

**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-05**

**Diseño, construcción y medida de un array de antenas  
reconfigurable.**

**Design, manufacture, and measurement of a reconfigurable  
antenna array.**

**Supervisor/es: Luis Ángel Tejedor Álvarez**

**Venus Magnolia Fraile Henao**

**Grado en Ingeniería Electrónica de Comunicaciones**

**Curso académico 2022-23**

**Convocatoria Julio 2023**

**Resumen:**

**En las comunicaciones inalámbricas los arrays de antenas son cada vez más utilizados. Son especialmente útiles cuando se necesita apuntar una antena de haz de pincel a un objetivo móvil. En este TFG se ha diseñado, fabricado y medido el diagrama de radiación de un array de antenas de 8 elementos a 2.4 GHz programable y reconfigurable digitalmente. El sistema incluye divisores de potencia, amplificadores, desfasadores y atenuadores programables. Se han construido placas de circuito impreso, se ha caracterizado cada subsistema y se ha programado el sistema de control software.**

**Abstract:**

**In wireless communications, antenna arrays are increasingly being used. They are specifically useful when it is necessary to steer a pencil beam antenna towards a moving target. In this Final Degree Project (TFG), an 8-element antenna array operating at 2.4 GHz has been designed and manufactured. The radiation pattern has been measured for different configurations digitally selected. The system includes power splitters, amplifiers, phase shifters and attenuators. Several PCBs have been manufactured, every subsystem has been characterized and the software control system has been developed.**

### **Autorización de difusión**

El autor de este proyecto autoriza a la Universidad Complutense de Madrid a difundir y utilizar el presente Trabajo Fin de Grado, tanto la aplicación como la memoria, únicamente con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a su autor. También autoriza a la Biblioteca de la UCM a depositar el trabajo en el Archivo Institucional E-Prints Complutense.

## **Agradecimientos**

En primer lugar, agradecer a mi familia por apoyarme y quererme siempre, incluso desde la distancia. A mi madre Carmen Magnolia por la paciencia y dedicación, y a mi padre Jesús Antonio por inculcarme la pasión por la ciencia y las enseñanzas de vida.

A aquellos amigos que se convirtieron en familia. A Mario y a José por su apoyo fundamental durante todos estos años.

A mis amigos y compañeros de la carrera. A Miguel por el cariño y tantas horas de estudio juntos. A Alfredo por la paciencia y el apoyo.

A mi tutor Luis Ángel por guiarme durante este trabajo.

# Índice

<b>Índice.....</b>	<b>v</b>
<b>Índice de Figuras.....</b>	<b>vi</b>
<b>Índice de Tablas .....</b>	<b>vii</b>
<b>1. Introducción y objetivos .....</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción.....	1
1.2. Estado del arte .....	4
1.3. Objetivos .....	5
1.4. Metodología.....	5
1.5. Diagrama de Gantt.....	6
1.6. Relación con asignaturas de Ingeniería Electrónica .....	6
<b>2. Arquitectura general.....</b>	<b>7</b>
<b>3. Wilkinson.....</b>	<b>9</b>
3.1. Primer prototipo.....	10
3.2. Segundo prototipo .....	13
<b>4. Amplificadores .....</b>	<b>15</b>
<b>5. Desfasador .....</b>	<b>16</b>
<b>6. Atenuador .....</b>	<b>20</b>
<b>7. Control.....</b>	<b>21</b>
<b>8. ControlArray.....</b>	<b>22</b>
8.1. Diseño.....	22
<b>9. Medidas.....</b>	<b>24</b>
9.1. Caracterización del sistema .....	24
9.1.1. Resultados de desfase.....	25
9.1.2. Resultados de atenuación .....	27
9.2. Medida de los cables .....	29
9.3. Montaje de la agrupación de antenas.....	30
9.4. Calibración .....	30
9.5. Diagrama de radiación.....	32
<b>10. Conclusiones y trabajo futuro.....</b>	<b>36</b>
10.1. Conclusiones .....	36
10.2. Trabajo futuro.....	37
<b>11. Bibliografía.....</b>	<b>38</b>
<b>12. Anexos.....</b>	<b>40</b>
12.1. Mezzanina Desfasadora.....	40
12.2. ControlArray.....	42
12.3. Código de control .....	45
12.4. Lista de materiales ControlArray .....	49

## Índice de Figuras

Figura 1. Distribución lineal de corrientes (eje z) [2] .....	1
Figura 2. Diagrama de radiación [2] .....	3
Figura 3. Esquema general.....	7
Figura 4. Diagrama de bloques de cada canal.....	8
Figura 5. Divisor Wilkinson 1 a 8 [15] .....	9
Figura 6. Divisor de potencia Wilkinson (por igual en cada salida) en línea microstrip. [2]...	9
Figura 7. Wilkinson 2.0.....	10
Figura 8. Medida S21 del Wilkinson 2.0 .....	11
Figura 9. Medida S11 del Wilkinson 2.0 .....	11
Figura 10. Vista frontal conector SMA.....	12
Figura 11. Densidad de corriente Wilkinson 2.0.....	12
Figura 12. Densidad de corriente Wilkinson 2.0.....	12
Figura 13. Wilkinson 2.0.....	13
Figura 14. Medida S21 del Wilkinson 3.0 .....	13
Figura 15. Medida S11 Wilkinson 3.0 .....	14
Figura 16. Polarización del MAAL-009120 .....	15
Figura 17. PCB Prueba Desfasador.....	16
Figura 18. Resultados del desfasador MAPS-010144.....	17
Figura 19. Stack-up de la Mezzanina desfasadora .....	18
Figura 20: Vista de cerca capa 3 .....	18
Figura 21. Mezzanina Desfasadora vista capa bottom.....	19
Figura 22. Mezzanina Desfasadora. Capa 3 (planos de alimentación) .....	19
Figura 23. Mezzanina Desfasadora vista capa top.....	19
Figura 24. Ecuilización de pistas de RF .....	22
Figura 25. Placa PCB ControlArray.....	23
Figura 26. Placa PCB del array de antenas .....	24
Figura 27. Medidas de desfase (canal 1-4).....	25
Figura 28. Medidas de desfase (canal 5-8).....	26
Figura 29. Medidas de atenuación (canal 1-4) .....	27
Figura 30. Medidas de atenuación (canal 5-8) .....	28
Figura 31. S21 de ControlArray con cables .....	29
Figura 32. Desfase de ControlArray con cables.....	29
Figura 33. Montaje del array de antenas .....	30
Figura 34. Diagramas de radiación teórico para diferentes $\alpha$ .....	32
Figura 35. Banco de medidas .....	33
Figura 36. Diagrama de radiación para $\alpha=0^\circ$ .....	34
Figura 37. Diagrama de radiación para $\alpha=90^\circ$ .....	34
Figura 38. Diagrama de radiación para $\alpha=180^\circ$ .....	34
Figura 39. Esquemático jerárquico Mezzanina Desfasadora .....	40
Figura 40. Esquemático desfasador MAPS010144.....	40
Figura 41. Esquemático conector SAMTEC.....	41
Figura 42. Esquemático jerárquico ControlArray .....	42
Figura 43. Esquemático Wilkinson 3.0 .....	42
Figura 44. Esquemático amplificador MAAL009120.....	43
Figura 45. Esquemático atenuador HMC1119.....	43
Figura 46. Esquemático control MCP2210.....	44

## Índice de Tablas

Tabla 1. Tabla de verdad MAPS 010144 .....	16
Tabla 2. Tabla de verdad HMC1119 [11] .....	20
Tabla 3. Valores escogidos para $\alpha=0^\circ$ .....	31
Tabla 4. Valores escogidos para $\alpha=90^\circ$ .....	31
Tabla 5. Valores escogidos para $\alpha=180^\circ$ .....	31

## 1. Introducción y objetivos

### 1.1. Introducción

Desde el comienzo del desarrollo de las tecnologías de radiofrecuencia y radiodifusión se planteó la idea de mejorar las prestaciones que podía dar un elemento radiante por sí mismo. Esto llevó a tomar en cuenta las contribuciones que podría tener combinar múltiples antenas para obtener un comportamiento distinto del conjunto en sí con respecto a la antena elemental. Concretamente, lo que se busca es modificar el diagrama de radiación del array de antenas, el cual se obtiene a partir de las interferencias de los campos radiados por cada uno de los elementos. Si se varía la fase o la intensidad de la señal que alimenta a cada uno de ellos, se puede mejorar el ancho del haz principal, manipular los lóbulos secundarios, variar la polarización o cambiar el apuntamiento del diagrama de radiación del conjunto.

Para explicar con detalle la base teórica de la que se parte [1], se ha considerado que todas las antenas del conjunto son iguales y de forma simultánea radian o reciben potencia. En este caso se ha diseñado un array de antenas lineal transversal y con fase progresiva que tiene como antena elemental un monopolo comercial WiFi de bajo coste del fabricante Bandwin con 5 dBi de ganancia. Según [2], un array de antenas lineal se define como aquel que tiene todos sus elementos en una misma coordenada, con la antena básica en  $z=0$ , y están equiespaciadas entre sí una distancia  $d$ . Al ser transversal se cumple que el máximo apuntamiento del diagrama de radiación se tendrá para  $\theta = \frac{\pi}{2}$  para una fase progresiva  $\alpha=0$ .

Luego, para estudiar las contribuciones que hace cada antena al array se partirá de una corriente  $\vec{J}_0(\vec{r}')$ , definida como la distribución de corrientes con faser de alimentación unitario sobre la antena situada en  $z=0$  e  $I_n$  el faser de corriente con el que se excita cada antena como se ve en la

Figura 1.

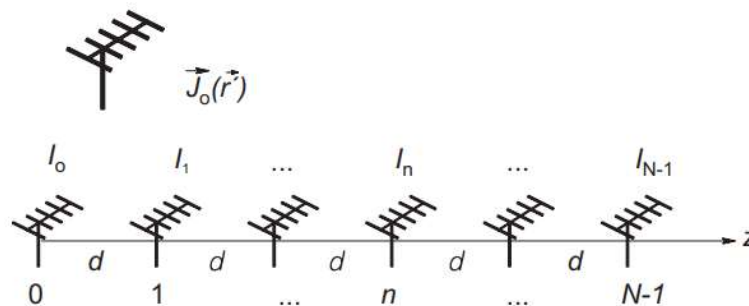


Figura 1. Distribución lineal de corrientes (eje z) [2]

Siendo la distribución de corriente sobre la agrupación:

$$\vec{J}(\vec{r}') = \sum_{n=0}^{N-1} I_n \vec{J}_0(\vec{r}' - nd\hat{z})$$

Si a dicha expresión se le aplica la transformada de Fourier tridimensional aparece el vector de radiación y a partir de él ya es posible calcular el campo de la agrupación.

Es importante destacar que si los fasores de alimentación  $I_n$  presentan una fase progresiva tendrán la forma  $I_n = a_n e^{jn\alpha}$  donde los coeficientes  $a_n$  serán reales positivos. Así pues, la expresión del campo eléctrico radiado por la agrupación sería la siguiente:

$$\vec{E}(\vec{r}') = \vec{E}_0 \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn\Psi}$$

En la expresión anterior  $\vec{E}_0$  corresponde al campo radiado por la antena elemental y el sumatorio se identifica con el Factor de la Agrupación  $FA(\Psi)$ . El factor de array es periódico en periodos de  $2\pi$  en  $\Psi$  y se puede obtener como la transformada de Fourier de los coeficientes de la alimentación  $a_n$ .

$$FA(\Psi) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn\Psi}$$

El factor de agrupación es muy útil, ya que, el diagrama de radiación del campo radiado por el conjunto de antenas se puede calcular como el diagrama de la antena elemental multiplicado por este factor de agrupación.

Por otra parte, se tiene que  $\Psi$  es el ángulo eléctrico y corresponde a la expresión.

$$\Psi = kd \cos(\theta) + \alpha$$

- Con  $\alpha$  definida como la fase progresiva, es decir, es el desfase entre cada una de las antenas y su antena inmediatamente consecutiva.
- Teniendo  $d$  como la distancia entre antenas.
- Con un valor de  $k$  tal que  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\lambda = \frac{c}{f}$  y se trabajará a una frecuencia de 2.4 GHz.

Ahora bien, si se representa la función del factor de agrupación se obtiene el margen visible, el cual se define como los ángulos que se pueden barrer con el array teniendo  $0 < \theta < \pi$ . En consecuencia, se cumple que los máximos y mínimos del margen visible van a coincidir con las proyecciones lineales de dichos puntos sobre una circunferencia que a su vez se proyectan de forma radial hasta el origen de dicha circunferencia, como se puede ver claramente en la Figura 2.

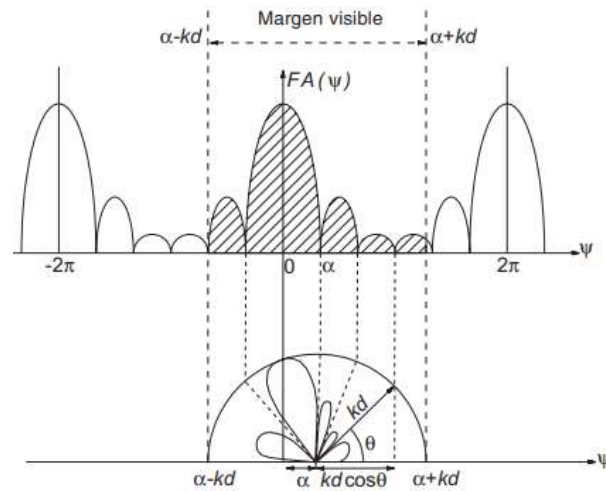


Figura 2. Diagrama de radiación [2]

Una vez obtenido el diagrama de radiación se puede estudiar el ancho del haz esperado en este caso concreto ( $\Delta\theta_{3d}$ ). Para ello se toma en cuenta la distancia  $d$  entre antenas, la cual, si es mayor a  $\lambda/2$  conlleva que el margen visible sea mayor a  $2\pi$  y esto implica que el intervalo del factor de la agrupación será mayor a un periodo, apareciendo así réplicas del lóbulo principal. Es decir, que la distancia que garantiza máximo apuntamiento con un único lóbulo principal de  $0 < \theta < \pi$  es para  $d=\lambda/2$ .

Cuantas más antenas se tengan, más directivo será el diagrama de radiación. Se ha escogido trabajar con  $N=8$  antenas, siendo un número suficiente de antenas para mejorar el apuntamiento y a su vez una cantidad manejable de elementos radiantes.

Por otra parte, al querer construir un array programable es necesario controlar el desfase y la atenuación aplicada a cada elemento para modificar el diagrama. En este caso se escoge utilizar el protocolo de comunicación SPI, el cual está estandarizado y gran cantidad de microchips en el mercado lo utilizan. El array se controlará desde un ordenador con un programa escrito en Python.

Según Franco Peláez [3] el protocolo SPI o Serial Peripheral Interface, es un protocolo serie capaz de controlar varios dispositivos a la vez y principalmente pensado para distancias cortas dentro de una misma placa, debido a la baja velocidad que presenta. Es un protocolo síncrono que consta de cuatro líneas de comunicación, las cuales son SCK, CS, MOSI, MISO y se le llama máster al dispositivo de control, mientras los periféricos a controlar se definen como esclavos. A continuación, se mencionan los parámetros que definen la comunicación:

- SCK: Es la señal de reloj por la que se regirá toda la comunicación y viene dada por el máster. Es común para todos los esclavos.
- CS: también llamado chip select, es la línea que indica a cuál de los esclavos se le está enviando información o recibiendo de él. Cada uno de los periféricos tiene una línea directa de CS que se comunica con el máster.
- MOSI: Master Out Slave In. Es una línea común para todos los esclavos por donde se enviará la información desde el máster hacia los esclavos.
- MISO: Master In Slave Out. Es por donde se envía la información de cada uno de los esclavos al máster. Es una línea común para todos los periféricos.

Es decir que serán necesarios tres cables (SCK, MOSI, MISO) más un cable de CS por cada dispositivo que se quiera controlar.

Los flancos de SCK indican cuando se muestrea cada bit. Así, cuando el máster se quiere comunicar envía una serie de bits a través del MOSI y activa el CS de los dispositivos a los que quiera enviar dicha información. Para esto CS debe mantenerse a un nivel bajo durante toda la comunicación. El procedimiento es similar cuando alguno de los esclavos se quiere comunicar con el máster, pero en este caso envía el tren de bits por la línea del MISO. Un periférico solo puede enviar o recibir información si el máster ha activado su CS.

Una vez explicado el funcionamiento cabe mencionar que SPI dispone de 4 modos de funcionamiento, siendo los modos 0, 1, 2 y 3 desde el más básico hasta el más complejo. Para el control de la agrupación de antenas será suficiente con utilizar el SPI modo 0.

## 1.2. Estado del arte

A pesar de que los arrays de antenas se utilizan desde hace un tiempo, actualmente siguen estando muy vigentes y cada vez tienen más aplicaciones en las nuevas tecnologías. A continuación, se mencionan algunas de las aplicaciones que utilizan agrupaciones de antenas.

- Las nuevas comunicaciones móviles de 5G han traído consigo una serie de avances tecnológicos debido a la frecuencia en la que trabaja (a mayor frecuencia se pueden alcanzar menores distancias). Una de las soluciones que se plantean para esto son las antenas MIMO o Multiple In Multiple OUT. [4] Este funcionamiento está compuesto por una agrupación de antenas patch y consiste en permitir direccionar el campo o cambiar el diagrama de radiación. La idea consiste en que la agrupación pueda comunicarse a la misma frecuencia, al mismo tiempo, y con los mismos códigos CDMA con varios usuarios a la vez. La antena es capaz de distinguir a cada usuario y tener un diagrama de radiación diferente para cada uno de ellos.
- Otra aplicación en la que utilizan es en antenas de satélites de órbita baja, como por ejemplo los satélites de Starlink [5]. Estos satélites utilizan arrays de antenas para usar más eficientemente los recursos del espectro de banda Ku y Ka, así como para compartir el espectro con otros usuarios autorizados. También se utilizan arrays de antenas similares en los terminales de usuario (estaciones base) que operan con sistema de SpaceX y así poder tener haces de antena altamente direccionables y orientados que siguen a los satélites de órbita baja. El sistema consiste en apagar y encender elementos de la agrupación de forma intermitente en ciertos ángulos de orientación para compensar variaciones del haz.
- Los arrays de antenas también son muy usados en sistemas radar [6], donde se puede barrer el espacio cambiando el apuntamiento del array sin necesidad de mover físicamente la antena, variando su fase. Incluso se puede construir un radar que haga un barrido tanto en azimut como en elevación, por ejemplo, se puede tener una agrupación que se mueva físicamente en azimut de forma circular mientras al variar la fase se hace simultáneamente un barrido en elevación. Esto es usado actualmente en aviación.

Esto son solo algunos ejemplos actuales del uso de las agrupaciones de antenas, las cuales se encuentran cada vez más presentes en diversos campos gracias a la flexibilidad que brindan.

### 1.3. Objetivos

Este trabajo ha consistido en el diseño, construcción y caracterización de un array de antenas de 8 elementos, con los siguientes objetivos intermedios:

- Diseñar la estructura general del array con una red de divisores, atenuadores y desfasadores controlables.
- Buscar dispositivos que se adapten a las especificaciones de diseño, y contar con desfasadores y atenuadores que puedan ser controlados a través de SPI.
- Probar cada una de las etapas del array, por separado, para verificar su correcto funcionamiento o detectar posibles fallos.
- Diseño de placas.
- Hacer un software que permita el control de las diferentes etapas del array.
- Medir el diagrama de radiación del array completo.

