UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DE UN ARREGLO DE ANTENAS POR FASE PARA LA DETECCIÓN DE LA EMISIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE TELÉFONOS CELULARES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

CHRISTOPHER EDUARDO MUÑOZ PARDO

PROFESOR GUÍA:
RICARDO FINGER CAMUS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
PATRICIO MENA MENA
RICARDO BUSTOS PLACENCIA

SANTIAGO DE CHILE
2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO
POR: CHRISTOPHER EDUARDO MUÑOZ PARDO
FECHA: 2017
PROF. GUÍA: SR. RICARDO FINGER CAMUS

DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DE UN ARREGLO DE ANTENAS POR FASE PARA LA DETECCIÓN DE LA EMISIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE TELÉFONOS CELULARES

Se construye un arreglo de antenas capaz de localizar las señales de radiofrecuencia emitidas por celulares, para lo cual se utiliza un arreglo de antenas por fases en el rango de frecuencias $1850 - 1920MHz$, que corresponde a una de las bandas de subida de datos de un celular para la tecnología 3G.

Actualmente, este tipo de tecnología es utilizado en aplicaciones militares, radio astronómicas y *broadcasting* en este trabajo se tiene la idea de dar una aplicación a esta tecnología en situaciones como por ejemplo, localización de personas en lugares de catástrofe y detección de celulares en donde no se permite portar uno, entre otros. El alcance de esta memoria estará centrado en el diseño, construcción y pruebas de un prototipo funcional.

En todo este trabajo se hace un énfasis en el proceso que lleva a conseguir los resultados obtenidos, como los componentes que se utilizan y el método con el que se realizan las pruebas, para que esta memoria sirva como un hito importante en el desarrollo de este proyecto.

Todo el esfuerzo puesto en esta memoria está dedicado a mi familia que siempre me ha apoyado, a pesar de que todo este proceso universitario tomó más tiempo del debido, ellos siempre han estado conmigo y yo siempre estaré para ellos.

Agradecimientos

En todo este proceso he tenido la posibilidad de adquirir una cantidad grande de conocimientos y de conocer gente con una disponibilidad increíble para resolver dudas y aportar ideas, por lo que quiero agradecer a mi profesor guía *Ricardo Finger* por confíar en mi para realizar este proyecto.

Gran parte de mis conocimientos electrónicos adquiridos han sido gracias a pasar mucho tiempo en el Laboratorio de Electrónica de la Universidad de Chile, por lo que quiero agradecer a *Miguel Patiño* por la buena disposición y buena onda que ha tenido todos estos años. Prometo que el control de acceso va a estar listo, eventualmente.

Debo agradecer a toda la gente del Laboratorio de Ondas Milimétricas por sus simpatía y conocimientos compartidos, especialmente agradecer a *David Monasterio* por ser partícipe de este trabajo y tener siempre la disponibilidad para responder y discutir dudas, a *Claudio Jarufe* por enseñarme a usar la LPKF mecánica y al equipo *Roach* por siempre estar dispuestos a prestar los cables SMA, jeje.

Obviamente tengo que agradecer a los ñoños que siempre estuvieron conmigo en la carrera desde EL3001, Romina *"Vacaciones"* Arriaza, Joaquín *"Pato"* Díaz, Carolina *"de Los Ángeles"* Mayol, José *"Pelao"* Ogalde, Iván *"No soy gamer"* Castro, José *"Simpsons"* Rosales y Gerardo *"Spoilers"* Peña, siempre debe haber un OPAMP presente en la universidad.

Tabla de Contenido

1. Introducción **1**
- 1.1. Motivación . . . 1
- 1.2. Antecedentes . . . 2
- 1.3. Objetivos generales y específicos . . . 3
- 1.4. Estructura de la memoria . . . 4

2. Marco teórico **5**
- 2.1. Electromagnetismo . . . 5
  - 2.1.1. Campo electromagnético . . . 5
  - 2.1.2. Antena . . . 6
  - 2.1.3. Arreglo en fase . . . 7
- 2.2. Microondas . . . 8
  - 2.2.1. Línea de transmisión . . . 8
  - 2.2.2. Microstrip . . . 9
  - 2.2.3. Antena patch . . . 10
- 2.3. Comunicaciones . . . 11
  - 2.3.1. Modulación en cuadratura . . . 11
  - 2.3.2. Bandas de telefonía móvil . . . 11
- 2.4. Electrónica . . . 12
  - 2.4.1. Protocolo I2C . . . 12
  - 2.4.2. Detector de potencia de microondas . . . 13
  - 2.4.3. Amplificador de bajo ruido . . . 13
  - 2.4.4. Conversor análogo a digital . . . 13
  - 2.4.5. Combinador de potencia . . . 13
  - 2.4.6. Modulador vectorial . . . 13
  - 2.4.7. Buffer . . . 14
  - 2.4.8. Potenciómetro digital . . . 14

3. Pruebas preliminares **15**
- 3.1. Interfaz I2C Ginkgo . . . 16
- 3.2. Potenciómetro digital . . . 17
- 3.3. Raspberry Pi . . . 18
- 3.4. Modulador vectorial . . . 19
- 3.5. Medidor de potencia . . . 24

4. Implementación **27**

4.1. Diseño placa electrónica 27
4.2. Montaje de componentes 30
4.3. Caracterización de la placa electrónica 31
4.4. Caracterización del patrón de radiación 32
4.5. Primeras imagenes electromagnéticas 35

5. Análisis de resultados **37**
5.1. Patrón de radiación 37
5.2. Imagen electromagnética 38

6. Conclusiones **39**
6.1. Conclusiones 39
6.2. Trabajo futuro 40

Bibliografía **41**

Anexos **42**

A. Esquemáticos **43**

B. Mediciones para el modulador vectorial - Magnitud **49**

C. Mediciones para el modulador vectorial - Fase **53**

D. Caracterización placa electrónica **57**

E. Código para caracterización placa electrónica **66**

Índice de Tablas

2.1. Bandas utilizadas por empresas en Chile. 12

3.1. Comparación de parámetros medidor de potencia 26

Índice de Ilustraciones

1.1. Modelo tridimensional del producto. 2

2.1. Caption for LOF 6
2.2. Ejemplos de arreglos en fase 7
2.3. Modelo de línea de transmisión con pérdidas. 8
2.4. Ilustración de una microstrip.[1] 9
2.5. Patch antenna montada sobre un substrato. 10
2.6. Transmisión de datos protocolo I2C. 12

3.1. Diagrama de bloques del dispositivo. 15
3.2. Interfaz I2C Ginkgo. 16
3.3. Datos de prueba para la interfaz I2C. La señal amarilla corresponde al nodo de datos SDA y la verde al nodo de reloj SCL. 16
3.4. Pinout y diagrama de bloques interno del circuito integrado DS3930. 17
3.5. Diseño del potenciómetro digital. 18
3.6. Potenciómetro digital montado en la placa de prueba. 18
3.7. Raspberry Pi con pantalla táctil de 5 pulgadas. 19
3.8. Diagrama de bloques del modulador vectorial 20
3.9. Comparación del tamaño del chip con una moneda de 100 pesos chilenos. . . 20
3.10. Diseño de la placa para el modulador vectorial. 21
3.11. Placa con el modulador vectorial montada. 21
3.12. Medición de la diferencia de fase para la placa 1. 22
3.13. Medición de la diferencia de fase para la placa 2. 22
3.14. Mediciones para la placa 1 del modulador vectorial. 23
3.15. Mediciones para la placa 2 del modulador vectorial. 23
3.16. Diseño de la placa para el medidor de potencia. 24
3.17. Placa del medidor de potencia montada. 24
3.18. Mediciones del medidor de potencia para distintas potencias y frecuencias. . 25

4.1. Diagrama de bloques completo. 27
4.2. Diagrama de bloques placa electrónica. 28
4.3. Diseño placa electrónica - capa de radiofrecuencia. 28
4.4. Diseño placa electrónica - capa de señales digitales. 29
4.5. Placa electrónica fabricada sin componentes. 29
4.6. Montaje componentes de la placa electrónica. 30
4.7. Montaje placa electrónica - capa de radiofrecuencia. 30
4.8. Montaje placa electrónica - capa de señales digitales. 30

4.9. Configuración para caracterizar la placa electrónica. 31
4.10. Montaje arreglo de antenas y placa electrónica. 32
4.11. Configuración para caracterizar el patrón de radiación. 33
4.12. Antena emisora y el arreglo de antenas posicionados sobre mesas separadas. . 33
4.13. Mediciones del patrón de radiación. 34
4.14. Mediciones con la fuente en el centro. 35
4.15. Mediciones con la fuente a un costado. 36

A.1. Esquemático - Antenas 1 a 4 44
A.2. Esquemático - Antenas 5 a 8 45
A.3. Esquemático - Antenas 9 a 12 46
A.4. Esquemático - Antenas 13 a 16 47
A.5. Esquemático - Suma de todas las antenas, amplificador y salida 48

B.1. Comparación magnitud placa 1 y placa 2 a 1.7$[GHz]$ 49
B.2. Comparación magnitud placa 1 y placa 2 a 1.9$[GHz]$ 50
B.3. Comparación magnitud placa 1 y placa 2 a 2.1$[GHz]$ 50
B.4. Comparación magnitud placa 1 y placa 2 a 2.3$[GHz]$ 51
B.5. Comparación magnitud placa 1 y placa 2 a 2.5$[GHz]$ 51
B.6. Comparación magnitud placa 1 y placa 2 a 2.7$[GHz]$ 52
B.7. Comparación magnitud placa 1 y placa 2 a 2.9$[GHz]$ 52

C.1. Comparación fase placa 1 y placa 2 a 1.7$[GHz]$ 53
C.2. Comparación fase placa 1 y placa 2 a 1.9$[GHz]$ 54
C.3. Comparación fase placa 1 y placa 2 a 2.1$[GHz]$ 54
C.4. Comparación fase placa 1 y placa 2 a 2.3$[GHz]$ 55
C.5. Comparación fase placa 1 y placa 2 a 2.5$[GHz]$ 55
C.6. Comparación fase placa 1 y placa 2 a 2.7$[GHz]$ 56
C.7. Comparación fase placa 1 y placa 2 a 2.9$[GHz]$ 56

D.1. Medición modulador vectorial 1 57
D.2. Medición modulador vectorial 2 58
D.3. Medición modulador vectorial 3 58
D.4. Medición modulador vectorial 4 59
D.5. Medición modulador vectorial 5 59
D.6. Medición modulador vectorial 6 60
D.7. Medición modulador vectorial 7 60
D.8. Medición modulador vectorial 8 61
D.9. Medición modulador vectorial 9 61
D.10.Medición modulador vectorial 10 62
D.11.Medición modulador vectorial 11 62
D.12.Medición modulador vectorial 12 63
D.13.Medición modulador vectorial 13 63
D.14.Medición modulador vectorial 14 64
D.15.Medición modulador vectorial 15 64
D.16.Medición modulador vectorial 16 65

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

El uso de celulares es bastante común en la sociedad contemporánea, es más, la manera más normal de comunicarse con alguien hoy en día es a través de redes sociales por lo que no se hace necesario llamar a alguien para poder entablar una conversación y transferir información de un individuo a otro. Además, según datos de la Subsecretaría de Telecomunicaciones[1] en abril del año 2010 se alcanzó una penetración de más de 100 celulares abonados por cada 100 habitantes, por lo que bajo este argumento es fácil suponer que para cada persona existe al menos un teléfono celular asociado a ese individuo, cosa que cualquier persona que viva en Chile puede corroborar fácilmente al mirar a su alrededor.

Gracias a la tecnología existente y el conocimiento disponible al momento de realizarse este trabajo se busca construir un dispositivo innovativo: una cámara que pueda ser capaz de usar las bandas electromagnéticas utilizadas en las comunicaciones móviles para lograr generar una imagen con los dispositivos que estén transmitiendo en esas bandas en un lugar físico.

Algunas de las aplicaciones para este dispositivo son:

- **Operaciones de rescate**

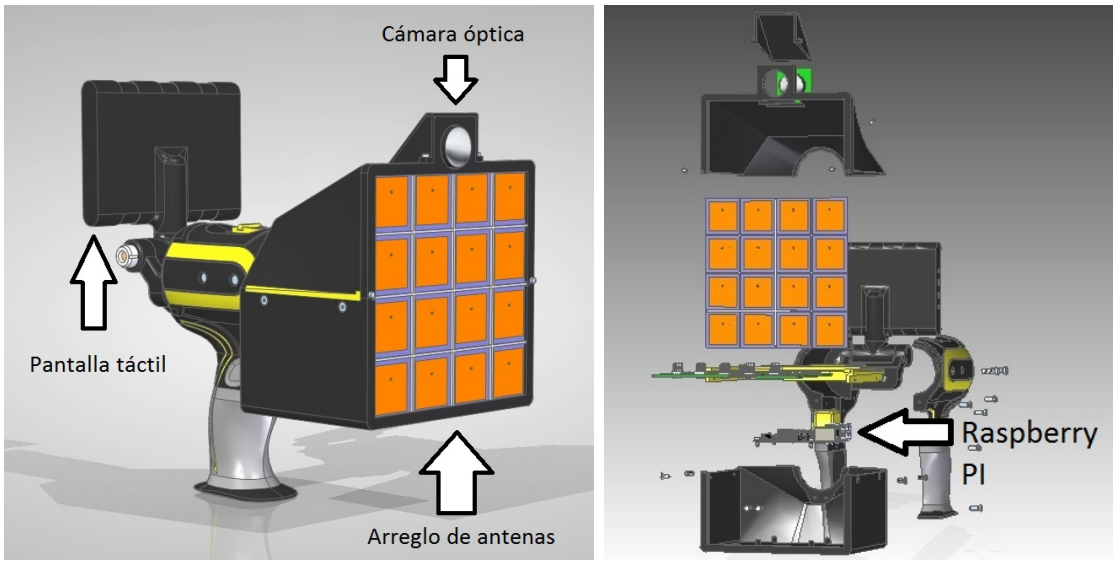
  Los desastres, ya sean naturales o generados por el hombre, pueden ocurrir en cualquier momento y lugar del mundo. Son instancias en las que cada segundo puede hacer la diferencia entre la vida y la muerte para una víctima que se encuentra bajo los escombros de un edificio o bajo la nieve en una avalancha, por ello es necesario contar con tecnología que facilite encontrar a personas en estas circunstancias y que reduzca los tiempos de búsqueda.

[1] `http://www.subtel.gob.cl/estudios-y-estadisticas/telefonia/` - Abonados Móviles. Última revisión: 5 de julio del 2016.

- **Rastreo del uso indebido de celulares**

  En Chile es muy común la utilización de celulares para hacer estafas a través de llamadas telefónicas y una cantidad no menor de estas son realizadas desde cárceles, por lo que poder detectar la presencia y ubicación de estos dispositivos móviles dentro de las celdas puede llegar a reducir esta cifra.

