que en la práctica la frecuencia Doppler, o la frecuencia observada por el receptor, ocurre dos veces, una en el camino desde el radar al objetivo y otra vez en el camino de vuelta, como energía reflejada. Muchas veces en este proceso se produce un cambio de fase, tal y como se puede observar en la *Figura 2.5*

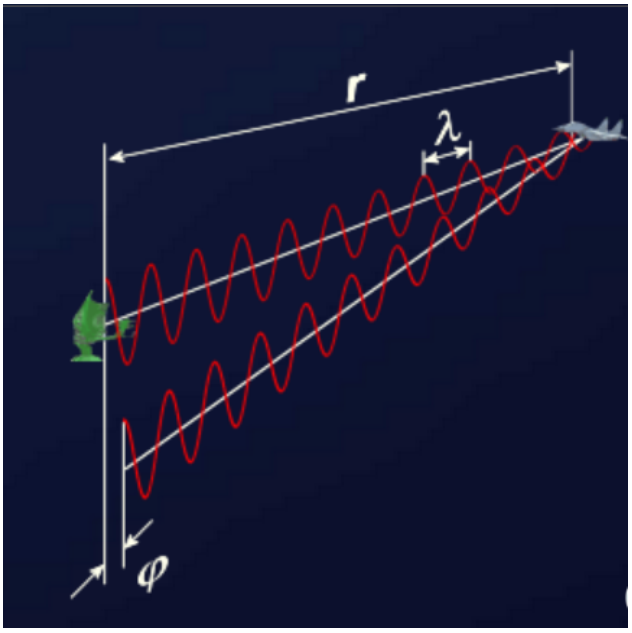


Figura 2.5: Cambio de fase en la señal receptora[13]

Capítulo 3

Diseño

3.1. Frecuencia de Trabajo

Los radares de estas características históricamente han trabajado en las bandas de frecuencia X (9.300 GHz a 10.800GHz), Ku (13.450 GHz), K (24.050 GHz a 24.250 GHz) y Ka (33.200 GHz a 36.000 GHz) es por ello que, para este diseño se pueden emplear cualquiera de estas frecuencias, para elegir mejor, se ha buscado que la banda elegida sea de uso civil en España, esto deja solo las bandas X, Ku y K. Además se requiere que sea fácil de detectar, para simplificar el montaje y la elección de componentes, esto significa que se necesita una banda con poca frecuencia y que pierda poca energía al propagarse en largas distancias. Por último se busca que se generen el mínimo de falsas alarmas posibles, es por esto que no se puede emplear la frecuencia K ya que esta es la frecuencia típica de los sistemas de puertas de apertura automática.[18]

La elección final de banda de frecuencias se encontraría entonces entre la banda X de menor frecuencia y la banda Ka, de mayor frecuencia pero banda característica de los radares compactos Mini-GATSO, pero aparece una ultima limitación a tener en cuenta al tratarse de un trabajo realizado en el laboratorio de la universidad, las frecuencias máximas con las que puede trabajar la instrumentación de la que se dispone, esto se debe a que se va a comprobar y construir cada componente por separado, puede que no se emplee para todos el mismo aparato de medida, es por ello que debe funcionar a la frecuencia más limitante de los dispositivos con lo que se van a tomar las medidas, se ha comprobado que en el laboratorio de la facultad se pueden construir sistemas de hasta 3.5 GHz, es por ello, que se empleará una frecuencia muy por debajo de las típicas de trabajo en un entorno real para este tipo de radares, y muy por debajo de la frecuencia máxima para el laboratorio, finalmente la frecuencia elegida será **1.5 GHz**, la cual es la misma frecuencia que la del radar de efecto Doppler presente en el laboratorio para la asignatura de Sistemas Radiantes, por lo que es posible que si se avanza significativamente con la construcción de un sistema real, pero no se completan todos los componentes, obtener los componentes faltantes de este sistema.

Al emplear una frecuencia tan baja, surge una desventaja a la hora de realizar el estudio de los componentes, concretamente las antenas, a menor frecuencia, mayor es el alcance, pero menor es su resolución y mayor es su tamaño, haciendo algo más aparatoso el sistema final.

3.2. Organización del diseño

El diseño en esta Memoria se va a dividir en dos partes, la primera la etapa de transmisión y sus componentes y la segunda será la etapa de recepción junto con sus componentes, ya que de esta forma resulta mucho más sencillo seguir el comportamiento del radar, al seguir el diseño propuesto en la *Figura 3.1*, el cual es el diseño básico de un radar mono estático de onda continua con efecto Doppler, cuyo coportamiento ya fue descrito en la sección *Funcionamiento del radar*

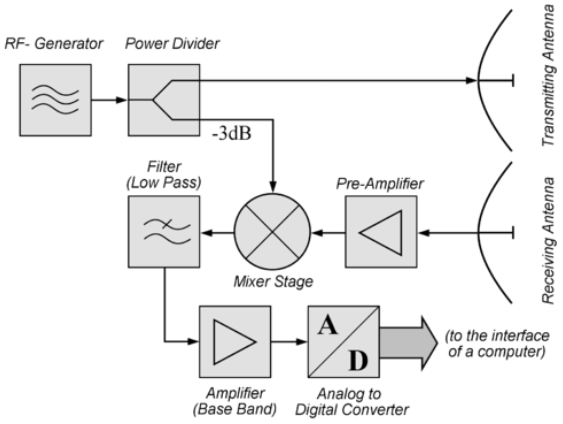


Figura 3.1: Diagrama de un radar mono-estable de onda continua[17]

El autor, a la hora de realizar estos componentes, no los ha realizado en este orden sino que ha diseñado los componentes en orden de complejidad, desde el menos complejo al más complejo, es decir, en el siguiente orden:

- Antenas receptoras y emisoras: reciben y emiten señales, se va a diseñar una antena para emisión y otra análoga para recepción, se proponen diferentes diseños con diferentes modelos, y finalmente se han construido las más adecuadas según criterios propuestos por el alumno, tales como complejidad, posibilidad de creación, posibilidad de optimización y posibilidad de corrección de errores una vez construidas (al ser una de las partes más importantes del diseño, y de cuya frecuencia depende todo el montaje final, es importante poder realizar cambios en las medidas para poder adecuarse a los errores acumulativos que proporciona un sistema real)

- Divisor de potencia: se encarga de llevar la señal original al mezclador para poder compararla, es decir, genera dos señales de igual frecuencia pero con menor potencia que la original, se espera que la potencia final sea muy pequeña.

- Filtro paso baja: filtra la señal mezclada para eliminar batidos de frecuencia y componentes no deseados, esta parte es de las más importantes del diseño, pues evita subidas y bajadas de la frecuencia tras realizar la transformada de Fourier.

- Amplificadores: amplifica la señal recibida, ya que esta suele ser muy débil, en función de los resultados de laboratorio es posible que a su salida se conecte un filtro de

frecuencia intermedia a la frecuencia de operación. Deben ser amplificadores de bajo ruido formados por redes de resistencias y condensadores para justar los niveles de polarización y optimizar la señal resultante. Además se propone introducir un amplificador antes de la antena emisora, pues tiene perdidas de potencia debido al divisor de potencia, para este amplificador se va a proponer uno del laboratorio, estudiando en detalle su comportamiento para verificar si es adecuado para el sistema final.

- Mezclador de señales: combina la señal recibida con la frecuencia de operación, esta etapa cuenta con un detector de envolvente para extraer la envolvente de la señal y así obtener la frecuencia Doppler.

- Generador de RF: Genera la señal original y con ello la frecuencia de operación. Para este apartado, el alumno empleará un generador del laboratorio, pues la placa ARDUINO UNO, no

- Conversor Analógico-Digital: Se va a emplear una tarjeta arduino UNO con una pantalla LCD. De tal forma que se recibe la señal de envolvente, la cual contiene la frecuencia doppler, y mediante código, se va a detectar su frecuencia y con las formulas propuestas determinar la velocidad del objeto. Para este apartado además se ha empleado la herramienta de Labview para generar señales doppler a baja frecuencia simuladas (con un programa de simulación doppler obtenido de la web de National Instrumente modificado[19]), ya que lo que importa para determinar la velocidad es la relación entre frecuencias.

Capítulo 4

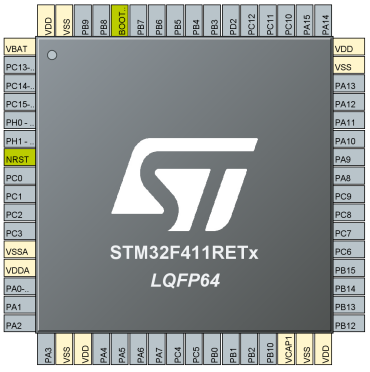
Etapa de transmisión

Se refiere a la parte del radar que transmite señal, son los componentes que se encargan del manejo de la señal de referencia, sobre la cual posteriormente se comparará su frecuencia, en este caso mediante el uso de una placa de procesamiento de datos.

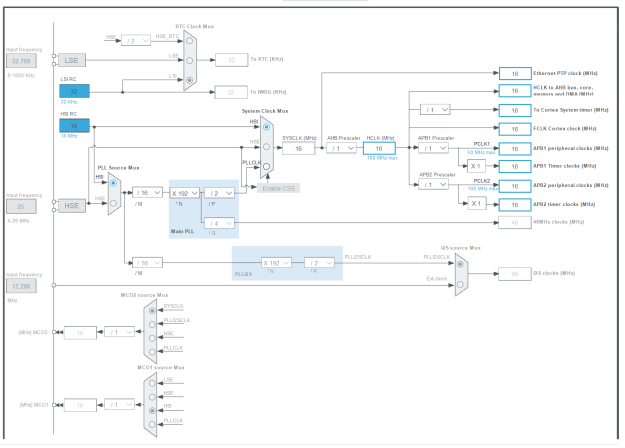
4.1. Generador de de RF

Inicialmente se propuso la idea de emplear una de las dos placas de adquisición de datos de las que disponía el alumno, pero finalmente, se descubrió que ninguna de las dos placas era capaz de generar una señal lo suficientemente grande, llegando como máximo a generarse señales de 26 MHz. (entre 1 y 16MHz con la placa ARDUINO UNO y entre 4 y 26 MHZ con la placa STM32F411RE)

Se podría, alternativamente, comprar un generador ya fabricado, o adquirir una placa o FPGA que admita la generación de señales a dicha frecuencia, pero para el primer caso habría que hacer un estudio de costes y beneficios, estudio que puede ser atractivo como unidad didáctica, pero que no esta enmarcado en los objetivos y tiempos propuestos por el estudiante, dejándose como opción si se llegasen a cumplir todos los objetivos propuestos. La segunda opción también requeriría de un estudio de mercado, además de emplear código para la generación de la frecuencia, esta última parte se ha realizado con la placa STM32F411RE, a una frecuencia menor, por lo que a continuación se muestra el proceso.



(a) Organización de los pines de la placa



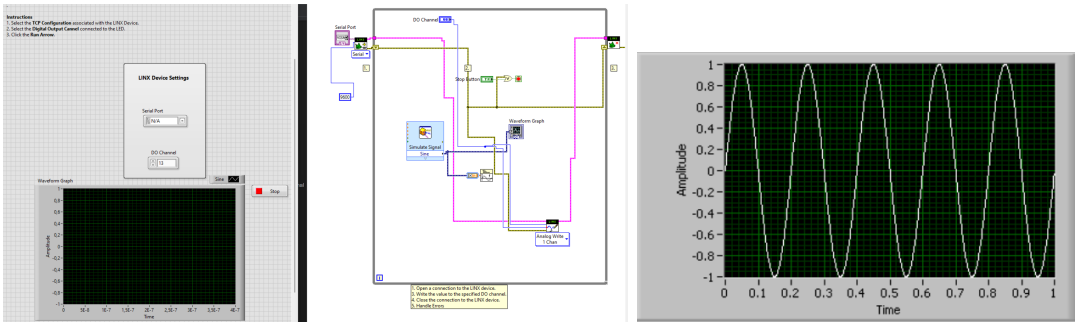
(b) Control del reloj interno de la placa

Figura 4.1: Diseño interno de la placa STM32F411RE

Se van a emplear dos software, primero el STM32CubeIDE, con este software se podría

generar directamente la señal pero al ser esta parte sólo una prueba el alumno decidió dedicar más tiempo a otros elementos de esta memoria, empleándolo como medio intermedio entre la placa y la herramienta de NI labview, con este programa, es posible generar un fichero de datos comprensivo de la placa a emplear para que NI labview sepa la posición de los pines y las funcionalidades de la placa, los datos dados por el programa se muestran en la *"Figura 4.1"*.

A continuación, se importa esta configuración de pines a través de la herramienta LINX de NI labview, esta permite al programa trabajar con placas reales siempre y cuando conozca la configuración de pines de la placa y el repertorio de instrucciones de la placa (C en este caso), y se crea un código que genere una señal a una frecuencia determinada, por ejemplo de 5 MHz, tal y como se muestra en la *"Figura 4.2"*. Al trabajar con NI Labview, él código generado será un código gráfico, es decir, cada set de instrucciones es representada por un bloque y el esquema del código se muestra con líneas de flujo entre estos bloques, con diferentes colores para cada tipo de dato, ya sean reales (en rosa) o enteros y floats de uso interno (azul y gris respectivamente). Por último se necesita que el código se repita en el tiempo, para ello, se emplea un bloque de iteración, en la *"Figura 4.2 (a)"* se muestra como el rectángulo que encierra todo.



(a) Código empleado (b) Señal de salida

Figura 4.2: Código de Labview

Para comprobar que esta frecuencia es la correcta se empelaría entonces un analizador de espectros, o, un programa de Arduino que determiné la frecuencia de una señal cada 0.1 segundos, se ha empleado este programa directamente, dando como resultado por pantalla a través de la aplicación ARDUINO IDE (aun no se había implementado la pantalla LCD), por su salida por pantalla:

```
Frecuencia= 5MHz
Frecuencia= 5MHz
Frecuencia= 5MHz
Frecuencia= 5MHz
Frecuencia= 5MHz
Frecuencia= 5MHz
Frecuencia= 5MHz
...
```

Figura 4.3: Salida por terminal

Sabiendo que funciona el código se puede determinar que si se tiene una placa capaz de generar la frecuencia propuesta, debería poder generarse sin más problemas que el de tener que añadir un amplificador de potencia para que la señal tenga unos rangos adecuados para su transmisión. Pero, esto solo se realizará en caso de que al alumno le de tiempo a realizar un estudio de mercado y conseguir la placa correspondiente, lo que por ahora, se plantea cómo trabajo futuro.

Es por ello, que para el montaje final y aunque no sea lo ideal, ya que se pretendía tener un sistema autónomo y portátil, se va a emplear un generador del laboratorio, en este caso, el generador RF MiniCircuits SSG-4000HP[20], es un equipo que se conectan al puerto USB de un ordenador y se controla mediante software (para trabajo futuro se podría proponer un generador de características similares, pues al no tener pantalla ni botones su coste se reduce considerablemente).Las características más importantes de este generador están recogidas en la tabla siguiente.

Frecuencia	250 MHz a 4 GHz
Resolución en frecuencia	5kHz
Potencia de salida	-50 a +20 dBm
Impedancia	50 Ω

Tabla 4.1: Características del generador de funciones RF MiniCircuits SSG-4000HP[20]

Para utilizarlo es tan sencillo cómo conectar la fuente de alimentación, un cable con salida SMA para introducir la señal en el objetivo y el cable USB, se enciende el generador y se abre el software Mini-Circuits Synthesized Signal Generator de forma automática (por la tecnología PlugandPlay. En la pestaña Main se deberán seleccionar la frecuencia, la potencia de salida y se hace clic en RF ON para comenzar a generar la señal.

4.2. Divisor de tensión

El divisor de tensión se emplea para poder enviar la señal generada por el generador a diferentes partes del circuito, en este caso, con potencias más pequeñas a la antena de emisión, para emitir la señal y, otra al mezclador, el cuál, la mezclará con lo por la antena de recepción.

Para la etapa de división de potencia en un radar de efecto Doppler a 1,5 GHz, se podría considerar el uso de un divisor de potencia resistivo, un divisor de potencia de microstrip o un divisor de potencia de Wilkinson, ya que estos son los ejemplos más típicos.

El divisor resistivo es simple y económico, pero puede tener pérdidas más altas. El divisor de microstrip es compacto y puede adaptarse a frecuencias más altas, mientras que el divisor de Wilkinson proporciona una buena relación de división con una pérdida de inserción relativamente baja.