### 1.4. Metodología

- Escoger los parámetros de diseño y los programas a utilizar en cada etapa
- Diseñar la estructura general del array completo. Buscar en los catálogos de los fabricantes de microchips SMD que se adapten a las características de diseño comparando diferentes datasheets.
- Diseño en Microwave Office de la etapa de división de potencia.
- Construcción de placas de prueba para los chips escogidos (utilizando Altium), caracterización de estos y solucionar posibles problemas de diseño. Se utilizarán simulaciones electromagnéticas en AWR Desing Enviroment.
- Integración de todas las etapas.
- Construcción de un software en Python que se comunique a través del protocolo SPI con cada uno de los elementos controlables del array para variar su diagrama de radiación.
- Construcción de un software en Matlab para simular la respuesta teórica esperada según los parámetros escogidos.
- Caracterizar cada una de las etapas del array ya construidas.
- Montar un banco de medidas que permita medir diagramas de radiación para diferentes parámetros de entrada Para esto será necesario usar los datos de caracterización y así saber con exactitud los valores a introducir por el programa en Python.
- Elaboración de la memoria del TFG.

## 1.5. Diagrama de Gantt

TAREAS	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DECIEMBRE	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
Definición del proyecto	■	■							
Estudio de la literatura		■	■						
Búsqueda de componentes		■	■						
Wilkinson 2.0. Diseño, fabricación y caracterización.		■	■						
Wilkinson 3.0. Diseño, fabricación y caracterización.			■	■					
PCB prueba desfasador. Diseño, fabricación y caracterización.			■	■	■				
PCB mezanina. Diseño y fabricación.				■	■	■			
PCB control array. Diseño, fabricación, caracterización, ajuste de diseño y medidas				■	■	■	■	■	■
Programa de Control						■	■	■	
Medidas de diagrama de radiación								■	■
Memoria						■	■	■	■

## 1.6. Relación con asignaturas de Ingeniería Electrónica

Un array de antenas se encuentra relacionado con diversas asignaturas impartidas a lo largo del Grado de Ingeniería Electrónica de comunicaciones.

En primer lugar, son necesarios los conocimientos básicos de electromagnetismo adquiridos en Electromagnetismo 1 y Electromagnetismo 2.

Luego, en cuanto a los conocimientos de antenas, sus respectivas características (como el diagrama de radiación) y las contribuciones que aportan cada uno de los elementos radiantes a una agrupación, han sido adquiridos en las asignaturas de Sistemas radiantes y Radiofrecuencia. También se han utilizado los conocimientos impartidos en la asignatura de Compatibilidad Electromagnética en cuanto a la adaptación de impedancias y filtros necesarios al trabajar con señales de radiofrecuencia.

Por otra parte, los conocimientos de programación necesarios para controlar el array y la utilización de Matlab han sido herramientas puestas en práctica a lo largo de la carrera. En cuanto al conocimiento del protocolo SPI y su implementación en circuitos reales viene de la asignatura Instrumentación Electrónica.

Cabe destacar que los conocimientos para caracterizar el array, montar el banco de medidas y saber utilizar correctamente todos los dispositivos necesarios han sido adquiridos en los laboratorios de las asignaturas mencionadas con anterioridad.

## 2. Arquitectura general

Como se ha comentado anteriormente, se quiere controlar un array de 8 antenas a 2.4 GHz. Se ha escogido esta frecuencia, ya que se encuentra en una banda de uso libre y es conveniente en caso de que se quiera transmitir a frecuencias compatibles con otras tecnologías como el Wifi.

La señal se le proporcionará al array a través de un generador de ondas a la frecuencia de trabajo y con una potencia de 10 dBm. Luego, la señal pasa a través de un conector SMA de montaje superficial a un divisor de potencia Wilkinson con 8 salidas de igual potencia entre sí y en fase. Como la señal pierde potencia debido al Wilkinson, se agrega un amplificador de 10dB en cada una de las ramas.

Se quiere que sea un array programable y reconfigurable, por lo que se tendrá una etapa para desfasar la señal y otra para atenuarla, cada una controlada por SPI de forma independiente y se tendrá esta estructura en cada una de las ramas.

Por último, la señal ya desfasada y atenuada pasará a través de conectores SMA verticales a 8 antenas comerciales Wifi [7] (una por rama) que estarán separadas entre sí  $\lambda/2$  (6.25 cm) y que conformarán el diagrama de radiación deseado.

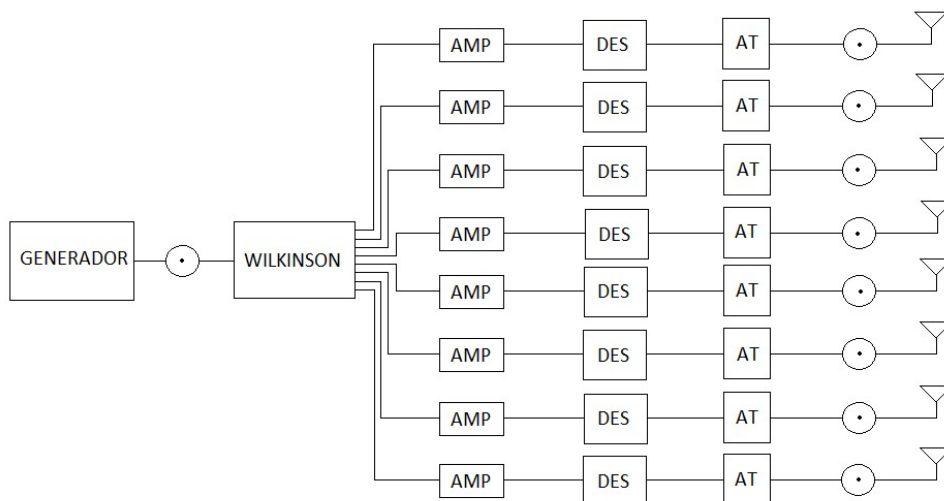


Figura 3. Esquema general

El esquema de la Figura 3 se implementará en un circuito impreso donde las etapas de amplificación, atenuación y desfase se harán con circuitos integrados comerciales que se han escogido según las especificaciones, mientras que el divisor Wilkinson está inspirado en el diseño descrito en [8] incluyendo ciertos cambios con los que se ha hecho una nueva versión.

Los componentes comerciales utilizados en cada una de las etapas están todos adaptados a 50  $\Omega$ . Cada una de las etapas será especificada en capítulos posteriores, pero se mencionan a continuación las características generales de los circuitos integrados a utilizar:

- La etapa de amplificación se hará utilizando el circuito integrado MAAL-009120 [9] que tiene un ancho de banda de funcionamiento de 70 MHz a 3 GHz con una ganancia típica de 11.2 dB a 1.9 GHz y 5V de alimentación.
- Para la etapa de desfase se usará el componente MAPS-010144 [10] , un desfasador digital de 4 bits que permite desfasar desde 0° (referencia) hasta 337.5° en pasos de 22. 5°, el cual funciona de 2.3 a 8.3 GHz. Tiene control serie utilizando el protocolo SPI y una alimentación bipolar ( $\pm 5V$ ). El punto de saturación es de 25 dBm e introduce 2.5 dB de pérdida para cualquier desfase.
- Como atenuador se utiliza el chip HMC1119 [11] que trabaja de 100 MHz a 6 GHz y permite una atenuación entre 0 dB (referencia) y 31.75 dB en pasos de 0.25 dB, con unas pérdidas mínimas de 1.3 dB a 2 GHz, presentando su punto de compresión de 1 dB a 31 dBm. Se alimenta con 5V.
- Como las etapas de desfase y atenuación pueden ser controladas por SPI, al ver la Figura 3 se sabe que harán falta una línea MISO, otra MOSI y el CLK conectadas a 16 chips aparte de las 16 líneas de CS (1 por cada componente) lo que implicaría tener un microcontrolador con esas capacidades o una mezcla de demultiplexores que complicarían el circuito. Es por esto que se ha decidido usar el microchip MCP2210 [12], el cual permite pasar de SPI a USB y puede ser programado en Python utilizando la librería mcp2210\_python [13]. Este circuito dispone de 9 GPIO que pueden ser utilizados como CS, por lo que se utiliza uno para controlar los desfasadores y otro para los atenuadores.

En general para la alimentación se buscaron componentes que trabajaran todos a 5V, salvo el desfasador que trabaja a  $\pm 5V$ , para tener una alimentación genérica en la placa.

Por otro lado, debido al alto precio de los desfasadores, se ha decidido dividir el diseño en dos placas PCB, una de ellas con todos los desfasadores (Mezanina) y la otra con el resto de los componentes, incluido el control de ambas etapas (ControlArray). Esto se hace para prevenir cualquier daño que pueda sufrir el circuito con los desfasadores en caso de tener algún problema con la alimentación, cortocircuito o en caso de tener que repetir el diseño de la placa principal.

Al tener dos placas es necesario tener un conector apto para RF y a nuestra frecuencia de trabajo que permita colocar una placa sobre otra, por lo que se ha escogido usar los conectores SAMTEC QFSS-016-04.25-L-D-DP-PC4 [14].

Explicada la idea general del diseño, en los próximos capítulos se procederá a explicar con detalle cada una de las etapas.

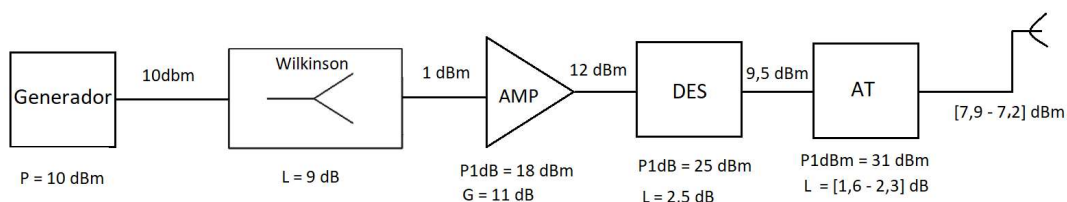


Figura 4. Diagrama de bloques de cada canal

### 3. Wilkinson

Como se ha visto en la arquitectura general, al plantear que el array tenga solo 1 entrada que termine en 8 salidas es necesario dividir la potencia de entrada, por igual, para cada uno de los canales y cuidar que el desfase en todas las salidas sea el mismo. Es por esto que, para dividir la potencia, se ha escogido un divisor Wilkinson 1 a 8, el cual, se ha construido a partir de 7 Wilkinson 2 a 1 como se puede ver en el esquema de la Figura 5.

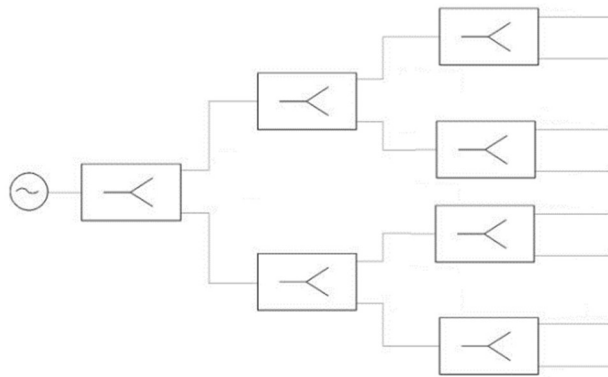


Figura 5. Divisor Wilkinson 1 a 8 [15]

Según Pozar [15] el divisor Wilkinson es un circuito que dispone de 3 puertos, donde la puerta 1 o de entrada tendrá una impedancia característica de  $Z_0$  y esta se divide en dos líneas de longitud  $\frac{\lambda}{4}$  e impedancia  $\sqrt{2}Z_0$ , las cuales están conectadas entre sí por una resistencia de valor  $2Z_0$ , quedando los terminales de salida adaptados a una impedancia de  $Z_0$  como se puede ver en la Figura 6. En este caso al tener adaptadas las entradas y salidas a  $50 \Omega$ , ese será el valor de  $Z_0$  y la resistencia que conecta las salidas del Wilkinson será de  $100 \Omega$ .

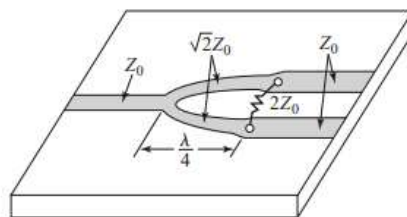


Figura 6. Divisor de potencia Wilkinson (por igual en cada salida) en línea microstrip. [2]

De esta forma se reparte la potencia que entra por el puerto 1 en partes iguales entre los puertos 2 y 3, es decir, que en cada una de las salidas del divisor se tienen 3 dB menos que a la entrada y ambas salidas estarían en fase. Este funcionamiento se puede extrapolar al divisor Wilkinson 1 a 8 de la Figura 5 donde al haber 3 etapas entre la entrada y cada una de las salidas, la atenuación será de 9 dB y estarán todas las salidas en fase.

Idealmente, la matriz S del divisor, a nuestra frecuencia de trabajo, será:

$$S = \frac{j}{\sqrt{8}} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Posteriormente, para el diseño del divisor, se ha partido del esquemático hecho por García Blázquez [8] que presenta un Wilkinson de una entrada y 8 salidas para un sustrato FR4 de 0,4 mm de espesor. En este caso, para reducir costes, se tendrán placas de 4 capas, lo que implica que se tiene el mismo sustrato FR4, pero con un grosor de 0.2104mm entre la primera capa y la segunda, por lo que se ha tenido que recalcular el ancho de las pistas con la calculadora del programa Microwave Office para el espesor específico del nuevo diseño. Una vez preparado el diseño se ha utilizado el programa Altium para generar la PCB con las pistas correspondientes. Las resistencias se han agregado con soldadura manual.

Al recibir el prototipo se dispuso de un banco de pruebas para medir la atenuación y desfase que introducían cada una de las líneas. Para dicho banco de pruebas, se dispuso de un analizador vectorial de redes MegiQ VNA-0440 donde se conectó una de sus entradas a la entrada del Wilkinson y la otra a cada una de las 8 salidas. Para medir cada salida se adaptaron el resto de las salidas libres a impedancias de 50  $\Omega$ , evitando que alguna reflexión pudiera alterar la medida. A continuación, se muestran los resultados de dicha prueba.

### 3.1. Primer prototipo

En la Figura 7 se puede ver el primer prototipo del divisor Wilkinson 1 a 8.

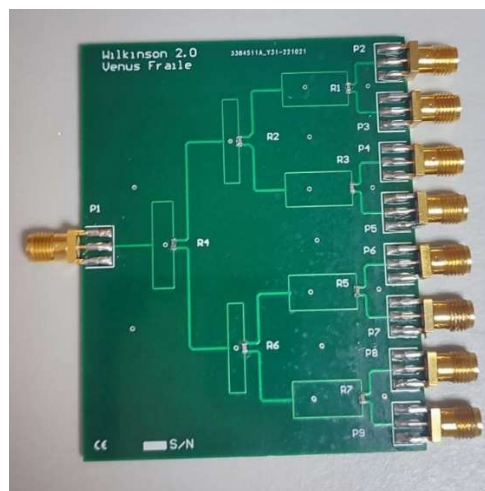


Figura 7. Wilkinson 2.0

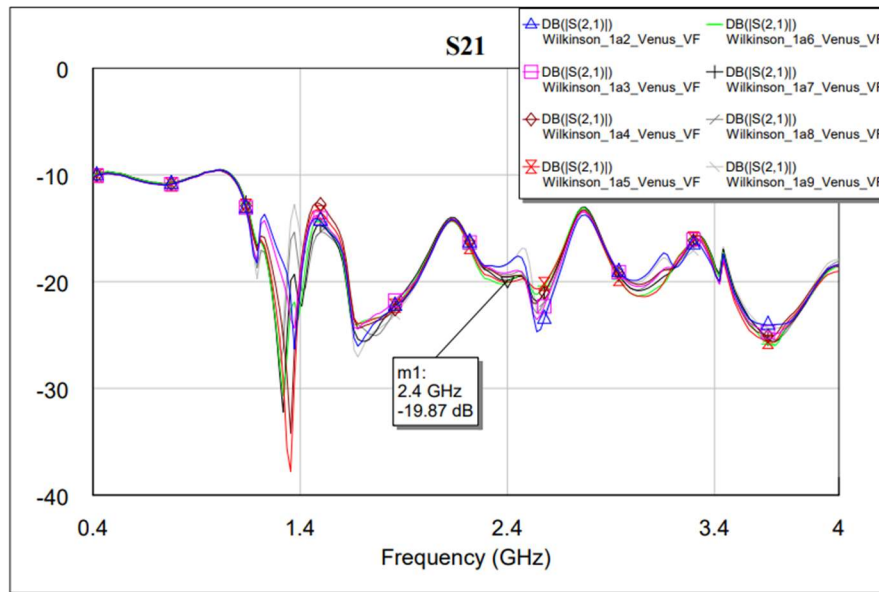


Figura 8. Medida S21 del Wilkinson 2.0

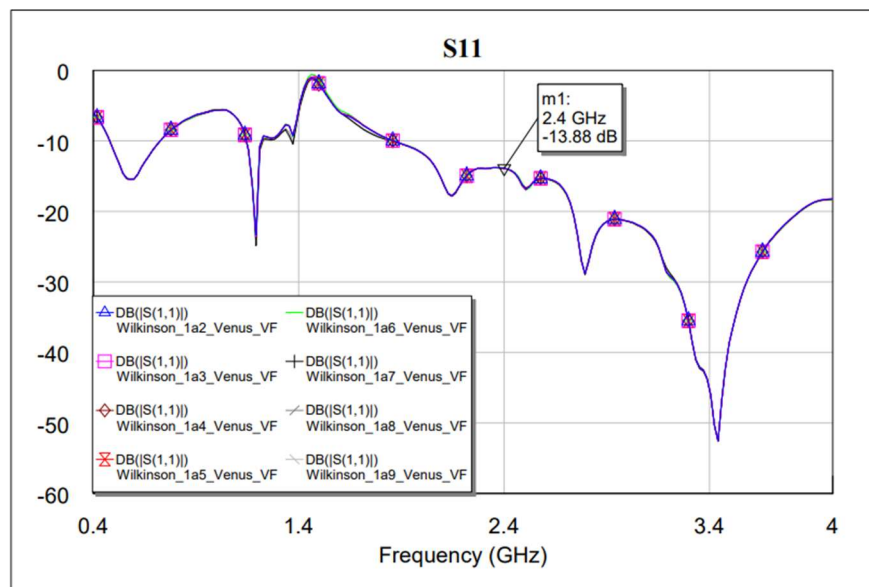


Figura 9. Medida S11 del Wilkinson 2.0

Una vez hechas las medidas, se obtuvieron unas pérdidas de 19.87 dB en cada una de las salidas como se puede ver en la Figura 8 mientras que idealmente se esperaban pérdidas de 9dB. En cuanto a las reflexiones se tienen -13.88 dB (Figura 9), lo cual es un valor bastante alto, lo que implica que mucha de la potencia está siendo reflejada. Si se comparan estos resultados con los obtenidos por García Blázquez [8] se puede observar que son bastante peores.

Al encontrarnos con este problema se comprobaron los cálculos de los anchos y longitudes de las pistas, el diseño de la placa, los valores de la resistencia, las soldaduras y por ultimo los conectores. Al analizar los conectores SMA se notó que las 4 capas de la PCB podrían estar ocasionando problemas. El campo de RF del Wilkinson está confinado en las líneas microstrip formadas entre la capa top y la capa 2 conectada a masa, por lo que idealmente se conectaría la pista de RF de la capa top al pin central del conector SMA y el borde del radio exterior (dieléctrico del conector) debería estar alineado con ese plano de masa. De esta forma el campo saliente de la

placa estaría alineado con el radio del dieléctrico del conector SMA y no se tendrían reflexiones. En este caso, al tener capas intermedias, el plano de masa no coincide con el radio del dieléctrico del conector, ocasionando pérdidas. Se puede observar en la Figura 10 una vista frontal del conector y un bosquejo de las 4 capas. En la zona verde el campo de RF se acoplaría correctamente y en la zona roja se perdería o se reflejaría.