Se espera que el dispositivo final, luego de realizadas todas las pruebas en este trabajo y el diseño correspondiente a la integración de todo los componentes mecánicos y eléctricos, se vea como el de la Figura 1.1.



(a) Modelo mecánico montado (b) Modelo mecánico desensamblado

Figura 1.1: Modelo tridimensional del producto.

1.2. Antecedentes

Los fundamentos detrás de la memoria están dados por la teoría electromagnética, ya que gran parte de las comunicaciones hoy en día están basadas en la emisión electromagnética de señales codificadas. Es importante notar que en el espectro de frecuencias, las ondas electromagnéticas utilizadas en telefonía móvil abarcan un rango que va desde los 700 MHz hasta aproximadamente los 2000 MHz, sin embargo en este trabajo se desea realizar una implementación como prueba de concepto, por lo que se concentrará el tiempo en el rango de los 1700-2000 MHz, que es donde se encuentra la banda 3G de uno de los principales operadores en Chile.

El equipo de trabajo de este proyecto corresponde a:

- **Ricardo Finger:** Doctor de la Universidad de Chile dedicado al procesamiento digitales de señales, interferometría y astronomía. Es el autor intelectual de la idea de este proyecto y es el coordinador del trabajo a realizar por el equipo. Ha puesto a disposición parte de los fondos de astronomía y es el profesor guía de esta memoria.
- **David Monasterio:** Ingeniero Civil Electricista de la Universidad de Chile. Ha trabajado por alrededor de 5 años en el Laboratorio de Ondas Milimétricas en distintos proyectos relacionados al diseño de antenas y guías de ondas para receptores de ALMA. Dentro del proyecto realiza el diseño de las antenas para banda de celulares y orientación en las decisiones de diseño.
- **Francisco Casado:** Alumno de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile. Interesado en electrónica e instrumentación se encuentra realizando un trabajo dirigido en este proyecto y está encargado de generar una interfaz de usuario para el despliegue de datos.

Este trabajo de memoria es realizado utilizando las instalaciones del Laboratorio de Ondas Milimétricas del Observatorio Astronómico Nacional ubicado en el cerro Calán. Este laboratorio cuenta con equipos capaces de trabajar en el rango de operación necesario.

Este proyecto es financiado parcialmente por fondos del departamento de astronomía de la Universidad de Chile (*Fondo Basal - PFB-06*) y por un fondo ganado en el concurso de innovación OpenBeauchef realizado por la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (*Proyecto Innova - 14ENI2-26863*).

1.3. Objetivos generales y específicos

Los objetivos generales de esta memoria son los siguientes:

- Construir un arreglo de antenas capaz de detectar señales electromagnéticas en el rango de frecuencias de las bandas de celulares.
- Determinar las capacidades físicas y eléctricas del prototipo y sus limitantes.

Con estos objetivos en consideración, se desprenden los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar la electrónica destinada a procesar las señales del arreglo de antenas.
- Probar y caracterizar los distintos componentes a utilizar.
- Diseñar, construir y probar la placa electrónica con la cual se manejarán las señales electromagnéticas.
- Caracterizar la señal obtenida desde el arreglo de antenas.
- Crear una imagen electromagnética usando fuentes ubicadas en distintos lugares.

1.4. Estructura de la memoria

Este documento está compuesto por 6 capítulos, cuya descripción se encuentra a continuación:

- **Capítulo 1: Introducción**

  Se presenta la motivación del trabajo presente en esta memoria, aplicaciones, antecedentes y equipo de trabajo del proyecto en cuestión, además de los objetivos generales y específicos.

- **Capítulo 2: Antecedentes teóricos**

  En este capítulo se mencionan y explican los conceptos necesarios para entender el funcionamiento de la cámara y los fundamentos técnicos que justifican la hipótesis de trabajo.

- **Capítulo 3: Pruebas preliminares**

  En este capítulo se describen las pruebas necesarias para poder obtener los resultados preliminares que permiten definir medir las capacidades del dispositivo que se implementa en esta memoria.

- **Capítulo 4: Implementación**

  En este capítulo se realiza una integración de todas las partes vistas en las pruebas conceptuales, donde se genera un diseño electrónico final con el objetivo de obtener la señal resultante del arreglo de antenas.

- **Capítulo 5: Análisis de resultados**

  En este capítulo se evalúan los resultados obtenidos con la electrónica y el arreglo de antenas, con lo que se resaltan las capacidades y limitantes finales de este prototipo.

- **Capítulo 6: Conclusiones**

  Se cierra el trabajo realizado y se presentan las principales conclusiones de los resultados obtenidos y además se proponen mejoras a realizar para la implementación del siguiente prototipo.

Capítulo 2

Marco teórico

En este capítulo de la memoria se presentan los contenidos teóricos necesarios para poder entender el trabajo cubierto por este documento:

2.1. Electromagnetismo

En esta sección se explicarán los fundamentos existentes detrás de la teoría electromagnética que son utilizados en este trabajo:

2.1.1. Campo electromagnético

Un campo electromagnético es un campo físico producido por partículas cargadas eléctricamente y su movimiento. Un campo electromagnético es capaz de afectar el comportamiento de objectos con carga cercanos y puede extenderse indefinidamente por el espacio y es una de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza (junto a la gravedad, la fuerza débil y la fuerza fuerte). Su comportamiento está gobernado por las ecuaciones de Maxwell mostradas a continuación:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \tag{2.1}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \tag{2.2}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \tag{2.3}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left(\mathbf{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \tag{2.4}$$

2.1.2. Antena

Una antena es un dispositivo capaz de convertir un campo electromagnético en corriente alterna y viceversa. Usualmente son utilizadas con un trasmisor o receptor de radio. En la transmisión de potencia, una radio transmisora provee una corriente eléctrica oscilante a una alta frecuencia alterna hasta el terminal de la antena y esta emite la energía de la corriente en forma de onda electromagnética. En la recepción de la señal de radio, la antena toma parte de la potencia de la onda electromagnética con el fin de producir un pequeño voltaje o corriente en los terminales de la antena y esta es suministrada al radio receptor.

Las antenas son esenciales en todos los equipos que usan radio ondas. Son utilizadas en radiodifusión, transmisión televisiva, radares, celulares y comunicaciones satelitales, entre otros. Un ejemplo de antena se presenta en la Figura 2.1, que corresponde a una antena dipolo, que consiste en dos barras conducturas colocadas de forma adyacente y la señal eléctrica es suministrada en el punto en común que poseen.

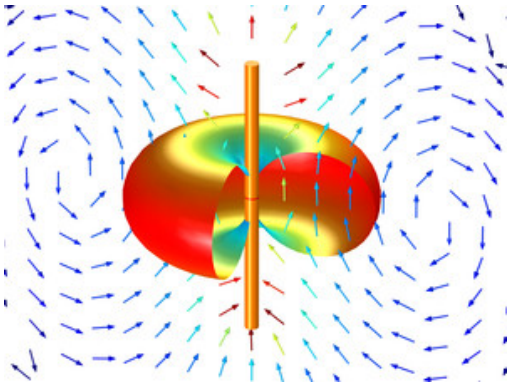
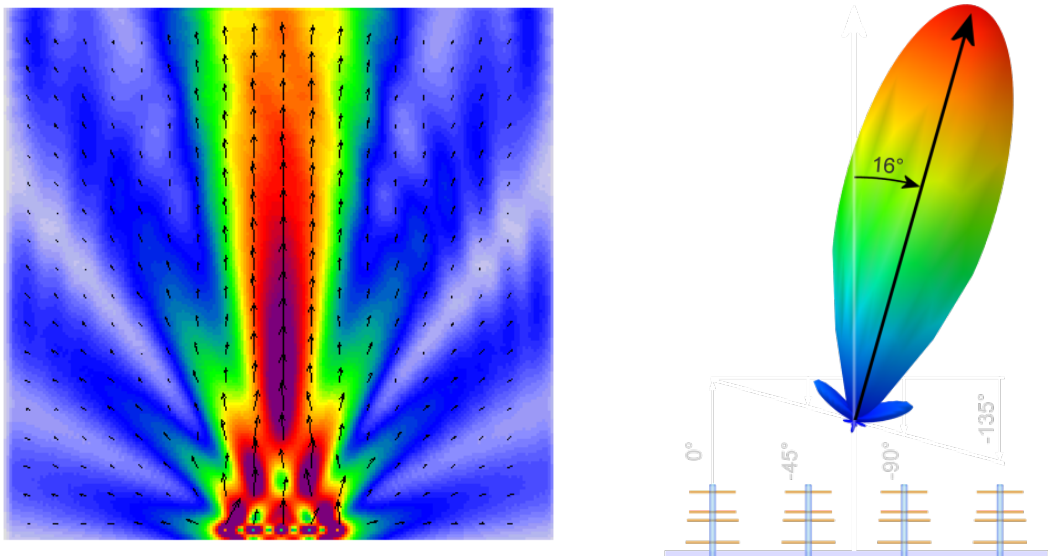


Figura 2.1: Patrón de radiación de una antena dipolo.[1]

[1]Imagen extraída de `https://www.comsol.com/model/dipole-antenna-8715`.

2.1.3. Arreglo en fase

Un arreglo en fase es un arreglo de antenas en el cual la fase relativa de las señales que alimentan a las antenas está fija de tal manera que el patrón de radiación del arreglo se construye en una dirección deseada y se anula en otras direcciones. La relación de fase entre las antenas puede ser fija o puede ser ajustable. En la Figura 2.2 se puede apreciar un arreglo en fase de 5 elementos, donde la fase relativa de cada antena es de 0°.



(a) Patrón de radiación de un arreglo en fase de 5 antenas girado en 0°.

(b) Patrón de radiación de un arreglo en fase de 4 antenas girado en 16°.

Figura 2.2: Ejemplos de arreglos en fase

El diseño de arreglos de antenas es un tópico extenso y no se abarca en este trabajo, más información puede ser encontrada en [2]. Sin embargo, la ecuación relevante para este trabajo corresponde a [9, pág. 20-5]:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \mathrm{d} \sin\left(\theta_0\right) \tag{2.5}$$

donde $\Delta\phi$ corresponde a la fase relativa entre cada antena, λ a la longitud de onda en la que se trabaja, d es la separación entre las antenas y θ_0 es el ángulo en el que se desea girar el patrón de radiación. Esta ecuación permite determinar la fase en la cual se debe ajustar cada antena para poder dirigir el patrón de radiación

2.2. Microondas

En esta sección se presentan los conceptos básicos de ingeniería de microondas usados en este trabajo:

2.2.1. Línea de transmisión

Una línea de transmisión es una estructura diseñada para transmitir potencia de radiofrecuencia, es decir, corrientes con una frecuencia lo suficientemente alta tal que la naturaleza de la onda debe ser tomada en cuenta. Las líneas de transmisión son usadas para propósitos como conectar transmisores y receptores de radio con sus antenas, distribución de la señal televisiva, conexiones en redes de computadores y buses de datos de computadores de alta velocidad.

El modelo general para una línea de transmisión se muestra en la Figura 2.3 y las ecuaciones utilizadas para describir el comportamiento de una línea de transmisión corresponden a (2.6) y (2.7), [6], [7]. Los valores R, L, G y C dependen de las características geométricas, de los materiales utilizados y representan la resistencia, inductancia, conductancia y capactancia por unidad de largo, respectivamente. Estas ecuaciones son conocidas como las Ecuaciones del Telégrafo (*Telegrapher's equations*).

$$\frac{\partial V(x)}{\partial x} = -(R + j\omega L) \cdot I(x) \tag{2.6}$$

$$\frac{\partial I(x)}{\partial x} = -(G + j\omega C) \cdot V(x) \tag{2.7}$$

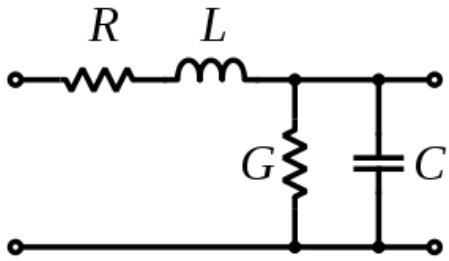


Figura 2.3: Modelo de línea de transmisión con pérdidas.

Uno de los parámetros más importantes en una línea de transmisión es la impedancia característica, denotada generalmente por Z_0, que corresponde a la relación entre el voltaje y la corriente que se produce por una onda viajando por la línea. La expresión general para este parámetro es

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}. \tag{2.8}$$

2.2.2. Microstrip

Una microstrip es un tipo de línea de transmisión que puede ser fabricada usando tecnología de placas de circuito impreso. Es utilizado en la manipulación de señales de frecuencias de microondas. Consiste en una cinta eléctrica conductiva separada de un plano a tierra por una capa de material dieléctrico conocida como substrato. Componentes de microondas como antenas, acopladres, filtros, divisores de potencia, entre otros, pueden ser generados con microstrip. La microstrip es mucho más barata en costo que las tecnologías de guías de onda tradicionales, así como también más liviana y compacta. En la Figura 2.4 se presenta un ejemplo de microstrip. En color verde se muestra el substrato, en la parte superior se encuentra la tira conductiva y abajo el plano a tierra.

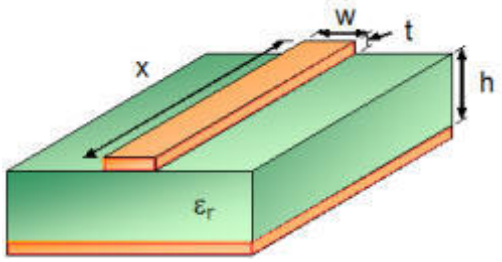


Figura 2.4: Ilustración de una microstrip.[2]

Las ecuaciones que definen la impedancia característica de una *microstrip* son [7]

$$\varepsilon_{\mathrm{e}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12h/W}} \tag{2.9}$$

$$Z_0 = \begin{cases} \dfrac{60}{\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{e}}}} \ln\left(\dfrac{8h}{W} + \dfrac{W}{4h}\right) & , \dfrac{W}{h} \leq 1 \\ \dfrac{120}{\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{e}}}\left(W/h + 1{,}393 + 0{,}667 \ln\left(W/h + 1{,}444\right)\right)} & , \dfrac{W}{h} \geq 1 \end{cases} \tag{2.10}$$

donde ε_r corresponde a la constante dieléctrica del material, ε_{e} es la constante dieléctrica efectiva, W es el ancho de la tira conductiva, h es la separación generada por el dieléctrico y Z_0 es la impedancia característica. Estas ecuaciones corresponden a una aproximación del modelo de una *microstrip*, pero son una buena aproximación práctica.

[2]Imagen extraída de `http://www.rfcafe.com/references/electrical/microstrip-eq.htm`.