En los tres casos el ancho de banda y la frecuencia de operación están íntegramente relacionado con las formulas intrínsecas de su diseño. En este caso, como se van a crear la mayoría de los componentes de cero, se va a elegir el componente con menos pérdidas para contrarrestar posibles pérdidas por error de diseño, es por ello y por su buena relación de división que se empleará el puente de Wilkinson, además de que se busca una relación de división 1:1 con mínimas pérdidas de inserción y un ancho de banda pequeño; este es un divisor en T con 3 líneas de transmisión, al que se conectan dos de los extremos con una resistencia para adaptar y asilar las dos salidas, al estar en T, se produce un desfase de 180 entre los puertos de salida, tal y como se muestra en la imagen:

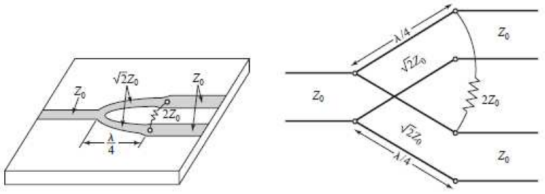


Figura 4.4: Geometria de un Puente de Wilkinson

4.2.1. Diseño

Consiste en dos líneas de transmisión cuya longitud de $\frac{\lambda}{4}$ e impedancia característica $\sqrt{2}Z_0$, y entre los puertos de salida se conectará un resistor de $2Z_0$, que disipará las potencias reflejadas.[21]

Lo primero entonces será determinar la frecuencia característica de entrada, al ser un circuito típico de RF se empleara la típica de$Z_0 = 50\Omega$.

Lo segundo será obtener los valores de las líneas de transmisión, teniendo en cuenta los siguientes factores

$$\lambda = \frac{c}{f} = 0{,}1999m$$

Relación de tensión :

$$K = \frac{P_1}{P_2}$$

Idealmente K=1, por lo que se emplea ese valor

Matriz de parámetros S:

$$S = \frac{/j}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Medida	Formula	Resultado
Lóngitud de cada línea	$L_{line} = \frac{\lambda}{4}$	0.049 m
Longitud total del puente	$L_{total} = 2L_{line}$	0.099 m
Impedancia línea superior	$Z_{01} = K\sqrt{RZ_0}$	$\sqrt{2}Z_0$
Impedancia línea inferior	$Z_{02} = \frac{1}{K}\sqrt{RZ_0}$	Z_{01}
Impedancia del puerto de salida superior	$Z_{L1} = KZ_0$	Z_0
Impedancia del puerto de salida inferior	$Z_{L2} = \frac{Z_0}{K}$	Z_0
Resistencia de terminación	$R = \frac{Z_0}{2}$	25Ω
Impedancia de terminación	$Z_R = 2Z_0$	$100\frac{1}{\Omega}$

Tabla 4.2: Valores de las líneas de transmisión propuestas

El ancho y el espaciado de las líneas de transmisión se obtendrá empleando la herramienta de diseño de microondas AWR, esta permite generar sistemas de ondas componente a componente, a la vez que realiza estudios de las características de estos, y, hasta incluye opciones de optimización de medidas. Finalmente también permite una vez tomadas medidas reales con una aparato externo importarlas al programa con el formato adecuado, este, suele ser .snp, donde n es el número de puertos (ya sea de entrada o salida) empleados en el circuito real.

En este caso, como el puente se va a crear sobre una placa PCB, las medidas dependerán de la constante dieléctrica del material que se vaya a emplear:

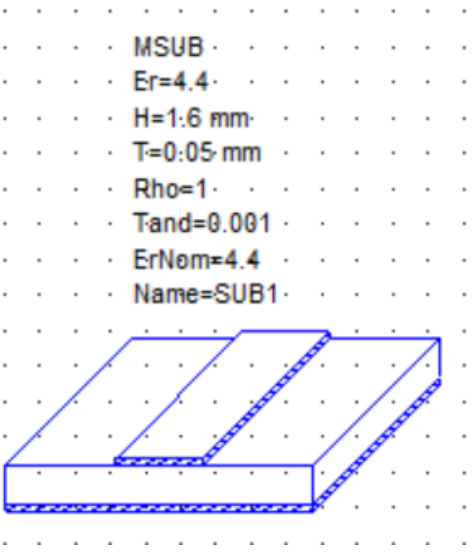


Figura 4.5: Diseño del sustrato a emplear

Con esta información, se va a crear un modelo en AWR y se va a emplear la herramienta de optimización para asegurar que el punto de operación son 1.5 GHz.

Tras realizar diversas simulaciones, con diversos valores (solo se muestra el resultado final, pero se han realizado 20 simulaciones con el método de optimización Robust (el más sencillo, emplea números random en un rango y guarda los resultados que más se acerquen al valor optimo), variando en cada simulación los valores de líneas en rangos de 25 mm)

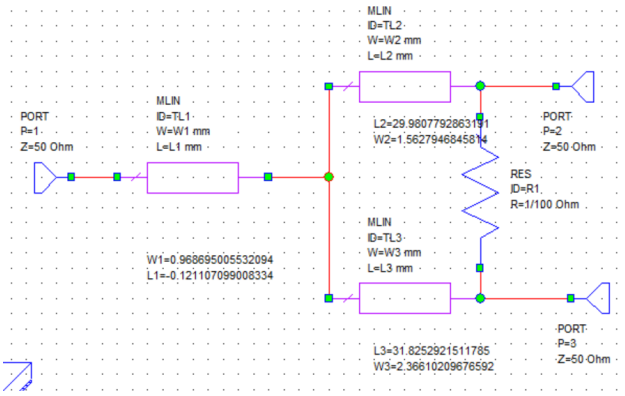


Figura 4.6: Diseño del puente sin optimizar

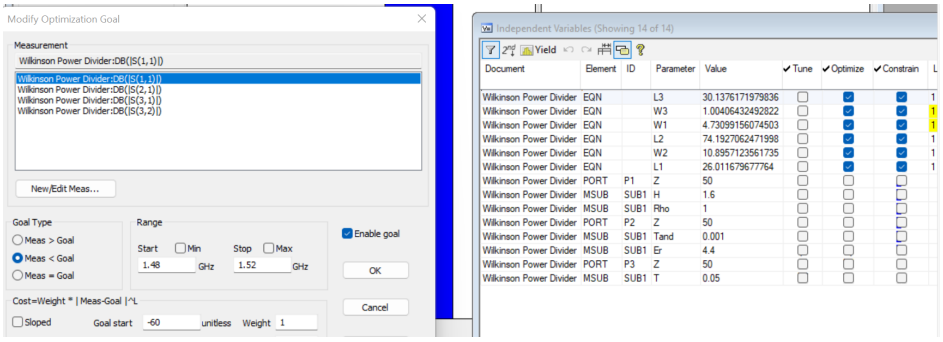


Figura 4.7: Optimizador

Quedando como resultado:

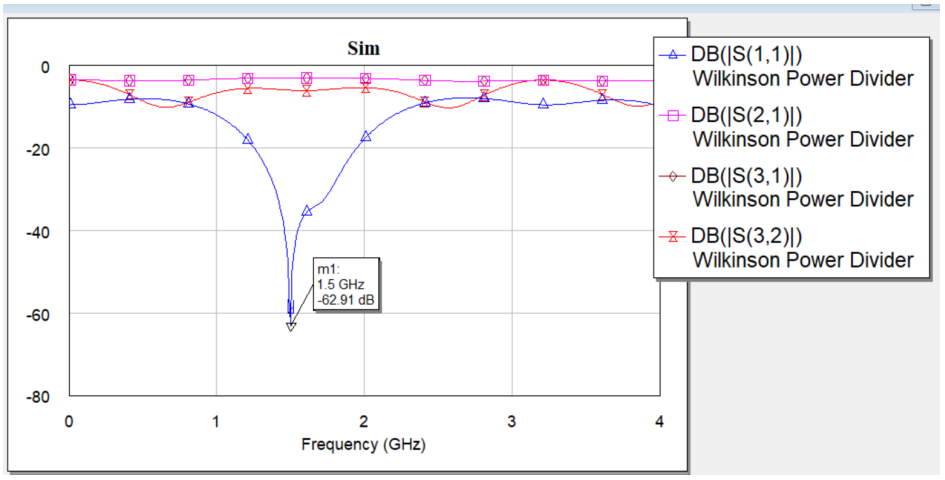


Figura 4.8: Resultado de la simulación

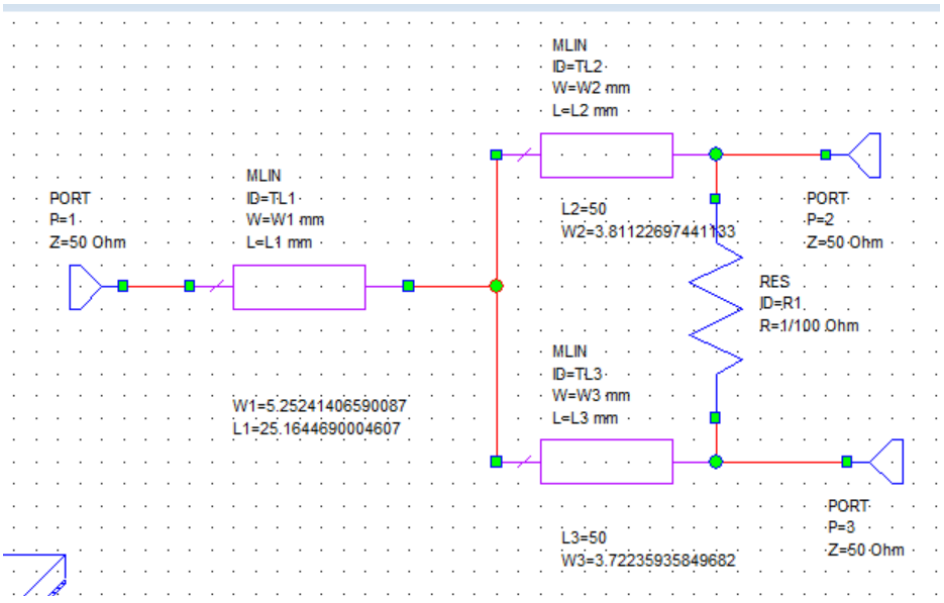


Figura 4.9: Valores a emplear

Se puede comprobar en la *"Figura 4.8"* que se cumplen las siguientes condiciones, las cuales son:

- En la frecuencia de diseño, S_{11} es muy bajo, lo que asegura el paso de está frecuencia integra por el puerto de entrada, es un comportamiento similar al de un filtro producido por la atenuación y las reflexiones del diseño.
- En la frecuencia de diseño se comporta cómo una red recíproca, es decir $S_{12} = S_{21}$ y $S_{13} = S_{31}$
- Los puertos 2 y 3, están asilados, es decir, a la frecuencia de diseño, estas señales están aisladas entre si y no se produce transferencia de señal entre ellas, esto evita perdidas de inserción.

Se ha llegado al siguiente diseño:

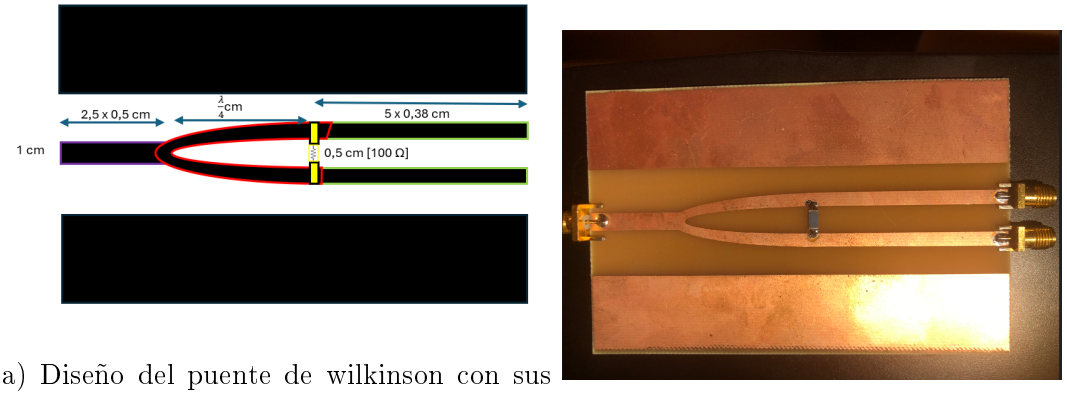
- Línea de transmisión 1: 2.5 cm de largo y 0.5 cm de ancho
- Líneas de transmisión 2 y 3: 5 cm de largo y 3.8 cm de ancho

4.2.2. Montaje y Pruebas

El montaje ha sido sencillo, se ha realizado mediante el método de fotolitografía sobre una placa (las características de esta placa son las mismas que las propuestas en la simulación). Se podría haber encargado a un fabricante la construcción de estas placas, pero, dado los tiempo de espera, los plazos del proyecto y algunos retardos que ha tenido el estudiante durante su realización, se ha optado por este método, además de que es el menos costoso, pues todo el material se encuentra en el laboratorio y al tratarse de un sistema modular requerirá de la creación de muchas placas. Se deja planteada la posibilidad de a futuro realizar los diseños en KiCAD para enviar a un fabricante.

Para ello, se han tomado las medidas dadas por el programa AWR y se ha generado un gerber a través del mismo, con estos datos solo falta tener las medidas de la resistencia a emplear. Se emplea una resistencia sobre placa de 5 mm de alto y 2 mm de ancho de 100 Ω (se emplea una obtenida en el laboratorio y se ajusta el ancho a esta resistencia).

Se han tenido en cuenta también las medidas de los conectores SMA para la entrada y salida de las señales. Es decir, las conexiones no deben superar los 0.5 cm de ancho. Los conectores SMA con conectores de RF con cable coaxial y entrada típica de 50 Ω, que pueden operar hasta los 18 GHz. Se emplean conectores de tipo rosca, lo que minimiza la reflexión y atenuación producida por espacio es la conexión.



(a) Diseño del puente de wilkinson con sus medidas

(b) Montaje completo y soldado

Figura 4.10: Contruccion final de la placa

Con este diseño se ha procedido a realizar una medida de los puertos mediante un analizador de vectorial de redes, el cual, mide la distribución de potencia de las señales de entrada con respecto a la frecuencia y permite medir potencias absolutas en dBm, así como observar las potencias de las señales portadoras, los armónicos, las interferencias o productos de interpolación. Hay que configurar adecuadamente los analizadores, pues son aparatos altamente sensibles, lo que también los hace idóneos para medidas de ruido. Se va a emplear el analizador vectorial de redes MegiQ VNA0440, de los cuales hay 3 en el laboratorio. Al igual que el generador, es un equipo cuyo coste se ha reducido mediante la eliminación de la pantalla y botones, dejando solamente los puertos de medida. Se emplea un software que se ejecuta en el PC y que se encarga de la configuración y de mostrar las medidas. Estos equipos tienen las siguientes características:

Frecuencia	400 MHz a 4 GHz
Puntos frecuencia	hasta 20000
Resolución en frecuencia	10 kHz
Potencia de salida	-30 a +5 dBm
Impedancia	50 Ω

Tabla 4.3: Características analizador vectorial de redes

Para utilizarlo, se debe conectar el puerto USB al PC, la fuente de alimentación a la red, y ejecutar el software MegiQ VNA, previamente instalado. Al hacerlo se abre una ventana que permite controlar todo, desde aquí, el manejo es el siguiente:

Lo primero, al trabajar en un rango de frecuencias tan grande es seleccionar el rango de frecuencias a medir, esto se hace en la ventana directamente bajo el menu 'options', aquí también se seleccionan las resoluciones o la selección del ancho de banda de un filtro muy estrecho que permite distinguir tonos muy juntos (útil para el mezclador de frecuencias), pero aumenta drásticamente el tiempo de barrido; se comprueba la potencia de referencia, teniendo en cuenta la potencia con la que se va a trabajar, para asegurarse de que no se exceda la potencia máxima de entrada del equipo.

A continuación se conectan todos los cables necesarios, es decir dos cables con conexión SMA como la descrita anteriormente, y posteriormente, y se procede a la calibración del equipo, la cual sirve para asegurase que la medida de potencia absoluta que se muestra coincide con la real y que por ende se desprecien las retribuciones internas del dispositivo y de los cables, en el caso de los cables si son adecuados para las frecuencias a las que se trabaja, su influencia en cuanto a pérdidas y reflexión debería ser pequeña. Pero como los analizadores de redes también miden fases, cualquier longitud de cable que se utilice va a tener un efecto directo sobre la fase.

Para ello, el analizador emplea fuentes de potencia absoluta y conocida con un ancho de banda grande y compara las medidas con el resultado. Se procede a realizar las medidas de varios elementos circuitales incluidos en el kit de calibración (kits que se compran y cuentan con todos los elementos necesarios) que son:

- Cortocircuito (Short): termina los puertos en cortocircuitos. Idealmente se refleja toda la potencia.
- Circuito abierto (Open): termina los puertos circuitos abiertos. Idealmente se refleja toda la potencia con fase 0.
- Carga adaptada (Load): termina los puertos en cargas adaptadas, típicamente de 50. Idealmente no se refleja potencia.
- Unión directa de los puertos 1 y 2 (Thru). Idealmente no debería haber pérdidas

La fiabilidad de la calibración está directamente relacionada con la calidad del kit de calibración, por eso un buen kit de calibración con elementos que se comporten bien hasta frecuencias de decenas de GHz puede llegar a costar varios cientos de euros.

Una vez este calibrado, se procede a conectar los cables y comenzar a tomar las medidas, las cuales se van a guardar cómo archivos .s2p (al tener sólo 2 puertos de entrada)

.

Se comparan con los resultados teóricos, recordemos que se busca que se cumplan los siguientes puntos:

- En la frecuencia de diseño, S_{11} es muy bajo.

- En la frecuencia de diseño se comporta cómo una red recíproca, es decir $S_{12} = S_{21}$ y $S_{13} = S_{31}$
- Los puertos 2 y 3 están asilados, es decir, a la frecuencia de diseño estas señales están aisladas entre si y no se produce transferencia de señal entre ellas, esto evita perdidas de inserción.