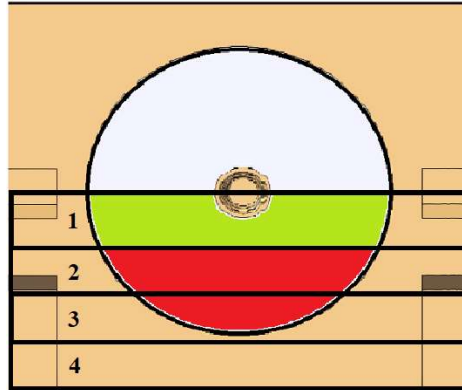


Figura 10. Vista frontal conector SMA

Una vez planteado el problema de los conectores, se dispuso a hacer una simulación electromagnética con el simulador AXIEM integrado en MW Office del circuito entero para averiguar si la reflexión se debía a los conectores o a un mal diseño de las pistas. Se comprobó que, si se colocaban directamente los puertos sobre la línea microstrip, los campos que llegaban se acoplaban correctamente a cada una de las pistas de salida que posteriormente iban a los conectores como se ve en las Figura 12 y Figura 122. Esto obligó a buscar una solución para los conectores, ya que, a pesar de ser un prototipo, la placa principal del array también sería de 4 capas y se utilizarían el mismo tipo de conectores para conectar las antenas y la alimentación de RF.

Para evitar los problemas de adaptación de los conectores SMA horizontales, se decidió cambiarlos por conectores verticales. Los conectores SMA verticales son típicamente through hole, que en nuestro caso no serviría, ya que no habría manera de conseguir que la potencia se acoplara sólo entre la capa top y la capa 2 o entre ningún otro par de capas. Sin embargo, existen conectores SMA de montaje superficial [16] que son perfectos para nuestro uso y, de acuerdo con el catálogo del fabricante poseen un  $S_{11} < -20 \text{ dB}$ . Una vez decididos los conectores a utilizar, se extrajo de MW Office el diseño realizado, incluyendo curvas suaves en los pliegues de las pistas para garantizar el ángulo adecuado que minimiza las pérdidas por reflexión. Para esta tarea fue necesario exportar las pistas a Autocad y convertirlo en un sólido con un formato adecuado para que Altium pudiese reconocerlo y así no alterar la forma del diseño.

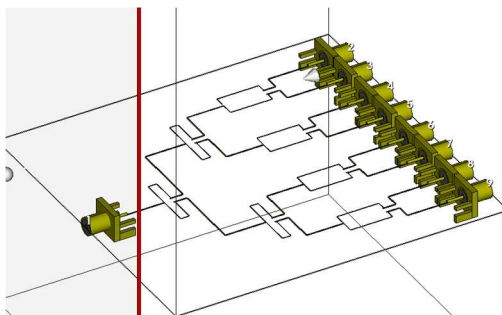


Figura 11. Densidad de corriente Wilkinson 2.0

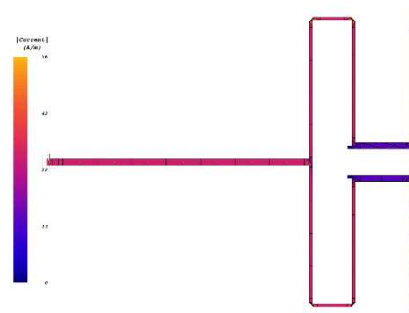


Figura 12. Densidad de corriente Wilkinson 2.0

### 3.2. Segundo prototipo

Una vez tomadas las decisiones de diseño, se fabricó el segundo prototipo del divisor Wilkinson de la Figura 13 donde se pueden ver los nuevos conectores SMA verticales y los nuevos cambios introducidos.

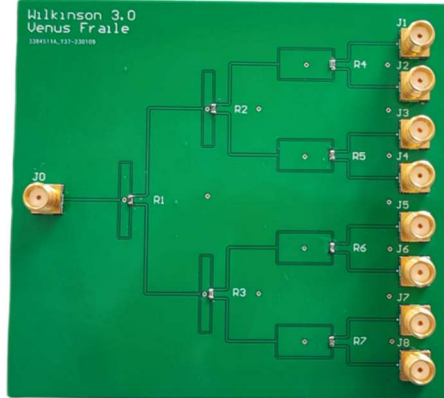


Figura 13. Wilkinson 2.0

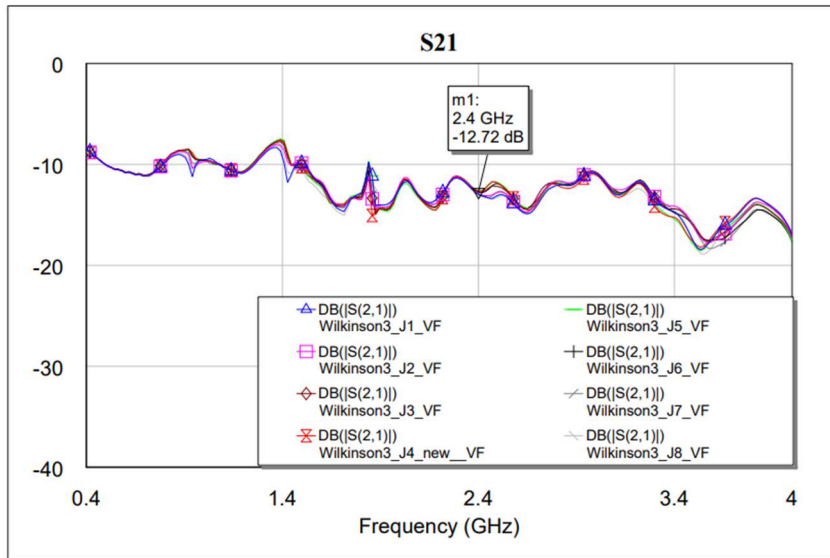


Figura 14. Medida S21 del Wilkinson 3.0

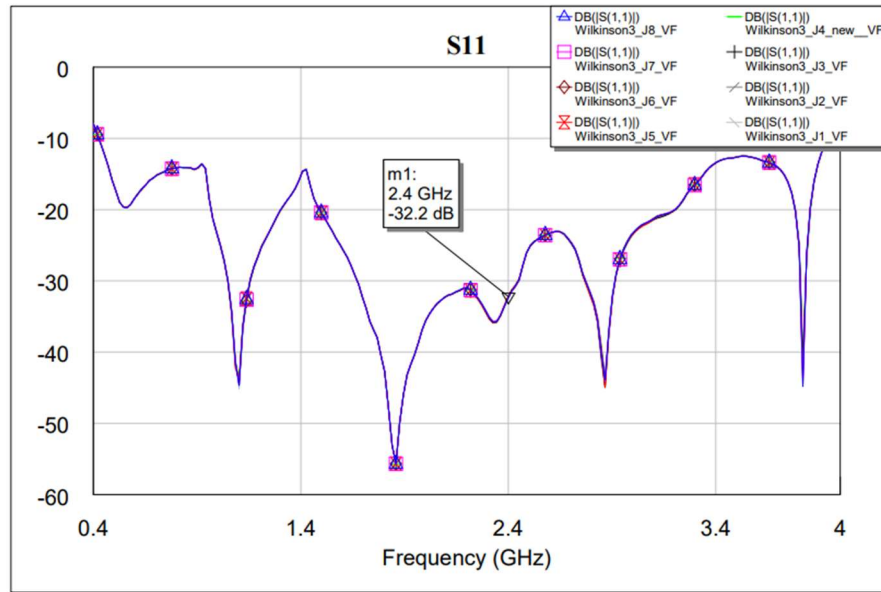


Figura 15. Medida S11 Wilkinson 3.0

Presentado los resultados de este prototipo en la Figura 14 y Figura 15 en la misma escala del anterior, se puede ver que la respuesta de las salidas es mucho más estable y tiene unas pérdidas con respecto a la entrada de -12.72 dB lo cual son más pérdidas de las esperadas, pero es mucho mejor que el primer prototipo. Para la adaptación se puede ver que se tienen -32.2 dB, es decir, se refleja muy poco. En general este prototipo presenta mejores resultados que el anterior.

Al ver los resultados se comprueba la influencia de los conectores en este tipo de placas PCB de 4 capas y como utilizar conectores SMA verticales mejoran considerablemente las prestaciones del diseño.

## 4. Amplificadores

Como se mencionó en el capítulo 2 se utilizarán amplificadores a la salida de cada una de las ramas del divisor de potencia Wilkinson. Esto se hace porque como se ha comentado en el capítulo 3, teóricamente se pierden 9 dB entre la entrada y cada una de sus salidas, y experimentalmente se midieron 12.72 dB, por lo que es conveniente amplificar las señales de RF que pasarán por el resto de las etapas.

Se ha escogido el microchip MAAL-009120 [9], el cual funciona a la frecuencia de trabajo, tiene el punto de compresión de 1dB en 18.5 dBm a la salida del amplificador y presenta una ganancia típica de 11 dB a 1.9 GHz. Es decir, que para no saturar al amplificador es necesario que la potencia de entrada sea menor a 7.5 dBm, incluso un poco menos para que no presente problemas. Esto se cumple, ya que, al tener 10 dBm de potencia a la entrada del divisor Wilkinson, a la salida de cada una de las ramas se obtiene, como máximo 1 dBm. Cada una de las salidas del Wilkinson irán conectadas a un amplificador, por lo que a su salida se tendrán 12dBm y dicha potencia se introducirá en los desfases. Estos 12 dBm se encuentran comprendidos dentro del rango de funcionamiento del desfaseador.

Visto esto, se justifica la ganancia del amplificador para garantizar una potencia tal que permita que la señal sea tratada correctamente en cada una de las etapas del array, sin superar los niveles de funcionamiento lineal de ningún dispositivo.

En cuanto a la polarización del amplificador, el fabricante recomienda polarizarlo como especifica la Figura 16 y es el esquema que se seguirá para su posterior implementación en la placa.

### Component List @ 5V

Part	Value	Case Style	Purpose
C1	39 pF	0402	Input DC Block
C2	39 pF	0402	Output DC Block
C3	470 pF	0402	RF Bypass
L1	12 nH	0805	RF Choke/Tuning
R1	24.9 $\Omega$	0402	Voltage Drop

### Application Schematic @ 5V

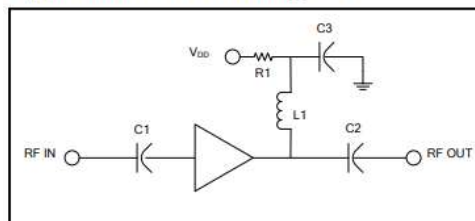


Figura 16. Polarización del MAAL-009120

## 5. Desfasador

La primera etapa que modificará el diagrama de radiación del array será el desfasador. Como se mencionó en el capítulo 2 el microchip que se utilizará será el MAPS-01044 [10], el cual permite desfases desde  $0^\circ$  a  $360^\circ$  en pasos de  $22.5^\circ$ . Este es un desfasador digital de 4 bits fabricado en GaAs. Permite el control en serie y es compatible con el protocolo SPI. Dentro de las opciones del mercado, las cuales eran limitadas, ha sido una de las opciones más económicas.

Una vez escogido el componente se procedió a realizar una placa de 4 capas de prueba para verificar el funcionamiento deseado. La placa resultante se puede ver en la Figura 17, donde para la entrada y salida de RF se tienen conectores SMA, para la alimentación bipolar ( $\pm 5\text{ V}$ ) y GND se tienen conectores de banana y por último J4 es un conector que se comunica con un adaptador USB a SPI TotalPhase Cheetah muy útil para pruebas. Este tiene una interfaz gráfica donde escribir en hexadecimal el mensaje SPI a enviar. Los datos son reconocidos por el chip y ajusta el correspondiente desfase.

Los condensadores C1 y C2 que se pueden ver en la placa, se agregan entre los pines de alimentación del chip y las fuentes, con un valor de  $100\text{nF}$  para filtrar la alimentación. Por otra parte, las resistencias R1, R2 y R3 se colocan entre los pines del control paralelo (que no se utiliza) y tierra, por recomendación del fabricante, con un valor de  $47\text{k}\Omega$ . Las pistas de entrada y salida de la señal están diseñadas para ser líneas de  $50\ \Omega$ .



Figura 17. PCB Prueba Desfasador

Truth Table (Digital Phase Shifter)<sup>10</sup>

D6	D5	D4	D3	D2	D1	Phase Shift
0	0	0	0	X	X	Reference Phase
0	0	0	1	X	X	22.5 deg
0	0	1	0	X	X	45 deg
0	1	0	0	X	X	90 deg
1	0	0	0	X	X	180 deg
1	1	1	1	X	X	337.5 deg

10. 0 = CMOS Low; 1 = CMOS High, X is CMOS Low or High

Tabla 1. Tabla de verdad MAPS 010144

Como se puede ver en la tabla de verdad del MAPS – 010144 [10] de la Tabla 1 a pesar de que el componente solo necesita 4 bits para el control, está diseñado para recibir 6 bits. Para escribir 6 bits utilizando números hexadecimales es necesario escribir un número de dos cifras porque cada cifra hexadecimal son 4 bits, lo que implica que se escribirán 8 bits, de los cuales los dos más significativos y los dos menos significativos pueden tener cualquier valor.

También se puede observar en la Figura 17 que, a pesar de trabajar con 4 capas, se han utilizado conectores SMA horizontales, esto se debe a que el diseño de la placa de prueba para el desfasador se hizo de forma simultánea al primer prototipo del Wilkinson, por lo que los problemas de reflexiones de los conectores fueron detectados posteriormente. Igualmente se han tomado los datos como válidos, ya que,

en general presentan errores aceptables de los desfases exceptuando el bit defectuoso que se mencionará posteriormente.

Una vez caracterizado el microchip se obtienen los resultados de la Figura 18 donde se muestra la desviación entre el desfase teórico y el medido. La línea azul representa la respuesta ideal y los puntos representados son los valores obtenidos ya descartado el offset. Para 0° grados de desfase el componente presentaba un offset de 9.8°.

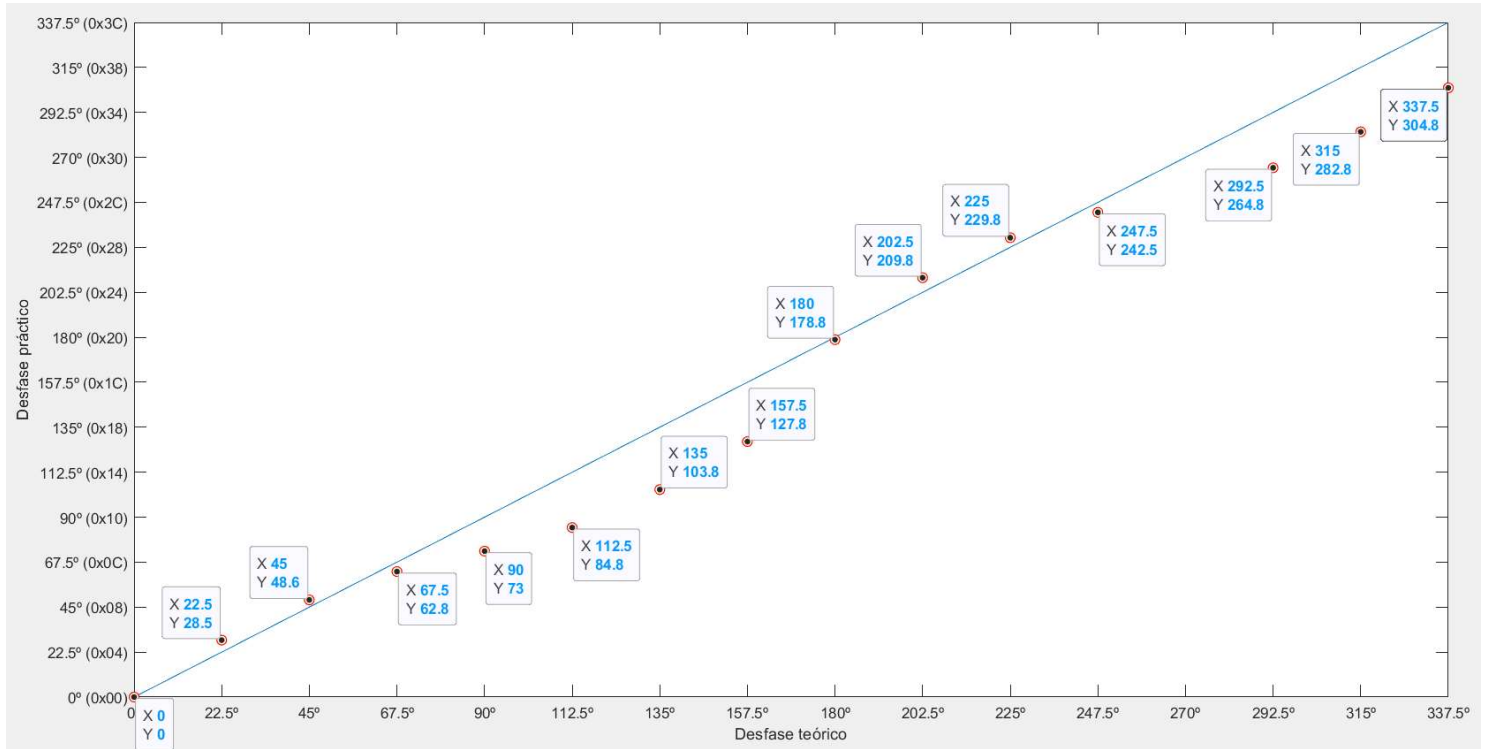


Figura 18. Resultados del desfasador MAPS-010144

Cabe destacar que al tener activo el quinto bit (desfase de 90°), el error es mucho mayor que en el resto de los casos. Se cree que es un problema específico de este chip, ya que, en los desfases donde ese bit no está presente se tienen como máximo 7,3° de desviación.

Visto esto se puede concluir que el circuito integrado elegido funciona correctamente y se utilizará para el diseño de la placa final. Se sabe cómo controlarlo y funciona aproximadamente de la manera esperada.

Como se mencionó anteriormente el MAPS – 010144 [10] es un dispositivo hecho de GaAs, eso sumado a la poca oferta de este tipo de circuitos para RF hacen que tenga un valor económico por encima del resto de componentes de la placa. Es por esto que se tomó la decisión de crear una placa PCB llamada “Mezanina Desfasadora” donde irán los ocho desfasadores y en caso de tener que cambiar algo del diseño general o cualquier error eléctrico o de ensamblaje de la placa principal no implique perder estos microchips.

Para el diseño de “Mezzanina desfasadora” se ha utilizado una PCB de 4 capas con sustrato FR4 y pistas microstrip de 50 Ω para las señales de RF. Se puede ver en la Figura 19 el grosor de cada una de las capas.

#	Name	Material	Type	Weight	Thickness	Dk	Df
	Top Overlay		Overlay				
	Top Solder	Solder Resist	Solder Mask		0.0127mm	3.8	
1	Top Layer 1		Signal	1/2oz	0.035mm		
	Dielectric 2	PP-023	Prepreg		0.2104mm	4.6	0.02
2	Top Layer	CF-004	Signal	1oz	0.0152mm		
	Dielectric 1	FR-4	Dielectric		0.32004mm	4.8	
3	Bottom Layer	CF-004	Signal	1oz	0.0152mm		
	Dielectric 3	PP-023	Prepreg		0.2104mm	4.6	0.02
4	Bottom Layer 1		Signal	1/2oz	0.035mm		
	Bottom Solder	Solder Resist	Solder Mask		0.0127mm	3.8	
	Bottom Overlay		Overlay				

Figura 19. Stack-up de la Mezzanina desfasadora

En la capa top (Figura 23) se tendrán los 8 desfasadores y sus respectivos componentes de polarización junto con las pistas de RF, todo rodeado de un plano de masa. En la segunda capa se tiene solo plano de masa.