2.2.3. Antena patch

Una patch antena es un tipo de antena de radio que puede ser una montada sobre una superficie plana. Consiste en una hoja plana de metal montada sobre un plano de tierra separado por un capa de dieléctrico, al igual que la microstrip. Corresponden al tipo original de antena microstrip descritas por Howell en 1972 [3], donde dos láminas de metal juntas forman una pieza resonante de línea de transmisión, cuyo largo corresponde a la mitad de la longitud de onda de la frecuencia deseada. El mecanismo de radiación proviene de las discontinuidades en cada uno de los bordes de la línea de transmisión. La radiación en los bordes hace que la antena sea eléctricamente un poco más larga que sus dimensiones físicas. Por tanto, para hacer que la antena sea resonante, el largo de la línea de transmisión debe ser un poco más corta que la mitad de la longitud de onda para obtener la frecuencia deseada. En la Figura 2.5 se muestra un ejemplo de antenna patch, donde uno de los bordes posee una microstrip para su excitación.

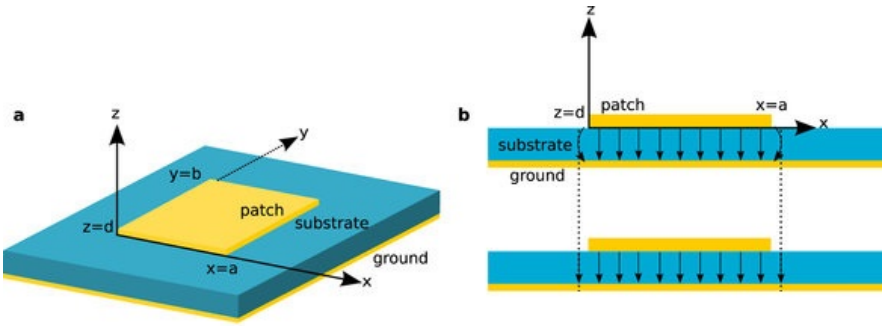


Figura 2.5: Patch antenna montada sobre un substrato.

2.3. Comunicaciones

En esta sección se presentan los conceptos básicos usados del área de comunicaciones en este trabajo:

2.3.1. Modulación en cuadratura

La modulación en cuadratura es la técnica de combinar dos señales portadoras de una modulación en amplitud de tal manera que las modulaciones por amplitud originales son separadas en el receptor. Ejemplos incluyen modulación en amplitud de cuadratura, modulación PSK, modulación MSK, entre otros. Con (2.11) y (2.12) se definen el comportamiento de la modulación en cuadratura.

$$\cos[2\pi f_c t + \phi(t)] = \cos(2\pi f_c t) \cdot I(t) - \sin(2\pi f_c t) \cdot Q(t) \tag{2.11}$$

$$\sin[2\pi f_c t + \phi(t)] = \sin(2\pi f_c t) \cdot I(t) + \cos(2\pi f_c t) \cdot Q(t) \tag{2.12}$$

$$\phi(t) = \tan^{-1}\left(Q(t)/I(t)\right) \tag{2.13}$$

Generalmente esta técnica es utilizada para la codificación binaria de los datos en la comunicación de los dispositivos móviles por lo que se suelen usar valores discretos de I y Q para representar las distintas combinaciones binarias. En este trabajo esta técnica es utilizada para cambiar la fase y magnitud de una señal.

2.3.2. Bandas de telefonía móvil

Las frecuencias de celulares son un conjunto de bandas de frecuencias en el rango de la banda de ultra alta frecuencia (UHF por sus siglas en inglés) que han sido asignadas para utilizar para telefonía celular. Todas las redes de celulares alrededor del mundo usan una porción del espectro de radio frecuencias para la transmisión y recepción de sus señales. La banda de UHF es también compartida con la transmisión televisiva y las comunicaciones de *Wi-Fi* y *Bluetooth*.

Las bandas utilizadas por las empresas más grande en Chile se presentan en la Tabla 2.1. En este caso, las bandas 3G corresponden a la tecnología UMTS y HSPA+, cuya banda de frecuencia se encuentra en los 1900 MHz.

Empresa	Tecnología
Movistar	GSM-1900 (GPRS, EDGE) 850/1900 MHz UMTS, DC-HSPA+ 2600 MHz LTE-FDD
Entel	GSM-1900 (GPRS, EDGE) 850/1900 MHz UMTS, DC-HSPA+ 2600 MHz LTE-FDD
Claro	CDMA2000 EV-DO GSM-1900 (GPRS) 1900 MHz UMTS, HSPA+ 2600 MHz LTE-FDD
WOM	iDEN 800 MHz 1700 MHz AWS, UMTS, HSDPA, LTE También usa las redes de Entel y Claro.

Tabla 2.1: Bandas utilizadas por empresas en Chile.

2.4. Electrónica

En esta sección se presentan los componentes electrónicos utilizados y su funcionamiento:

2.4.1. Protocolo I2C

El protocolo de comunicación I2C es un bus de datos serial de 2 nodos del tipo Maestro-Esclavo. Un nodo está destinado a funcionar como reloj de la trama de datos y el otro es usado para enviar bit a bit los datos. Estos nodos se denotan SCL y SDA, respectivamente.

Para iniciar la comunicación el maestro envía una dirección correspondiente al esclavo con el que se quiere comunicar junto con un bit R/W que indica si se va a escribir o leer un dato. Al final, el maestro espera una respuesta con el reconocimiento de la dirección por parte del esclavo denotada ACK. Si la comunicación falla el maestro debe enviar nuevamente estos datos, en caso contrario, dependiendo del bit $R/\bar{W}$ se envía o se recibe un dato como byte. Un ejemplo de comunicación usando el protocolo I2C se ve en la Figura 2.6.

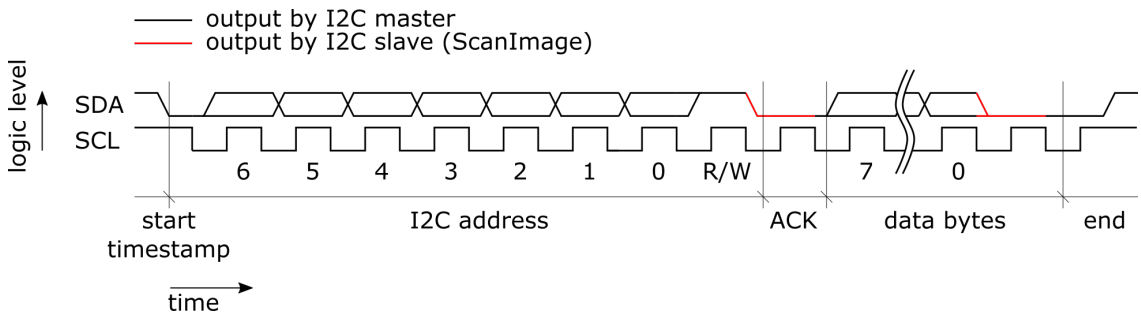


Figura 2.6: Transmisión de datos protocolo I2C.

2.4.2. Detector de potencia de microondas

Un detector de potencia de microondas es un instrumento que es capaz de medir la potencia eléctrica de señales de frecuencia de microondas. Diferentes sensores pueden ser utilizados para diferentes frecuencias y/o niveles de potencia. Históricamente el medio de operación en la mayoría de los medidores de potencia es que el sensor es capaz de convertir la potencia de microondas a un voltaje DC el cual puede ser leído por el medidor y desplegado de alguna manera.

2.4.3. Amplificador de bajo ruido

Un amplificador de bajo ruido (LNA, por sus siglas en inglés) es un componente electrónico utilizado para amplificar las señales que son bajas en magnitud. El LNA permite aumentar la potencia de la señal de entrada sin agregar ruido adicional. Un LNA es un elemento importante en el *front-end* del circuito receptor de radio que ayuda a disminuir el ruido no deseado generado por el procesamiento.

2.4.4. Conversor análogo a digital

Un conversor análogo a digital (ADC por sus siglas en inglés) es un dispositivo que convierte una cantidad física continua (usualmente un voltaje) a un valor digital que representa la amplitud del valor medido. La conversión involucra la cuantización de la entrada, por lo que necesariamente introduce un error de medición. Por lo general, en vez de realizar la conversión de forma continua, un ADC hace la conversión de forma periódica midiendo la entrada, por lo que la señal resulta ser discretizada en tiempo y amplitud.

2.4.5. Combinador de potencia

Los combinadores de potencia tienen la función de sumar dos o más señales electromagnéticas en un solo puerto. Estos dispositivos también pueden ser usados en sentido opuesto, es decir, son capaces de dividor en dos o más señales una entrada.

2.4.6. Modulador vectorial

Un modulador vectorial es un dispositivo electrónico que es capaz de aplicar modulación en cuadratura a una señal, de esta manera cambiando la amplitud y/o la fase de esta.

2.4.7. Buffer

Un *buffer* es un tipo de amplificador que permite la transformación de impedancia eléctrica de un circuito a otro, con el objetivo de que la señal de la fuente no sea afectada por alguna corriente o voltaje que la carga pueda producir.

2.4.8. Potenciómetro digital

Un potenciómetro digital es un componente electrónico controlado de forma digital que imita la función analógica de un potenciómetro analógico tradicional.

Capítulo 3

Pruebas preliminares

En este capítulo se mencionan los resultados de las pruebas realizadas a los componentes necesarios para realizar un diseño electrónico efectivo para el proyecto. En la Figura 3.1 se muestra un diagrama de bloques del sistema completo, donde el cuadrado en amarillo representa la placa electrónica.

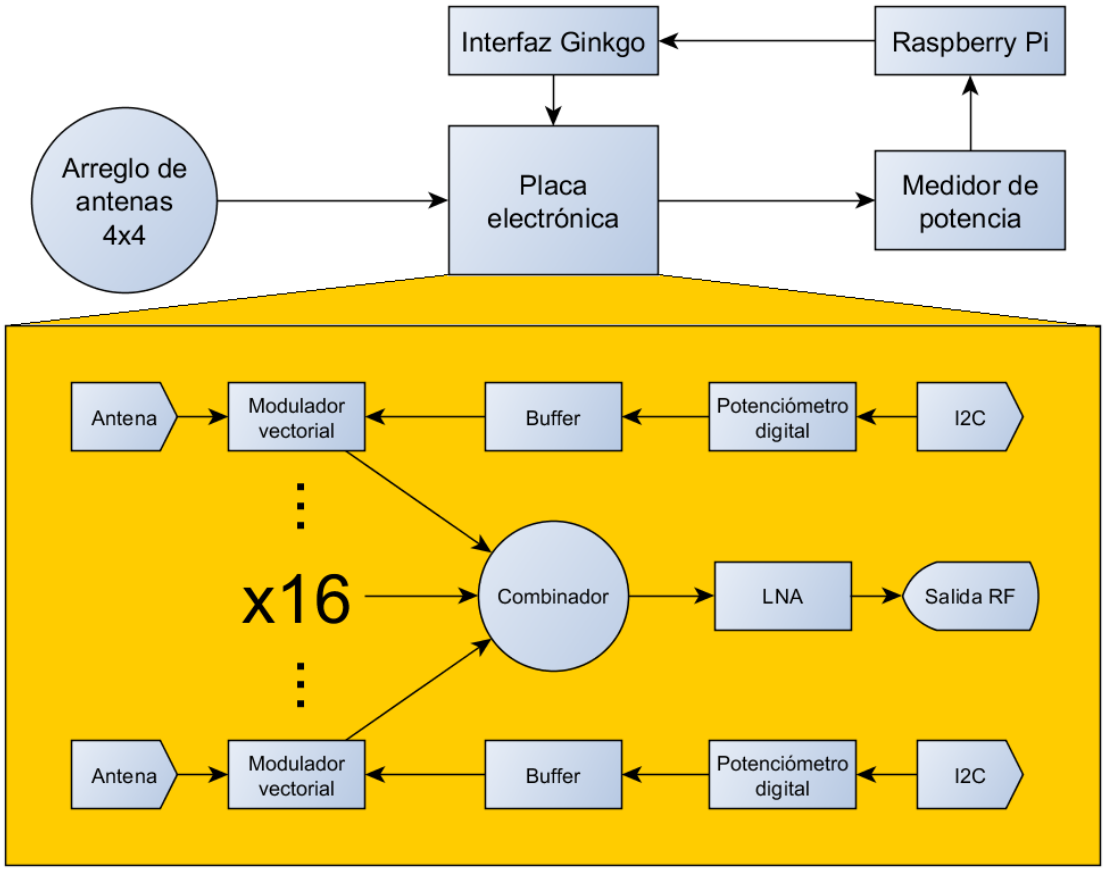


Figura 3.1: Diagrama de bloques del dispositivo.

3.1. Interfaz I2C Ginkgo

Como existe una parte de la electrónica que debe manipularse de manera digital, es necesario utilizar un protocolo de comunicación I2C. Los potenciómetros digitales se manipulan con este protocolo para configurar sus valores, por lo que se usa una interfaz de comunicación serial I2C, **Ginkgo VTG200A** [8], que permite programar el bus de comunicación usando varios lenguajes, entre ellos *python*, *C/C++* y *C#*. En la Figura 3.2 se puede ver una imagen del dispositivo.

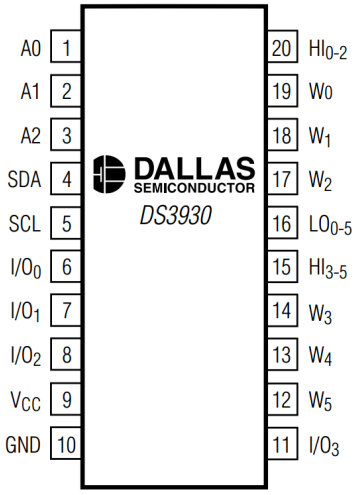
Figura 3.2: Interfaz I2C Ginkgo.

Para corroborar el correcto funcionamiento y para aprender el modo de uso de este componente se utiliza un compás digital que también trabaja con el protocolo I2C junto con un osciloscopio para lograr corroborar la correcta transmisión de datos en el dispositivo, que resulta en dos señales que se pueden apreciar en la Figura 3.3.

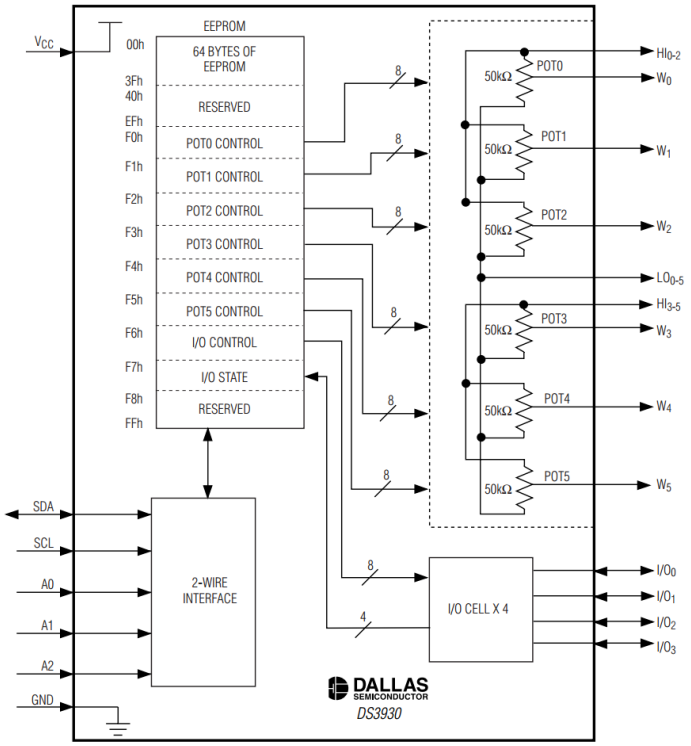
Figura 3.3: Datos de prueba para la interfaz I2C. La señal amarilla corresponde al nodo de datos SDA y la verde al nodo de reloj SCL.