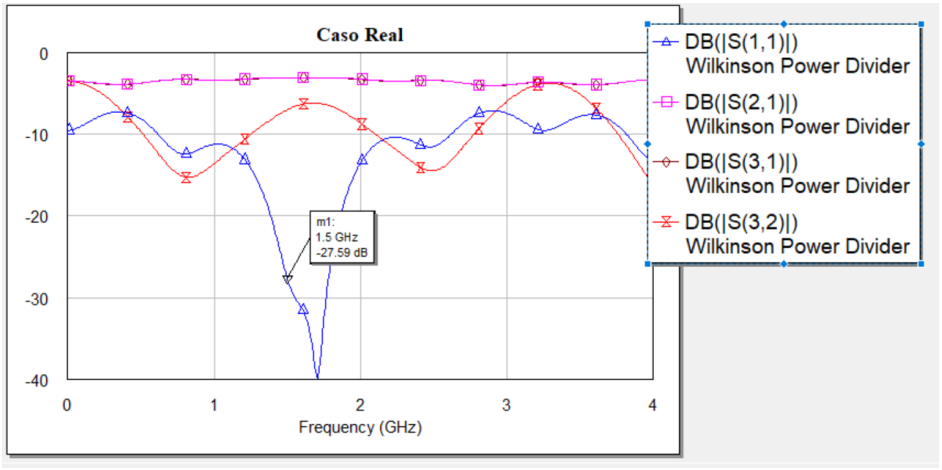


Figura 4.11: Resultados del puente real

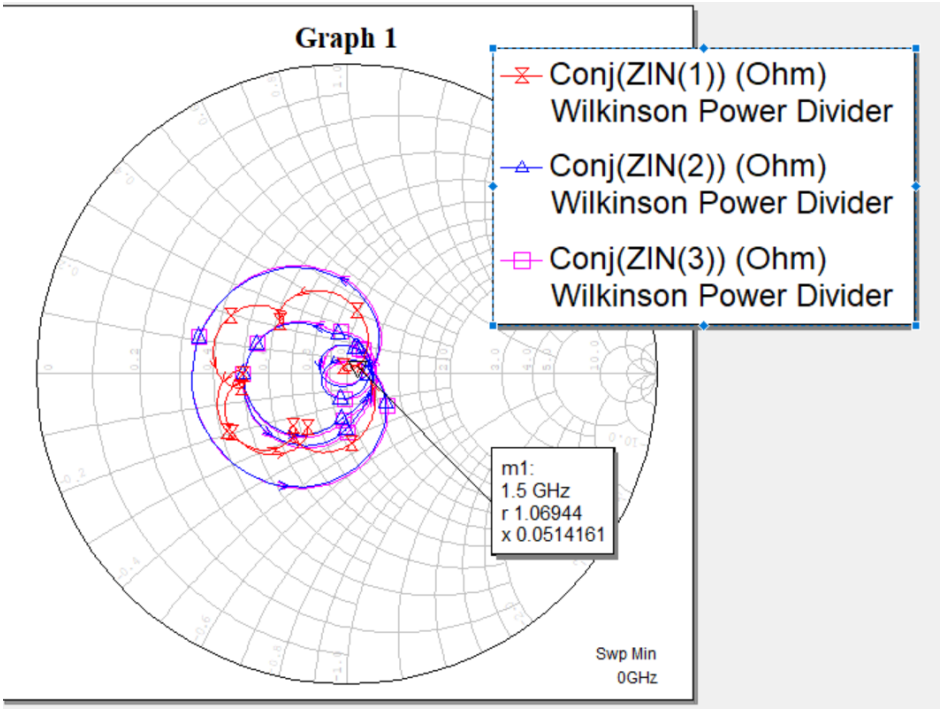


Figura 4.12: Impedancias de entrada y salida del sistema

Se observa que los puntos propuestos se cumplen, aunque el puerto 2 y 3 no están perfectamente asilado, a futuro, esto, se podría solucionar añadiendo stubs (líneas muy cortas)

a la salida de tal forma que las señales tenga puntos de descarga, impidiendo que vayan por otro camino.

Además sus impedancias de entrada y salida son de casi 50 Ω. En la *"Figura 4.12* se muestran los resultados en formato fasorial, es decir, como ganancia y fase normalizado sobre 50 Ω, por lo que cuanto más cercana la magnitud (r) a 1 y más cercana la fase (x) a 0, más cercano a 50 Ω esta el resultado.

4.3. Antena en transmisión

Se busca una antena sencilla de fabricar en el laboratorio y que sea lo más directiva posible, a su vez, se van a emplear dos antenas idénticas para la etapa de transmisión y la etapa de recepción, podría emplearse la misma para ambas etapas, pero entonces habría que crear un interruptor de RF rápido y preciso, a la vez que aislar los cables de emisión y recepción. El emplear dos antenas tiene la desventaja de que en el mundo real nunca serán idénticas, por lo que cualquier error en su construcción afectará a la directividad y funcionamiento de la antena, pero plantea un mejor aislamiento y flexibilidad de montaje.

La primera limitación se resuelve de forma sencilla, se necesita que los componentes de la antena se puedan conseguir o implementar con facilidad con lo que se tiene en el laboratorio o en casa

La segunda limitación, se refiere a la directivdad, *"...parámetro fundamental de las antenas. Mide la "direccionalidad"del diagrama de radiación de una antena. Una antena que irradia por igual en todas las direcciones tendría una direccionalidad nula, y la directividad de este tipo de antena sería 1 (o 0 dB)... Cuando se especifica una directividad para una antena, lo que se quiere decir es "directividad de cresta". La directividad es técnicamente una función del ángulo, pero la variación angular se describe por su diagrama de radiación..."* [22] Es decir, se busca el diseño de antena que asegura la mayor directividad. El diagrama de radiación normalizado de una antena puede escribirse como una función en coordenadas esféricas cómo:

$$D = \frac{1}{\frac{1}{4\pi}\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi}|F(\theta,\phi)|^2 sin\theta d\theta d\phi} \tag{4.1}$$

El numerador es el valor máximo de F (diagrama de radiación), y el denominador sólo representa la "potencia media radiada en todas las direcciones". Esta ecuación es sólo una medida del valor máximo de la potencia radiada dividido por la media, es decir, la directividad de la antena.[22]

4.3.1. Diseño

Teniendo en cuenta estas dos limitaciones, se puede pensar en una antena tipo parche o en una antena yagi casera (con pvc, cobre y cable coaxial). En este caso, para avanzar los conocimientos y debido a que en la asignatura de Sistemas radiantes se construyó una antena tipo parche, cuya directividad no fue muy elevada, es por ello que se ha elegido realizar una antena yagi.

La antena Yagi-Uda es de alta ganancia, es más, cuanto mayor es su ganancia mayor es su directividad y suelen operar en las bandas de HF o UHF (entre 3 MHz y 3 GHz), pero suelen tener un ancho de banda pequeño.

La estructura de estas antenas consta de un elemento de conducción, normalmente un dipolo o antena tipo patch dipolo pegada, este elemento será el único que se excita mediante una fuente de tensión. El resto de elementos se podrían considerar parásitos, reflejando e induciendo energía en una dirección determinada.

Se comienza con la longitud del elemento de alimentación (F en la *"Figura 4.13"*), el cual típicamente se coloca en el segundo director desde el extremo, como se muestra en la *"Figura 4.13"*. Típicamente se modifica el tamaño del elemento de alimentación para que resuene con el resto de elementos, la distancia entre elementos es un parámetro S del cuál existen tablas ya trabajadas para optimizar estos parámetros, y como resultado dan que normalmente debería ser de 0.45-0.48 λ (longitud de onda) para una antena dipolo. A su vez, el elemento situado a la izquierda del elemento de alimentación es el reflector y su longitud será de R, siendo ligeramente más largo que la distancia total del elemento de alimentación, este elemento determina a relación S_{11} de la antena. Cuanto más grande sea el elemento mejor actuará como reflector, por lo que, hará la antena más directiva al reflejar las ondas que vayan en esa dirección hacia la dirección objetivo, es decir, hacia el elemento de alimentación, además, si $R > \lambda$ la corriente del reflector se hará inductiva, ya que los elementos situados a la derecha del elemento de alimentación (en la *"Figura 4.13"*) serán mucho más pequeños o cortos que la resonancia, convirtiéndolos en elementos capacitivos, haciendo que la corriente adelante a la tensión y produciendo una distribución uniforme de fase, esta es la defición de antena de onda viajera y crea un diagrama de radiación con una forma similar a la de una llama, donde la radiación se dirige a lo largo del eje +y (como se muestra en la *"Figura 4.13"*)

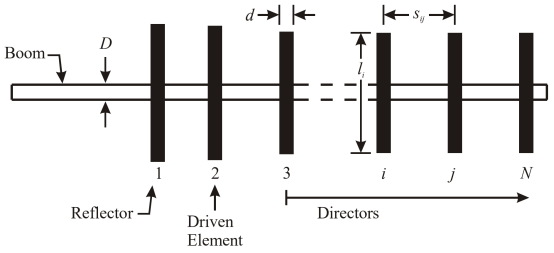


Figura 4.13: Diseño de una antena yagi

El resto de elementos se conocen como elementos directores, y el numero de estos elementos (N) suele oscilar entere 1 y 20, cada elemento tiene una longitud D y suelen estar separador entre sí a una distancia de SD siendo S el valor descrito por las tablas.

El diseño de estas antenas es el siguiente:

- Buscar tablas de parámetros de diseño de Yagi-Uda actualizadas
- Diseño con un programa de diseño de antenas y ajustar mediante las tablas a un rendimiento aceptable

Para este caso, se va a emplear una de las tablas más usadas, la table publicada por *P. Viezbicke de National Bureau of Standrds* en *Yagi Antenna Design*, 1968.

$d/\lambda = 0.0085$ $s_{12} = 0.2\lambda$		LENGTH OF YAGI-UDA (IN WAVELENGTHS)					
		0.4	0.8	1.20	2.2	3.2	4.2
LENGTH OF REFLECTOR (l_1/λ)		0.482	0.482	0.482	0.482	0.482	0.475
LENGTH OF DIRECTORS, λ	l_3	0.442	0.428	0.428	0.432	0.428	0.424
	l_4		0.424	0.420	0.415	0.420	0.424
	l_5		0.428	0.420	0.407	0.407	0.420
	l_6			0.428	0.398	0.398	0.407
	l_7				0.390	0.394	0.403
	l_8				0.390	0.390	0.398
	l_9				0.390	0.386	0.394
	l_{10}				0.390	0.386	0.390
	l_{11}				0.398	0.386	0.390
	l_{12}				0.407	0.386	0.390
	l_{13}					0.386	0.390
	l_{14}					0.386	0.390
	l_{15}					0.386	0.390
	l_{16}					0.386	
	l_{17}					0.386	
SPACING BETWEEN DIRECTORS (s_9/λ)		0.20	0.20	0.25	0.20	0.20	0.308
DIRECTIVITY RELATIVE TO HALF-WAVE DIPOLE (dB)		7.1	9.2	10.2	12.25	13.4	14.2
DESIGN CURVE (SEE FIGURE 10.25)		(*A*)	(*B*)	(*B*)	(*C*)	(*B*)	(*D*)

Figura 4.14: *P. Viezbicke de National Bureau of Standrds* en *Yagi Antenna Design*, 1968.

La tabla anterior es un punto de partida perfecto para calcular la longitud necesaria de la antena

Tras tener en cuenta estas tablas se realiza una simulación empleando la herramienta de Antenna Designer de Matlab a una frecuencia de 1.5 GHz, por lo que se emplea la tabla con los valores de I_4

Medida	Formula	Resultado
λ	$\frac{c}{f}$	0.1999 m
$\frac{d}{\lambda}$	$\frac{d}{\lambda}$	0.0085 m
S_{12}	$0{,}2\lambda$	0.039 m
longitud total de la antena	$0{,}8\lambda$	0.159 m
longitud del reflector	$\frac{I_1}{\lambda} = 0{,}482\lambda$	0.096 m
longitud del primer director	$0{,}428\lambda$	0.085 m
longitud del segundo director	$0{,}424\lambda$	0.084 m
espacio entre directores	$\frac{S_11}{\lambda} = 0{,}20\lambda$	$0{,}039m$

Tabla 4.4: Valores de las líneas de transmisión propuestas

Al introducir estos valores en la simulación, incluyendo los datos del material sobre el que se va a construir, el cual es el mismo en todas la placas y empleando elementos de cobre (se da la impedancia y la conductividad del material que conforma los elementos de la antena), y se elige un dipolo doblado como elemento activo. Se llega a los siguientes resultados:

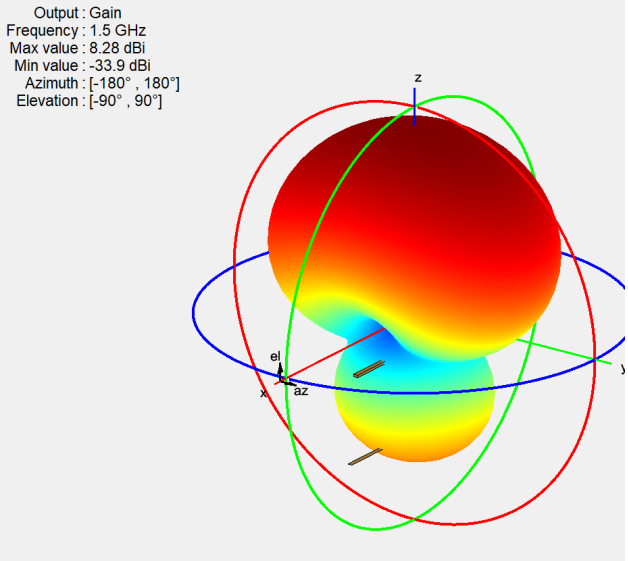
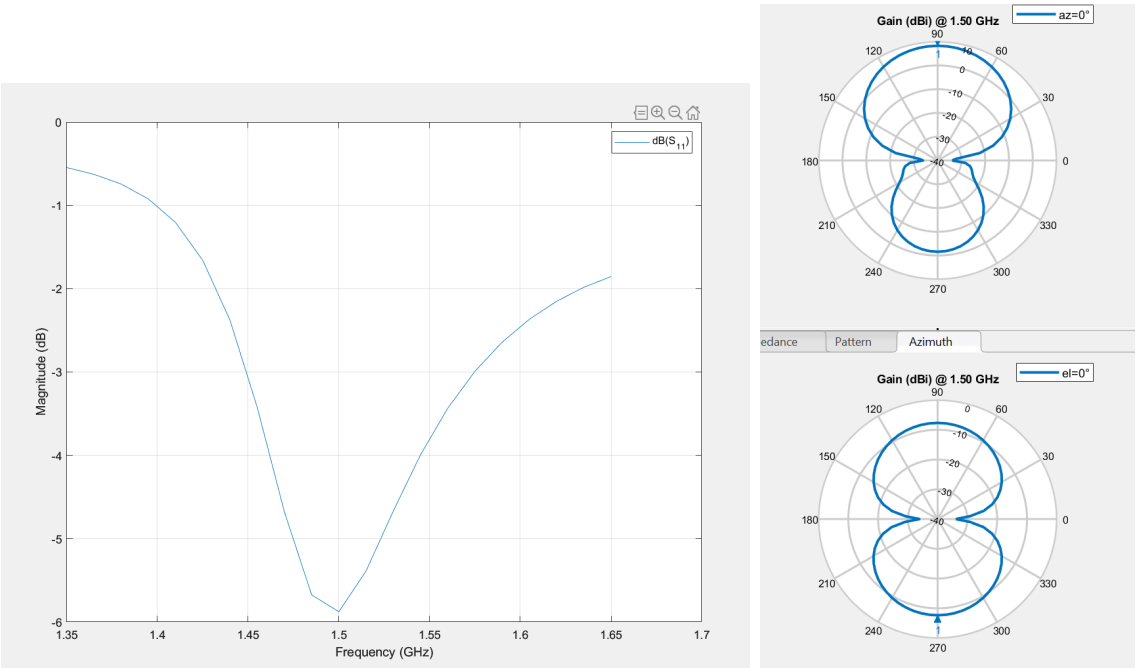


Figura 4.15: Patrón de radiación frente al diseño de la antena

Si se observan los valores de la simulación para este diseño, se puede comprobar que el funcionamiento es el adecuado para un frecuencia de resonancia de 1.5 GHz.

Se espera además, que tenga una impedancia de entada de 50 Ω, es decir, la impedancia característica . En este caso, para ahorrar material se van a emplear, 2 elementos directivos, 1 elemento reflector y 1 elemento de alimentación, es decir:



(a) Parámetro S11, con caída en 1.5 GHz (b) Patrón de radiación

Figura 4.16: Resultados de la simulación

4.3.2. Montaje y Pruebas

Para el montaje de esta antena se emplearán los siguientes materiales:

- *Guia*: Tubo de PPB de 5/8 de grosor y 15.9 cm de largo. La antena estándar de mercado tiene un grosor de 1.6 cm y la que se diseña tendrá 1.588 cm, esto significa que los directores saldrán un poco más con respecto a la guía estándar.
- *Directores*: Hilo de cobre calibre 13, con 50 cm de cable bastaría para una antena.
- *Coaxial*: Cable coaxial de la misma medida que la guía en largo.
- *Conectores*: Se necesitan para poder conectar el cable coaxial al resto del circuito.