En la tercera capa se han hecho dos planos de alimentación que ocupan, cada uno, la mitad del espacio, uno de +5V y otro de -5V (Figura 20Figura 22). En esta capa también se han incluido las líneas de control, teniendo 8 CS, 1 CLK, 1 MISO y 1 MOSI. Esto se puede ver en la Figura 22 donde se tiene una vista detallada de la capa 3 mostrando la separación entre planos, los respectivos taladros que conectan a los planos de alimentación y alguna de las pistas de control.

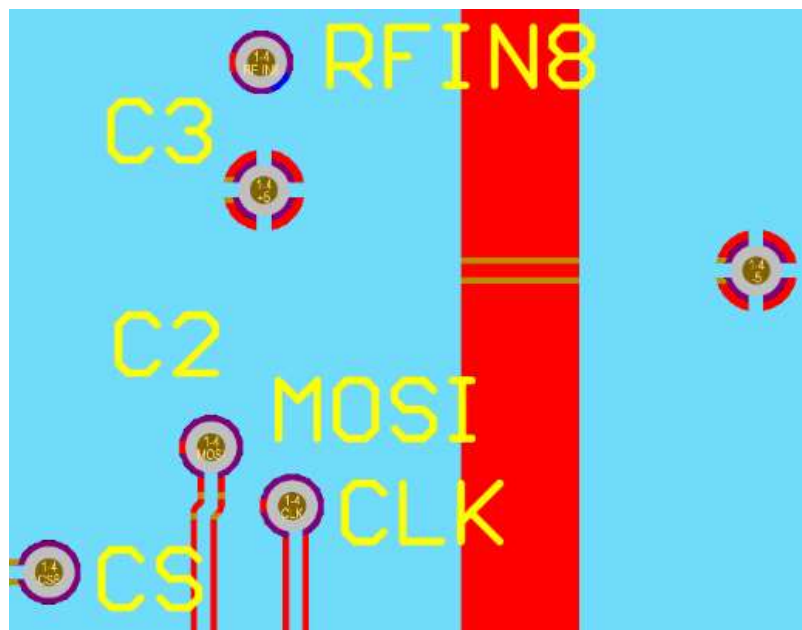


Figura 20: Vista de cerca capa 3

En la capa bottom se tiene el conector QFSS-016-04.25-L-D-DP-PC4 (Figura 21) y también se ha utilizado para resolver cualquier cruce entre líneas de una misma capa. Cabe destacar que se tienen taladros que van desde la capa 1 a la 4 para comunicar las pistas.

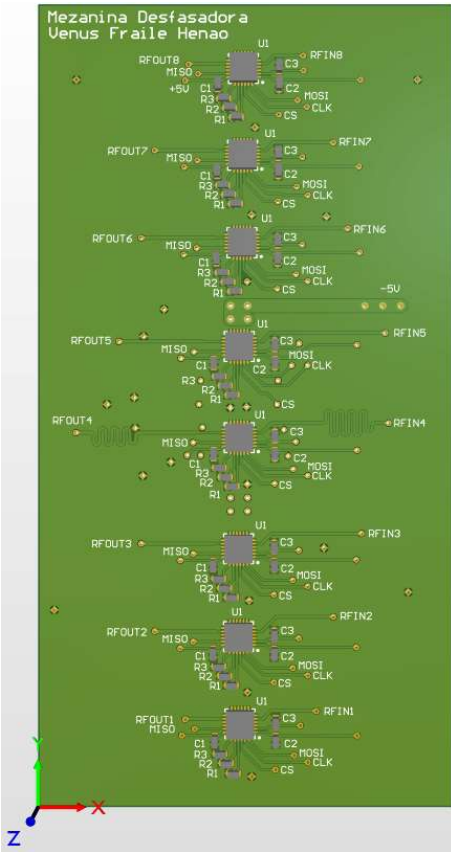


Figura 23. Mezanina Desfasadora vista capa top

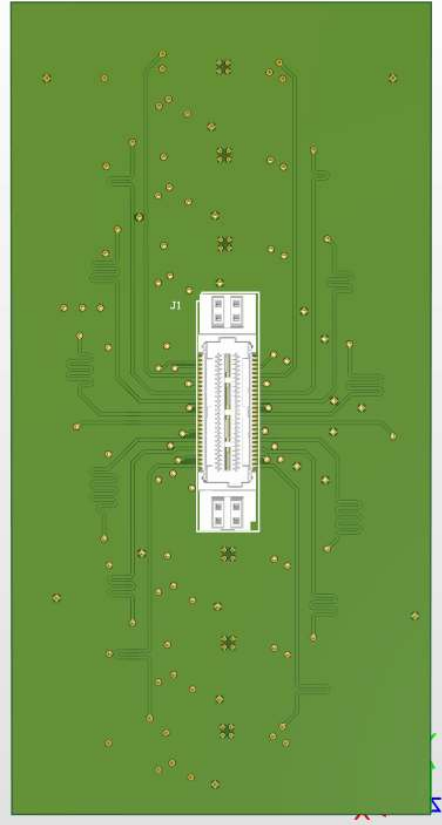


Figura 21. Mezanina Desfasadora vista capa bottom

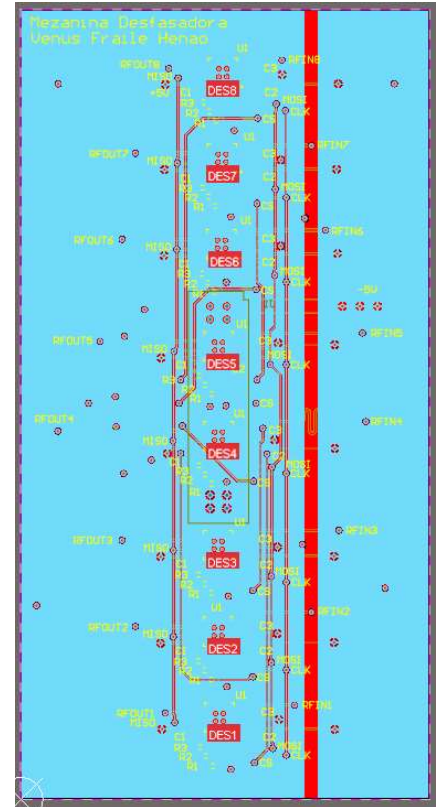


Figura 22. Mezanina Desfasadora. Capa 3 (planos de alimentación)

En esta placa, la soldadura de los desfasadores y del conector de la mezanina fue necesaria hacerla en horno, es decir, primero se utiliza una máscara de soldadura para aplicar la pasta de estaño, se coloca el componente en su sitio con las patas adecuadas en cada una de las marcas de estaño y por último se introduce en el horno para ser calentado a 250° C. La pasta utilizada está conformada por estaño y resina, de manera que primero se funde la resina para prevenir cortos y luego se funde el estaño soldando los componentes

Debido a la cantidad de componentes, primero se realizó este proceso con el conector de la mezanina. Esto implicó que una vez soldado el conector era necesario introducir nuevamente la placa al horno para soldar los desfasadores, es decir, se calentaría de nuevo la soldadura ya hecha y se corría el riesgo de que se despegara. Fue necesario utilizar un pegamento térmico para el conector, este pegamento es una pasta suave que se aplica y al entrar en contacto con el calor sella, dejando el componente fijo.

El resto de los componentes han sido soldados de forma manual.

Con todo esto, ya se tendría la placa Mezanina desfasadora preparada para ser conectada en la placa principal.

## 6. Atenuador

Como se menciona en la introducción es necesario variar la potencia con la que radia cada antena para obtener distintos diagramas de radiación, concretamente para modificar el nivel de los lóbulos secundarios. Es por esto que se ha escogido el microchip HMC1119 [11], el cual permite atenuar entre 0dB y 31.75dB en pasos de 0.25dB con un error de menos de  $\pm 0.1$ dB. También presenta bajas pérdidas de inserción y funciona a la frecuencia de trabajo.

Es importante destacar que se puede alimentar con 5V y así seguir manteniendo la homogeneidad de la alimentación de la placa.

En cuanto al control, permite control serie por SPI, igualmente compatible con el resto de los componentes. Para esto dispone de 6 bits, los cuales se controlan según la Tabla 2.

Por otra parte, el fabricante recomienda agregar condensadores en serie de 100pF en la entrada y salida de radiofrecuencia para filtrar cualquier señal de continua que pueda alterar la polarización y los pines de control paralelo, no utilizados, se dejan conectados al plano de masa

Este dispositivo fue probado por García Blázquez [8] y los resultados de la placa de prueba fueron buenos, a pesar de no ser útil para su diseño específico. En este caso lo importante es que los valores programados coincidan con los resultantes. Dicho esto, se considera incluir los atenuadores HMC1119 [11] en la placa final de ControlArray.

Digital Control Input <sup>1</sup>							Attenuation State (dB)
D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	
Low	Low	Low	Low	Low	Low	Low	0 (reference)
Low	Low	Low	Low	Low	Low	High	0.25
Low	Low	Low	Low	Low	High	Low	0.5
Low	Low	Low	Low	High	Low	Low	1.0
Low	Low	Low	High	Low	Low	Low	2.0
Low	Low	High	Low	Low	Low	Low	4.0
Low	High	Low	Low	Low	Low	Low	8.0
High	Low	Low	Low	Low	Low	Low	16.0
High	High	High	High	High	High	High	31.75

<sup>1</sup> Any combination of the control voltage input states shown in Table 6 provides an attenuation equal to the sum of the bits selected.

Tabla 2. Tabla de verdad HMC1119 [11]

## 7. Control

Se ha mencionado que todos los componentes que se deben controlar son compatibles con el protocolo SPI, por lo que se necesitarían 16 chip selects, 1 línea de MOSI, 1 línea de MISO y 1 línea de CLK. El protocolo SPI suele ser típico para comunicar microcontroladores Arduino con dispositivos, pero en caso de usarlo haría falta tener una placa con 16 GPIO y la respectiva interfaz. Todo esto implicaría agregar un microcontrolador con esas características, que aumentaría el precio, o utilizar una red de decodificadores para poder implementar el control con menos señales GPIO y escoger el camino deseado, pero eso implicaría latencia y gestión de conflictos. Es por esto por lo que se ha escogido utilizar el IC MCP2210 [12], el cual convierte el protocolo USB 2.0 a SPI (modo 0, 1, 2 o 3) y es mucho más sencillo de programar. Este chip contiene 9 salidas GPIO que pueden ser utilizadas como entrada o salida, 1 MOSI, 1 MISO y 1 CLK, así que se utilizarán 2 MCP2210. Uno de ellos controlará todos los desfases y otro todos los atenuadores y ambos se incluirán en la placa final.

Este chip requiere utilizar un oscilador de 12 MHz, para el que se ha utilizado un oscilador de cuarzo [17] con un voltaje operativo entre 3.3 V y 5.5 V que en este caso se alimentará con 5 V, lo que permite conservar la homogeneidad de la alimentación de la placa. En cuanto al protocolo de funcionamiento se utilizará el SPI modo 0, siendo el más sencillo de utilizar y que cumple con las necesidades de control de los microchips y las capacidades del MCP2210.

Para programar el MCP2210 se ha utilizado la librería de `mcp2210_python` [13], la cual permite acceder a las características del dispositivo de forma intuitiva. Esta librería ofrece la opción de escoger parámetros característicos de la comunicación como el retardo, el modo SPI y especificar el identificador del IC destino. También permite designar el propósito de cada GPIO (Se tienen a disposición 9 de ellos), como MOSI, MISO o CS y advierte en caso de no escoger un pin existente. Por último, tiene funciones específicas donde sólo es necesario escribir el mensaje a enviar en bits, se señala el GPIO al que se quiere enviar, y que previamente se ha definido como chip select, y con esto se hace la operación de transferencia de datos.

El hecho de utilizar una librería de Python hace que el programa sea portable y se pueda ejecutar desde Windows, Unix o cualquier sistema que soporte este lenguaje. Las pruebas de comunicación se harán desde Windows a través de la aplicación Anaconda, que contiene un entorno de desarrollo científico de Python llamado Spyder 5.4.3 con una interfaz parecida a Matlab, ya que ofrece feedback de la comunicación, muestra los valores de las variables utilizadas y tiene su propia terminal de comandos.

En el código realizado, los posibles valores de desfases y atenuaciones ya caracterizados en capítulos anteriores se guardan en variables binarias para luego ser utilizadas en arrays de 8 elementos (uno por antena) y así definir las combinaciones de desfases y atenuaciones para construir un diagrama de radiación específico.

En principio, el programa contará con 3 diagramas de radiación preestablecidos y el usuario será capaz de escoger cuál desea representar, a través del terminal. Una vez escogido se comprueba que se ha introducido un valor válido y en caso contrario se vuelve a pedir el dato. Una vez seleccionada una opción válida, el software procede a llamar a dos funciones (una para la atenuación y otra para los desfases) que se encargan de enviar la información (12.3. Código de control)

## 8. ControlArray

### 8.1. Diseño

Igual que en las placas anteriores se ha utilizado Altium para el diseño de la placa final, la cual integrará todas las etapas explicadas excepto los desfasadores que se encuentran en la “Mezzanina desfasadora”. Se ha escogido hacer una PCB de cuatro capas, lo cual permite más versatilidad al momento de hacer las conexiones, pero, sobre todo, porque permite tener pistas con impedancia de  $50 \Omega$  en FR4 más estrechas que con el espesor típico de 1,6 mm. La primera capa tendrá la mayoría de los componentes SMD y las pistas de radiofrecuencia microstrip de  $50 \Omega$ , ya que justo debajo tiene un plano de masa. La segunda capa será el plano de masa mencionado y las siguientes dos capas serán utilizadas para planos de alimentación y el interconectado general de baja frecuencia. También se han colocado algunos componentes en la capa bottom en caso de conflicto de espacio en la primera y algunos componentes opcionales.

Para el diseño del esquemático se ha utilizado un diseño jerárquico en Altium, es decir, se distribuyen los circuitos en varios esquemáticos que son referenciados a un esquemático principal para así tener un diseño más limpio. Para el interconectado entre esquemas se han utilizado *harness* (un tipo de red) y buses, estos se pueden ver en la Figura 39 y Figura 42 del capítulo de anexos, página 40.

Luego, para facilitar el ruteado de la PCB se han empleado “rooms”. Esta herramienta es muy útil cuando se tienen varios canales con chips iguales que se polarizan de la misma manera. Mediante las romos sólo es necesario hacer la interconexión de uno de ellos y para el resto de los canales se replican las conexiones con el resto de los componentes del mismo tipo. Esto ha sido sumamente útil, ya que, se dispone de un desfasador y un atenuador por cada una de las 8 antenas.

Dentro del diseño de la PCB, las pistas de radiofrecuencia han tenido que seguir dos condiciones. En primer lugar, cumplir con el grosor para  $50 \Omega$  y en segundo lugar se ha tenido que hacer una ecualización de retardos para que las diferencias de fase sólo dependan de los chips desfasadores y no de la longitud de las pistas.

Para realizarlo se han utilizado herramientas de Altium dentro de las reglas de diseño. Consiste en definir un tipo de red y se especifica que las líneas de este tipo deben tener la misma longitud. De esta forma, se toma como referencia la más larga y luego es necesario ir una a una ajustando las longitudes para cumplir la regla. Para no ocupar mucho espacio dentro de la PCB, este ajuste se realiza introduciendo tramos de línea en zigzag en cierta parte de la línea, como se muestra en la Figura 24. En este caso al tratarse de señales de radiofrecuencia no se pueden tener esquinas de  $90^\circ$  porque implicaría tener reflexiones, por lo que, se ha configurado para tener esquinas redondeadas.

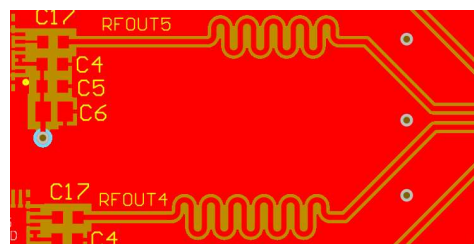


Figura 24. Ecualización de pistas de RF

También fue necesario agregar condensadores en serie a las líneas de radiofrecuencia a la entrada y salida de cada una de las etapas para evitar cualquier componente de continua que pudiese alterar las polarizaciones. A algunos de los IC se les había colocado en sus propios esquemáticos, pero en otros fue necesario agregarlo en el diseño general.

En cuanto a las conexiones de la placa se ha escogido un conector micro USB para cada uno de los MCP2210 que permitirán el control desde un ordenador. Para las alimentaciones se tiene un conector único tru-hole de tres patas TE Connectivity 796636-3 que alimentará a toda la placa con  $\pm 5V$  y masa. Por último, para las señales de RF de entrada y salida se utilizan conectores SMA superficiales.

También la placa cuenta con 4 patas conectadas a masa y un led de señalización en cada MCP2210 que indica si se está comunicando. No se han incluido puntos de prueba por el espacio disponible entre pistas.

Una vez se tenían todos los componentes de la placa colocados y conectados, se colocó el conector de la mezzanina en la capa top y se hizo la interconexión con la salida de cada uno de los amplificadores, con la alimentación, con los desfases y con los chips de control.

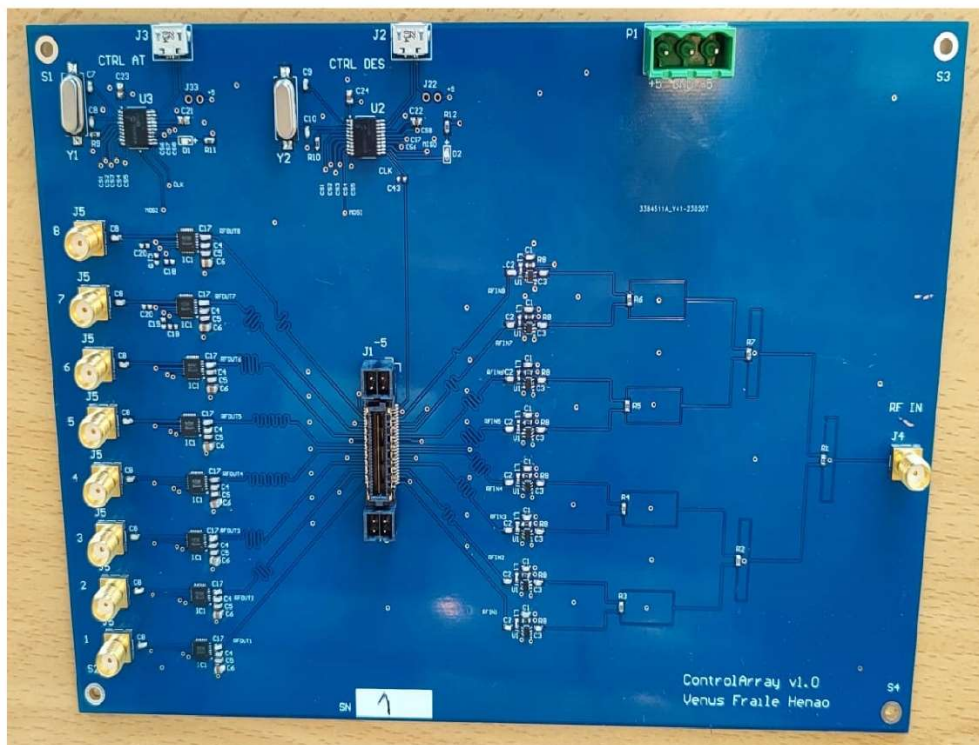


Figura 25. Placa PCB ControlArray

## 9. Medidas

### 9.1. Caracterización del sistema

Una vez ya construidas todas las placas y el control ya programado, se procede a conectar la Mezzanina Desfasadora con la placa principal Control Array como se puede ver en la Figura 26, comprobando así que los diseños encajan. También se conectó la alimentación y se comprobó el consumo, siendo este de aproximadamente 0.7A para +5V y de 0.01A para -5V. El consumo presente en la alimentación positiva se debe principalmente a los amplificadores. A su vez se conectó la PCB al ordenador para comprobar que se obtenían los desfases programados por el software de control. Fue necesaria la utilización del entorno de programación de Spyder y su respectiva terminal de comandos donde se puede escoger el diagrama de radiación deseado.