3.2. Potenciómetro digital

El primer componente electrónico a probar corresponde a un potenciómetro digital de 8 bits con memoria no volátil, **Maxim Integrated DS3930**[5], cuya función consiste en generar señales de voltajes que irán al modulador vectorial, ver Capítulo 3.4, permitiendo que este último pueda controlar la fase de una de las antenas del arreglo. En la Figura 3.4 se presenta el pinout del integrado y su diagrama de bloques.



(a) Pinout del potenciómetro digital.



(b) Diagrama de bloques del potenciómetro digital

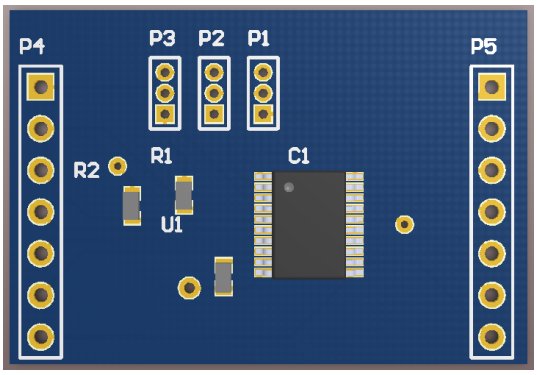
Figura 3.4: Pinout y diagrama de bloques interno del circuito integrado DS3930.

Este integrado consiste en 6 potenciómetros ajustables cuyos terminales centrales pueden trabajar en un rango de voltajes que va desde LO_{0-5} hasta HI_{0-2} y HI_{3-5} cuando está conectado a una carga resistiva alta, donde LO_{0-5} es el voltaje más bajo de los 6 elementos, HI_{0-2} es el voltaje más alto de los primeros 3 y HI_{3-5} es el voltaje más alto de los 3 restantes. Como los valores alcanzables por los potenciómetros son discretos, las ecuaciones que definen los voltajes de salidas en los terminales centrales para una carga resistiva grande corresponden a (3.1) y (3.2).

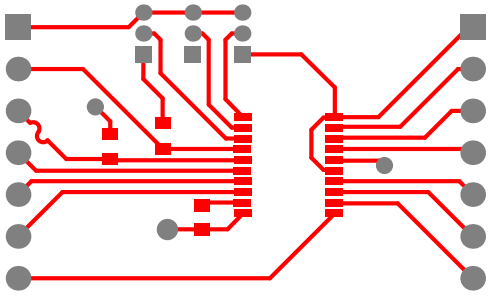
$$W_{0-2} = (HI_{0-2} - LO_{0-5}) \cdot \frac{V[7:0]}{256} + LO_{0-5} \tag{3.1}$$

$$W_{3-5} = (HI_{3-5} - LO_{0-5}) \cdot \frac{V[7:0]}{256} + LO_{0-5} \tag{3.2}$$

Para probar este componente se construye una placa en las instalaciones del Laboratorio de Ondas Milimétricas, cuyo diseño y montaje final pueden ser vistos en las Figuras 3.5 y 3.6 respectivamente. La interfaz de comunicación utilizada por el potenciómetro digital es I2C,



(a) Modelo 3D de la placa del potenciómetro



(b) Ruteo de la placa del potenciómetro

Figura 3.5: Diseño del potenciómetro digital.

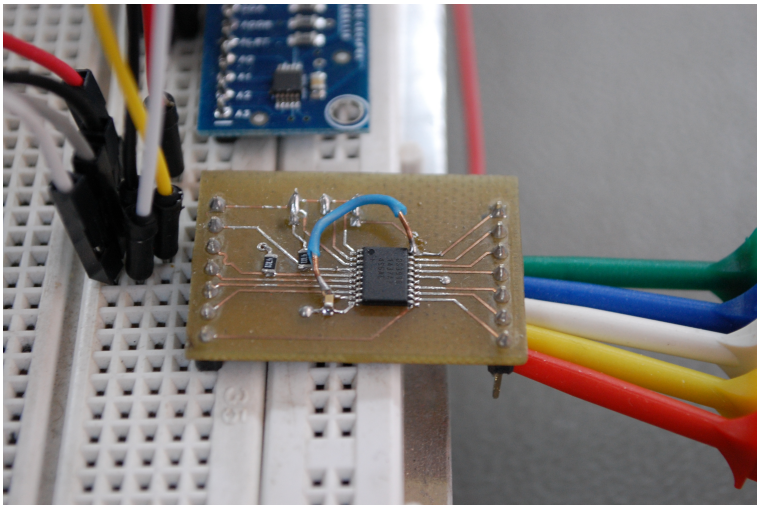


Figura 3.6: Potenciómetro digital montado en la placa de prueba.

con lo que se utiliza una interfaz Ginkgo 3.1 para comunicarse con él. La prueba a realizar consiste en lograr fijar valores determinados en los terminales centrales y poder medir ese valor en el osciloscopio, para esto se alimentan los valores de alimentación del potenciómetro, junto con HI_{0-2} y HI_{3-5} a $5V$ y el voltaje de LO_{0-5} se fija a $0V$, luego se genera una rampa de manera digital en los potenciómetros y se mide que la salida corresponda a esta señal.

3.3. Raspberry Pi

Un componente fundamental es la unidad de procesamiento. En este caso consiste en una Raspberry Pi, la cual es utilizada para manejar la interfaz Ginkgo y ésta a su vez maneja los

potenciómetros digitales. La Raspberry Pi es un computador de placa simple del tamaño de una tarjeta de crédito creado en el Reino Unido con la intención de enseñar ciencias de la computación en escuelas y facilitar el desarrollo de proyectos de sistemas embebidos.

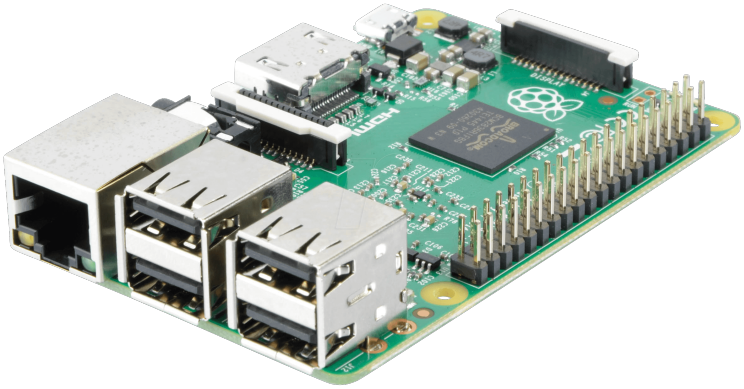


Figura 3.7: Raspberry Pi con pantalla táctil de 5 pulgadas.

En primera instancia se usa la interfaz I2C que trae este dispositivo para hacer la comunicación con los potenciómetros digitales. Sin embargo, debido a una falla eléctrica, cuya procedencia se desconoce aún, dejó de funcionar y se opta por usar la interfaz Ginkgo por este motivo. La programación de la interfaz Ginkgo en la Raspberry se realiza utilizando C/C++ ya que los controladores para Python no se encuentran disponibles para el sistema operativo (*Raspbian*)de la unidad de procesamiento.

3.4. Modulador vectorial

La pieza clave que permite al haz electromagnético dirigir su patrón de radiación es la diferencia de fase entre las antenas. Para lograr cambiar la fase de cada antena de manera electrónica se utiliza un modulador vectorial, **Analog Devices HMC631LP3** [1]. Este permite cambiar la magnitud y fase de una señal eléctrica en el rango de 1.8-2.7 GHz. En la Figura 3.8 se ve una diagrama de bloques interno del modulador donde se pueden notar las entradas de este componente. Las entradas I y Q corresponden a los valores homónimos de (2.11) y la salida $RFOUT$ corresponde a corresponde al lado izquierdo de (2.11).

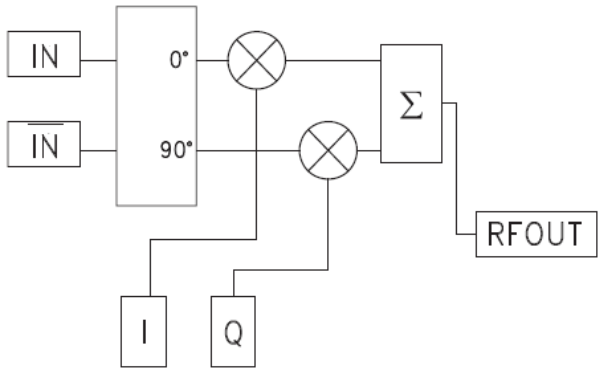


Figura 3.8: Diagrama de bloques del modulador vectorial

Para probar este componente se diseña y construye una placa electrónica para montar el circuito integrado junto a sus componentes respectivos, en este caso, varios componentes pasivos y un amplificador operacional. Este último tiene la función de trabajar como un *buffer* para que las señales de entradas I y Q del modulador vectorial no pierdan fidelidad debido a que sus impedancias son bajas. El diseño de la placa se puede ver en la Figura 3.10. Cabe mencionar que este componente tiene dimensiones $3{,}0mm \times 3{,}0mm \times 1{,}0mm$, posee 4 *pads* por lado con una separación de $0{,}5mm$, un ancho de $0{,}3mm$ y no tiene patas. Su montaje se realiza con un microscopio mientras se encuentra conectado a tierra para evitar una falla debido a una descarga electroestática. En la Figura 3.9 se pueden comparar las dimensiones con las de una moneda chilena de 100 pesos.

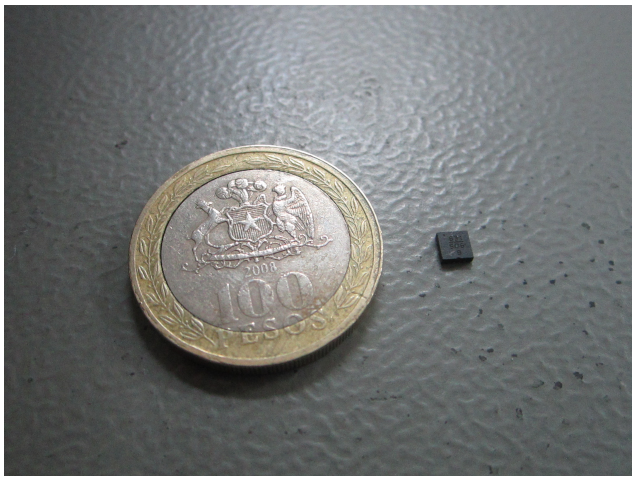
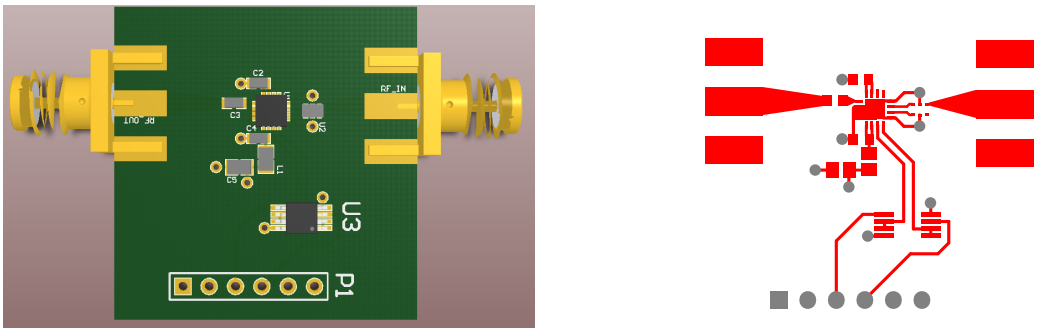


Figura 3.9: Comparación del tamaño del chip con una moneda de 100 pesos chilenos.

Para verificar que los resultados obtenidos por este componente son repetibles y similares de un integrado a otro, se construyen dos placas con el mismo diseño mostrado en la Figura 3.10 y se montan ambos para realizar las pruebas. Una de las placas montadas se puede apreciar en la Figura 3.11. El fabricante de este componente entrega (3.3) y (3.4) para poder obtener los voltajes que se deben aplicar a las señales I y Q dada una magnitud y fase. Se utilizan estas ecuaciones para corrobar su funcionamiento veracidad.



(a) Modelo 3D de la placa para el modulador vectorial.

(b) Ruteo de la placa para el modulador vectorial.

Figura 3.10: Diseño de la placa para el modulador vectorial.

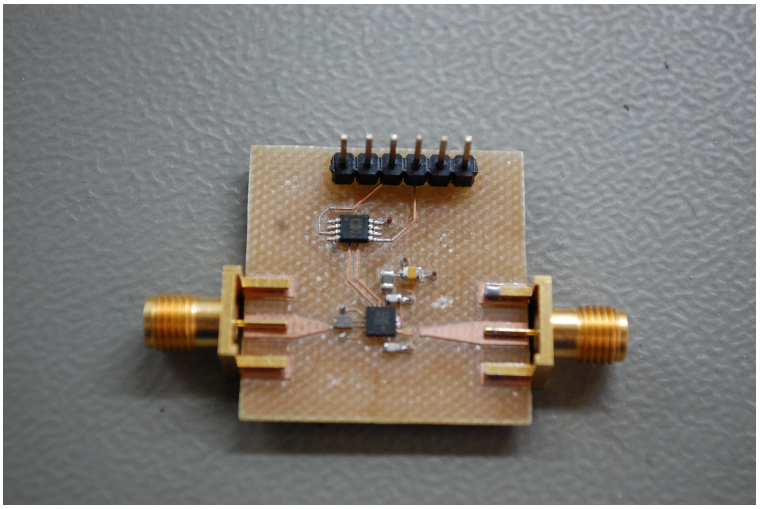


Figura 3.11: Placa con el modulador vectorial montada.

$$I\left(G,\theta\right) = 1{,}5 + \frac{G}{0{,}316}\cos\left(\theta\right) \tag{3.3}$$

$$Q\left(G,\theta\right) = 1{,}5 + \frac{G}{0{,}316}\sin\left(\theta\right) \tag{3.4}$$

Utilizando la interfaz Ginkgo se fijan los valores dados por las ecuaciones y se mide la fase obtenida en la señal para pasos de 30° partiendo desde 0° y terminando en 360°. Luego se calcula la diferencia entre el valor inicial obtenido para 0° y el valor para cada cambio de fase. Este proceso se realiza para la placa 1 y 2, con lo que se obtienen las Figuras 3.12 y 3.13.