Se va a emplear como guía dos videos uno del MIT[23], y sí se utilizan las medidas propuestas y el método de los videos para realizar las antenas, el diseño final será:

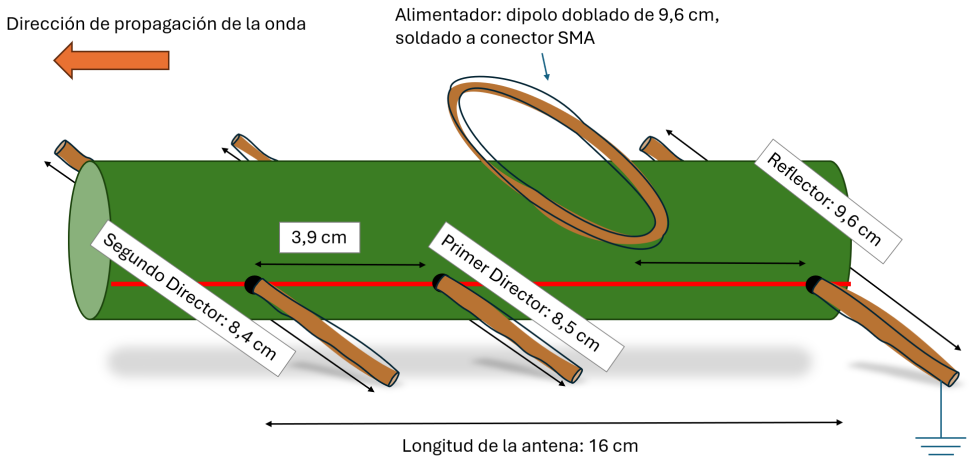
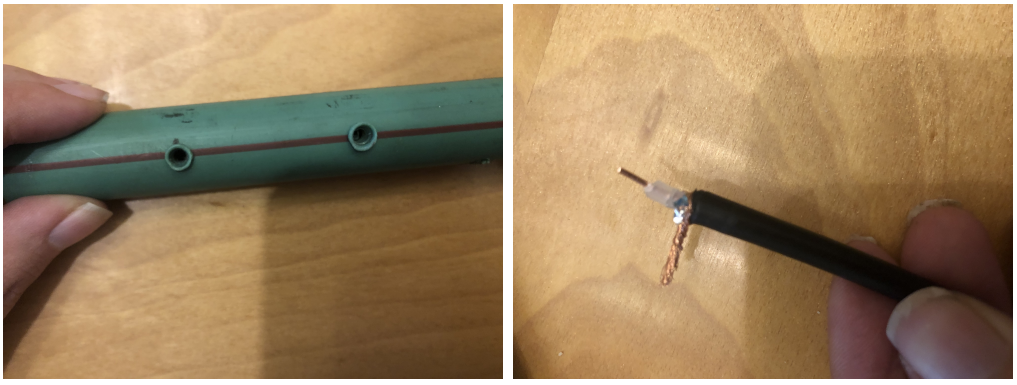


Figura 4.17: Diseño de la antena a realizar

El primer paso será crear las guías con los agujeros correspondientes, es decir 3 de lado a lado para los directores y reflectores. A continuación, se miden y cortan los directores y el reflector en el cable de cobre. Y por ultimo se colocan en la guía y se fijan con silicona o algún material no conductor.

Ahora es necesario crear el dipolo de la antena con el cable coaxial, para ello, primero se va a pelar uno de sus extremos a la medida del grosor de la guía, dejando expuesto el cable de cobre del centro del cable, finalmente se procede a estañar la punta.

Por último se crea elemento del dipolo, será un dipolo doblado con la misma medida que el reflector y sólo quedaría colocar los conectores RF en el cable coaxial para poder conectarlo a los equipos.



(a) Agujeros (b) Cable coaxial pelado

Figura 4.18: Diseño final



Figura 4.19: Antenas resultantes

El alumno no ha podido medir los parámetros de la antena a día de la entrega del TFG debido a que por problemas de salud no ha podido acudir al laboratorio, queda como trabajo futuro.

En el caso de que las medidas tomadas no sean válidas, esta antena tiene la ventaja de que las medidas de los directores (las que más afectan a la frecuencia de trabajo de la antena) se pueden ajustar con gran facilidad al ser elementos no fijos (se han unido con silicona caliente y puntos de soldadura, si se necesitará cambiarlos solo habría que quitarlos con una pistola de calor y sustituirlos por elementos nuevos).

4.4. Amplificador de potencia

Se propone, tras ver en las simulaciones la disminución en potencia de la señal de salida del puente de tensión, emplear un amplificador de potencia antes de la antena emisora, el cual amplificará la señal de emisión para que tenga una potencia adecuada, de por lo menos 10 dB. Al igual que con el caso del generador de señales, la complejidad de este modulo, la falta de tiempo y la necesidad de un funcionamiento completo ha dado como resultado el de emplear un amplificador de potencia del laboratorio, el cual, se ha medido y caracterizado para su uso.

Se ha empleado el ZHL-2W-63-S+, el cual es un amplificador de alta potencia, con las siguientes características:

Frecuencia	600 MHz a 6 GHz
Ganancia máxima	+51 dB
Ganancia típica	+42 dB
Potencia de salida a 3dB de compresión	+31dBm
Figura de ruido	12 dB
Impedancia	50 Ω

Tabla 4.5: Características amplificador de potencia

Para su medida se ha empleado el mismo método de análisis vectorial y del espectro que en el caso del puente de wilkinson, pero hay que trabajar con cautela, pues amplifica a 40 dB, y la mayoría de analizadores admiten como mucho 20 dB, se observa que el analizador de vectorial de redes del laboratorio, admite hasta 30 dB de potencia de entrada, es por ello, que antes de tomar las medidas, y para no dañar el aparato, se procede a introducir un atenuador a 30dB, concretamente el VAT-30+ de Mini Circuits, el cual, si se estudia su data sheet se observa que tiene una atenuación de 28.75 dB a 1.5 GHz, con una reflexión de casi 0, siendo ideal para esta situación.

Es por ello, que primero, se va a caracterizar este componente, lo que se busca es la ganancia en la medida S de los puertos 1-2 recíprocos y la medida VSWR en cada puerto, la cual determina la reflexión en los puertos. (Ya que $VSWR = \frac{1+R}{1-R}$)

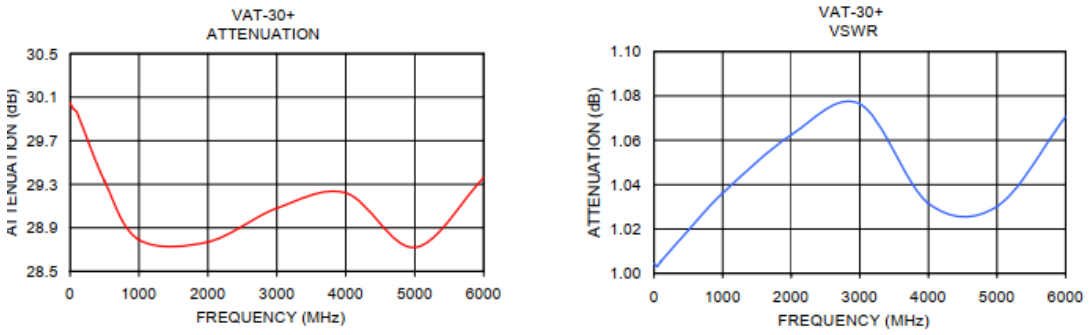


Figura 4.20: Funcionamiento ideal del atenuador

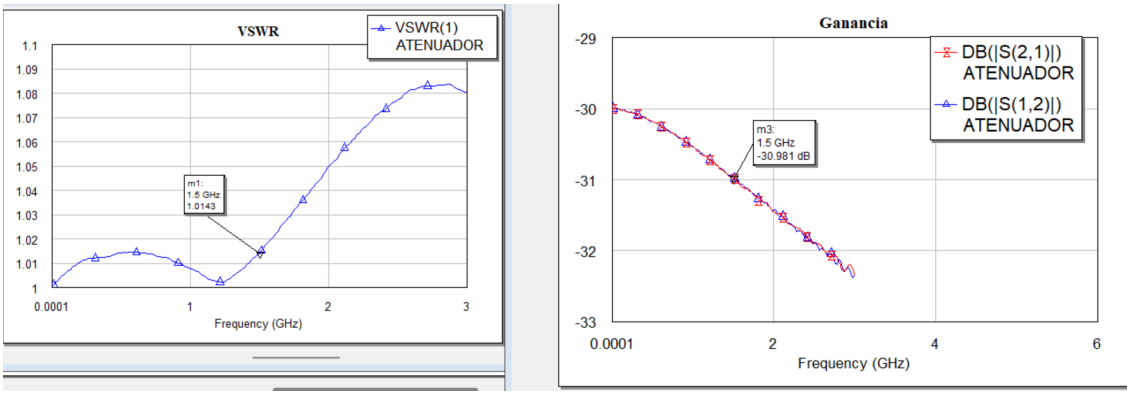


Figura 4.21: Funcionamiento real del atenuador

Como se puede observar en la *"Figura 4.21"*, se atenúa la señal en 30 dB, y no produce reflexión de la señal (VSWR es 1), por lo que es ideal para que amplificador de potencia trabaje en las potencias deseadas de aproximadamente 10 dB.

A continuación, se mide el amplificador, junto el atenuador, de tal forma que el resultado final de ganancia obtenido será aquel disponible entre los puertos 2 y 1. Con las conexiones puerto 2 a la salida del atenuador, (el cual se conecta a la salida del amplificador) y el puerto 1 a la entrada del amplificador. Dando cómo resultado la *"Figura 4.22"*. La cuál, muestra que el amplificador conectado al atenuador tendrá en 1.5GHz una amplificación de potencia de casi 5dB, esto, es cercano al objetivo, pero puede que sea muy bajo.

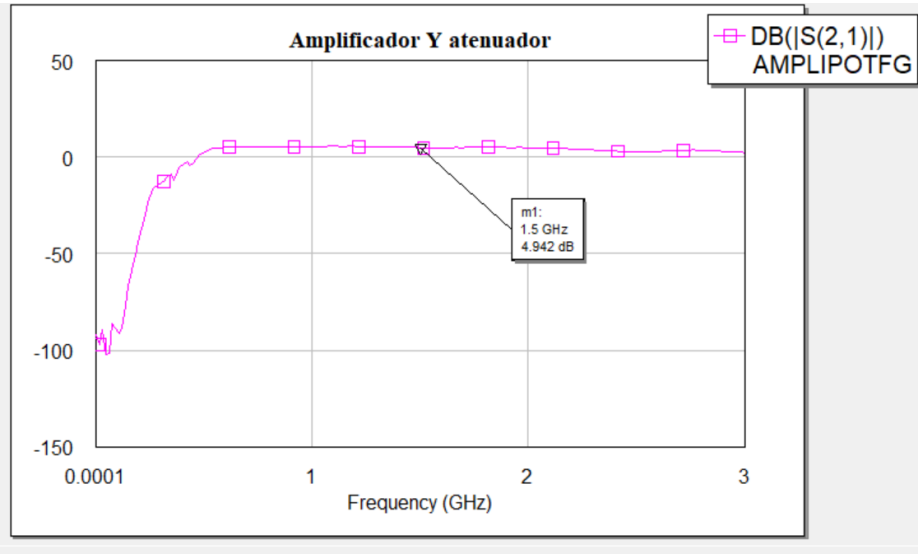


Figura 4.22: Funcionamiento del amplificador de potencia

Solo faltaría conectar el amplificador entre el divisor y la antena y medir el valor resultante, si el valor de potencia resultante se encuentra en el rango de los 15-20dBm, se considerará valida esta solución, si esta por debajo de estas, habría que realizar de nuevo las medidas empleando otro atenuador menos restrictivo.

Pero como no se han podido caracterizar las antenas reales, se deja este paso de optimización del diseño como propuesto y descrito como trabajo futuro.

Capítulo 5

Etapa de Recepción

Si nos remitimos al diagrama de bloques de la *Figura 3.1*, la etapa de recepción es donde se recoge la señal (con una antena), se amplifica (con un amplificador de frecuencia) y se mezcla con la frecuencia de operación (proveniente del divisor de tensión), posteriormente, este batido de frecuencias se filtra y amplifica en banda base (con un filtro paso baja) para tener una señal Doppler (señal modulada en amplitud) limpia y clara en frecuencia, para la etapa de detección de frecuencia se va a emplear una placa de ARDUINO UNO mediante la lectura de los picos de su envolvente, de la cual se hablará en el punto Capítulo 6.

5.1. Antena en Recepción

5.1.1. Diseño

Las antenas de transmisión y recepción tienen exactamente el mismo diseño, por lo que se remite al lector a la sección antenas de emisión, las posibles diferencias entre una y otra se deben a errores humanos en la impresión.

El montaje es exactamente el mismo observado previamente en antenas de emisión, es más, las dos antenas se han construido a la vez, por lo que en esta sección solo se observarán los resultados de las pruebas realizadas sobre la antena de Recepción. Dado que no se ha podido caracterizar las antenas, este paso se propone como trabajo futuro.

5.2. Pre-Amplificado, Amplificador de alta frecuencia y amplificador en banda base

Se va a emplear el mismo amplificador en los casos de amplificación en frecuencia, en este sistema se necesita amplificar la señal de recepción, ya que esta suele ser muy débil. Deben ser amplificadores de bajo ruido formados por redes de resistencias y condensadores para justar los niveles de polarización y optimizar la señal resultante.

Se debe emplear un amplificador de bajo ruido con ganancia de al menos 20 dB y figura de ruido baja con una red de adaptación adecuada.

Se elige un amplificador y después, con la red de adaptación se procede a adaptar la impedancia de entrada y salida a la de un circuito de RF, es decir a 50 Ω.

5.2.1. Elección y diseño de la red de adaptación

Para la elección del amplificador se proceder a realizar búsquedas y comparaciones en diversas webs de vendedores y fabricantes, en este caso, como se pretende implementar sobre una placa PCB, se eligen amplificadores integrados de RF de bajo ruido y teniendo en cuenta la limitaciones de tiempo y coste, se proponen amplificadores que se encuentren en el laboratorio. Tras realizar este estudio, se proponen los siguientes amplificadores:

Amplificador Propuesto	HMC589A2[24]	ADL5545[25]
Frecuencia	30 MHz a 4 GHz	30 MHz a 6 GHz
Ganancia típica	+21 dB	+24.1 dB
Potencia de entrada	+8 dBm a 1-4 GHz	+10 dBm a 900 MHz
Figura de ruido	5 dB a 1.5 GHz	2.9 dB a 900 MHz
Impedancia	50 Ω	50 Ω
Alimentación	5V	5V

Tabla 5.1: Características de los dos amplificadores propuestos

Una vez estén todos los archivos .s2p insertados en el AWR MW Office se observan los parámetros MAG de estos, es decir la máxima ganancia que proporcionan a las distintas frecuencias, se observará en 1.5 Ghz y se busca que sea mayor de 20 dB en esa frecuencia.

$$MAG = |\frac{S_{21}}{S_{12}}|(K - \sqrt{K^2 - 1}$$

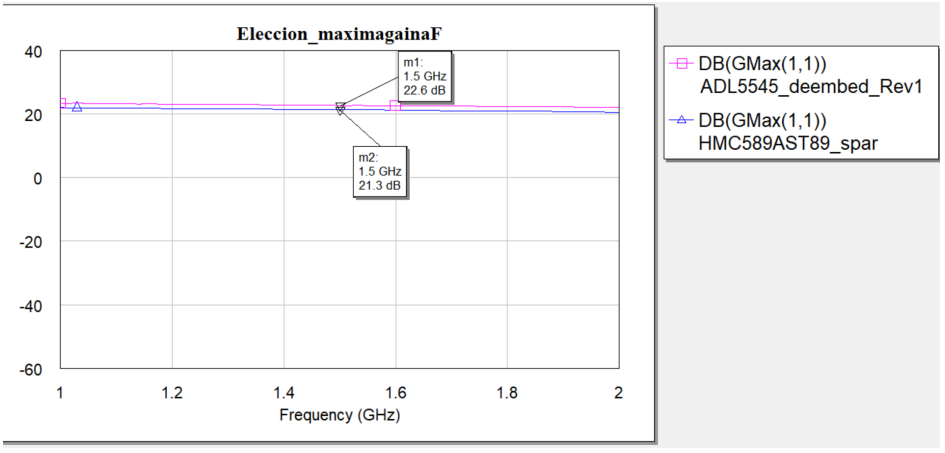


Figura 5.1: Ganancia máxima de los amplificadores propuestos (MAG)

Ambos cumplen está condición, por lo que ahora se observará la estabilidad en las distintas frecuencias, para ello se emplea al parámetro K, dado por la siguiente relación:

$$K = \frac{1 + |\delta|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2|S_{12}S_{11}}$$

Para ello se crea otra gráfica, con la condición de que K >1 para ser estables, ya que si esto no se cumple la MAG anteriormente calculada carece de sentido.