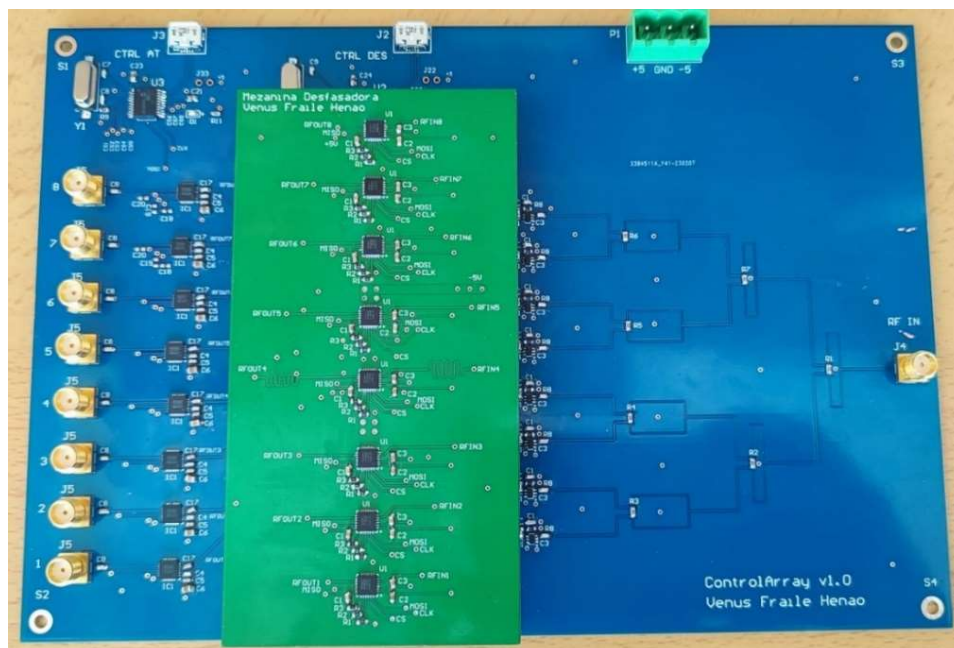


Figura 26. Placa PCB del array de antenas

Al hacer las medidas correspondientes no se obtenían los resultados esperados, por lo que se hizo una revisión de diseño. En esta revisión se detectó un error en la huella de los amplificadores, así que fue necesario fabricar de nuevo la placa.

Para la primera versión de ControlArray se utilizó soldadura en horno para los atenuadores, los conectores SMA y el conector de la mezzanina. El resto de los componentes fueron soldados de forma manual. En la segunda versión se pidió al fabricante de PCB la placa con todos los componentes ya soldados, debido al tiempo que conllevaba volver a soldarla entera.

Luego, se caracterizó cada canal de salida con respecto a la señal de entrada utilizando un analizador vectorial de redes MegiQ VNA-0440 [18]. Para esto se han cargado las salidas con impedancias adaptadas de  $50 \Omega$ , excepto la que se quería medir, de esta forma se puede hacer una medida aislada de cada canal para cada componente programable. El programa de control permite enviar los datos que se quieran y seleccionar al microchip al que se le envían.

### 9.1.1. Resultados de desfase

Para medir los desfases de cada canal se programó una atenuación de 0 dB en todos los canales y 0° de desfase, excepto para el canal a medir. El canal por medir se programaba con cada uno de los desfases posibles, es decir, de 0° a 357.5° en pasos de 22.5°. Una vez hecha las medidas, se han obtenido los resultado representados en las Figura 27 y Figura 28.

Para la representación gráfica se han tomado los valores medidos y se han transformado en la escala de 0° a 360°. Ya cambiados de escala, se puede ver que al programar 0° se obtienen para cada canal un offset de entre 270° y 348°, esto se debe a los efectos de los componentes sobre la señal de RF. A pesar de utilizar la ecualización para tener longitudes de pista iguales en todos los canales en cada etapa, cada componente, introduce una atenuación o desfase ligeramente diferentes. Esto se puede compensar al programar cada uno de los desfases una vez ya caracterizados todos los canales.

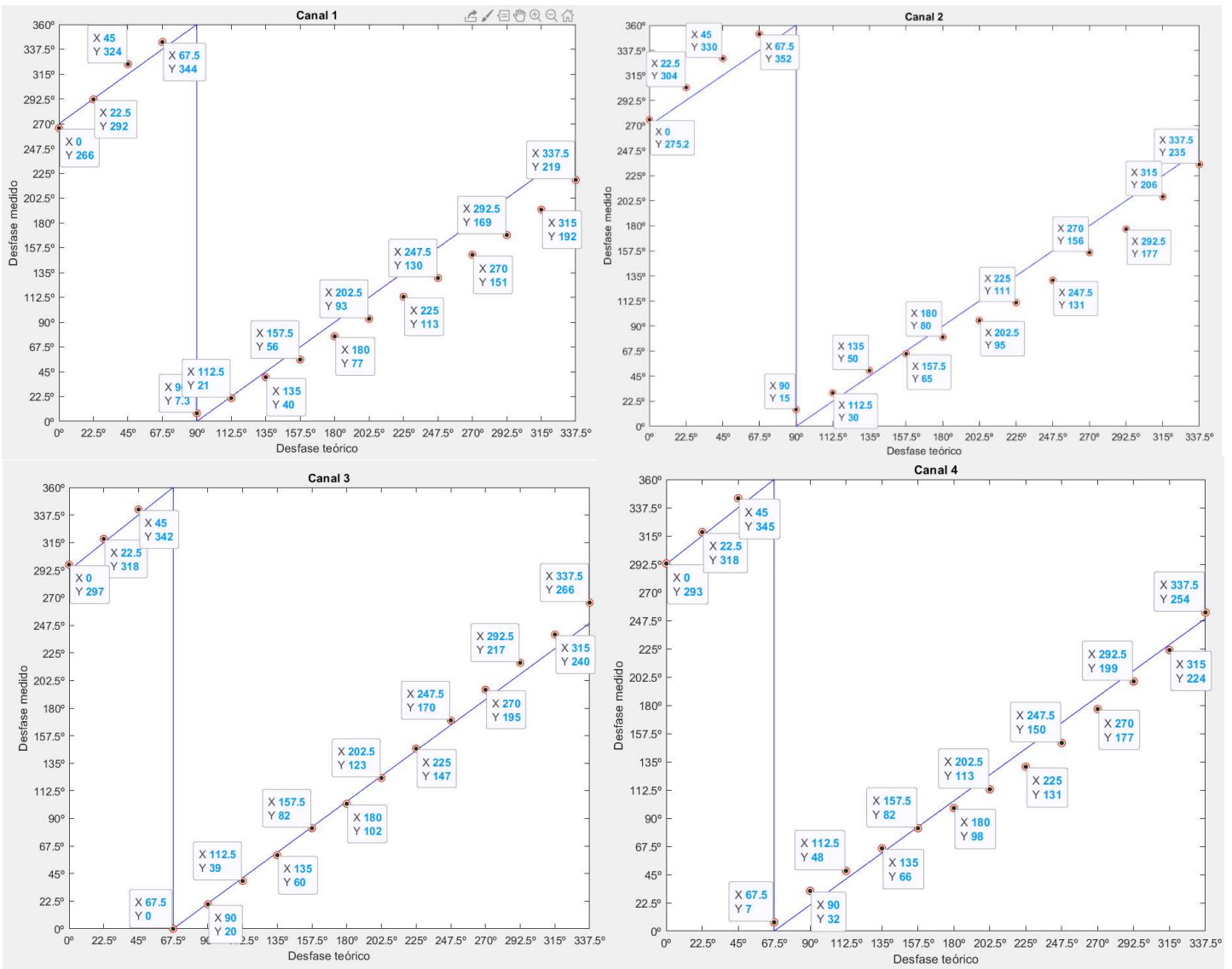


Figura 27. Medidas de desfase (canal 1-4)

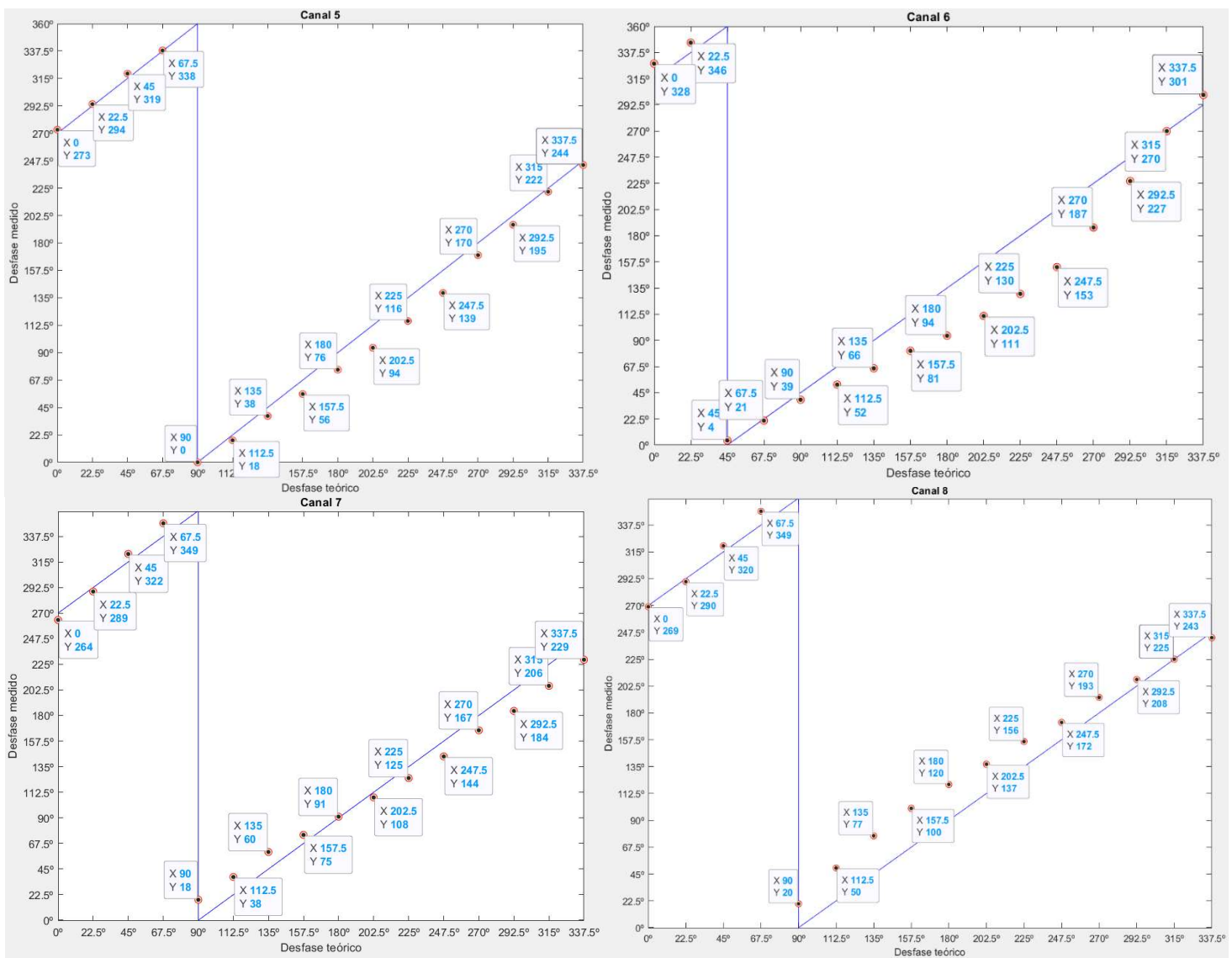


Figura 28. Medidas de desfase (canal 5-8)

La línea azul de la Figura 27 y Figura 28 corresponde al desfase ideal que se debería obtener, tomando en cuenta el offset y los puntos rojos representan las medidas obtenidas para cada desfase programado. Los desfases se introducen al programa de control en bits, lo cuales corresponden al valor hexadecimal representado en la sección 5. El offset se representa debido a que al tener un paso de 22.5° no se puede corregir con exactitud.

Visto los resultados de la medida lo primero que destaca es que los offset de cada canal no son iguales a pesar de estar diseñados de la misma forma y de que los componentes repetidos están hechos por los mismos fabricantes. Los integrados, aunque sean iguales unos a otros, pueden presentar variaciones entre sí.

También se puede observar como el error se va acumulando a partir de programar ciertos desfases. Esto se observó en la prueba del desfasador en la sección 5, donde existía un desfase (correspondiente a un bit específico) que presentaba mucho más error que el resto, por lo que al activarlo otros desfases acumulaban el error.

Específicamente el canal 3 y el canal 4 y de la Figura 27 se comportan de forma muy similar a la ideal.

### 9.1.2. Resultados de atenuación

Para medir la atenuación se siguió un procedimiento similar al anterior. Se han programado todos los canales con  $0^\circ$  de desfase. Para las salidas que no se miden se cargan con  $50 \Omega$  y se programa una atenuación de 0 dB. Luego, se midió la atenuación de cada canal al programar los pasos que permite el atenuador, estos pasos son de 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16 y 31.75. Cada uno de estos valores corresponde a activar un bit de los 8 bits que componen el mensaje a enviar.

A pesar de que el componente es lineal, la representación de las atenuaciones teóricas (eje X) se ha hecho en escala logarítmica porque cada valor introducido representa el doble del anterior y las medidas de atenuación experimentales están representadas en escala natural (eje Y). Se pueden introducir combinaciones, pero fue de interés probar cada uno de los bits activo. La curva ideal se ha representado como los valores teóricos en X y en Y con sus respectivas escalas.

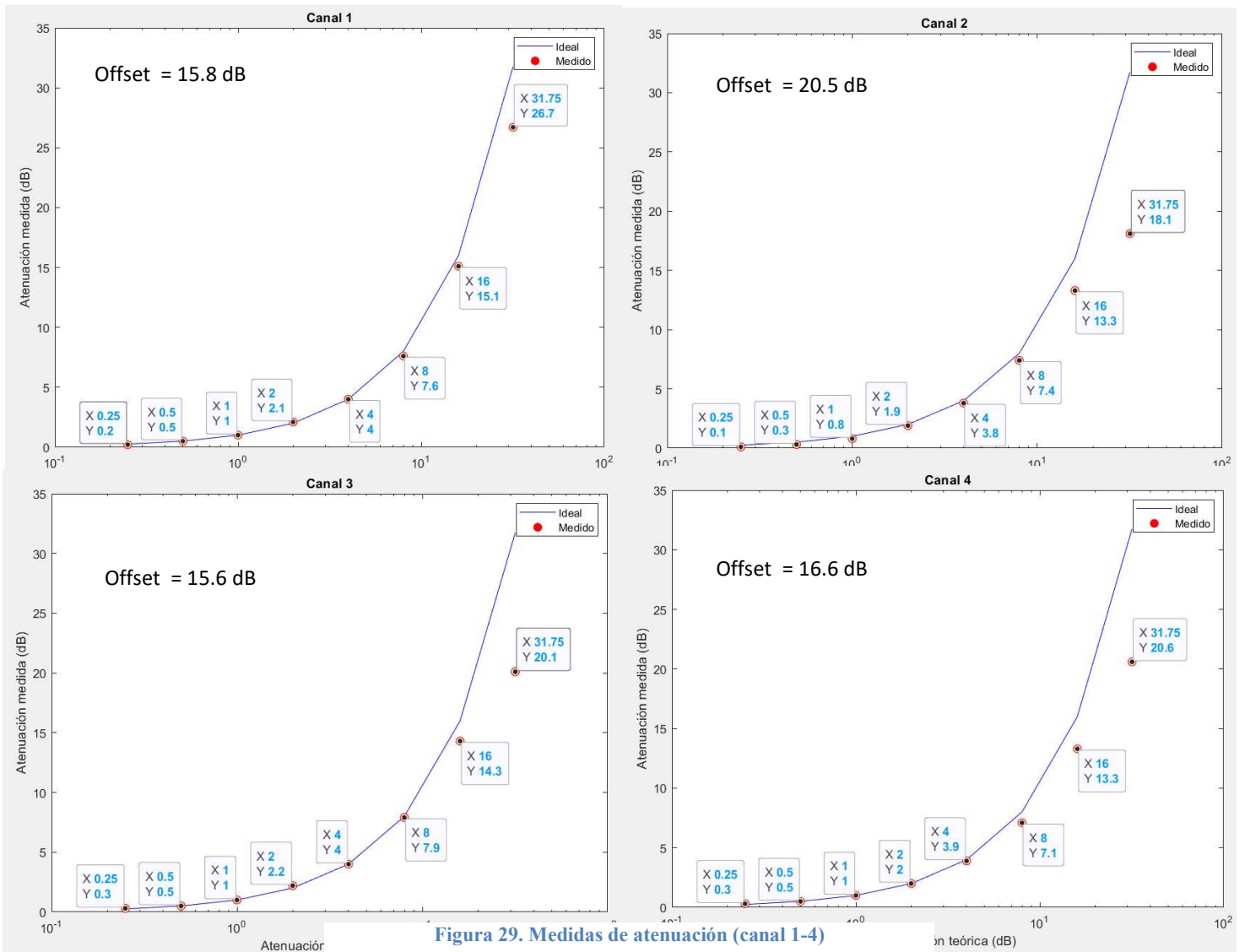


Figura 29. Medidas de atenuación (canal 1-4)

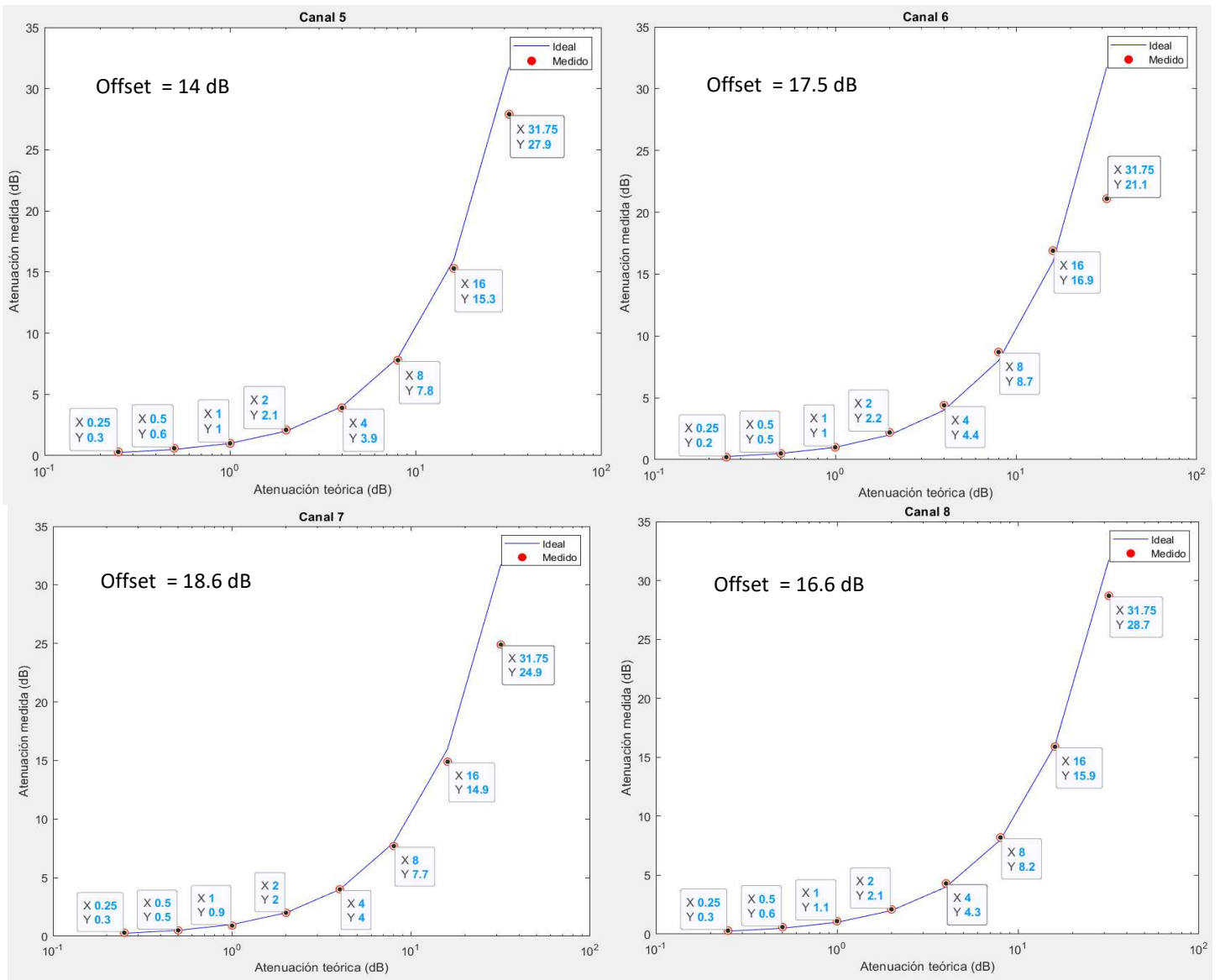


Figura 30. Medidas de atenuación (canal 5-8)

Se puede observar que el comportamiento de todos canales se asemeja mucho al ideal en las Figura 29 y Figura 30. A partir de 16 dB de atenuación se puede ver que se empieza a saturar, ya que la respuesta es menor a la programada. Esto ocurre para casi todos los canales.