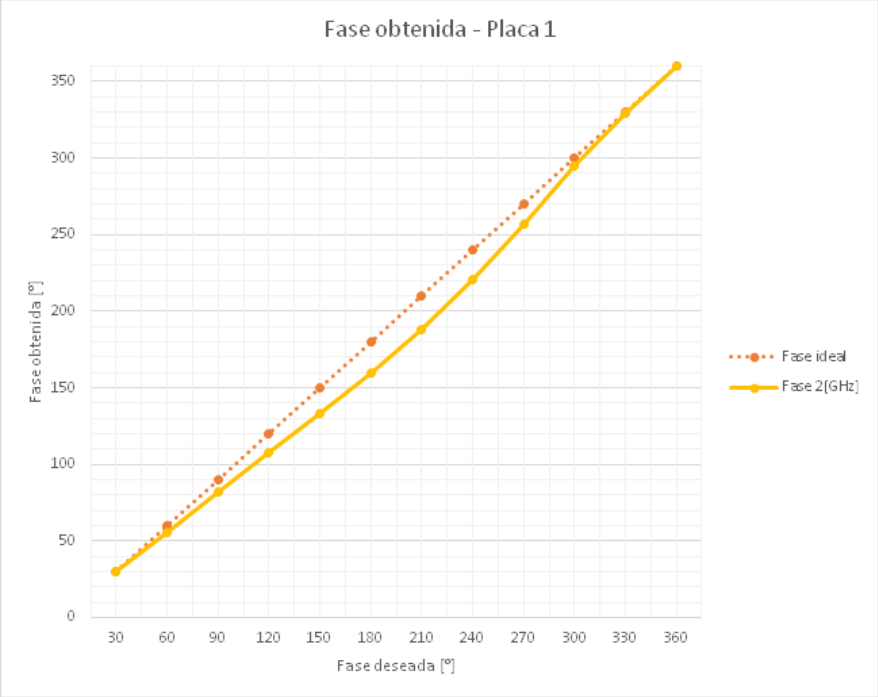


Figura 3.12: Medición de la diferencia de fase para la placa 1.

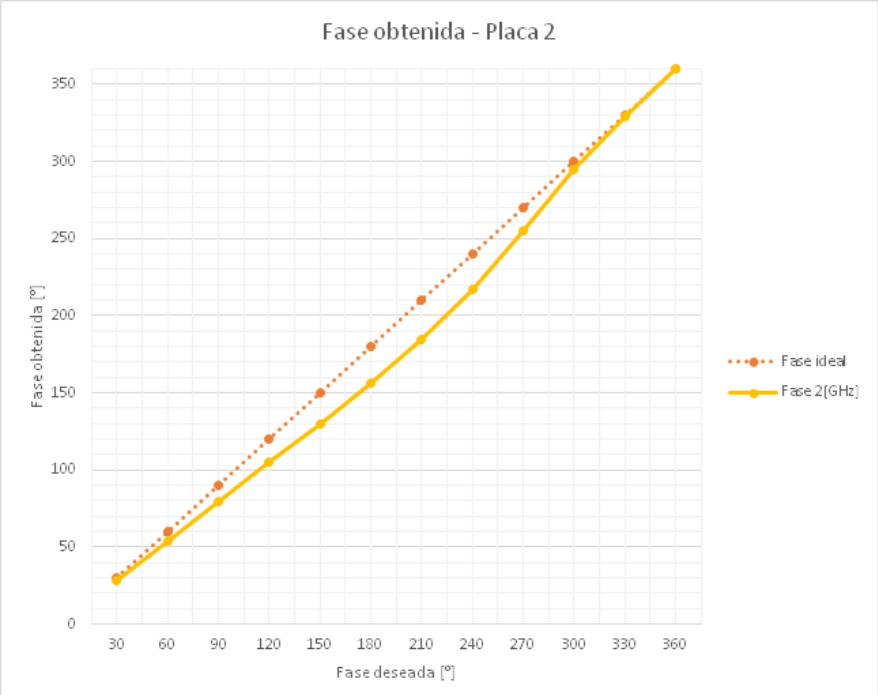
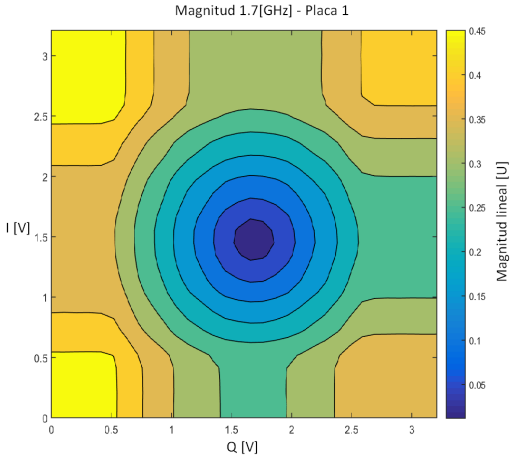
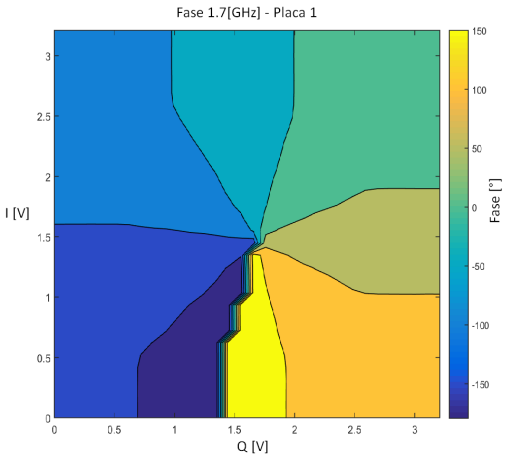


Figura 3.13: Medición de la diferencia de fase para la placa 2.

En estas figuras se observa que para cambios de fase cercanos a 180° se obtienen errores de aproximadamente 25°, por lo que las ecuaciones no son un buen referente para poder fijar los valores de fase de las antenas. Para generar diferencias de fase de forma más precisa, se decide hacer un mapeo de la magnitud y fase para la mayor cantidad de valores posibles de I y Q generando una grilla equidistante que va en el rango de $0 - 3{,}3V$ para ambas entradas. Dado que la toma de datos se realiza usando un analizador de redes vectorial, el cual se demora una cantidad no despreciable de tiempo en tomar una cantidad de valores, se decide hacer una grilla de 32×32 puntos en el rango ya mencionado. Estos valores son ingresados utilizando la interfaz Ginkgo y se hacen las mediciones para ambas placas. También se aprovecha de hacer el mapeo para distintas frecuencias dado que el analizador de redes vectorial toma datos en distintas frecuencias. Con esto se obtienen los resultados de las Figuras 3.14a y 3.14b para la placa 1 y las Figuras 3.15a y 3.15b para la placa 2.

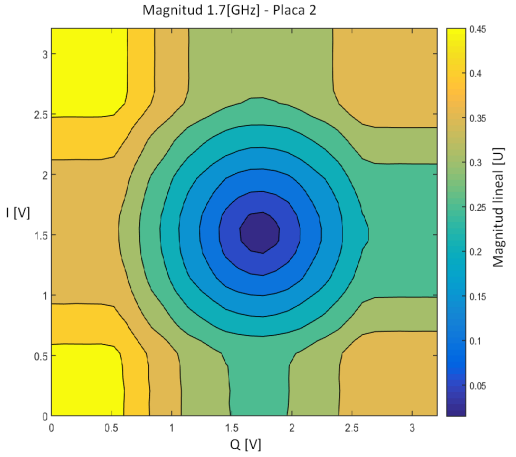


(a) Medición de la magnitud para la placa 1.

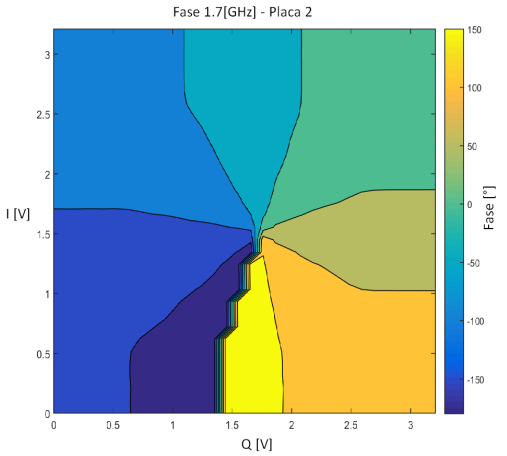


(b) Medición de la fase para la placa 1.

Figura 3.14: Mediciones para la placa 1 del modulador vectorial.



(a) Medición de la magnitud para la placa 2.



(b) Medición de la fase para la placa 2.

Figura 3.15: Mediciones para la placa 2 del modulador vectorial.

De estos datos se desprende que los valores de entrada utilizados para fijar la señal a una fase y magnitud concretas no coinciden para ambos moduladores. Por lo tanto es necesario caracterizar cada uno para generar una diferencia de fase con mayor precisión y así calcular los valores de I y Q correspondientes a cada valor de fase y magnitud.

3.5. Medidor de potencia

El componente encargado de detectar si existe radiación electromagnética en un lugar es el medidor de potencia (o *powermeter*), **Linear Technology LT5538** [4]. Se utiliza luego de combinar las señales de todas las antenas para medir qué tan intensa es la emisión en un dirección definida. Para probar este chip se diseña una placa con algunos componentes definidos por el proveedor [4, pág. 10] para trabajar en el rango definido de $1{,}7 - 2{,}0GHz$. En la Figura 3.16 se observa el diseño utilizado para probar el chip y en la Figura 3.17 se muestra la placa construida y montada.

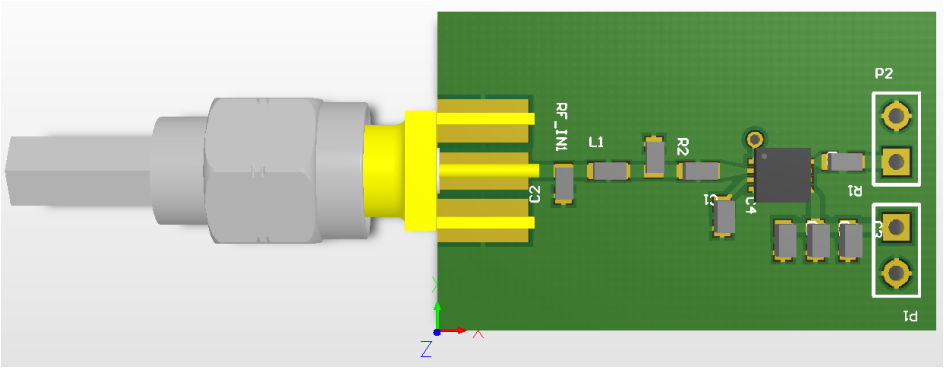


Figura 3.16: Diseño de la placa para el medidor de potencia.

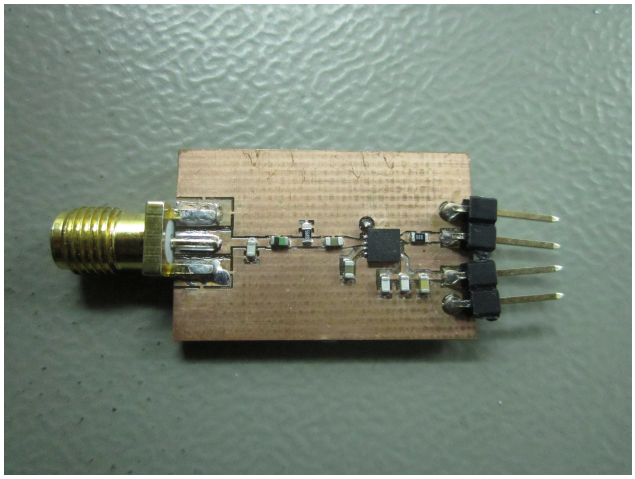


Figura 3.17: Placa del medidor de potencia montada.

La prueba del circuito integrado consiste en alimentar con $5V$ el medidor de potencia, ingresar una señal con una potencia conocida a través de la entrada SMA y medir el voltaje de salida. En este caso se mide el voltaje usando un osciloscopio para poder determinar si existe ruido o alguna componente en la salida que pueda afectar la medición de potencia. Los resultados se muestran en la Figura 3.18, donde se ha medido en tres frecuencias distintas: $880MHz$, $2140MHz$ y $1880MHz$, Las dos primeras frecuencias se han escogido debido a que los datos pertenecientes a estas curvas se encuentran en la hoja de datos y la última porque es la frecuencia de interés en la banda de comunicación de celulares.

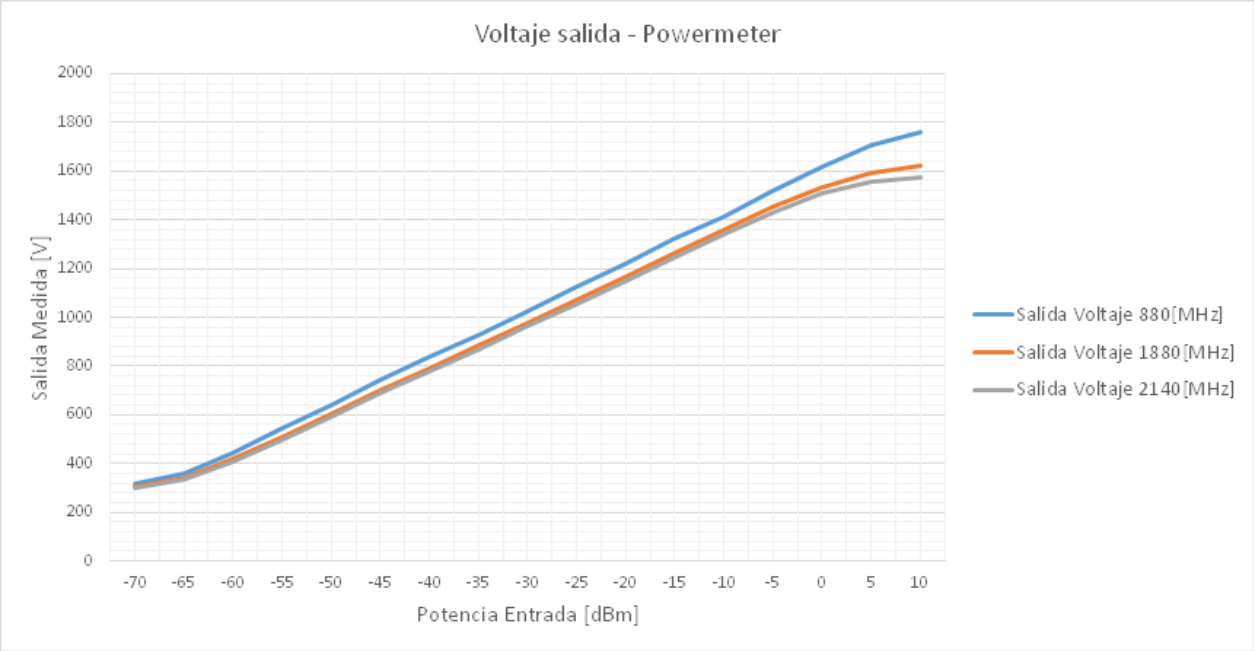


Figura 3.18: Mediciones del medidor de potencia para distintas potencias y frecuencias.