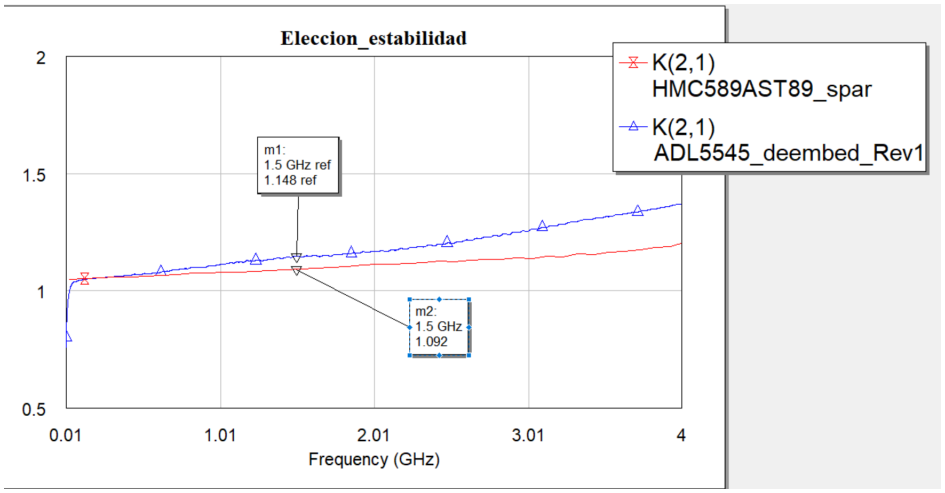


Figura 5.2: Estabilidad de los amplificadores propuestos (factor K)

Vemos que los dos transistores tienen una K>1, por tanto, la MAG obtenida se cumple para los dos, por ahora nada nos indica que uno sea mejor que el otro, por lo que se siguen realizando simulaciones. Por último, se mira el parámetro módulo de delta, el cual viene dado por:

$$\delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$$

Para que sea estable el amplificador, tiene que cumplirse que este parámetro sea menor que 1. El problema está en que AWR MW Office no tiene este parámetro de por sí, por tanto, se recurre a un parámetro llamado B1, el cual si B1 >0, es lo mismo que si módulo de delta <1 (son inversamente proporcionales).

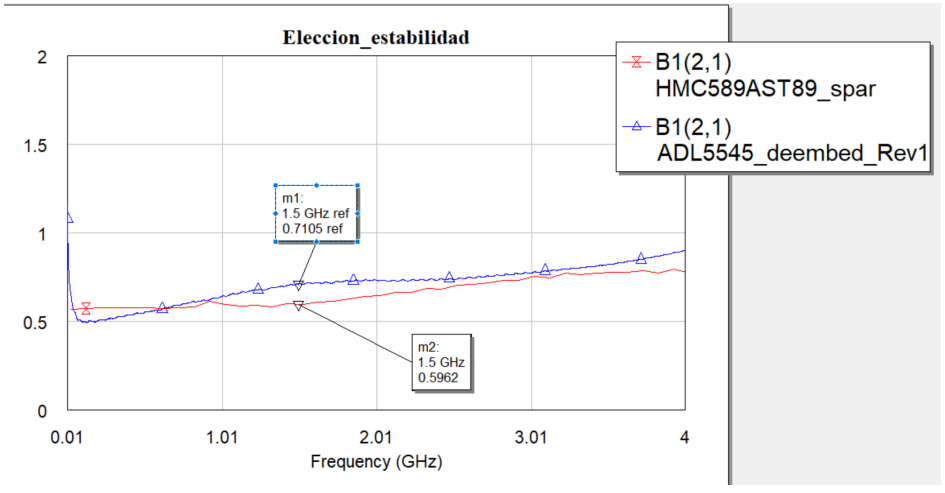
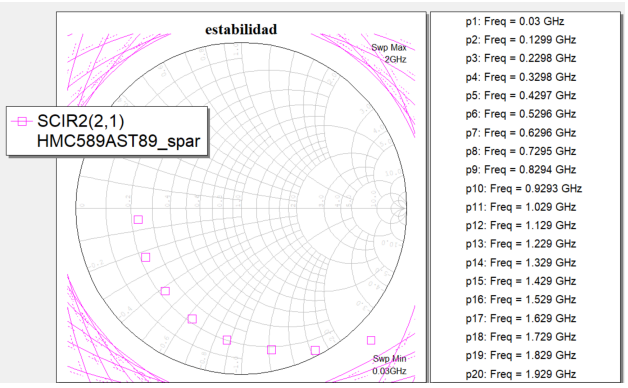


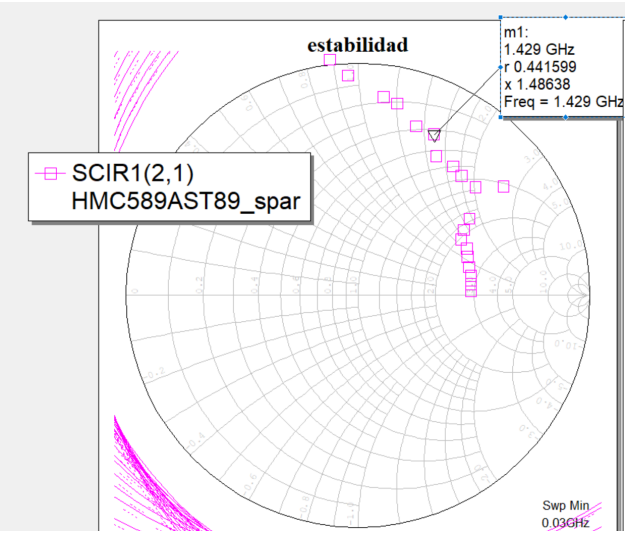
Figura 5.3: Estabilidad de los amplificadores propuestos (factor B)

Se ha elegido el HMC589A2, ya que tiene una ganancia máxima menor, por lo que va a tener menos pérdidas a la hora de amplificar la señal. Ahora, se procede a la adaptación

del amplificador en si, para ello, es necesario observar si se necesita adaptación a la entrada o a la salida, se representan los círculos de estabilidad a la entrada sobre la carta de Smith haciendo uso del parámetro SCIR1 de AWR MW Office. Se hace lo mismo, pero con los círculos de estabilidad a la salida, para ello se emplea SCIR2.



(a) Estabilidad a la salida



(b) Estabilidad a la entrada

Figura 5.4: Estabilidad de los amplificadores propuestos

Se ven los círculos de estabilidad para cada frecuencia dada en los archivos de parámetros S. Los cuales relacionan la impedancia del puerto con la reflexión que tiene este de forma compleja, cuanto más cerca del centro del circulo se encuentre un punto de frecuencia, más cerca de la inestabilidad se considera, en los amplificadores, se busca que los puntos de relación se encuentren fuera del circulo para asegurar la estabilidad.

Los círculos de estabilidad a la entrada ocupan media carta de Smith, estos círculos son los de frecuencias bajas (0-3 Ghz), frecuencias que suelen estar bastante cerca del centro de la carta de Smith, y pueden indicar inestabilidad, pero no es una medida absoluta, pues en este caso está cerca del borde, para ajustar este valor y asegurar la estabilidad se pueden recurrir a redes de adaptación y otras técnicas.

Podemos hacer padding para solucionar esto, lo cual es añadir una resistencia a la entrada

para ver si se limpian estos círculos, cosa que no suele funcionar ya que la MAG puede no llegar a la potencia deseada. Esa resistencia se añade junto a una red más compleja. Se tiene una MAG de 21.3 dB, por tanto, al adaptar se pueden llegar a perder hasta 1.3 dB.

Para esto se ha decidido perder todos los dB que puedo a la salida, teniendo cuidado a la hora de adaptar la salida ya que tiene que estar adaptada a 50 ohm.

Para la adaptación de la impedancia del amplificador, se pretende emplear una red RLC, donde las impedancias de entrada y salida son la misma, es decir, la impedancia de la antena, para ello, se coloca una inductancia en serie con la antena y se conecta 1 resistencias en paralelo formando una T con conexión a tierra.

La elección del valor de la inductancia viene determinada por la frecuencia de resonancia en un circuito LC

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

La impedancia de salida será entonces (siendo w la frecuencia angular de la señal)

$$Z_out = R_2||(R_1 + jwL_1)$$

Se pueden suponer unos valores base, como por ejemplo $Z_in = 50\Omega$ y $Z_out = 50\Omega$, con valores típicos y prefijados de $L_1 = 10nH$ y $R_2 = 180\Omega$, y con la ayuda de la herramienta AWR, se procede a ajustar en la medida de lo posible mediante simulación estos valores y la herramienta de optimización, durante las simulaciones se ha observado que es mejor crear una red más compleja a la salida, donde hay una combinación RLC, se ha empleado directamente la herramienta de AWR MW Oficce para crear esta red, basándose en los amplificadores empleados en clase de Compatibilidad electromagnética, obteniéndose los siguientes resultados:

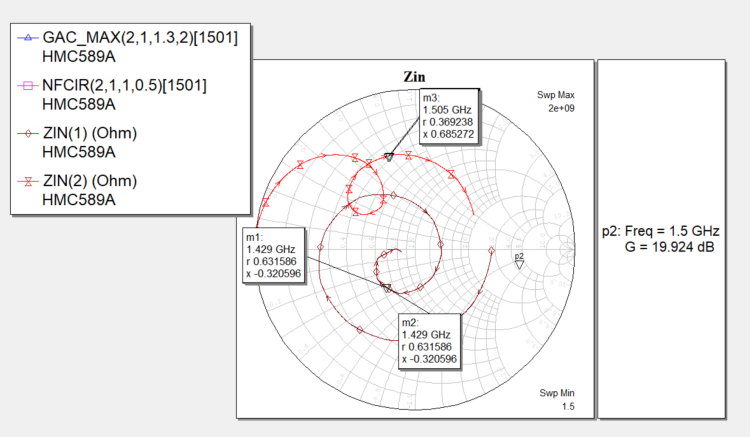


Figura 5.5: Estabilidad y ganancias a la salida y la entrada

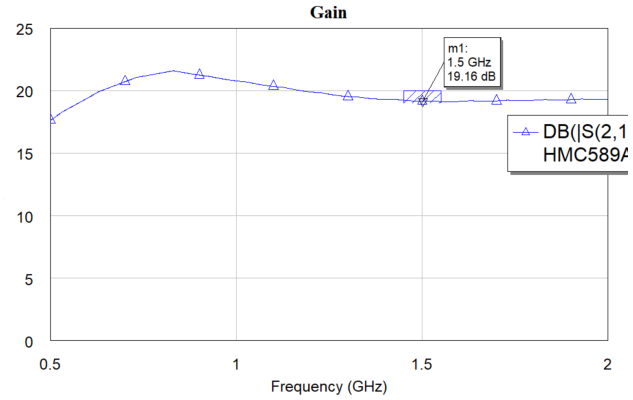


Figura 5.6: Ganancia a la salida del circuito completo

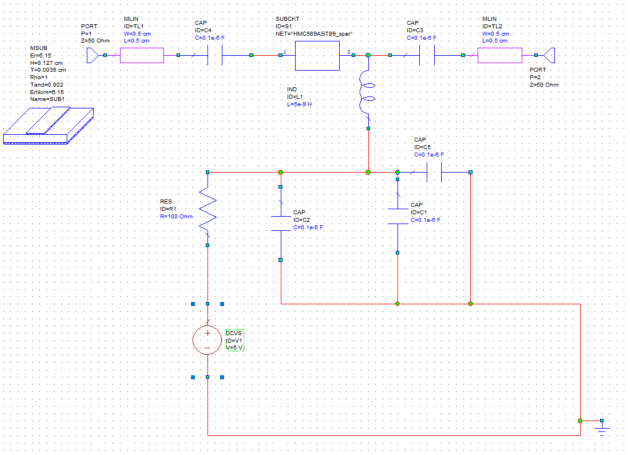


Figura 5.7: Cirucito final

Lo cual demuestra que se puede conseguir una estabilidad mediante la adaptación a la salida, y además daría valores de ganancia de casi 20dB. Lo único que no sería ideal, pero se compensa con una resistencia en paralelo a la entrada y otra a la salida (de 75 Ω) es la impedancia, la cual toma un valor (r) de 25 Ω.

5.3. Mezclador

En el caso de un radar de efecto Doppler, se necesita un mezclador para desplazar la señal recibida de 1.5Ghz a una frecuencia menor que nos permita pasar a un conversor analógico-digital para su posterior procesado. Esto corresponde a un mezclador funcionando en modo "down-converter". Para ello tomamos la frecuencia OL menor que la RF, para obtener en banda base la señal de RF de 1.5GHz con un ancho de banda aproximado de 100 MHz. [26]

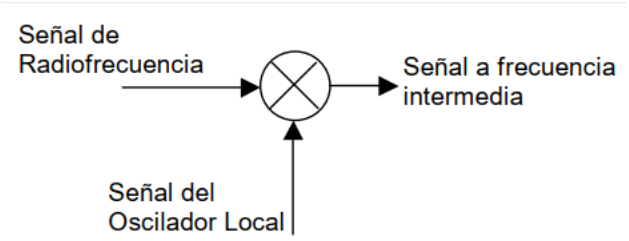


Figura 5.8: Funcionamiento del mezclador

Un mezclador, en un dispositivo capaz de mezclar dos señales de entrada, típicamente de distinta frecuencia, dando como resultado un mezcla de estas señales tal que:

$$v_{out}(t) = Kv_{in_1}v_{in_2}$$

Es decir, mezcla dos señales en el tiempo multiplicándolas. Pero las señales con las que se trabajan van a ser de tipo seno, por lo que se van a producir lo que se conocen como Mezclas espurias, conjuntos de término de la forma $K_m K_n v_{out}(t)^m v_{in_i}(t)^m$ donde m y n se corresponden conjuntos de mezclas de las frecuencias de entrada, es decir, se generan frecuencias $mf_1 + nf_2$, las cuales se nominan productos de intermodulación de orden m+n. Estos productos se caracterizan porque a mayor orden menor potencia, y los primeros en aparecer son los de menor orden y mayor potencia, por lo que se necesita eliminarlos de alguna manera. Para reducir el numero de productos, se puede hacer de forma sencilla con diodos Schottky ajustando la impedancia con una red de adaptación.[27]

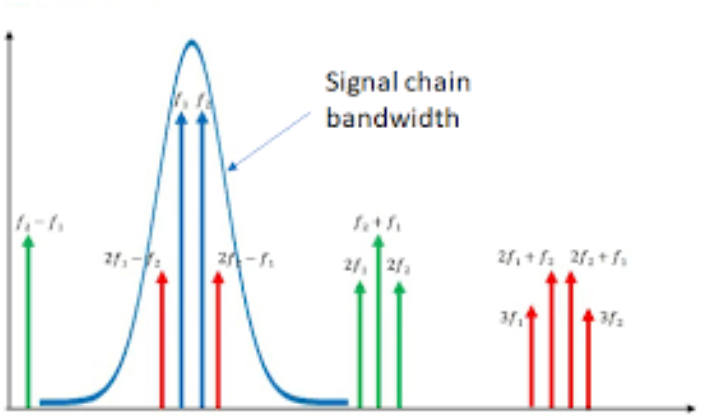


Figura 5.9: Productos de intermodulación [27]

5.3.1. Diseño

Se deben emplear diodos Schottky de alta velocidad y baja capacitancia.

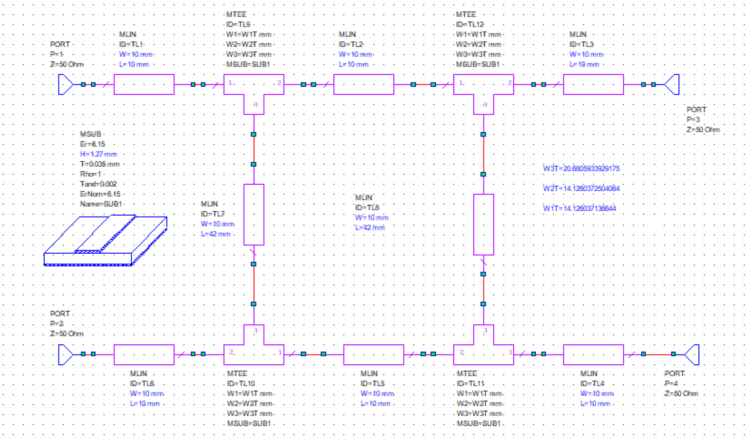
Para la elección se ha vuelto a emplear la web de venta de elementos electrónicos rs-online.es[28], empleando parámetros de búsqueda para diodos de alta velocidad, baja capacitancia y baja tensión de alimentación pues se pretende alimentar con una batería o con una placa. Se ha elegido el diodo BAT-17G[29].