La saturación también se reflejó en el desfase que introducía el componente. El desfase se mantenía constante hasta llegar a los 16 dB de atenuación introducidos donde variaba aproximadamente  $\pm 30^\circ$

Al tener un paso de 0.25 dB no fue necesario representar el offset, ya que puede ser corregido con el programa de control.

## 9.2. Medida de los cables

Una vez caracterizado cada canal de la placa se midieron las atenuaciones y desfases que introducían los cables que conectan cada una de las salidas a cada una de las antenas de la agrupación para comprobar que eran similares y tomarlo en cuenta al calibrar si fuera necesario.

Para la medida se ha programado el atenuador a 0 dB y el desfador a 0° para todos los canales y se representan los resultados medidos desde la entrada de la placa hasta cada uno de los cables en las salidas.

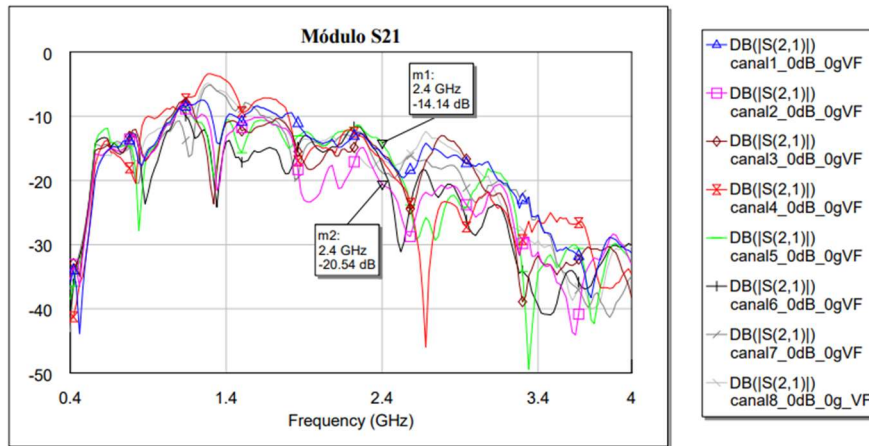


Figura 31. S21 de ControlArray con cables

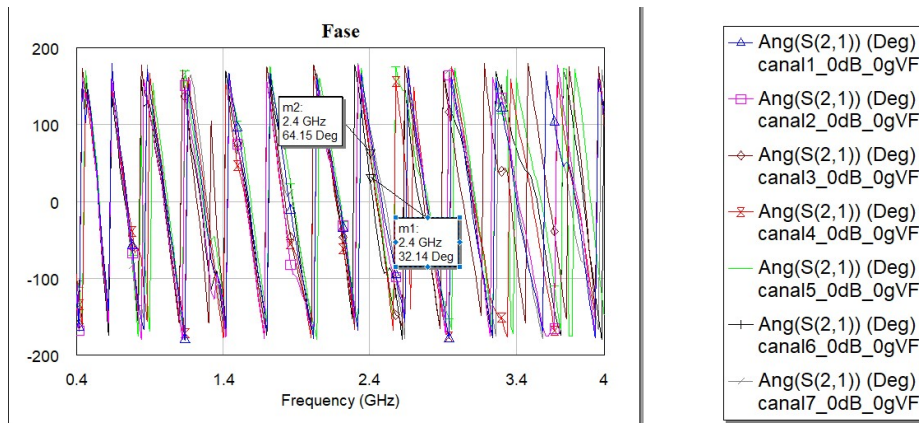


Figura 32. Desfase de ControlArray con cables

Se puede ver que la PCB con todos sus componentes incluidos los cables, presentan pérdidas a la salida con respecto a la entrada de entre 14.14 dB y 20.54 dB. También tiene un desfase de entre 32.14° y 64.15°. Idealmente se tendrían las mismas pérdidas y desfases para todos los canales, pero la señal pasa por varias etapas que, a pesar de tratarse de los mismos componentes y cables no tienen por qué comportarse exactamente igual y a su vez se deben tomar en cuenta las pérdidas y desfases introducidos por los conectores.

### 9.3. Montaje de la agrupación de antenas

Al querer una distancia entre antenas de  $\lambda/2$  a la frecuencia de trabajo de 2.4 GHz, las antenas deben estar separadas entre sí 6.25 cm. En total el array tiene una longitud de aproximadamente 43.75 cm. Para no hacer una PCB de este tamaño se decidió tener una base donde poner las antenas a la distancia mencionada y conectar cada una de las antenas a través de cables coaxiales a los canales de salida de la placa.

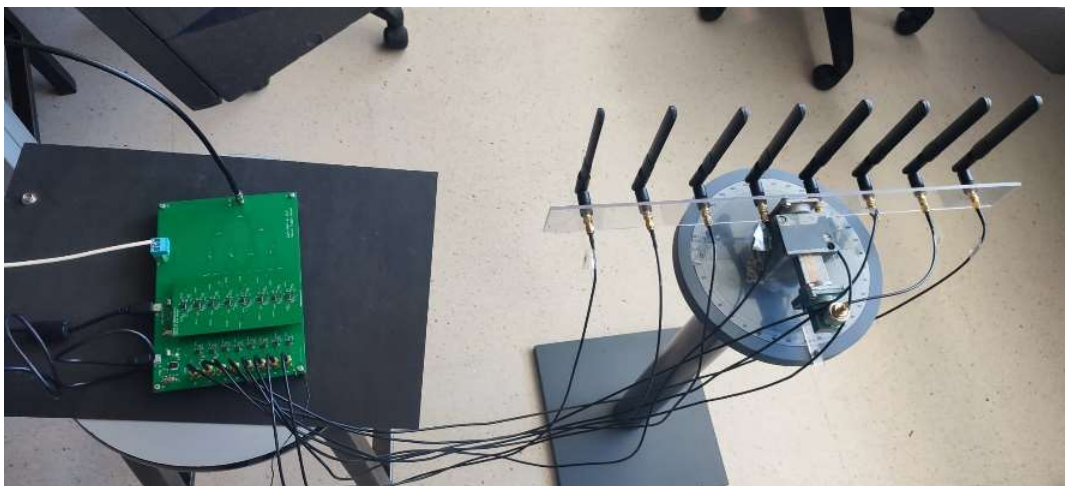


Figura 33. Montaje del array de antenas

### 9.4. Calibración

Con los datos obtenidos en el apartado de medidas se busca la mejor combinación de desfases para obtener diagramas de radiación para  $a_n = [1,1,1,1,1,1,1,1]$ , es decir, todas las alimentaciones iguales para fases progresivas de  $\alpha=0^\circ$ ,  $\alpha=90^\circ$  y  $\alpha=180^\circ$ .

Como se mencionó anteriormente se pueden corregir con mayor exactitud las atenuaciones que los desfases debido a los pasos que permiten cada uno de los microchips. Así que se buscó minimizar el error de fase.

La fase progresiva se refiere al desfase entre una antena y la siguiente, por lo que el desfase que se le coloque a la primera antena es irrelevante siempre y cuando se tome como referencia para los siguientes desfases. De esta forma, para minimizar el error acumulado se comparó el error del primer canal con respecto al siguiente para cada  $\alpha$ . Esto se hizo para todos los desfases del primero canal. Al encontrar el menor error se comparaba con el siguiente canal y así hasta cubrir los 8 canales. Una vez se tenían varias combinaciones se escogía la que menor error acumulado presentaba. Los datos con menor error han sido para  $\alpha=0^\circ$ .

Es importante destacar que se tomó como referencia el desfase medido y no el desfase programado, es decir, si se quería un desfase de  $90^\circ$  para todos los canales se buscaba para qué valor medido se obtenía dicho desfase. Los desfases medidos no coinciden con los programados por el offset ya mencionado. Quitar el offset con el programa se podría hacer, pero no es una operación trivial. A efectos de comprobar si el array funciona correctamente este mecanismo es efectivo.

Una vez escogidos los desfases a introducir en cada canal se toma en cuenta aquel canal con mayor atenuación para poder igualar el resto de los canales con el atenuador.

En la Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5 se pueden observar los datos tomados en cuenta para programar cada uno de los diagramas de radiación en el programa de control. También se encuentra el error que tendrá tanto la atenuación como el desfase de cada canal.

**Tabla 3. Valores escogidos para  $\alpha=0^\circ$**

Canal	Atenuación deseada	Atenuación medida	Atenuación por introducir	Atenuación offset	Fase deseada	Fase medida	Fase por introducir	Fase offset
1	-17	-12.0	5.00	0.00	-80	-77	180.0	3
2	-17	-14.1	3.00	0.10	-80	-80	180.0	0
3	-17	-15.1	2.00	0.10	-80	-82	157.5	-2
4	-17	-11.7	5.25	-0.05	-80	-82	157.5	-2
5	-17	-13.2	3.75	-0.05	-80	-76	180.0	4
6	-17	-14.3	2.75	0.05	-80	-81	157.5	-1
7	-17	-14.2	2.75	-0.05	-80	-75	157.5	5
8	-17	-17.0	0.00	0.00	-80	-77	135.0	3

**Tabla 4. Valores escogidos para  $\alpha=90^\circ$**

Canal	Atenuación deseada	Atenuación medida	Atenuación por introducir	Atenuación offset	Fase deseada	Fase medida	Fase por introducir	Fase offset
1	-17.7	-12.1	5.50	-0.10	-56	-56	157.5	0
2	-17.7	-17.7	0.00	0.00	34	30	45.0	4
3	-17.7	-17.6	0.00	-0.10	124	120	315.0	4
4	-17.7	-13.2	4.50	0.00	-146	-150	247.5	4
5	-17.7	-12.9	4.75	-0.05	-56	-56	157.5	0
6	-17.7	-17.5	0.25	0.05	34	32	0.0	2
7	-17.7	-16.9	0.75	-0.05	124	131	337.5	-7
8	-17.7	-14.2	3.50	0.00	-146	-137	202.5	-9

**Tabla 5. Valores escogidos para  $\alpha=180^\circ$**

Canal	Atenuación deseada	Atenuación medida	Atenuación por introducir	Atenuación offset	Fase deseada	Fase medida	Fase por introducir	Fase offset
1	-19.7	-15.8	4.00	0.10	68	68	22.5	0
2	-19.7	-14.6	5.00	-0.10	-112	-111	225.0	-1
3	-19.7	-15.8	4.00	0.10	68	63	0.0	5
4	-19.7	-12.3	7.50	0.10	-112	-113	202.5	1
5	-19.7	-13.9	5.75	-0.05	68	66	22.5	2
6	-19.7	-16.2	3.50	0.00	-112	-111	202.5	-1
7	-19.7	-19.7	0.00	0.00	68	71	22.5	-3
8	-19.7	-15.5	4.25	0.05	-112	-100	157.5	-12

## 9.5. Diagrama de radiación

Para medir el diagrama de radiación se montó un banco de medidas donde se tenía la PCB conectada a un generador de RF a 2.4 GHz y 10 dBm de potencia, y conectado a su vez con el ordenador para transmitir los datos de control. La placa estaba conectada, a través de los cables coaxiales, a las 8 antenas del array. La estructura de las antenas estaba sobre una base circular dividida en 360° que se puede girar y tiene un goniómetro, con el 0 alineado al centro del array.

Para la recepción de la señal se ha utilizado un analizador de espectros GW-Instek y una antena monopolar WiFi [7] similar a las usadas para el array. Se ha utilizado promediado de 4 muestras y un spam de 20 MHz por las fluctuaciones que presentaba la potencia, y Ref Level a -30dBm con el ancho del filtro de frecuencia intermedia de 100kHz. Lo ideal para la recepción sería una antena más directiva, pero en el laboratorio no se disponía de otras antenas que funcionasen a la frecuencia de trabajo. Es por esto que, para evitar recibir señales procedentes de otras direcciones, se han utilizado absorbentes a los lados del laboratorio y detrás la antena emisora. Esto último para evitar potencia que pudiese reflejarse, ya que, el diagrama es simétrico. Como se ve en la Figura 34 se tendrán dos lóbulos principales.

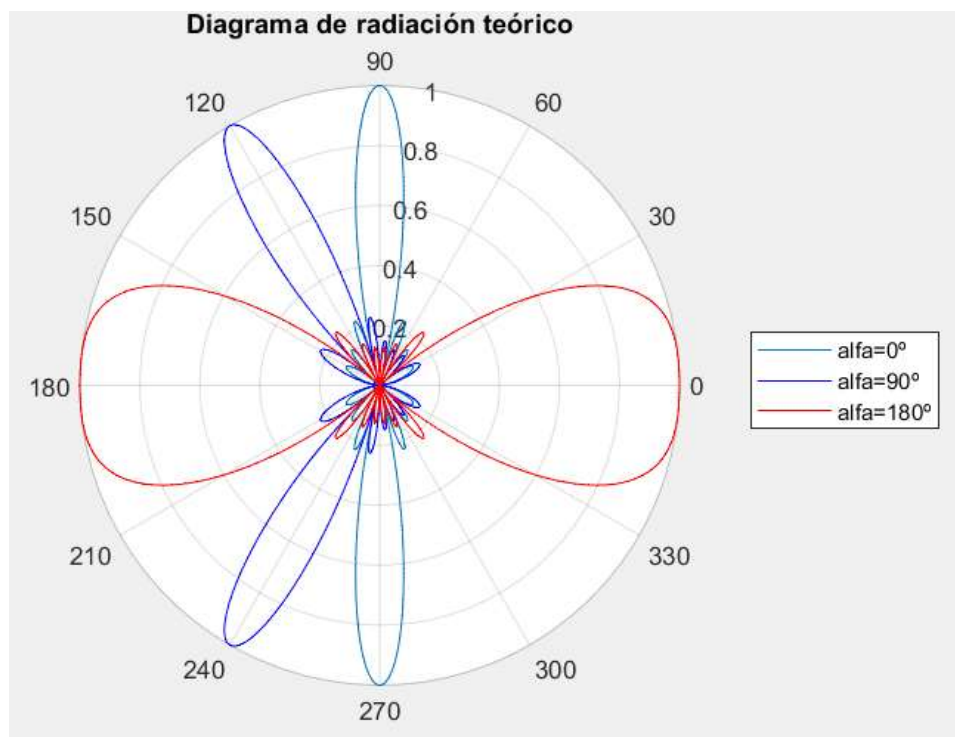


Figura 34. Diagramas de radiación teórico para diferentes  $\alpha$

Lo ideal para medir el diagrama de radiación sería hacerlo dentro de una cámara anecoica y así poder evitar las interferencias externas o por reflexión.

Para el montaje del banco de medidas de la Figura 35 fue necesario comprobar que se estaba trabajando en campo lejano, por lo que la distancia entre el array y el analizador

de espectros debía ser mayor a  $\frac{2d^2}{\lambda}$ , con d la longitud del array de antenas. Esto daba como resultado que se tendrían condiciones de campo lejano a partir de 3.065 m.

Para obtener los diagramas de radiación se programaron los valores escogidos y se leyó la potencia recibida para cada 2° de variación en azimut. Debido a que los diagramas de radiación son simétricos, se decidió tomar medidas de 0° a 180° para comprobar el correcto funcionamiento del array.



Figura 35. Banco de medidas

Una vez hechas las medidas, en la siguiente página se presentan los resultados obtenidos junto a los diagramas de radiación ideales en unidades naturales, ya que, lo que se quiere comparar es la forma del diagrama.