De los datos podemos obtener los parámetros mostrados en la hoja de datos correspondientes a estas curvas [4, pág. 3] para corroborar el correcto funcionamiento del medidor de potencia. Estos parámetros corresponden a:

- *Output slope:* Pendiente obtenida en la curva lineal de salida, medida en $[mV/dB]$.
- *Logarithmic intercept:* Potencia de entrada para la cual el voltaje de salida es 0, medida en $[dBm]$.
- *Linear dynamic range:* Rango total en el cual el voltaje de salida se comporta de manera lineal, medido en $[dB]$.

En la Tabla 3.1 se comparan los resultados con los datos del proveedor. Los errores son bajos.

Frecuencia	$880MHz$			$2140MHz$		
	Fabricante	Medido	Error %	Fabricante	Medido	Error %
Output slope $[mV/dB]$.	19.00	18.98	0.10	17.70	17.47	1.30
Logarithmic intercept $[dBm]$.	-88.80	-84.27	5.10	-89.00	-84.84	4.67
Linear dynamic range $[dB]$.	75	73	2.67	70	68	2.86

Tabla 3.1: Comparación de parámetros medidor de potencia

Capítulo 4

Implementación

En este capítulo se presenta el proceso realizado para la implementación del prototipo funcional para captar las señales electromagnéticas. En la Figura 4.1 se muestra un diagrama de bloques con todos los elementos del diseño del proyecto. En este sistema

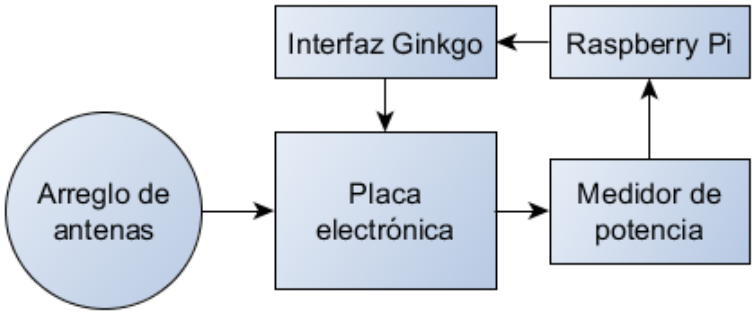


Figura 4.1: Diagrama de bloques completo.

4.1. Diseño placa electrónica

Con cada uno de los componentes probados, se diseña una placa electrónica que integra cada parte para poder cambiar la fase de cada una de las antenas y poder combinar la cantidad total de señales provenientes del arreglo. El diseño en diagrama de bloques se presenta en la Figura 4.2. Los esquemáticos correspondientes se adjuntan en el Anexo A. Notar que se ha incluido en el diseño un amplificador de bajo ruido, pero que no se incluye en la implementación final debido a que no se le realizaron las pruebas correspondientes y al ser montado presenta problemas. Se decide no utilizar este componente y simplemente usar un *bypass* en su lugar. Para el ruteo de las pistas y posicionamiento de todos los elementos electrónicos se han tomando las siguientes consideraciones:

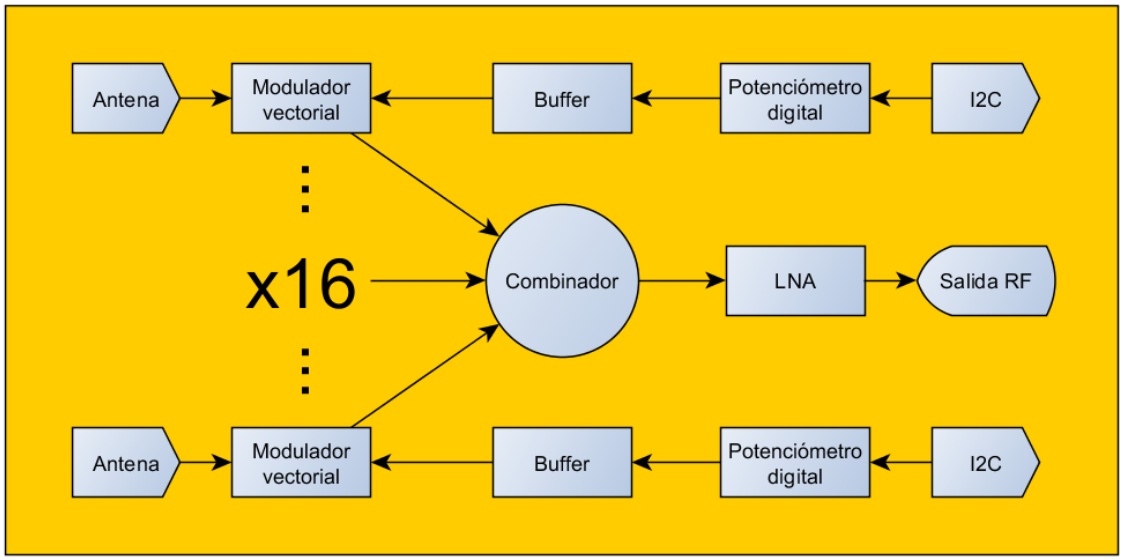
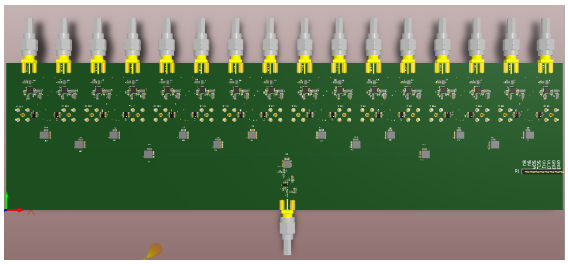


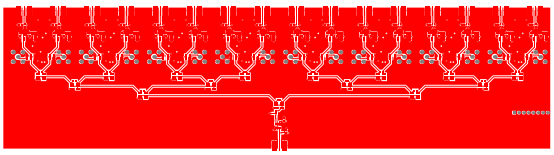
Figura 4.2: Diagrama de bloques placa electrónica.

- El espesor de la placa electrónica es de 0,8mm. Consiste en cuatro capas, donde una está dedicada a las señales de radiofrecuencia, otra corresponde a un plano a tierra, la siguiente es un plano de alimentación y la última es para las señales digitales provenientes de la interfaz I2C.
- Todos los elementos utilizados que trabajan en radiofrecuencia están adaptados a 50Ω. Por tanto, para la placa de espesor 0,8mm corresponde a una *microstrip* de ancho 0,29mm. Esto debido a que el fabricante entrega la información que el espaciado entre la capa dedicada a señales de radiofrecuencia y el plano a tierra es de 0,17mm.
- Las líneas de radiofrecuencia deben tener el mismo largo eléctrico. Para poder tener un mejor control de las fases se posicionan todos los componentes a la misma distancia entre sí y de la manera más simétrica posible.

El diseño final enviado a construir se muestra en las Figuras 4.3 y 4.4.

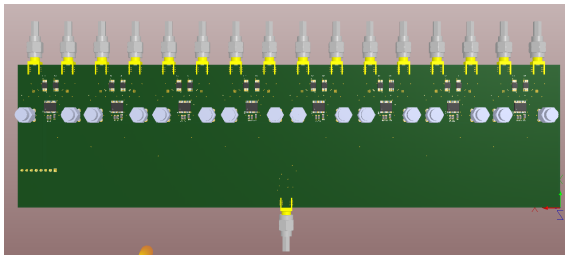


(a) Modelo 3D del diseño.

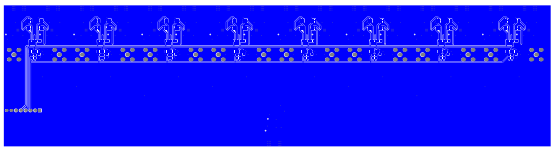


(b) Ruteo capa de radiofrecuencia.

Figura 4.3: Diseño placa electrónica - capa de radiofrecuencia.



(a) Modelo 3D del diseño



(b) Ruteo capa componentes digitales.

Figura 4.4: Diseño placa electrónica - capa de señales digitales.

Esta placa es enviada a construir a un fabricante en China y el resultado de la fabricación se muestra en la Figura 4.5. En la imagen, la placa superior aparece mostrando la capa de señales digitales y la placa inferior aparece mostrando la capa de señales de radiofrecuencia.

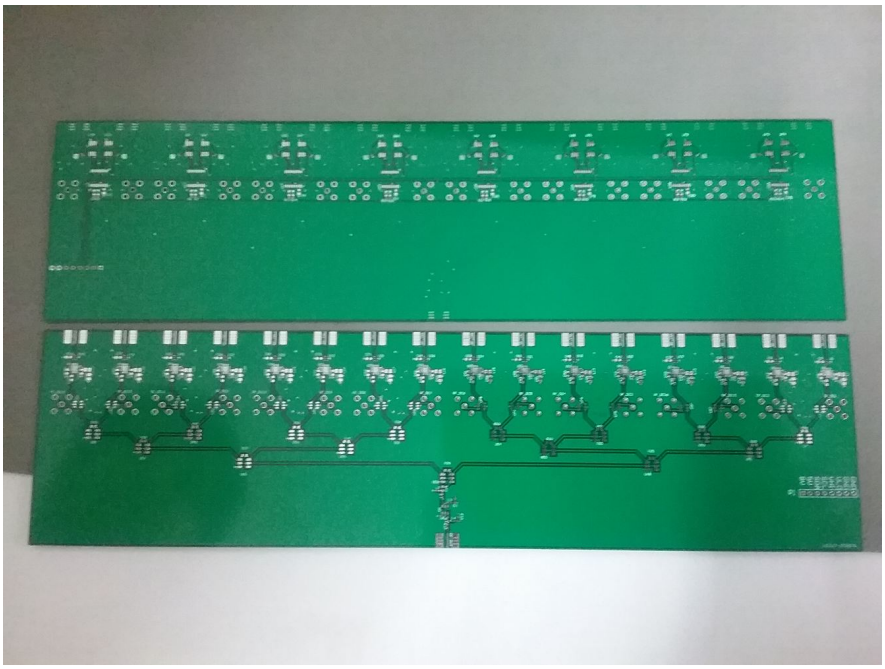
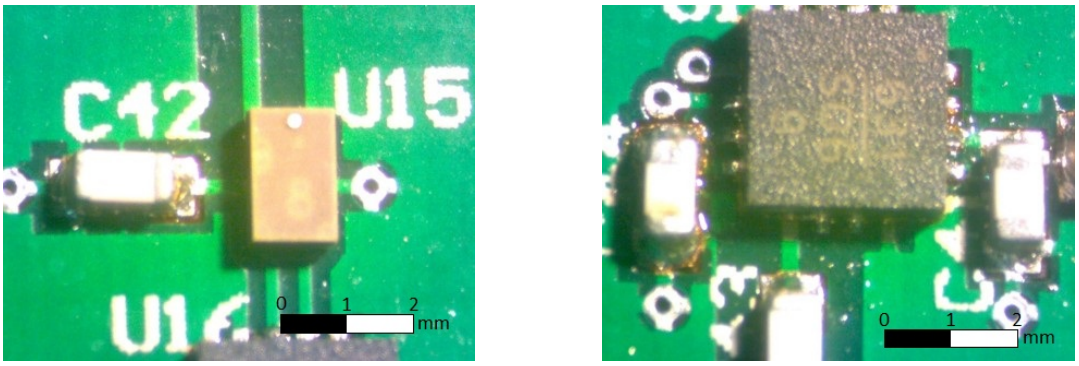


Figura 4.5: Placa electrónica fabricada sin componentes.

4.2. Montaje de componentes

Con la placa en las manos se procede a montar todos los componentes electrónicos. Para esto se utiliza soldadura en pasta y un horno para hacer el proceso de montaje más eficiente y rápido. Algunos componentes ya montados se muestran en las Figuras 4.6a y 4.6b y la placa con todos sus elementos se ve en las Figuras 4.7 y 4.8.



(a) Condensador y balun.

(b) Modulador vectorial y condensadores.

Figura 4.6: Montaje componentes de la placa electrónica.

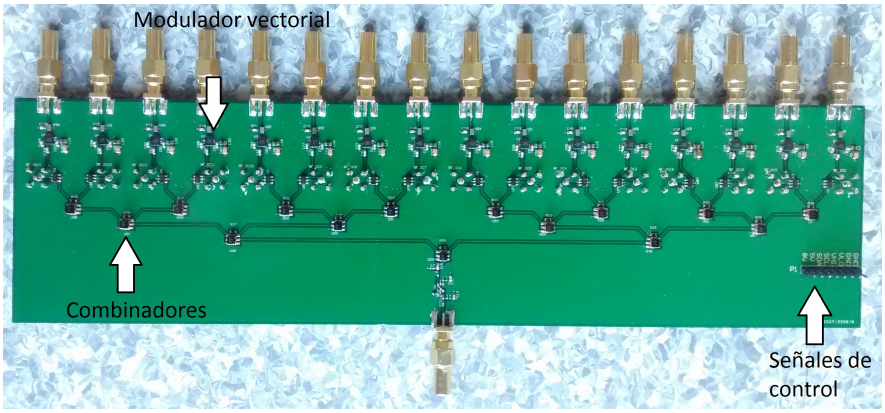


Figura 4.7: Montaje placa electrónica - capa de radiofrecuencia.

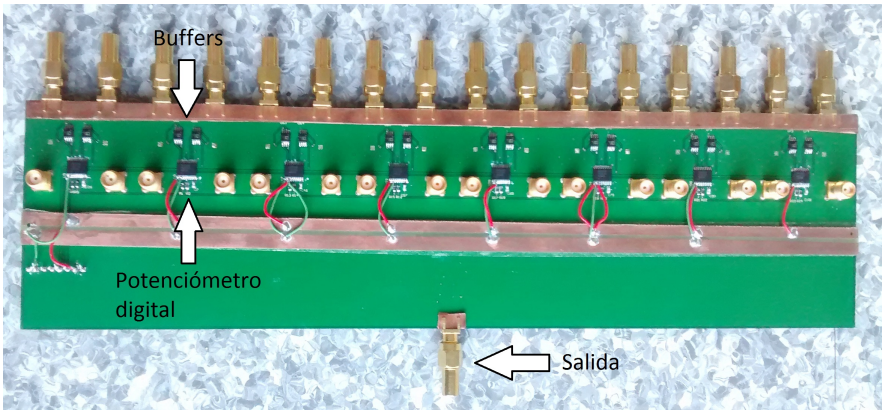


Figura 4.8: Montaje placa electrónica - capa de señales digitales.