Montaje y encapsulado	Superficial SOT-23
Corriente continua máxima	200mA
Caída de tensión máxima	1.25V
Tiempo de recuperación	6ns - 6GHz

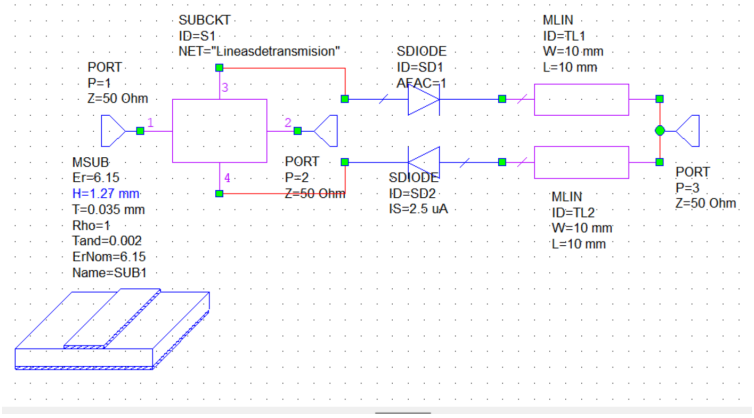
Tabla 5.2: Características del diodo empleado

Se ha elegido este diodo, lo primero porque estaba disponible en el laboratorio y lo segundo, por sus características, tiene una respuesta altamente rápida con una capacitancia interna de 0.75pF a un voltaje de 5 voltios. que es el uque se va a emplear para alimentar todo el circuito.

El mezclador en sí esta diseñado con una configuración en H o en pi. Emplearía 2 diodos, uno, permitiría el paso de la mitad positiva de la señal RF, el segundo, que se colocaría en paralelo con el primero, permitiría el paso de la mitad negativa y ambos se conectarían a la señal de referencia (adaptada) que viene del divisor y permite la mezcla de la señal de RF de la antena con la señal de referencia.



(a) Red en H



(b) Circuito completo con los diodos

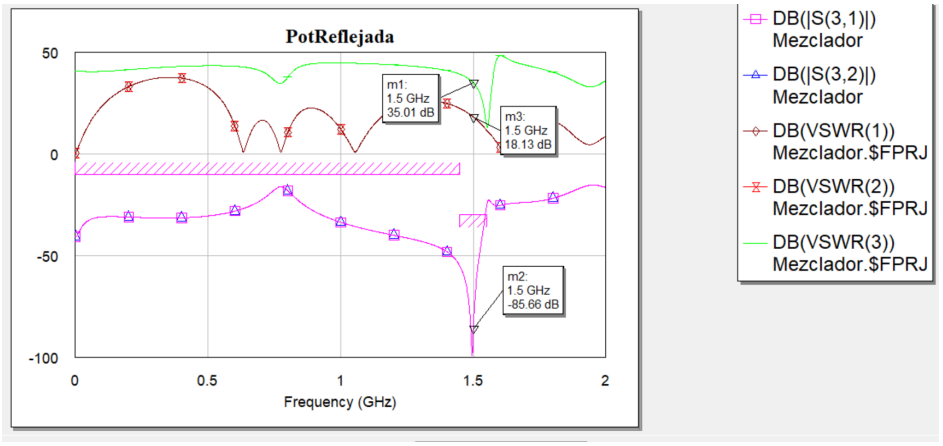
Figura 5.10: Red en H circuito

El parámetro que más se va a tener en cuenta es la reflexión de la señal, la cual en AWR se obtiene como el VSWR, ya que es directamente proporcional al coeficiente de reflexión de la señal.

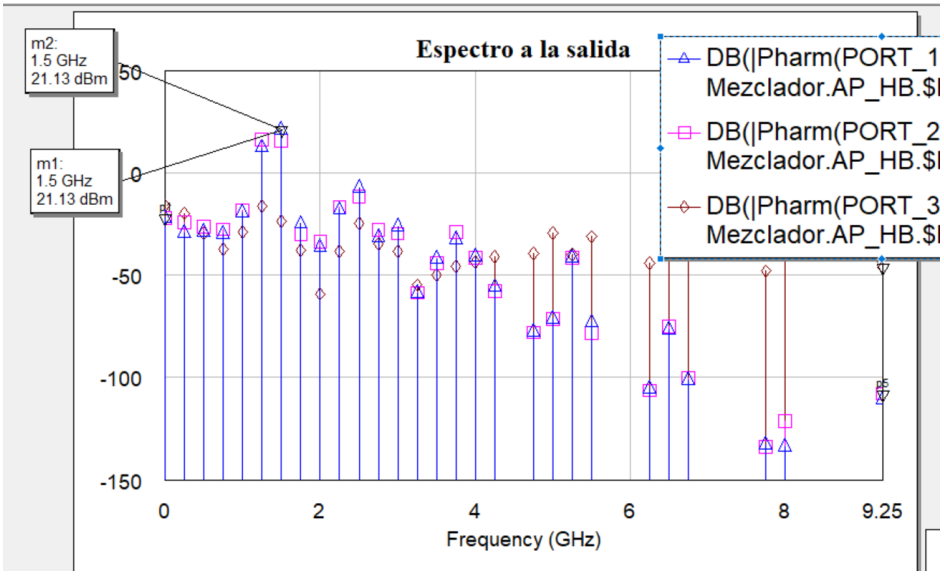
$$VSWR = \frac{1+R}{1-R}$$

El objetivo es que la reflexión a la frecuencia deseada sea mínima, por ello, el VSWR debe ser mínimo, obteniendo así las mínimas perdidas de inserción posibles. A su vez, observando el espectro de la señal, se espera obtener picos de frecuencia en la frecuencia de diseño, por último, se espera que las entradas y el puerto de salida estén aislados, por ello, se observa la ganancia entre los puertos 31 y 23, esperando que sea lo más cercana a 0 posible.

Con estos datos, se crean perfiles de optimización en AWR, llegando a los siguientes resultados.



(a) Red en H



(b) Circuito completo con los diodos

Figura 5.11: Red en H resultados

Por lo tanto, el sistema a montar es el de la *Figura 5.12* y se va a realizar mediante

fotolitografía, proceso utilizado para fabricar dispositivos semiconductores, se transfiere un patrón desde una fotomáscara a la superficie de una oblea (trozo del material a emplear).

El proceso de fotolitografía es el siguiente: *"[...]*

- *Limpieza de obleas semiconductoras: eliminar cualquier tipo de contaminante de la superficie.*
- *Aplicación de la fotorresina: la superficie se cubre con una sustancia sensible a la luz, dejando la oblea recubierta con una capa plana y uniforme, esta fotoresina es una lámina trasparente sobre la que se imprimer en nergo el diseño, para que se impriman las zonas donde haya dibujo.*
- *Exposición y desarrollo de la fotorresistencia: la oblea se expone a la luz ultravioleta y la fotorresistencia se ilumina a través de las zonas no oscurecidas por el patrón dibujado en la máscara. Posteriormente, la oblea se .ªblanda.en las partes iluminadas sometiéndola a un agente químico que elimina las zonas no dibujadas.*
- *Grabado: proceso de grabado selectivo de la oblea de silicio en aquellas zonas que no han sido protegidas por el fotorresistente.*
- *Eliminación de la fotorresina: a través de un proceso de disolución y eliminación cuando ya no es necesario.*

[...]"[30]

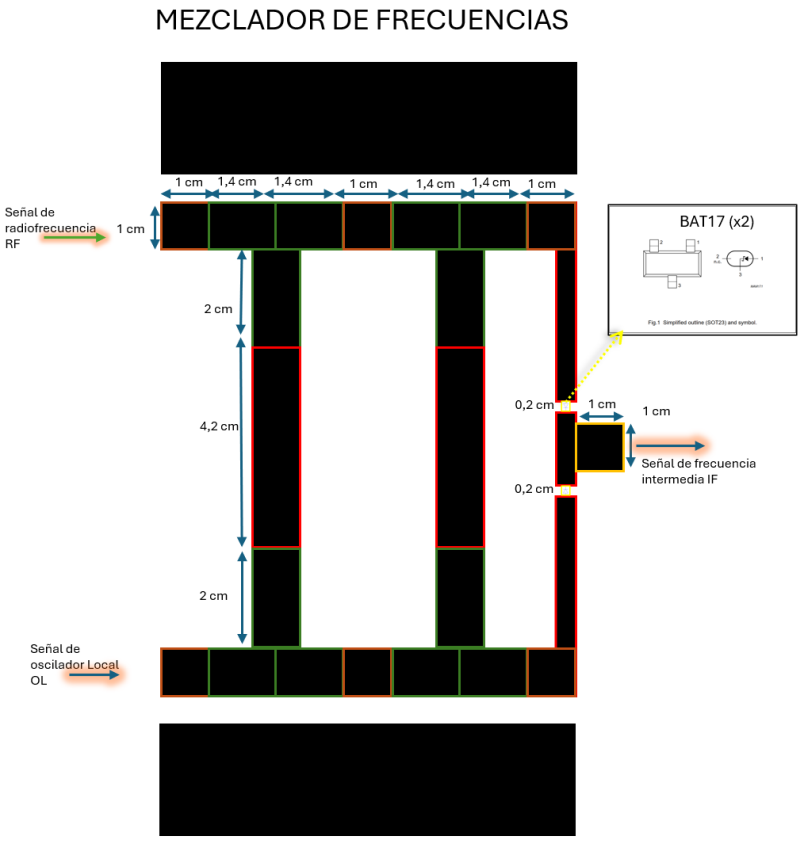


Figura 5.12: Diseño del mezclador

5.4. Filtro Paso Baja

Se creará un filtro para eliminar el máximo de espurias posibles y tener la señal en banda base, es decir, en el espectro positivo desde cero, de esta forma, es mucho más sencillo su estudio.

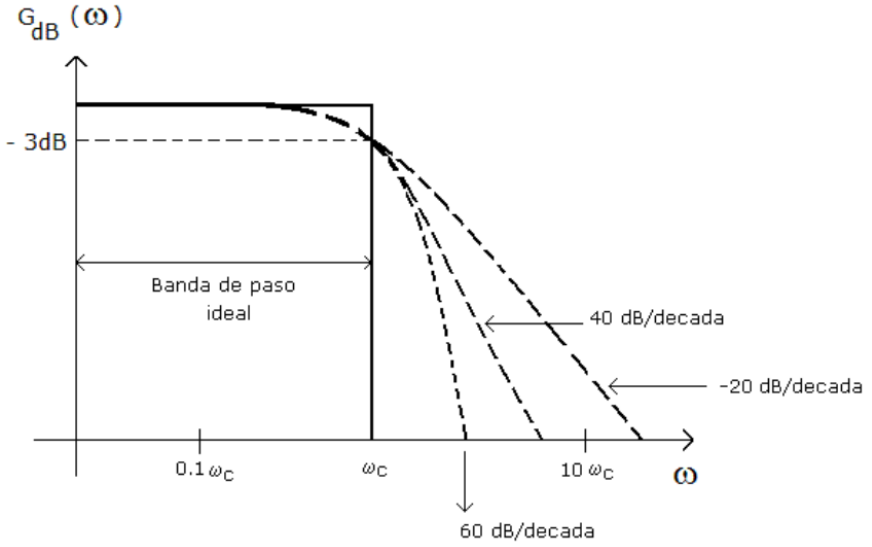


Figura 5.13: Comportamiento de un filtro paso bajo (Tipo Butterworth)

Se elige filtro tipo Butterworth porque de los tipos de filtros es el más sencillo, se pretende comenzar con ejemplos sencillos y si el tiempo no apremia intentar realizar ejemplos más complejos.

En los filtros paso bajo las medidas se deben tomar en la banda de paso, ya que la banda de paso representa las frecuencias que el filtro dejará pasar, para obtener la banda de paso se debe buscar el punto en el que el filtro tenga una caída de -3dB, en ese punto estará la frecuencia de corte que indicara el ancho de banda de la banda de paso. Ahora, que ya se sabe como encontrar la zona de trabajo del filtro, se pueden comenzar a evaluar un diseño.

5.4.1. Diseño

Se busca un filtro cuya transformada de Laplace„ al realizar un diagrama de bode del filtro, este tendrá la forma de la *Figura 5.13*, con una bajada de -(minimo)20dBm en la posición de la frecuencia de corte.

Lo primero es calcular los parámetros del filtro como

$$C = \frac{g_i}{2\pi f_c R_0}$$

$$L = \frac{g_i R_0}{2\pi f_c}$$

Donde:

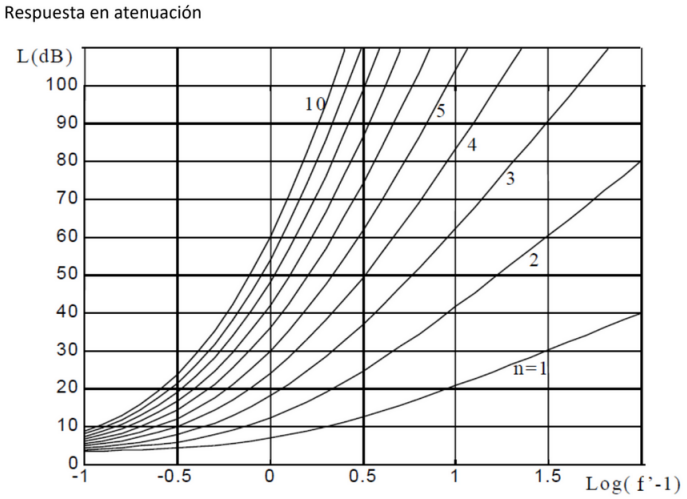
- C: Capacitancia en faradios.
- f_c: Frecuencia de corte del filtro, como la frecuencia de operación es de 1.5GHz y se espera un filtro poco abrupto, se puede poner en 1.5GHz directamente.
- R: Resistencia en Ohmnios
- g_i: Coeficiente del filtro, dependen de su orden.

Y su respuesta en frecuencia se expresará cómo

$$H(f) = \frac{1}{1 + j\frac{f}{f_c}}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Y si se tiene en cuenta la tabla de coeficientes de filtros



Coeficientes

Orden	g_0	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}	g_{11}
1	1	2	1									
2	1	1,4142	1,4142	1								
3	1	1	2	1	1							

Figura 5.14: Coeficientes del filtro

Sí se emplea una R_0 típica de 50 Ω y .se quiere que la frecuencia de corte ronde los 1.5GHz, no tenga una caída muy abrupta, por lo que se emplea el orden 2, con 3 componentes.

$g_1 = 1{,}4142$	$g_2 = 1{,}4142$	$g_3 = 1$
$C = \frac{g_1}{2\pi f_c R_0} = 3pF$	$L = \frac{g_2 R_0}{2\pi f_c} = 7{,}5nH$	$C = \frac{g_3}{2\pi f_c R_0} = 2{,}12pF$

Tabla 5.3: Componentes

A continuación, con la herramienta AWR MW Oficce se procede a diseñar y optimizar el filtro partiendo de estos valores. Se muestran las imágenes del filtro ya optimizado, donde solo se modificarán como variables de optimización los valores de los condensadores entre 2-5pF. Para determinar bien el orden del filtro se busca también saber cuál será la atenuación a una frecuencia 2 veces mayor que el ancho de banda de la banda de paso. En este caso da que para el doble de la frecuencia la atenuación es de 20 dB, por lo que si se observa la gráfica de la *Figura 5.14*, es efectivamente de segundo orden

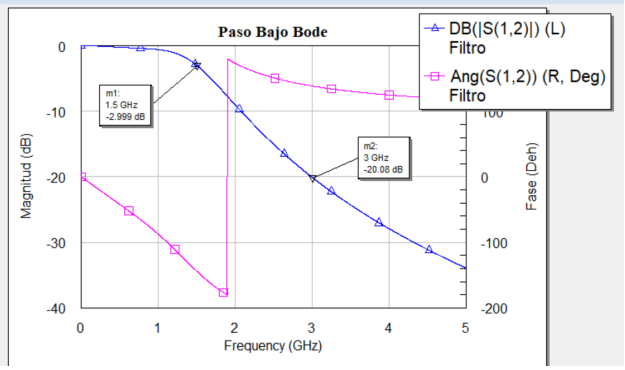


Figura 5.15: Bode del filtro

Ahora debemos buscar las pérdidas máximas de retorno, para ello se utilizará el parámetro S11, representando en las pérdidas de retorno. El punto que representa las pérdidas máximas debe estar en la zona de la banda de paso, por lo que buscamos el mínimo de la zona de la banda de paso en la gráfica de pérdidas de retorno.

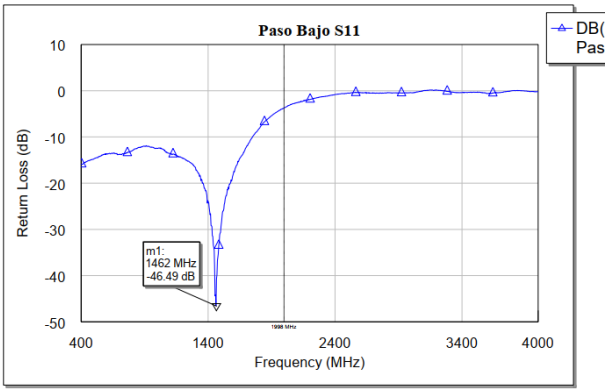


Figura 5.16: Pérdidas de retorno

Por último, se va a buscar la máxima variación de retardo de grupo en la banda de paso, primero, hay que tener claro que es el retardo de grupo: Todas las componentes en frecuencia de una señal sufren un retardo al pasar a través de un filtro, por lo que el retardo de grupo en un filtro es el tiempo que se retarda la señal, en los casos ideales, el retardo de grupo será contante, ya que la fase es lineal, pero en los casos reales, esta constante se ve afectada por distorsiones ya que cada componente de frecuencia de una señal tardará un tiempo distinto en pasar por el filtro, para poder obtener el retardo de grupo, se toman dos puntos extremos

(pico superior e inferior) y el retardo de grupo será la diferencia entre los dos, estos puntos deben encontrase en la banda de la paso. Como la simulación es ideal, se tomará esta medida sobre el filtro real una vez creado.