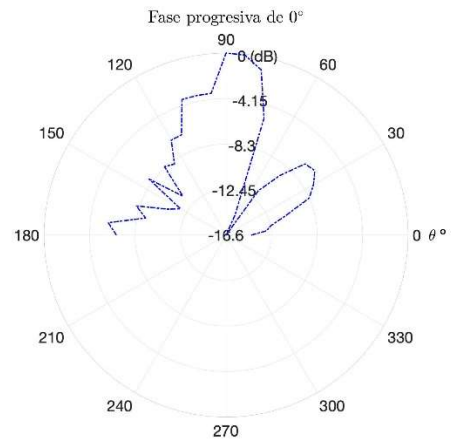
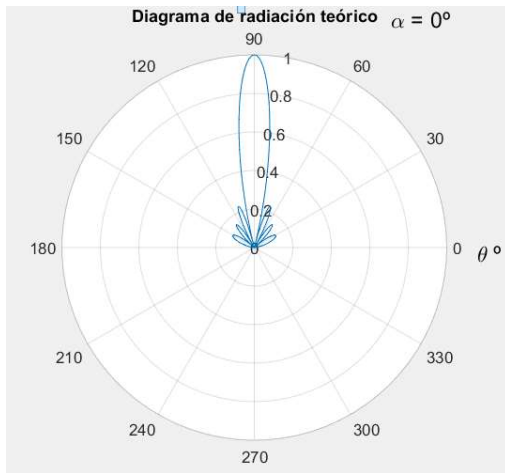


Figura 36. Diagrama de radiación para  $\alpha=0^\circ$

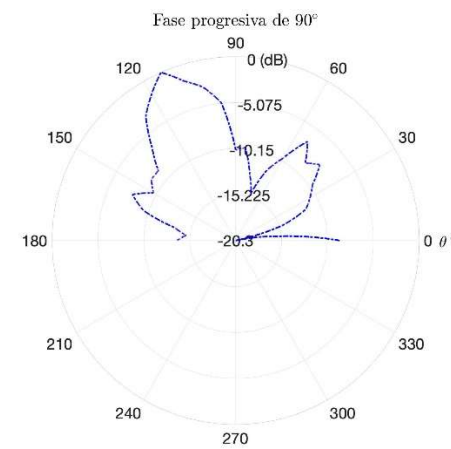
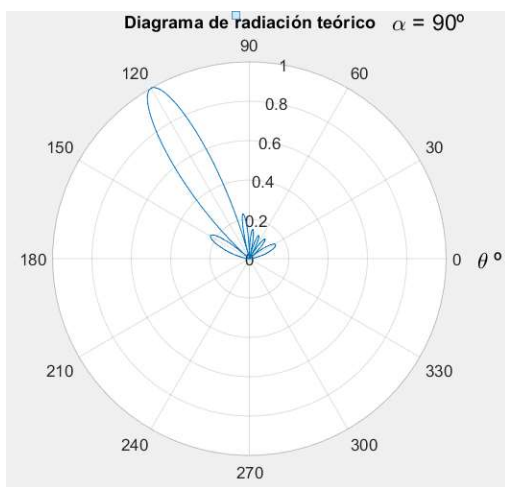


Figura 37. Diagrama de radiación para  $\alpha=90^\circ$

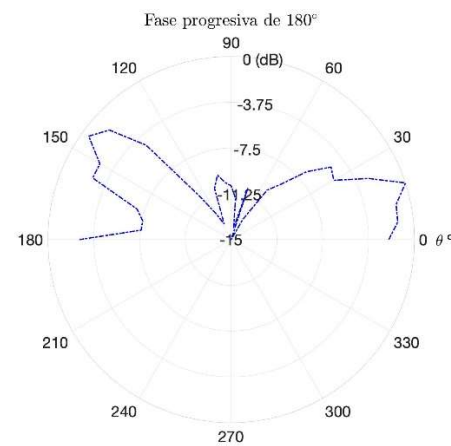
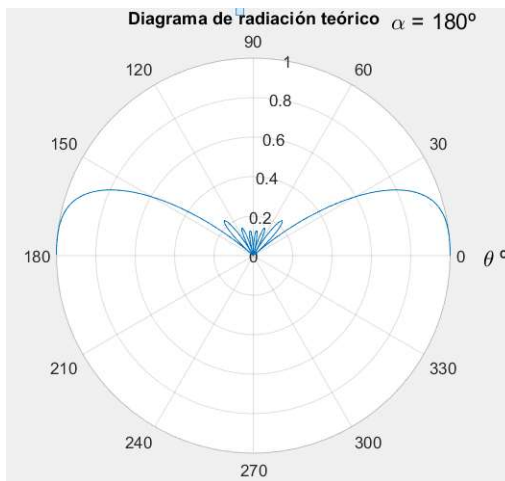


Figura 38. Diagrama de radiación para  $\alpha=180^\circ$

Se puede ver que los diagramas de radiación no son ideales. Esto era de esperarse por las interferencias que podían aparecer, entre ellas se encuentran:

- El laboratorio tiene estantes y mesas metálicas, aparte de aparatos electrónicos hechos también de materiales metálicos. A pesar de haber utilizado los absorbentes es muy probable que esto haya causado reflexiones. También se ve que los diagramas de radiación tienen más picos en los ángulos de desde  $\theta$  igual  $90^\circ$  hasta  $180^\circ$ , lo cual coincide con la mesa donde estaban el portátil, la placa, el generador y la alimentación.
- La antena receptora es un monopolo, es decir que recibe potencia en todas las direcciones en azimut. La medida puede presentar mucho ruido debido a esto. También al tratarse de una antena WiFi puede estar captando ruido de la señal WiFi de la facultad.
- El offset de los desfases y las atenuaciones puede ocasionar que el diagrama se desvíe de la idealidad.

Visto las posibles interferencias se analiza el comportamiento del array.

Se puede ver en la Figura 36 que se tiene un lóbulo principal con máxima potencia en aproximadamente  $\theta=90^\circ$ , esto coincide con el valor esperado. El lóbulo secundario que aparece tiene más potencia de la esperaba, con solo unos 7 dB de atenuación con respecto al lóbulo principal. El diagrama debe ser simétrico respecto a  $\theta=90^\circ$ , pero se han tenido interferencias, por lo que no logra del todo la simetría deseada.

En la Figura 37  $\alpha=90^\circ$  se esperaba tener el máximo de potencia en  $\theta=120^\circ$ , pero se obtiene para un ángulo un poco menor. A pesar de tener una señal ruidosa se podría decir que se tiene un diagrama parecido al original y que efectivamente se ha logrado mover el máximo del array programando la placa.

En el último diagrama medido de la Figura 38 se buscaba no solo cambiar la dirección si no cambiar la forma del diagrama. Efectivamente se ve que el diagrama cambia y presenta dos máximos de potencia. El máximo más cercano a  $\theta=0^\circ$  se asemeja más a la realidad que el máximo en  $\theta=180^\circ$

Cabe destacar que en este caso por la facilidad de los cálculos y el tiempo limitado solo se programó la placa para estos valores y con fase progresiva, pero el array está preparado para programar cualquier valor comprendido en los rangos de los componentes. Por esto se podría programar muchos otros diagramas, incluso con cualquier desfase entre las antenas. Se podría incluso obtener diversos lóbulos con máximos de potencia o manipular las alimentaciones de tal forma que minimicen los lóbulos laterales.

## 10. Conclusiones y trabajo futuro

### 10.1. Conclusiones

Tras la definición del proyecto y el estudio de la literatura, se decidió diseñar un array de antenas de 8 elementos a 2.4 GHz, cuyo diagrama de radiación pudiera ser modificado de forma digital.

Para ello, en primer lugar, se realizó una búsqueda de componentes aptos para las especificaciones de diseño del proyecto, descartando aquellos que no fuesen válidos y haciendo especial énfasis en aquellos que permitieran tener homogeneidad en la alimentación y en el protocolo de control SPI. Para ellos se usaron los componentes especificados en la sección 2 de Arquitectura general.

Una vez escogido los componentes, se diseñó el divisor de potencia Wilkinson. Se ha escogido este tipo de divisor, ya que no presenta desfase entre sus salidas.

El primer prototipo de dicho divisor no presentó los resultados esperados, por lo que se diseñó una segunda versión tomando en cuenta los posibles problemas de diseño. Así se pudo mejorar significativamente las características del divisor. Con esto se demostró la importancia de los conectores en el diseño de una PCB de RF y como los conectores SMA verticales son una buena opción para las placas de 4 capas.

Al mismo tiempo que se diseñaba el Wilkinson se diseñó una placa para comprobar el correcto funcionamiento del desfasador escogido. Se comprobó que era un integrado que funcionaba lo suficientemente bien para aplicarlo al proyecto. Los desfasadores se han colocado en otra placa (Mezzanina desfasadora) que irá conectada a la placa principal.

Comprobado el funcionamiento de los componentes se diseñó y fabricó la PCB ControArray, la cual, junto con Mezzanina desfasador, contiene todo el circuito necesario para programar el array de antenas según se desee. Una vez se tenía dicha placa se caracterizó el comportamiento de sus chips programables para utilizar esa información en el momento de calibrar las medidas.

Luego, se programó un código en Python capaz de comunicarse con el MCP2210 y realizar una comunicación a través del protocolo SPI para enviar los datos de control al atenuador y al desfasador.

Completado el diseño del array, se montó un banco de medidas lo más adaptado posible a las herramientas disponibles en el laboratorio para medir los diagramas de radiación y comprobar los cambios hechos de forma digital.

Al medir los diagramas de radiación para distintas fases progresivas se comprobó que efectivamente se obtenían los diagramas programados.

Por último, se puede concluir que se ha diseñado, fabricado y caracterizado un array de antenas programable con éxito.

## 10.2. Trabajo futuro

El array diseñado ha sido pensado para emitir señal y poder cambiar su diagrama de radiación. Una línea de trabajo futuro podría ser agregar una línea de recepción y así se tendría una placa que emita y reciba señal. Para esto sería necesario aumentar el tamaño de la placa y los componentes a utilizar. En caso de utilizar más amplificadores sería necesario agregar algún sistema de disipación de calor, ya que, debido a la potencia que consumen, se calienta el circuito.

Si se agregara la línea de recepción se podría utilizar para implementar un radar que barrera en azimut.

También se podría introducir un programa que, dados los datos de caracterización de la placa, la fase y atenuación deseada, devuelva la mejor combinación de valores a introducir en el control, minimizando el error acumulado.

Por último, el programa de control se podría programar según los offset de cada canal para la atenuación y el desfase, de forma que lo compense lo más eficientemente posible y tome un valor permitido dentro de las posibilidades de cada componente. También sería muy recomendable poder realizar medidas en cámara anecoica para tener resultados más fiables que poder optimizar.

## 11. Bibliografía

- [1] P. Antoraz Canales, *Apuntes de Sistemas Radiantes*, Madrid, 2023.
- [2] Á. Cardama Aznar, L. Jofre Roca, J. M. Rius Casals, J. Romeu Robert y S. Blanch Boris, *Antenas*, Barcelona: El Tinter, 2002.
- [3] F. J. Franco Pelaéz, «Apuntes de Instrumentación Electrónica,» 2022. [En línea]. Available: <https://eprints.ucm.es/id/eprint/70436/1/ApuntesIE.pdf>. [Último acceso: abril 2023].
- [4] W. Hong, «"Multibeam Antenna Technologies for 5G Wireless Communications",» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, nº 12, pp. 6231-6249, 2017.
- [5] SPACE EXPLORATION TECHNOLOGIES CORP. , «fcc.report: SpaceX Non-Geostationary satellite system. Attachment A. Technical Information to supplement schedule S,» 2016. [En línea]. Available: <https://fcc.report/IBFS/SAT-LOA-20161115-00118/1158350.pdf>. [Último acceso: Mayo 2023].
- [6] H. Randy L y R.-S. Yahya, «Antenna Array Developments: A Perspective on the Past, Present and Future,» *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 57, nº 1, p. DOI:10.1109/MAP.2015.2397154, 2015.
- [7] «aliexpress.com,» Enero 2023. [En línea]. Available: [https://es.aliexpress.com/item/1005002656944314.html?spm=a2g0o.order\\_list.order\\_list\\_main.11.21ef194deiV3Dw&gatewayAdapt=glo2esp](https://es.aliexpress.com/item/1005002656944314.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.11.21ef194deiV3Dw&gatewayAdapt=glo2esp).
- [8] L. G. Blázquez, *Diseño de una red de distribución de señal para un array de antenas*, Madrid, 2022.
- [9] MACOM, «MAAL-009120 Miniature Broadband Gain Stage,» [En línea]. Available: <https://cdn.macom.com/datasheets/MAAL-009120.pdf>. [Último acceso: 2023].
- [10] MACOM, «mouser.es,» [En línea]. Available: [https://www.mouser.es/datasheet/2/249/MAPS\\_010144-318345.pdf](https://www.mouser.es/datasheet/2/249/MAPS_010144-318345.pdf). [Último acceso: Octubre 2022].
- [11] ANALOG DEVICES, «analog.com,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc1119.pdf>. [Último acceso: Octubre 2022].
- [12] Microchip, «ww1.microchip.com,» 2021. [En línea]. Available: <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/APID/ProductDocuments/DataSheets/MCP2210-USB-to-SPI-Protocol-Converter-with-GPIO-%28Host-Mode%29-20002288C.pdf>. [Último acceso: Noviembre 2022].
- [13] J. Herbert, «pypi.org,» 17 marzo 2022. [En línea]. Available: <https://pypi.org/project/mcp2210-python/>. [Último acceso: diciembre 2022].

- [14] Samtec, «mouser.es,» [En línea]. Available: <https://www.mouser.es/datasheet/2/527/qfss-2854367.pdf>. [Último acceso: Enero 2023].
- [15] D. M. Pozar, Microwave engineering, Amherst: John Wiley & Sons, Inc..
- [16] molex, «farnell.com,» 23 10 2018. [En línea]. Available: <https://www.farnell.com/datasheets/2698430.pdf>. [Último acceso: marzo 2023].
- [17] Liming, «<https://datasheet.lcsc.com/>,» [En línea]. Available: [https://datasheet.lcsc.com/lcsc/2304140030\\_Suzhou-Liming-Elec-49MD-12-00-20-20-20-A\\_C240957.pdf](https://datasheet.lcsc.com/lcsc/2304140030_Suzhou-Liming-Elec-49MD-12-00-20-20-20-A_C240957.pdf). [Último acceso: abril 2023].
- [18] MegiQ, «megiq.com,» [En línea]. Available: <https://www.megiq.com/images/Brochures/MegiQ%20VNA%20Brochure.pdf>. [Último acceso: 2022].