En la Figura 4.8 se pueden observar los siguientes detalles:

- Ocho circuitos integrados deben ser conectados usando cables debido a una falla en el diseño. Se utiliza una placa extra para conectar algunos *pads* a $3{,}3V$ y $0V$, en este caso se usan cables rojos y verdes respectivamente.
- Los conectores utilizados para conectar las antenas están diseñados para placas de espesor $1{,}6mm$. Por lo tanto se usan láminas de cobres para poder rellenar el espacio faltante.

4.3. Caracterización de la placa electrónica

Para poder fijar cada señal a la fase deseada es necesario caracterizar cada modulador vectorial como se ve en el Capítulo 3.4. Por tanto, se utiliza el mismo procedimiento que se menciona en esa sección, con la diferencia de que la grilla usada es de 48×48 puntos y se mide a una frecuencia de $1{,}88GHz$. La configuración y los equipos que se usan para medir se muestran en la Figura 4.9. Cabe mencionar que la medición de cada modulador vectorial toma alrededor de 20 minutos y al ser 16 en total es necesario todo un día para poder caracterizar por completo la placa electrónica.

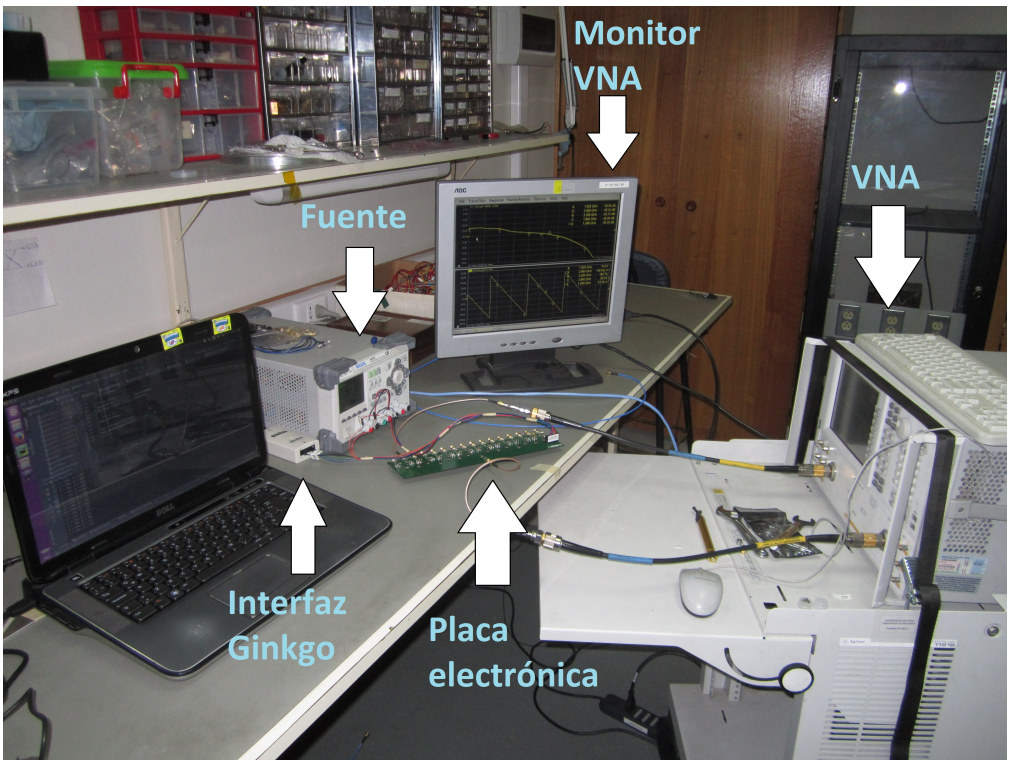
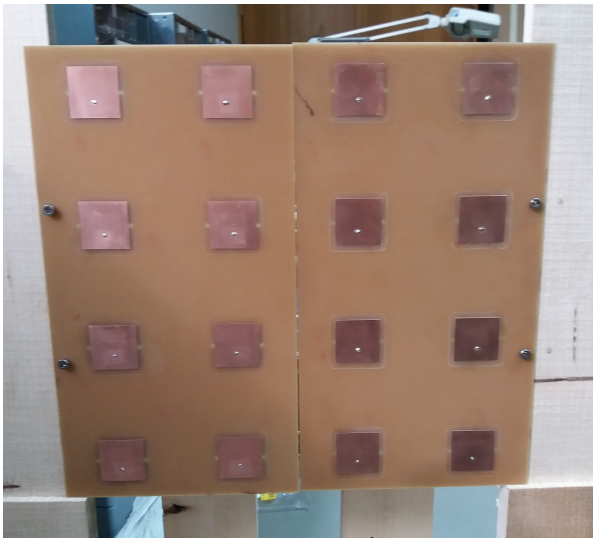


Figura 4.9: Configuración para caracterizar la placa electrónica.

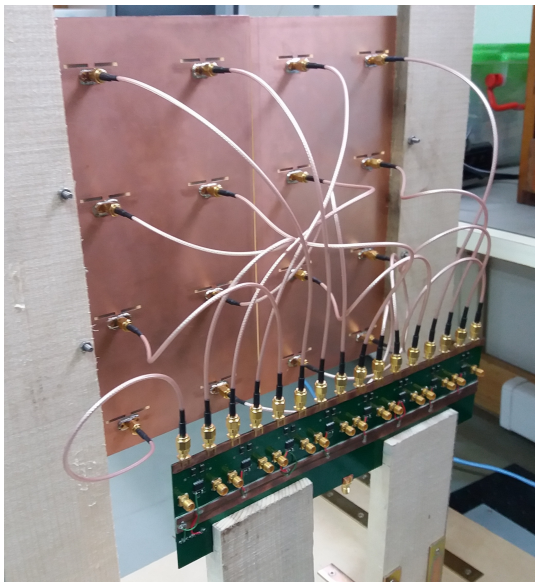
Los resultados de las mediciones se adjuntan en el Anexo D. Con la grilla de datos de 48×48 se utiliza una interpolación para poder obtener los 256×256 datos en total que es capaz de generar cada potenciómetro digital. Estos últimos datos se usan para generar una tabla a nivel de *software* con el fin de poder fijar la fase de cada modulador vectorial de forma apropiada. Esta tabla consiste en un arreglo de $16 \times 360 \times 2$, donde la primera componente corresponde al modulador utilizado, la segunda componentes es el grado en fase para el cual se quiere fijar y la última corresponde a las entradas I y Q del modulador vectorial.

4.4. Caracterización del patrón de radiación

El arreglo de antenas es diseñado por el ingeniero David Monasterio y construido en las instalaciones del Laboratorio de Ondas Milimétricas. Este arreglo consiste en 4×4 elementos y cada elemento es una antena *patch* con una frecuencia central de $1{,}84GHz$, un ancho de banda de $200MHz$ y un espaciado de $8cm$ entre cada una. En la Figuras 4.10a y 4.10b se puede ver el arreglo de antenas, de frente y con cada antena conectada a la placa, respectivamente.



(a) Arreglo de antenas patch.



(b) Arreglo de antenas conectado a la placa electrónica.

Figura 4.10: Montaje arreglo de antenas y placa electrónica.

Para medir el patrón de radiación generado por el arreglo de antenas se arma una configuración en una habitación con una antena encargada de emitir a $1{,}84GHz$ a una distancia de $2m$ del arreglo, una fuente de voltaje para alimentar de forma eléctrica la placa electrónica y un analizador de espectro para poder medir la potencia recibiada por el arreglo, además la base de donde se encuentra montado el arreglo tiene un sistema de rotación graduado con una resolución de $1°$ para poder fijar con una buena precisión la dirección de medición. En las Figuras 4.11, 4.12a y 4.12b se puede observar el montaje de medición y los equipos involucrados.

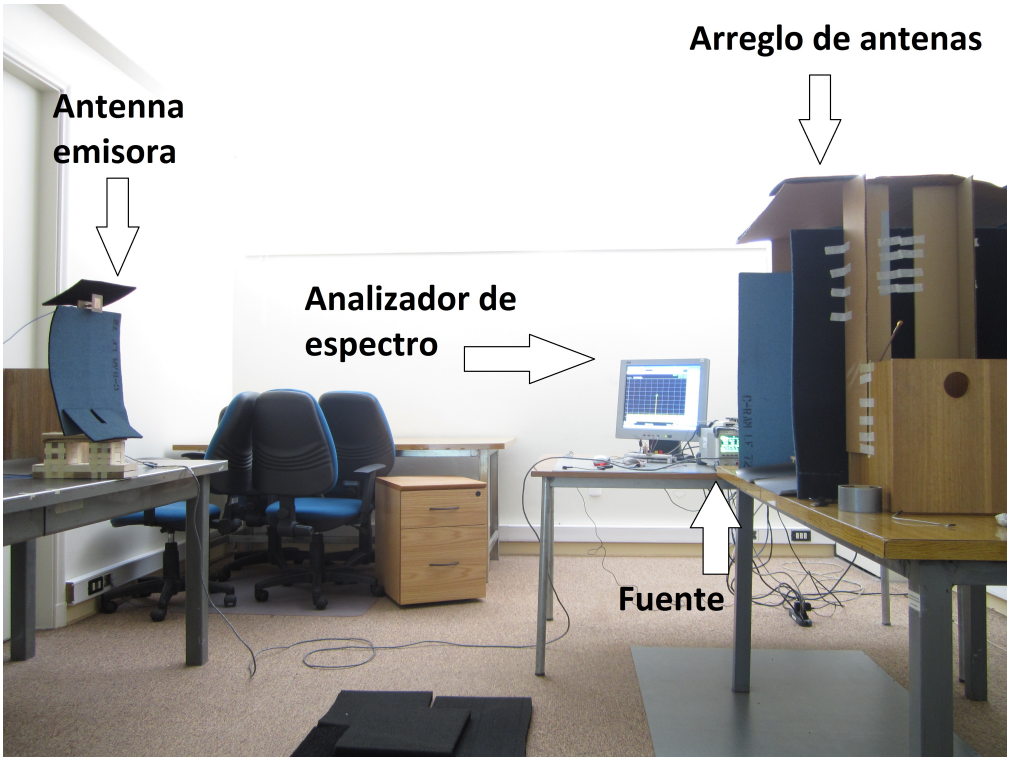
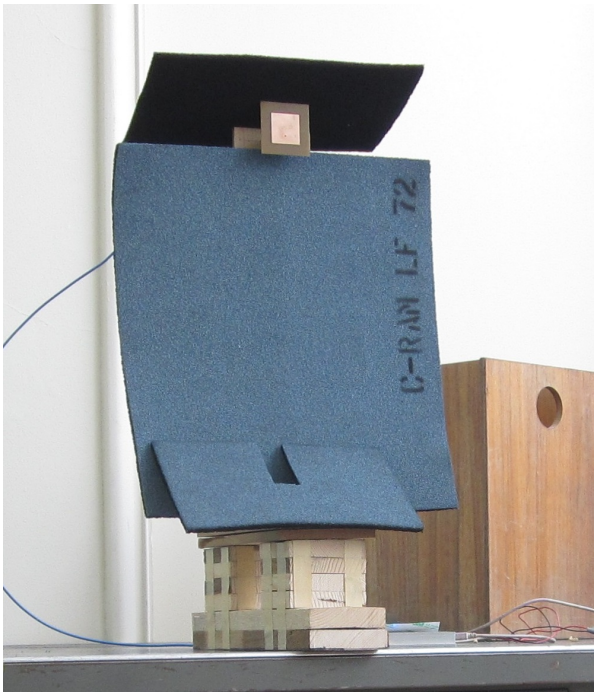


Figura 4.11: Configuración para caracterizar el patrón de radiación.

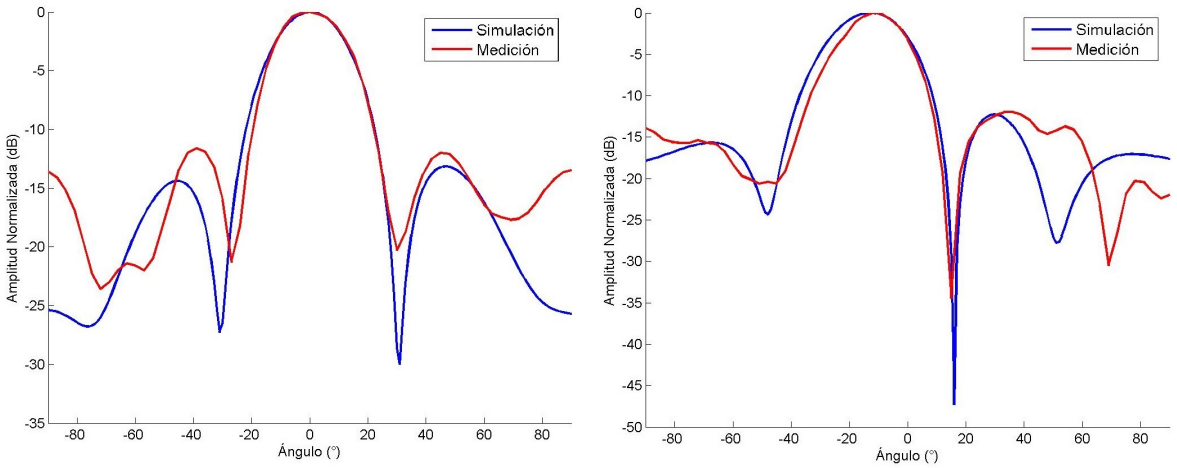


(a) Antena emisora tipo patch, igual a un elemento del arreglo.

(b) Arreglo de antenas en dirección a la antena emisora. Por debajo se encuentra el sistema de rotación.

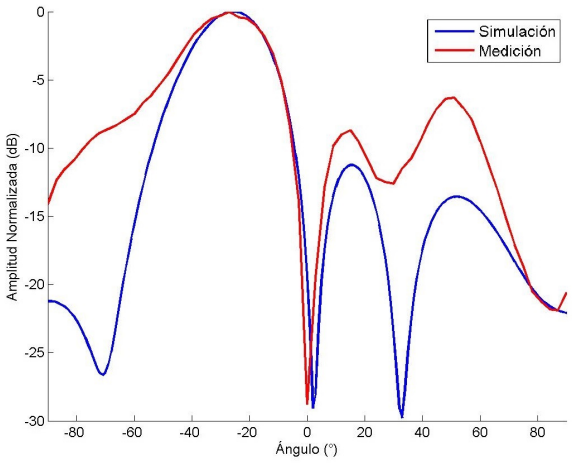
Figura 4.12: Antena emisora y el arreglo de antenas posicionados sobre mesas separadas.