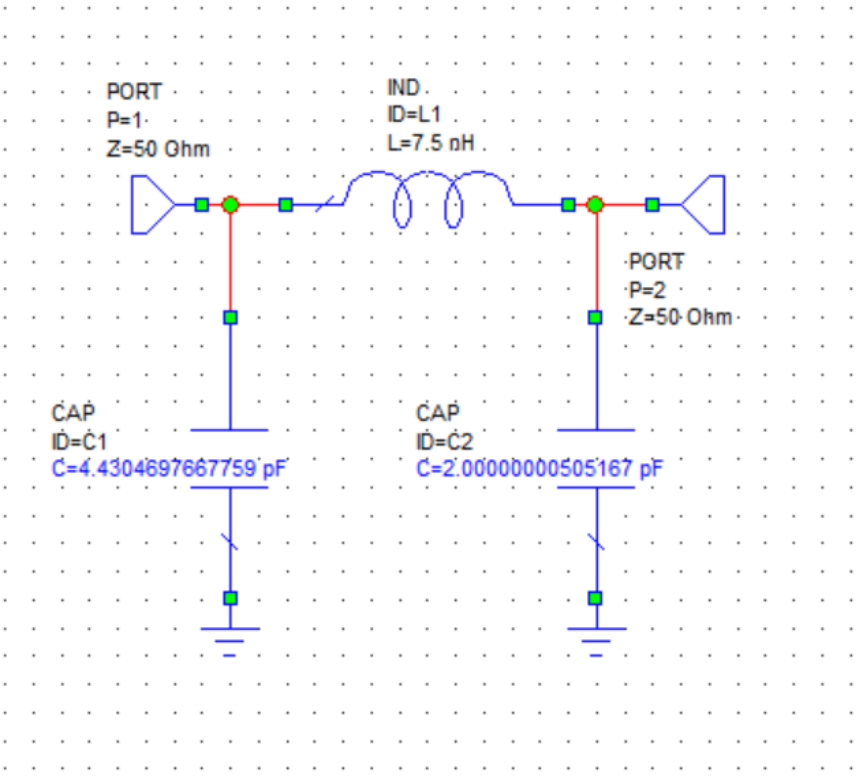


Figura 5.17: Diseño final del filtro

Al igual que en diferentes apartados de la memoria, no ha dado tiempo a realizar el circuito real ni su montaje, queda como trabajo futuro.

Capítulo 6

Procesamiento de datos

Esta parte se introduce como un apartado único pues es completamente diferente de lo realizado hasta ahora, esta parte es íntegramente código aplicado al conocimiento que se tiene sobre la señal Doppler.

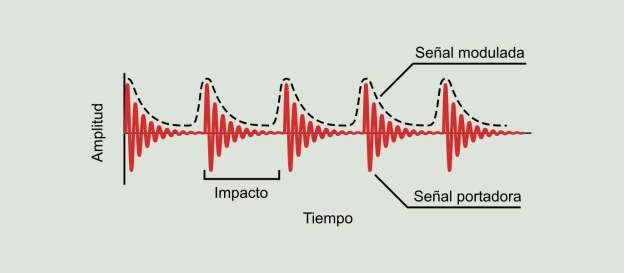


Figura 6.1: Definición de envolvente

Se ha empleado una placa ARDUIO UNO para hacer una lectura de los datos en frecuencia de la señal, posteriormente, en la misma placa, se han mostrado por una pantalla LCD los valores de velocidad obtenidos a partir de esa frecuencia, pues se conoce ya el valor de la frecuencia de referencia del radar, los códigos empleados se pueden encontrar en el Código de Recepción en Arduino, este proceso se ha basado en el estudio realizado por John Mcnelly[31]

Para calcular la frecuencia de un objeto se mide el ancho de cada pulso de la señal recibida en el Arduino para calcular el periodo de la señal y así tener su frecuencia Doppler, con la que ya se puede calcular la velocidad. Es una de modulación de envolvente, en la que la frecuencia Doppler será la de la señal modulada, esto, sucede por el efecto del mezclador.

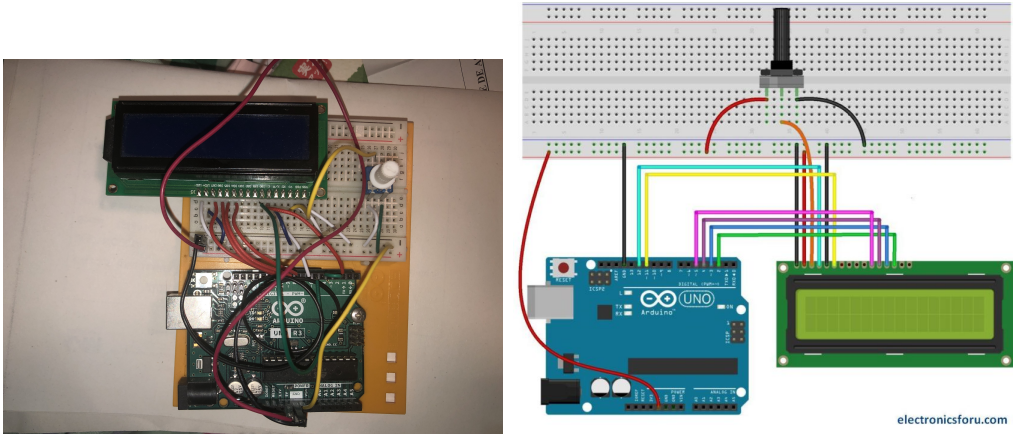
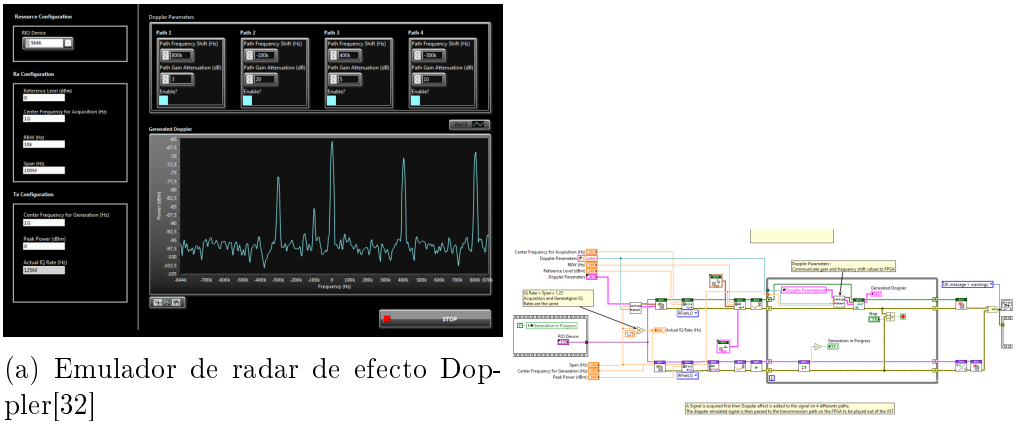


Figura 6.2: Pinout Uno con LCD, la señal entra por el pin A0

Pero, para asegurarse de su correcto funcionamiento, se procede a emplear la herramiento NI Labview para simular un radar de efecto Doppler (este código se ha obtenido de internet y solo de ha modificado para poder sacar la señal a un ARDUINO[32])



(a) Emulador de radar de efecto Doppler[32]

Figura 6.3: Emulador de radar de efecto Doppler[32]

Se han creado dos versiones del código de arduino, la primera, ya implementada para mostrar los resultados por una pantalla LCD es de la que se van a mostrar los resultados. Se procede a mostrar el resultado por la pantalla el resultado (en frecuencia), debería ser de 50Hz según el simulador.

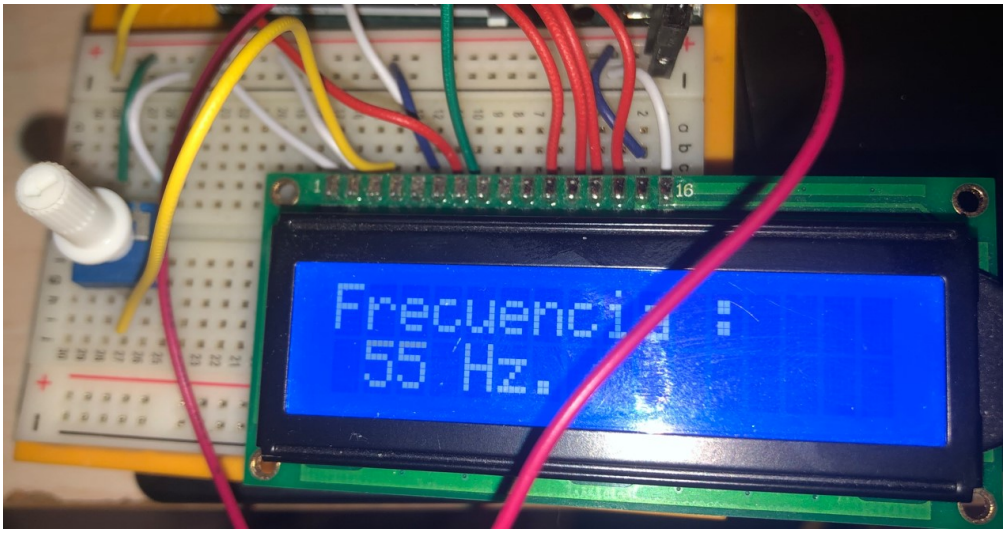


Figura 6.4: Salida

Capítulo 7

Conclusiones y Trabajo Futuro

7.1. Conclusiones

Como conclusión principal de este trabajo, se puede observar la complejidad de realizar un sistema modular, teniendo en cuenta todos y cada uno de sus componente así como factores externos como la no idealidad de los sistemas reales. Y como un pequeño error de calculo o de simulación podría hacer que el sistema no funcione con los parámetros deseados.

Finalmente, mientras se investigaba para este trabajo se han estudiado los diversos usos reales y teóricos de este tipo de sistemas, que aunque no lo parezca están a nuestro alrededor, en el día a día con mayor o menor complejidad. Llegando a la conclusión de que los radares de efecto Doppler son, bastante necesario en el ambito en que los ingenieros técnicos de telecomunicaciones nos movemos.

7.1.1. Problemas encontrados

El principal problema que se ha tenido es el tiempo, este ha sido un proyecto muy ambicioso que requería de mucho tiempo de estudios, investigación, simulaciones, comprobaciones y creación de componentes. Pero este problema ha dado como resultado una parte teórica y de simulaciones mucho más trabajada, permitiendo que en el trabajo futuro sólo reste construir los componentes físicos y realizar pequeñas subsanaciones de errores ya previstas en los comentarios de cada uno de los apartados.

También se ha tenido un problema con las ficheros de salida que proporcionan los analizadores vectoriales de redes, pues el formato de salida que proporcionan, a pesar de llamarse .s2p, daba errores al introducirlo en el programa AWR MW Office. Este problema se ha solucionado a base de investigar los diferentes formatos de los que se dispones, el analizador vectorial de redes daba los resultados con puntos en vez de comas y con una sola tabulación entre elementos, el programa AWR MW Office requiere de una doble tabulación para distinguir un elementos de otro.

7.1.2. Resultados obtenidos

Las medidas simuladas proponen resultados muy prometedores, pues han sido estudiadas con esmero y cuidado para que el montaje final se pueda realizar casi sin problemas, buscando en todo caso minimizar errores e interferencias con posibilidades de aislamiento.

7.2. Trabajo Futuro

Se ha observado cada una de las partes de un radar de efecto Doppler a nivel teórico y de diseño, pero no ha podido observarse ni crearse un sistema real, esto, abre la puerta a un trabajo futuro bastante completo, siguiendo el siguiente mapa de ruta:

- Obtención de las resistencias, condensadores e impedancias propuestas para cada uno de los diseños del sistema, se buscará que sean montados sobre placa y que sean de un tamaño pequeño o adecuado a la zona en la que se quieren introducir.

- Obtención de los amplificadores propuestos, esto, es bastante sencillo, estos componentes se encuentran en el laboratorio y por ello se han elegido.

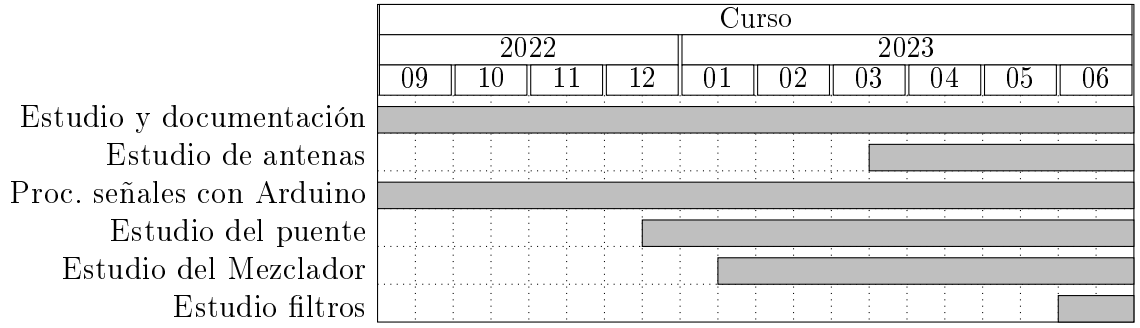
- Diseño de los componentes en PCB o en su defecto para su creación mediante fotolitografía, lo ideal sería crear ambos diseños, uno en fotolitografía para hacer los estudios de medidas y corrección de errores y una vez se tenga todo comprobado se procedería a crear los módulos en PCB para enviar a un fabricante y tener todos los módulos de manera profesional.

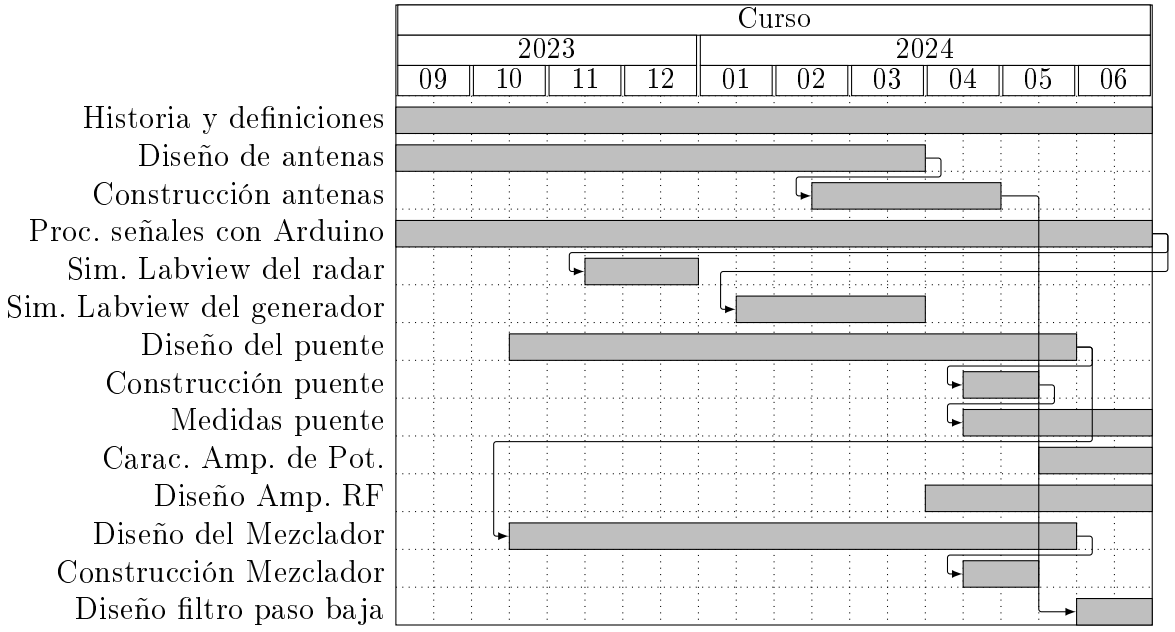
- Búsqueda de elementos de bajo coste o buena relación precio-prestaciones para la generación de la señal, lo primero sería determinar si se quiere emplear otra placa o un generador, una vez se haya hecho esta elección, que también influirá en el precio, se procede al estudio de los principales fabricantes, y se comparan sus prestaciones.

- Finalmente, se propone crear un programa de NI Labview que muestre por pantalla los resultados, en vez de emplear una pantalla LCD.

7.3. Diagrama de Grant

En el curso 2022-2023, por problemas de salud, el alumno sólo pudo realizar los capítulos 1 y 2, así cómo un estudio teórico, sin simulaciones ni medidas de los componentes del capitulo 3, etapa de recepción junto con sus componentes.




Curso
2023
2024
09
10
11
12
01
02
03
04
05
06
Historia y definiciones
Diseño de antenas
Construcción antenas
Proc. señales con Arduino
Sim. Labview del radar
Sim. Labview del generador
Diseño del puente
Construcción puente
Medidas puente
Carac. Amp. de Pot.
Diseño Amp. RF
Diseño del Mezclador
Construcción Mezclador
Diseño filtro paso baja

Bibliografía

[1] F. S. BERGÉS, *"Guerra antisubmarina (ASW). ¿Cómo se caza un submarino moderno? Explicado con ejemplos de Malvinas"*, published: 2022-02-08, 2022. dirección: https://www.fsupervielle.com/post/guerra-antisubmarina-asw-moderna.