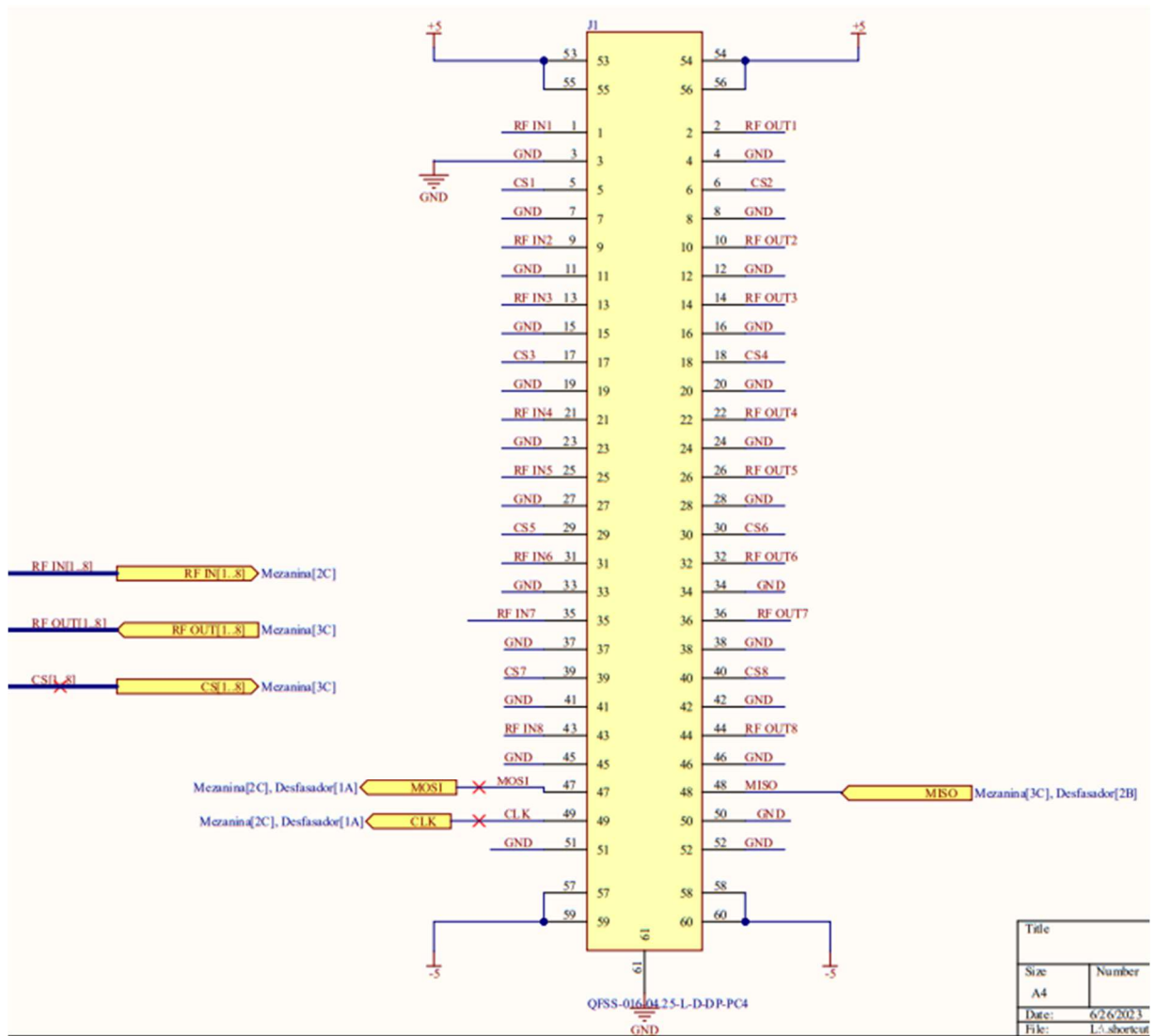


Figura 41. Esquemático conector SAMTEC

## 12.2. ControlArray

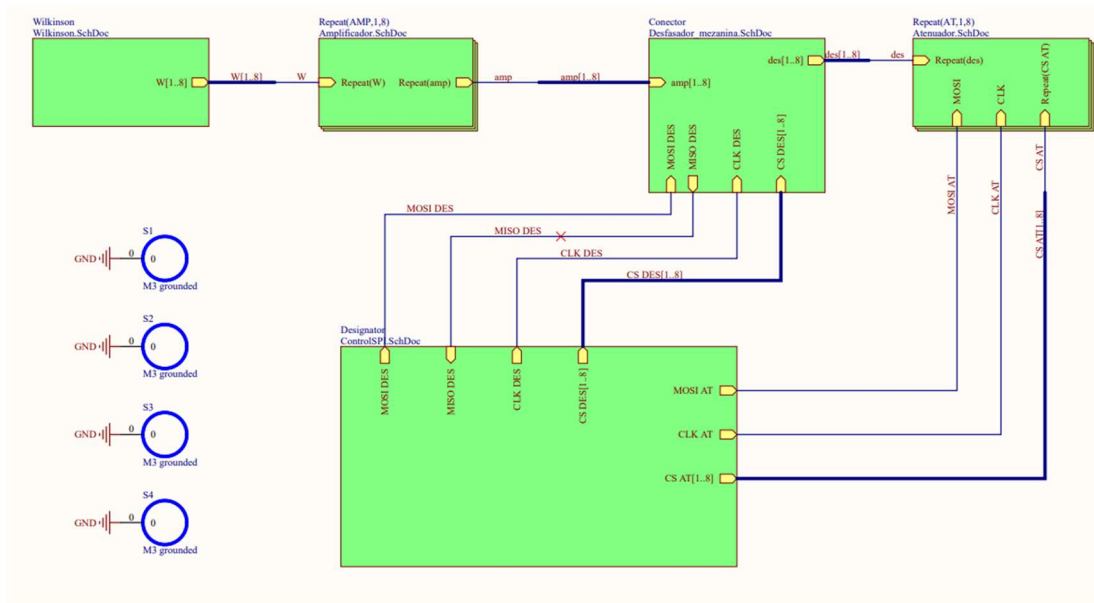


Figura 42. Esquemático jerárquico ControlArray

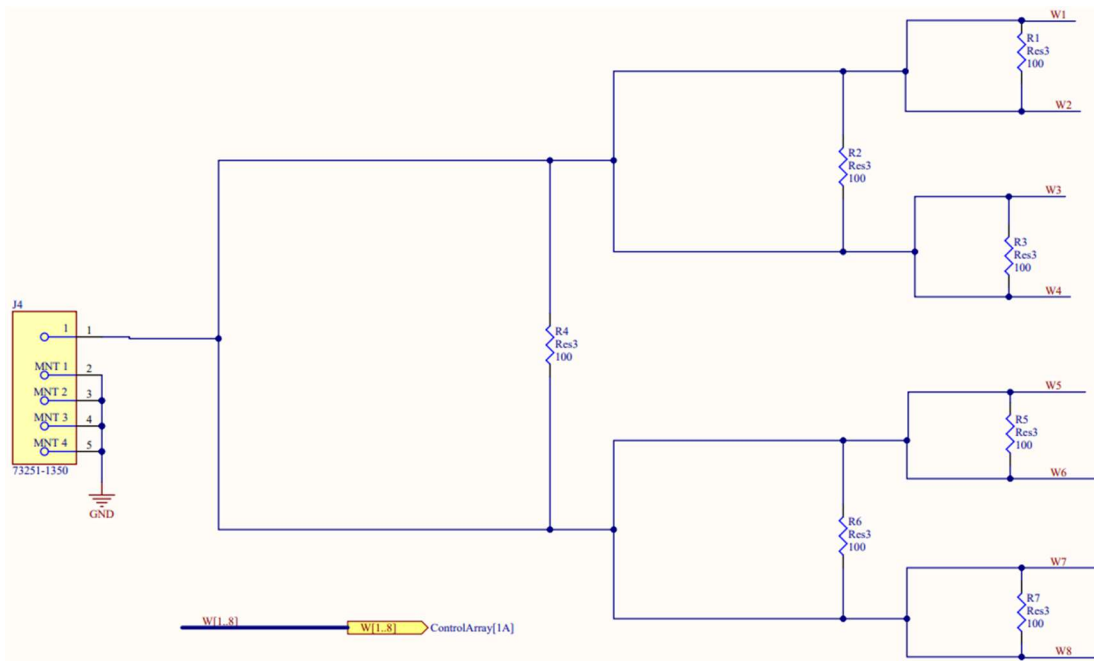


Figura 43. Esquemático Wilkinson 3.0

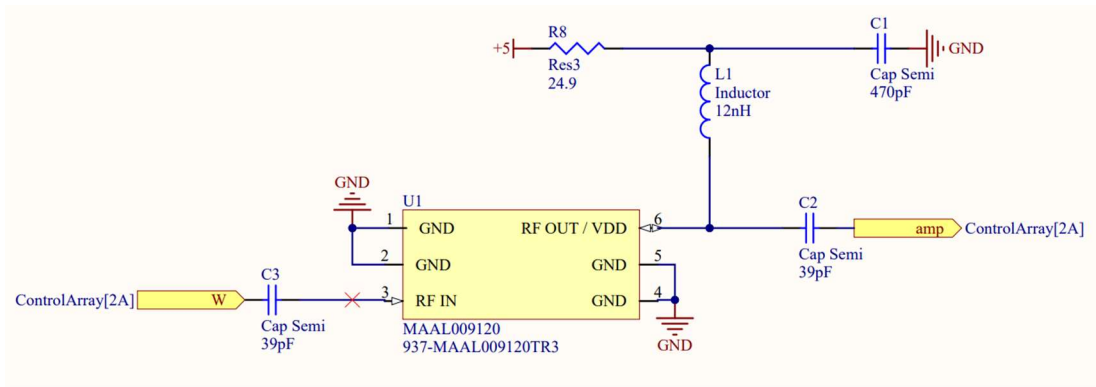


Figura 44. Esquemático amplificador MAAL009120

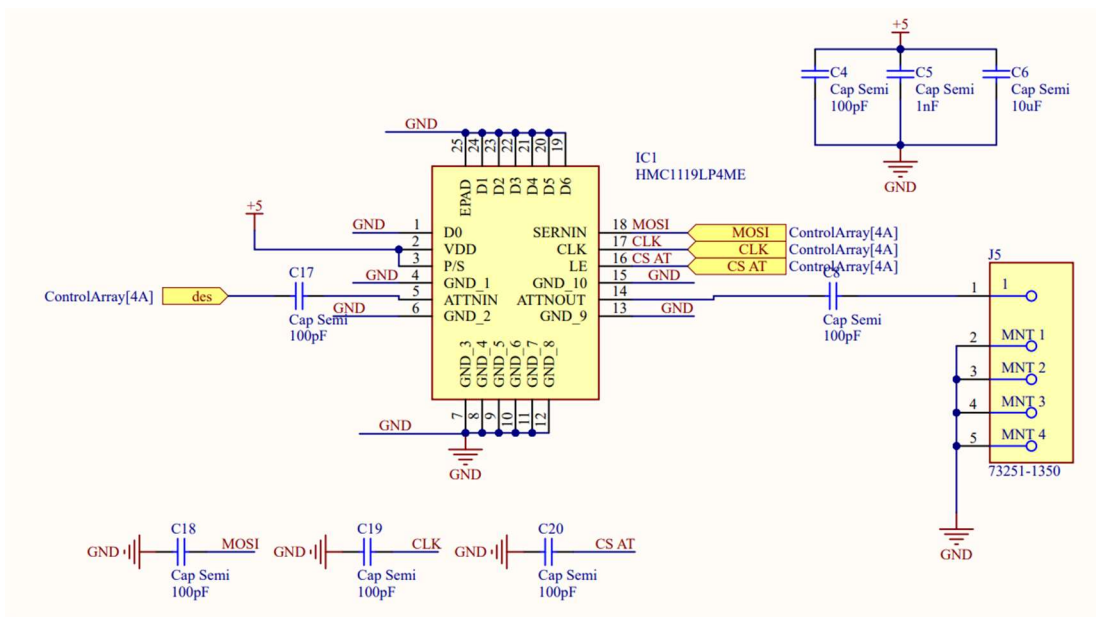


Figura 45. Esquemático atenuador HMC1119

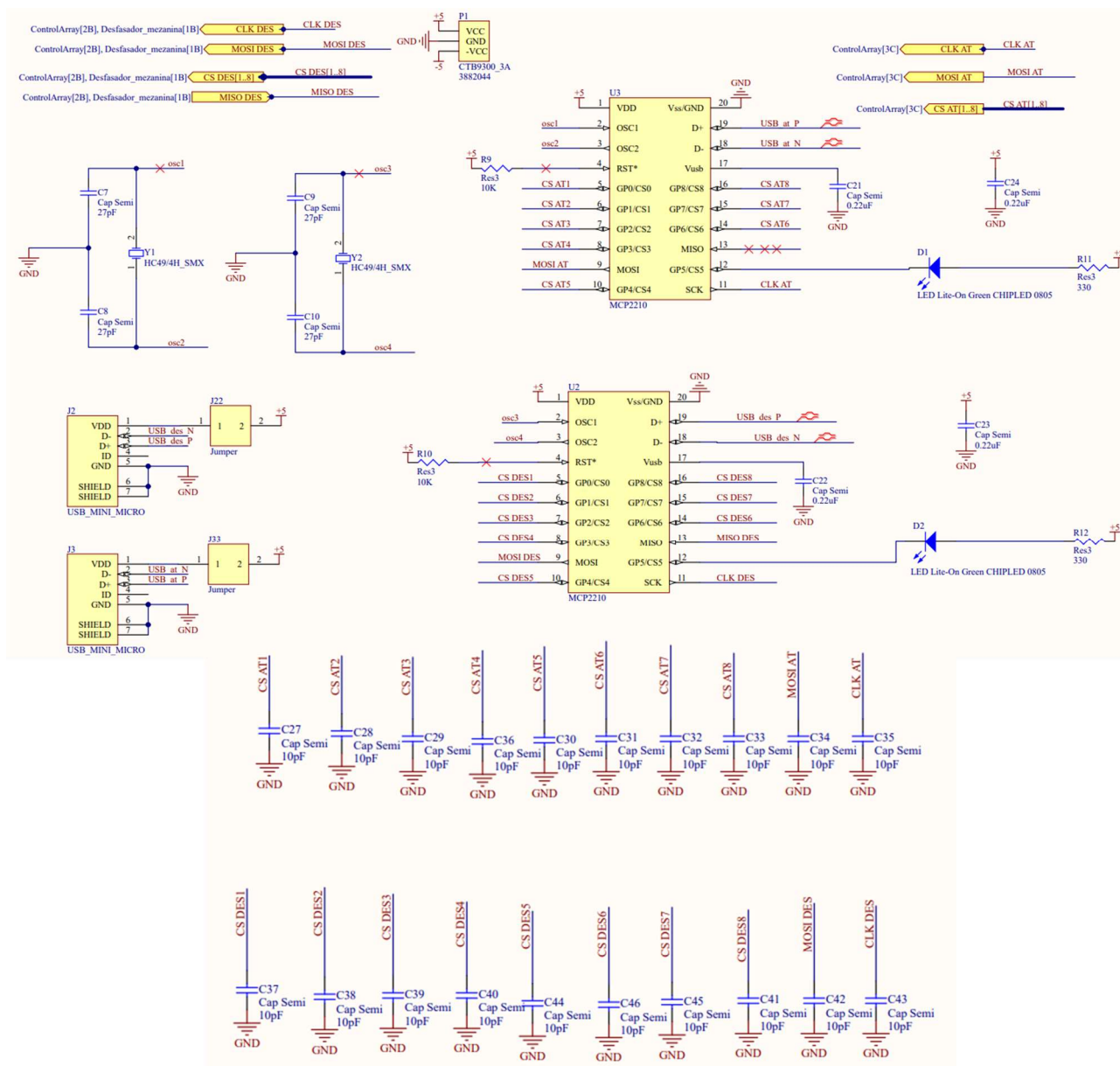


Figura 46. Esquemático control MCP2210

### 12.3. Código de control

#### #CONSTANTES DE ATEUNACION EN dB

```
ATENUACION_0= 0b00000000
ATENUACION_025= 0b00000001
ATENUACION_05= 0b00000010
ATENUACION_1= 0b00000100
ATENUACION_2= 0b00001000
ATENUACION_4= 0b00010000
ATENUACION_8= 0b00100000
ATENUACION_16= 0b01000000
ATENUACION_31_75= 0b11111111
```

```
ATENUACION_5= 0b00010100
ATENUACION_3= 0b00001100
ATENUACION_5_25= 0b00010101
ATENUACION_3_75= 0b00001111
ATENUACION_2_75= 0b00001011
ATENUACION_7_5= 0b00011110
ATENUACION_6= 0b00011000
ATENUACION_4_25= 0b00010001
ATENUACION_5_75= 0b00010111
ATENUACION_5_5= 0b00010110
ATENUACION_4_5= 0b00010010
ATENUACION_4_75= 0b00010011
ATENUACION_075= 0b00000011
ATENUACION_3_5= 0b00001110
ATENUACION_2_75= 0b00001011
```

```
GRADOS_0 = 0b00000000
GRADOS_22_5= 0b00000100
GRADOS_45= 0b00001000
GRADOS_67_5= 0b00001100
GRADOS_90= 0b00010000
GRADOS_112_5=0b00010100
GRADOS_135= 0b00011000
GRADOS_157_5=0b00011100
GRADOS_180= 0b00100000
GRADOS_202_5=0b00100100
GRADOS_225= 0b00101000
GRADOS_247_5=0b00101100
GRADOS_270 = 0b00110000
GRADOS_292_5=0b00110100
GRADOS_315= 0b00111000
GRADOS_337_5=0b00111100
```

```
grados_0 = [GRADOS_180, GRADOS_180, GRADOS_157_5,
            GRADOS_157_5, GRADOS_180, GRADOS_157_5,
            GRADOS_157_5, GRADOS_135]
```

```
grados_noventa = [GRADOS_157_5, GRADOS_45, GRADOS_315,
                  GRADOS_247_5, GRADOS_157_5, GRADOS_0,
                  GRADOS_337_5, GRADOS_202_5]
```

```
grados_ciento80 = [GRADOS_22_5, GRADOS_225, GRADOS_0,
                   GRADOS_202_5, GRADOS_22_5, GRADOS_202_5,
                   GRADOS_22_5, GRADOS_157_5]
```

```
att_0 = [ATENUACION_5, ATENUACION_3, ATENUACION_2, ATENUACION_5_25,
```

```

        ATENUACION_3_75,ATENUACION_2_75,ATENUACION_2_75,ATENUACION_0]
att_noventa = [ATENUACION_5_5,ATENUACION_0,ATENUACION_0,ATENUACION_4_5,
               ATENUACION_4_75,ATENUACION_025,ATENUACION_075,ATENUACION_3_5]
att_ciento80 = [ATENUACION_4,ATENUACION_5,ATENUACION_4,ATENUACION_7_5,
                ATENUACION_5_75,ATENUACION_3_5,ATENUACION_0,ATENUACION_4_25]

from mcp2210 import Mcp2210, Mcp2210GpioDesignation, Mcp2210GpioDirection

def select_pattern(pattern):
    if(pattern == 0): # alfa=0
        grados = grados_0
        att     = att_0

    elif(pattern == 1): # alfa=90
        grados = grados_noventa
        att     = att_noventa

    elif(pattern == 2): # alfa=180
        grados = grados_ciento80
        att     = att_ciento80

    return grados,att

def desfasador(grados):
    # serial number Atenuador:"0000438822" , Desfasador: igual, termina con 3PRUEBA:"0000370570'
    mcp = Mcp2210(serial_number="0000442398")

    mcp.configure_spi_timing(chip_select_to_data_delay=0,
                             last_data_byte_to_cs=0,
                             delay_between_bytes=0)

    for i in range(9):
        mcp.set_gpio_designation(i, Mcp2210GpioDesignation.GPIO)

    for i in range(0, 9):
        mcp.set_gpio_direction(i, Mcp2210GpioDirection.OUTPUT)

    #chip1
    mcp.set_gpio_designation(1, Mcp2210GpioDesignation.CHIP_SELECT)
    rx_data_1 = mcp.spi_exchange(bytes([grados[0]]), cs_pin_number=1)

    #chip2
    mcp.set_gpio_designation(2, Mcp2210GpioDesignation.CHIP_SELECT)
    rx_data_1 = mcp.spi_exchange(bytes([grados[1]]), cs_pin_number=2)

    #chip3
    mcp.set_gpio_designation(3, Mcp2210GpioDesignation.CHIP_SELECT)
    rx_data_1 = mcp.spi_exchange(bytes([grados[2]]), cs_pin_number=3)

    #chip4
    mcp.set_gpio_designation(4, Mcp2210GpioDesignation.CHIP_SELECT)
    rx_data_1 = mcp.spi_exchange(bytes([grados[3]]), cs_pin_number=4)

    #chip5
    mcp.set_gpio_designation(5, Mcp2210GpioDesignation.CHIP_SELECT)

```

```

rx_data_1 = mcp.spi_exchange(bytes([grados[4]]), cs_pin_number=5)

#chip6
mcp.set_gpio_designation(6, Mcp2210GpioDesignation.CHIP_SELECT)
rx_data_1 = mcp.spi_exchange(bytes([grados[5]]), cs_pin_number=6)

#chip7
mcp.set_gpio_designation(7, Mcp2210GpioDesignation.CHIP_SELECT)
rx_data_1 = mcp.spi_exchange(bytes([grados[6]]), cs_pin_number=7)

#chip8
mcp.set_gpio_designation(8, Mcp2210GpioDesignation.CHIP_SELECT)
rx_data_1 = mcp.spi_exchange(bytes([grados[7]]), cs_pin_number=8)

```

```
def atenuador(att):
```

```

    mcp.configure_spi_timing(chip_select_to_data_delay=0,
                             last_data_byte_to_cs=0,
                             delay_between_bytes=0)

    for i in range(9):
        mcp.set_gpio_designation(i, Mcp2210GpioDesignation.GPIO)
# set all pins as GPIO

    for i in range(0, 9):
        mcp.set_gpio_direction(i, Mcp2210GpioDirection.OUTPUT)

#chip1
mcp.set_gpio_designation(0, Mcp2210GpioDesignation.CHIP_SELECT)
rx_data_1 = mcp.spi_exchange(bytes([att[0]]), cs_pin_number=0)

#chip2
mcp.set_gpio_designation(1, Mcp2210GpioDesignation.CHIP_SELECT)
rx_data_1 = mcp.spi_exchange(bytes([att[1]]), cs_pin_number=1)

#chip3
mcp.set_gpio_designation(2, Mcp2210GpioDesignation.CHIP_SELECT)
rx_data_1 = mcp.spi_exchange(bytes([att[2]]), cs_pin_number=2)

#chip4
mcp.set_gpio_designation(3, Mcp2210GpioDesignation.CHIP_SELECT)
rx_data_1 = mcp.spi_exchange(bytes([att[3]]), cs_pin_number=3)

#chip5
mcp.set_gpio_designation(4, Mcp2210GpioDesignation.CHIP_SELECT)
rx_data_1 = mcp.spi_exchange(bytes([att[4]]), cs_pin_number=4)

#chip6
mcp.set_gpio_designation(6, Mcp2210GpioDesignation.CHIP_SELECT)
rx_data_1 = mcp.spi_exchange(bytes([att[5]]), cs_pin_number=6)

#chip7
mcp.set_gpio_designation(7, Mcp2210GpioDesignation.CHIP_SELECT)
rx_data_1 = mcp.spi_exchange(bytes([att[6]]), cs_pin_number=7)

#chip8

```

```
mcp.set_gpio_designation(8, Mcp2210GpioDesignation.CHIP_SELECT)
rx_data_1 = mcp.spi_exchange(bytes([att[7]]), cs_pin_number=8)

option = input('Seleccione la opción deseada (0) para alfa=0 y an=-17db TODOS, (1): para alfa=90 y an=-17.7db, (2): para alfa=180 y an=-17.7db')
option = int(option)
while( (option < 0) or (option > 2)):
    option = input('Por favor hazlo bien: ')
    option = int(option)

grados, atenuacion = select_pattern(option)

desfasador(grados)
atenuador(atenuacion)
```

## 12.4. Lista de materiales ControlArray

Manufacturer	ManufacturerPart Number	Value	Quantity	Description
<b>KEMET</b>	C0603C471J5GACTU	470pF	8	Capacitor (Semiconductor SIM Model)
<b>KEMET</b>	C0603C390J5GACTU	39pF	16	Capacitor (Semiconductor SIM Model)
<b>KEMET</b>	C0603C101J5GAC7867	100pF	50	Capacitor (Semiconductor SIM Model)
<b>SAMSUNG</b>	CL10C102JB8NNNC	1nF	10	Capacitor (Semiconductor SIM Model)
<b>TDK</b>	C2012Y5V0J106ZT	10uF	10	Capacitor (Semiconductor SIM Model)
<b>MURATA</b>	GRM1885C1H270JA01D	27pF	4	Capacitor (Semiconductor SIM Model)
<b>KEMET</b>	C0603C224K8RACTU	0.22uF	4	Capacitor (Semiconductor SIM Model)
<b>WALSIN</b>	0603N100D500CT	10pF	20	Capacitor (Semiconductor SIM Model)
<b>Lite-On</b>	LTST-C191GKT		2	Typical RED, GREEN, YELLOW, AMBER GaAs LED
<b>Analog Devices</b>	HMC1119LP4ME		8	Integrated Circuit
<b>Samtec</b>	QMSS-016-06.75-L-D-DP-PC4		1	Samtec QMSS-0.16-06.75-L-D-DP-PC4
<b>Molex</b>	47346-001		2	Micro-USB
<b>Molex</b>	73251-1350		9	CONN SMA JACK STR 50 OHM SMD
<b>Harwin</b>	M20-9990246		2	Jumper 2 vias, 2.54mm pitch
<b>Wurth Elektronik</b>	744786112A	12nH	8	Inductor
<b>CAMDEN</b>	CTB9300/3A		1	Header, 3-Pin
<b>TE Conectivity</b>	CRG0603F100R	100	7	Resistor
<b>VISHAY</b>	CRCW060324R9FKEA	24.9	8	Resistor
<b>YAGEO</b>	RC0603FR-0710KL	10K	2	Resistor
<b>TE Conectivity</b>	CRG0603F330R	330	2	Resistor
<b>MACOM</b>	MAAL-009120		8	Miniature Broadband Gain Stage 70 - 3000 MHz
<b>Microchip</b>	MCP2210		2	USB to SPI Protocol Converter with GPIO (master)
<b>Raltron</b>	AS-12.000-18-SMD		2	Surface Mount Quartz Crystal