[2] RACE, *"Tipos de Radares de velocidad"*, published: 2022-06-06, 2022. dirección: https://www.race.es/radar-movil-tramo-tipos-radares.

[3] U. C. de Madrid, *Ïngeniería Electrónica de Comunicaciones 22-23"*, last visited: 2022-11-11, 2022. dirección: https://fisicas.ucm.es/estudios/grado-ingenieriaelectronicadecom

[4] R. A. Española, *radar"*, last visited: 2022-13-11, 2022. dirección: https://dle.rae.es/radar.

[5] unicrom.com, *"Historia del RADAR (RAdio Detection And Ranging)"*, published: 2019-04-07, 2022. dirección: https://unicrom.com/historia-del-radar/.

[6] J. P. Sanfuentes, «Historia del radar",» *Revista de Marina. Armada de Chile. Santiago*, págs. 1-7, 2000.

[7] W. F. Schools, *Radar"*, 2022. dirección: https://www.classicistranieri.com/wikipediaforschoolses/wp/r/Radar.htm.

[8] T. K. Sarkar y M. S. Palma, «A history of the evolution of RADAR,» en *2014 44th European Microwave Conference*, IEEE, 2014, págs. 734-737.

[9] M. Guarnieri, «The early history of radar [historical],» *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 4, n.º 3, págs. 36-42, 2010.

[10] W. F. Schools, *"Fotografía Real del sistemar"*, 1945. dirección: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chain_Home_radar_installation_at_Poling,_Sussex,_1945._CH15173.jpg.

[11] AngelFire.com, *"Mapa de operaciones"*, 1945. dirección: https://www.angelfire.com/games2/warpspawn/CHome.html.

[12] C. P. Vega, «Introducción al radar,» *Departamento de Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Cantabria, España*, 2010.

[13] C. Wolff, *"Fundamentos Radar"*, Español: Ricardo Delvasto-Jaimes y Rodrigo Garcia., 1945. dirección: https://www.radartutorial.eu/01.basics/Principio%20Radar.es.html.

[14] U. I. Wikipedia, *"Funcionamiento de un radar de primer Orden"'*, 2007. dirección: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sonar_Principle_ES.svg.

[15] Furuno, *"¿COMO FUNCIONA EL RADAR?"'* Dirección: https://www.electromaritima.com.mx/post/como-funciona-el-radarg.

[16] R. academia de ingeniería, *"Diccionario Español de Ingenieria"*, last visited: 2022-25-11. dirección: https://diccionario.raing.es/es.

[17] Wikipedia, *."Efecto Doppler"*. dirección: https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Doppler.

[18] TodoRadares.com, *"Frecuencias radares de tráfico (Bandas)"*. dirección: https://www.todoradares.com/bandas-de-frecuencias-de-radares-de-trafico/.

[19] N. Instruments, *Labview: Simulación de Doppler effect Radar*. dirección: https://www.ni.com/en/shop/wireless-design-test/vector-signal-transceivers/what-is-vst/real-time-radar-target-simulation-with-labview-and-pxi-vector-si.html.

[20] MiniCircuits, *Data sheet de MiniCircuits SSG-4000HP*. dirección: https://www.google.com/url?q=https://www.minicircuits.com/pdfs/SSG-4000HP.pdf&sa=D&source=apps-viewer-frontend&ust=1719107056112075&usg=AOvVaw0micQNDvc4-BgD0lU85al8&hl=es.

[21] P. D. Kannadassan, *Implementation of "Wilkinson Power Divider" on AWR Microwave Office*.

[22] A. Theory, *."Antenna Basics"*, last visited: 2024-01-30, 2022. dirección: https://www.antenna-theory.com/spanish/basics/main.php.

[23] MIT. dirección: http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/38668/163582267-MIT.pdf?sequence=2&isAllowed=y.

[24] A. de RF hmc589a. dirección: https://www.mouser.es/new/analog-devices/adi-hmc589a-amplifier/.

[25] A. de RF ADL5545. dirección: https://www.analog.com/ADL5545/datasheet.

[26] A. F. J. S. Piqueras, «TFG: MEJORAS EN EL DISEÑO DE UN MEZCLADOR EN LA BANDA DE LOS 1420 MHZ PARA APLICACIONES DE RADIOASTRONOMIA,» *UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CARTAGENA*, Cartagena, Junio 2007.

[27] A. Electronics. dirección: https://resources.altium.com/es/p/rf-signal-chain-and-link-budget-basics-iot.

[28] B. realizada en rs. dirección: https://es.rs-online.com/web/c/semiconductores/amplificadores-y-comparadores/amplificadores-rf-integrados/?applied-dimensions=4294454837,4294443034,4290686621,4292092300,4293159895,4294219745,4294246657,4294454836.

[29] B. Diodo. dirección: https://es.rs-online.com/web/p/diodos-schottky-y-rectificadores/5452692?gb=s.

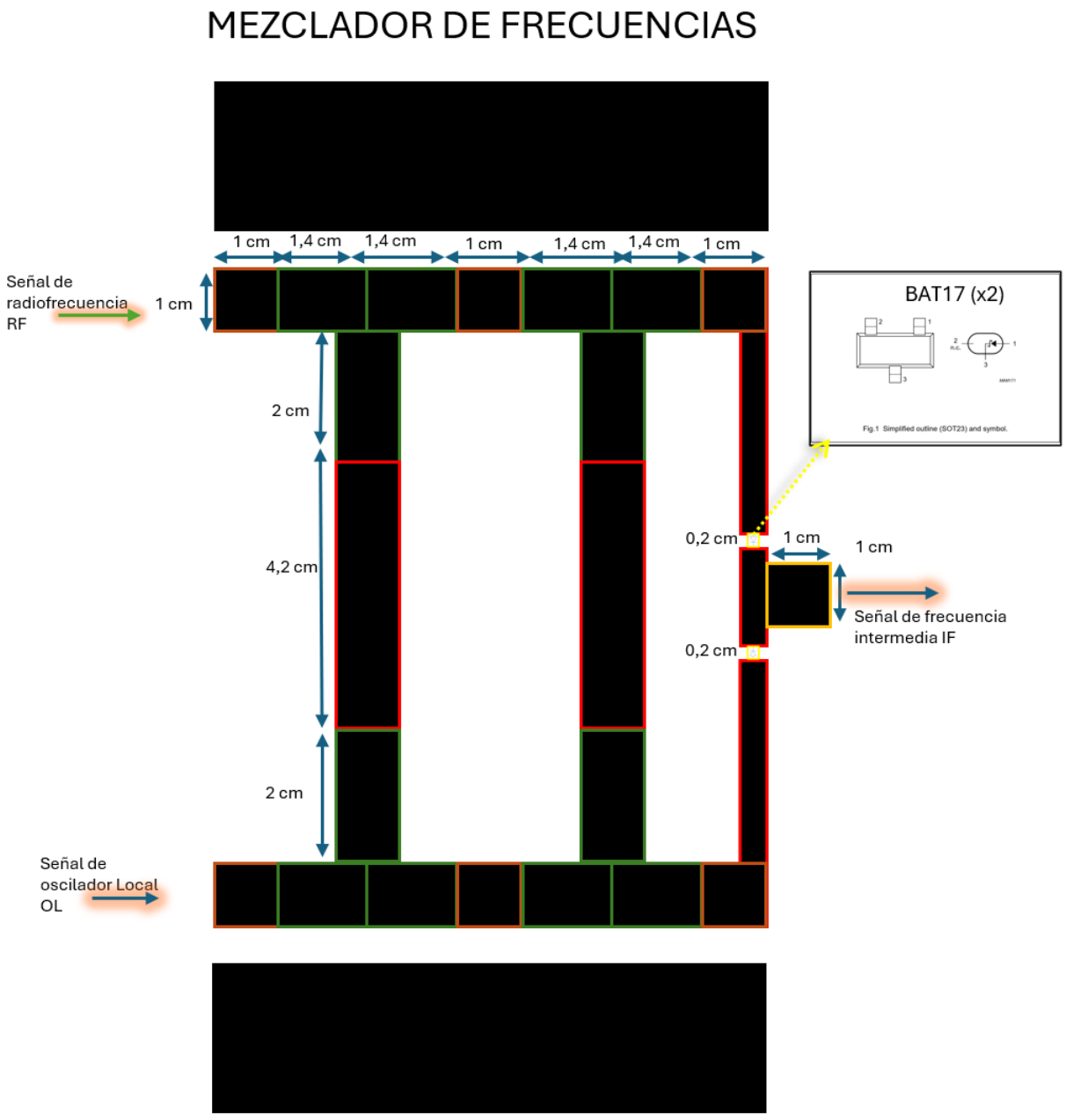
[30] Fotolitografia. dirección: https://www.inelmatic.com/ES/blog/noticias-1/post/fotolitografia-en-la-fabricacion-de-chips-32.

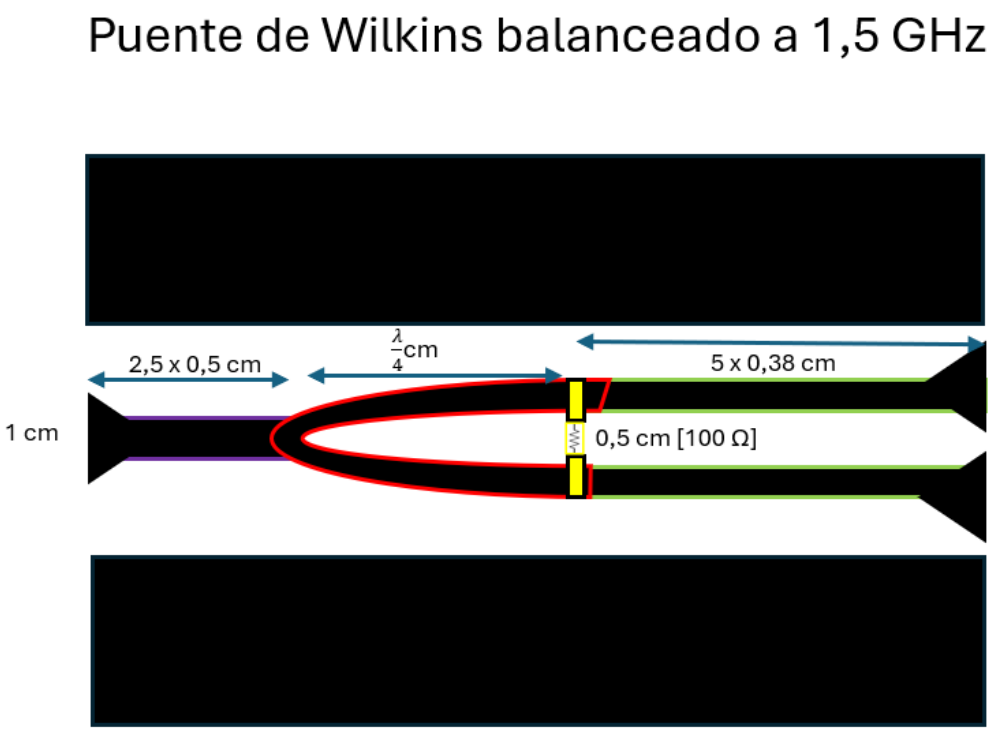
[31] J. Mcnelly, *Arduino Radar Speed Sign*. dirección: https://johnmcnelly.com/arduino-radar-speed-sign/.

[32] N. Instrumentes, *Doppler Emulator Example program*. dirección: https://forums.ni.com/t5/Example-Code/Doppler-Emulator-Example-Program-for-NI-VST/tap/4029907.

Anexo A

Diseño en PCB




Puente de Wilkins balanceado a 1,5 GHz
2,5 x 0,5 cm
$\frac{\lambda}{4}$cm
5 x 0,38 cm
1 cm
0,5 cm [100 Ω]

Anexo B

Código de Recepción en Arduino

Primera iteración, emplea los contadores internos de la placa.

```
...

#define ResolutionADC 12
#define countdelay 1 // retardo de la señal normal
#define calibration 0 // ajuste normal
#define gatetime 100 // marco de tiempo de estudio, 1.5GHz, son 6ms
#define onems 1000 //ms

LiquidCrystal lcd(7, 2, 8, 9, 10, 11);
char units[][5] = {"Hz", "KHz", "MHz", "GHz"}; //Unidades de frecuencia

void setup(){
 lcd.begin(16,2); // inicializa el LCD
 lcd.print("** Frequencia **"); //mensaje inicial
 delay(onems); //delay incial para mostrar la frecuencia
  analogRead(ResolutionADC); //se lee el puntero 12.
}

void loop() {
  analogRead(A1);
 char Freq[16]; //se guarda la frecuencia (hasta 16 digitos)
 unsigned long Fcalc=0; //inicializa la cuenra de tiempo
 float Fval;
 FreqCounter::f_comp=calibration; // se calibra SI HAY DE DONDE CALIBRAR
 FreqCounter::start(gatetime); // se cuentan cuantos picos de señal hay en la ventana se
 while (FreqCounter::f_ready == 0)
  Fcalc = FreqCounter::f_freq;
  delay(countdelay);
  Fval = (float) Fcalc * (onems / gatetime); // se escala la entrada al marco
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("** Frequencia **");

  //se indican las frecuencias
```

```
if(0 <= Fval && Fval < 1000){ // hz
 dtostrf(Fval, 3, 2, Freq);
 strcat(Freq, units[0]);
                      lcd.setCursor(5,1);
 lcd.print(Fval);
 lcd.print(units[0]);
    float v=-((1500000*343)/Freq)+343;
                      lcd.print(v)
                      lcd.print("m/s")
}
              else if(1000 <= Fval && Fval < 1000000){ //KhZ
 Fval = Fval/1000;
                      dtostrf(Fval, 3, 2, Freq);
                      strcat(Freq, units[1]);
                      lcd.setCursor(5,1);
                      lcd.print(Freq);
                      lcd.print(units[1]);
                      float v=-((1500000*343)/Freq)+343;
                      lcd.print(v)
                      lcd.print("m/s")

}
else if(1000000 <= Fval){ //Mhz
 Fval = Fval/1000000;
                      dtostrf(Fval, 3, 2, Freq);
                      strcat(Freq, units[2]);
                      lcd.setCursor(5,1);

                      lcd.print(Freq);
                      lcd.print(units[2]);
                      float v=-((1500000*343)/Freq)+343;
                      lcd.print(v)
                      lcd.print("m/s")
}
  else if(10000000 <= Fval){ //GHz
 Fval = Fval/10000000;
                      dtostrf(Fval, 3, 2, Freq);
                      strcat(Freq, units[3]);
                      lcd.setCursor(5,1);

                      lcd.print(Freq);
                      lcd.print(units[3]);
                      float v=-((1500000*343)/Freq)+343;
                      lcd.print(v)
                      lcd.print("m/s")
}
```

```
  else{
   lcd.setCursor(0,1);
   lcd.print("Fuera de rango");
  }
}
```

Segundo código, más sencillo, es una optimización del anterior, que emplea contadores virtuales en vez de los contadores internos de la placa, falta introducir el código para el LCD

```
#include <FreqCounter.h>

// Pin de frecuencia
#define PIN_NUMBER A0
// numero de muestras a tomar, cuanto más mejor, pero más tarda en ejecutar, entre 4-7 v
#define AVERAGE 4

unsigned int doppler_div = 44;
unsigned int samples[AVERAGE];
unsigned int x;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  pinMode(PIN_NUMBER, INPUT);
}

void loop() {
  // deshabilita interrupciones, ya que el codigo es sensible en el tiempo:
  noInterrupts();

  unsigned int pulse_length = 0; //inicializa el pulso a 0, es decir, se buscará un cero

  // el bucle registra y almacena 4 mediciones del periodo, en un periodo de 0.1 segundo
  for (x = 0; x < AVERAGE; x++)
  {
    pulse_length = pulseIn(PIN_NUMBER, HIGH);
    pulse_length += pulseIn(PIN_NUMBER, LOW);
    samples[ap] =  pulse_length;
  }
  interrupts();

  // comprueba que la media del periodo de las muestras se haga sobre muestras con el mi
  bool samples_ok = true;
  unsigned int nbPulsesTime = samples[0];
  for (ap = 1; ap < AVERAGE; ap++)
```

```
  // si todas las muestras tienen un  periodo aproximado, entonces de tiene la frecuen
  {
    nbPulsesTime += samples[x];
    if ((samples[x] > samples[0] * 2) || (samples[x] < samples[0] / 2))
    {
      samples_ok = false;
    }
  }

  if (samples_ok)
  {


    unsigned int Ttime = nbPulsesTime / AVERAGE; //periodo promedio
    unsigned int Freq = 1000000 / Ttime;

      Serial.write(Freq/doppler_div); // obtencion de velocidad
      //Serial.print(Ttime);
      Serial.print("\r\n");
      Serial.print(Freq);
      Serial.print("GHz : ");
      float v=-((1500000*343)/Freq)+343;
      Serial.print(v);
      Serial.print("km/h\r\n");
  }

}
```