En la Figura 4.12b se puede notar que el arreglo se cubre con un material absorbente para evitar recibir las emisiones generadas por las reflexiones de las paredes de la habitación. Con la antena emitiendo y la placa electrónica alimentada eléctricamente se procede a medir el patrón de radiación. Para esto se fijan las fases de las antenas según la ecuación (2.5) para dirigir el haz de radiación en un ángulo deseado, luego se gira la base del arreglo desde $-90°$ hasta $90°$ con pasos de $3°$ y se mide la potencia promedio recibida en el analizador de espectro. Los ángulos elegidos para la dirección son $0°$, $-15°$, $-30°$ y $-45°$ Las mediciones se muestran en la Figura 4.13, donde se comparan los valores medidos con las simulaciones realizadas en el software HFSS. Las fases y magnitudes de las antenas usadas en la simulación corresponden a las medidas con el analizador de redes vectorial para hacer la comparación lo más fidedigna posible.

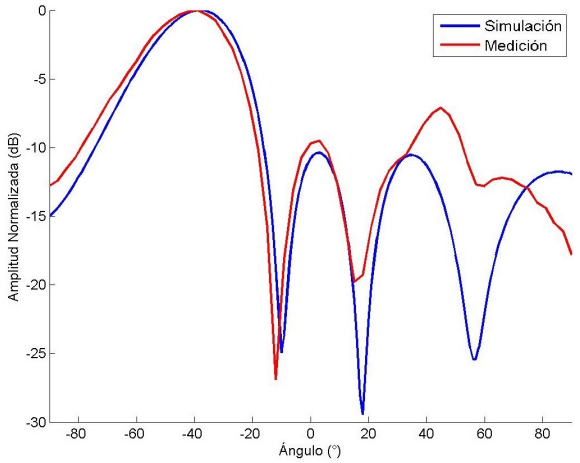


(a) Patrón de radiación para el haz girado en $0°$.

(b) Patrón de radiación para el haz girado en $15°$.



(c) Patrón de radiación para el haz girado en $30°$.

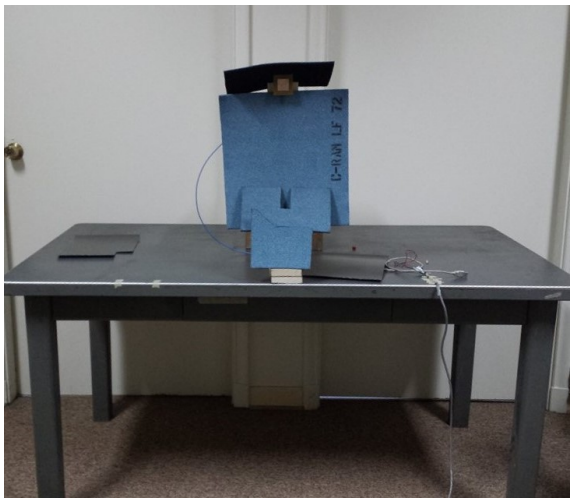


(d) Patrón de radiación para el haz girado en $45°$.

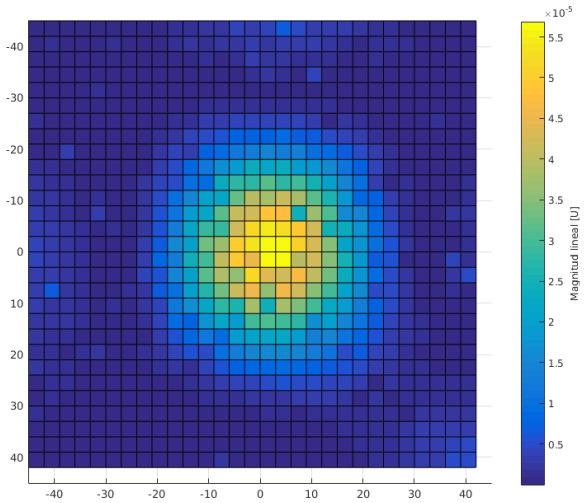
Figura 4.13: Mediciones del patrón de radiación.

4.5. Primeras imagenes electromagnéticas

La parte más importante de este trabajo es generar una imagen con la emisión electromagnética. Para alcanzar este objetivo se usa la misma configuración utilizada para medir el patrón de radiación con la diferencia de que el arreglo de antenas se encuentra orientado en una dirección física constante y se modifica la fase de las antenas para medir la potencia en distintas direcciones. Se realiza una medición con el emisor frente al arreglo de antenas y otra medición con el emisor trasladado hacia la izquierda con respecto al arreglo de antenas. Los datos tomados corresponden a una matriz de 31×31, donde se ha elegido un paso de $3°$ en ambas direcciones, generando un mapa que va desde los $-45°$ hasta los $45°$ en ambos ejes. La toma de datos de cada medida toma alrededor de 5 minutos. Estos resultados se pueden observar en las Figuras 4.14a y 4.14b para la antena posicionada al frente y en las Figuras 4.15a y 4.15b para la antena trasladada.

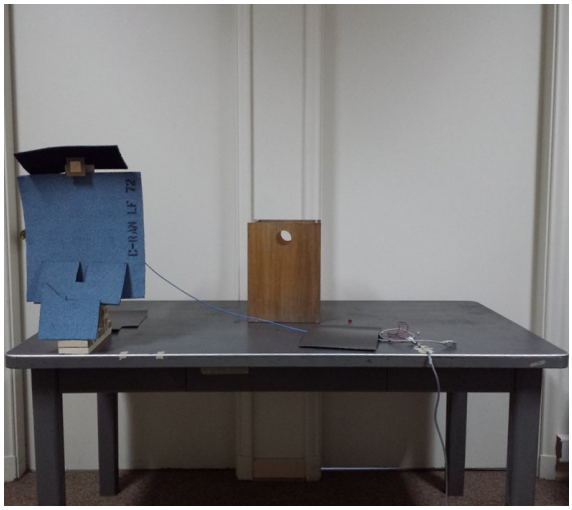


(a) Imagen con la posición de la fuente centrada.

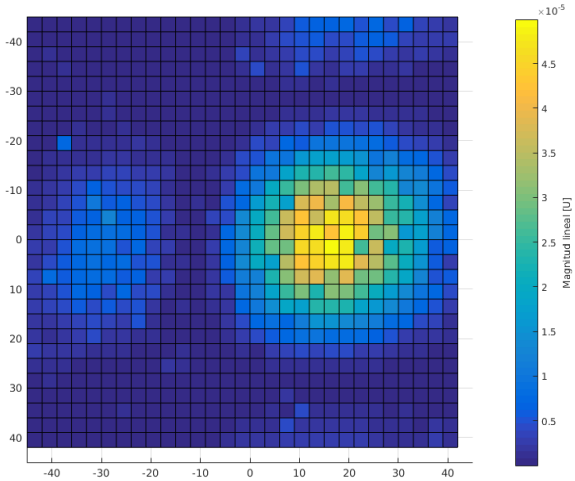


(b) Imagen electromagnética con la fuente centrada.

Figura 4.14: Mediciones con la fuente en el centro.



(a) Imagen con la ubicación de la fuente trasladada.



(b) Imagen electromagnética con la fuente trasladada.

Figura 4.15: Mediciones con la fuente a un costado.

Capítulo 5

Análisis de resultados

En este capítulo se presenta un análisis extensivo de los resultados obtenidos en la implementación.

5.1. Patrón de radiación

De la Figura 4.13a se puede observar que gran parte del patrón medido se asemeja bastante con la simulación realizada. A excepción del *side lobe* izquierdo que se encuentra levemente trasladado. Este lóbulo lateral del patrón trasladado puede deberse a la difracción generada por la apertura utilizada para proteger el arreglo de antenas de las reflexiones que se producen en las paredes y objetos existentes en la pieza.

De las Figuras 4.13b, 4.13c y4.13d se ve que el lóbulo principal se encuentra levemente trasladado, aproximadamente en 2°, lo que puede deberse a dos razones. Primero que la ecuación utilizada para cambiar la fase de cada antena se aproximó en el *software*. Otra razón es el hecho de que los datos obtenidos para cada modulador vectorial son obtenidos usando una aproximación para completar la tabla de datos. Por otra parte, se aprecia que el lóbulo lateral más distante al principal es mayor al esperado. Esto es debido a que las condiciones de medición no son perfectas debido a que la habitación no se encuentra completamente aislada electromagnéticamente por lo que existen reflexiones que son recibidas por el arreglo de antenas. De aquí se desprende que cuando se esté orientando el patrón en direcciones mayores o iguales a 30° pueden aparecer reflexiones que contaminan la imagen final lo que genera falsas fuentes de emisión electromagnética. Para solucionar esto se debe investigar sobre un método de procesamiento que permita extraer el patrón de radiación de la medición. Además, es necesario realizar estas mediciones nuevamente en un ambiente mejor controlado para poder determinar la real causa de la diferencia de fase del patrón obtenido y el simulado.

5.2. Imagen electromagnética

De las Figuras 4.14b y 4.15b se puede notar que los resultados son los esperados, se obtiene una imagen de la emisión electromagnética donde se puede apreciar fácilmente el origen de la fuente. Además, se observa en la Figura 4.15b que la imagen obtenida a través del arreglo se encuentra invertida, ya que la fuente fue trasladada hacia la izquierda pero el patrón se trasladó hacia la derecha. Por otra parte, una prueba rápida mostró que en el eje vertical también se encuentra invertida la imagen óptica con la imagen electromagnética. Por tanto se debe corregir por *software* para obtener la imagen en la misma orientación que el lugar medido. Además, se puede ver un pequeño conjunto de puntos que sobresale, esto corresponde al hecho de que el patrón de radiación presenta un lóbulo lateral que sobresale y contamina la imagen con las reflexiones de la pieza, como se menciona en la sección anterior. Como la imagen se contamina de fuentes no existentes esto puede resultar en una detección ficticia al momento de querer localizar un teléfono celular. Por otra parte, debido al ancho del patrón de radiación, si dos dispositivos móviles se encuentran lo suficientemente cerca, la imagen electromagnética puede resultar en una sola fuente de emisión. Con esto no se podría distinguir entre dos celulares en el mismo lugar.

Capítulo 6

Conclusiones

6.1. Conclusiones

En esta memoria se presentaron las pruebas realizadas a cada uno de los elementos utilizados en el diseño e implementación de un prototipo funcional que es capaz de generar una imagen electromagnética. Con esto se puede visualizar la emisión proveniente de teléfonos celulares en un lugar determinado.

Gran parte de los componentes que fueron usados funcionan de manera correcta y como se indica en su respectiva hoja de datos, a excepción del modulador vectorial que funciona con distintos parámetros de los indicados según el proveedor. Esto se debe a leves diferencias de construcción entre cada dispositivo y además del cuidado que se tiene al montarlo en la placa electrónica correspondiente.

La placa electrónica fue diseñada cumpliendo los requerimientos necesarios para todos sus componentes electrónicos. Fue enviada a construir a un fabricante extranjero y montada en las instalaciones de Observatorio Astronómico Nacional, resultando en un trabajo hecho en gran parte en Chile. La caracterización de esta placa se realiza para los 16 moduladores vectoriales que incorpora, con esto se pueden calibrar los valores de magnitud y fase para cada uno de tal manera de crear un patrón de radiación correcto.

Se midieron los patrones de radiación para algunos ángulos del arreglo utilizando una fuente continua de emisión a $1{,}88GHz$. Estos ángulos fueron fijados de forma eléctrónica y para algunos se miden comportamientos inadecuados en el patrón de radiación, como la aparición de lóbulos laterales no deseados.

Se generaron la primeras imágenes electromagnéticas de la fuente continua fijando la fase de las antenas en distintos ángulos para poder barrer el espacio que se encuentra frente al arreglo. En las imágenes se puede ver claramente la dirección en la que se encuentra la fuente. Por otra parte, en una de las imágenes aparece una fuente fantasma que puede deberse a las condiciones de medición en el lugar. El prototipo toma alrededor de 5 minutos en lograr construir esta imagen.

6.2. Trabajo futuro

Como trabajo futuro a realizar en este proyecto se encuentra:

- Mejorar las condiciones de medición para el arreglo de antenas. Para ello se buscará información sobre lugares dentro del país (con en la Universidad Técnica Federico Santa María ubicada en Valparaíso) que estén al alcance y posean una cámara anecoica adecuada para la medición en la frecuencia de trabajo de este proyecto.
- Disminuir el tiempo necesario para generar la imagen electromagnética. Actualmente el tiempo requerido es de alrededor de 5 minutos para obtener una grilla de 31×31 puntos. Para lograrlo se reemplazará la electrónica digital actual por otros componentes que posean un tiempo de respuesta menor. Se estima que el tiempo se puede disminuir al menos hasta 30 segundos.
- Integrar en el diseño y utilizar un conversor análogo-digital para poder leer los datos desde la Raspberry Pi.
- Reemplazar los moduladores vectoriales debido a que la diferencia de desempeño entre cada uno varía demasiado. Además, cada modulador consume una corriente $84,00[mA]$, con lo que al ser 16 moduladores se alcanza un consumo de $1,34[A]$ y una potencia disipada aproximada de $10,72[W]$, lo que es mucho para un dispositivo portable. Para esto se está viendo la posibilidad de utilizar un desfasador digital que consume alrededor de $130\mu A$ a $5V$, cuyo modelo es el **PE44820** de la empresa Peregrine Semiconductor.
- Integrar el *software* encargado de detectar las fuentes de emisión. Este coloca en la imagen de video un marcador para indicar la dirección de la emisión. Este *software*, realizado por los alumnos *Daniel Albornoz* y *Daniel Köbrich*, ya se encuentra listo pero debe ser integrado de manera eficiente al trabajo presentado en esta tesis.
- Realizar un diseño más compacto del conjunto total de elementos, incluyendo el arreglo de antenas, electrónica, unidad de procesamiento y batería. De esta manera se podrá construir un equipo que sea cómodo de transportar y fácil de utilizar.

Bibliografía

[1] Analog Devices. *HMC631LP3, GaAs HBT Vector Modulator 1.8 - 2.7 GHz*, 10 2007. v00.

[2] Constantine A. Balanis. *Antenna theory: Analysis and design*. John Wiley & Sons, 2005.

[3] J. Q. Howell. Microstrip antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, pages 90–93, 1972.

[4] Linear Technology. *LT5538, 40MHz to 3.8GHz RF Power Detector with 75dB Dynamic Range*, 4 2008.

[5] Maxim Integrated. *DS3930, Hex Nonvolatile Potentiometer with I/O and Memory*, 4 2003. Rev. 0.

[6] Clayton R. Paul and Syed A. Nasar. *Introduction to electromagnetic fields*. McGraw-Hill, 1987.

[7] David M. Pozar. *Microwave engineering*. John Wiley & Sons, 2009.

[8] Viewtool. *VTG200A, Ginkgo USB-I2C Adapter User Manual v1.1*, 2015.

[9] John L. Volakis. *Antenna Engineering Handbook*. McGraw-Hill, 2007.

Anexos

Apéndice A

Esquemáticos

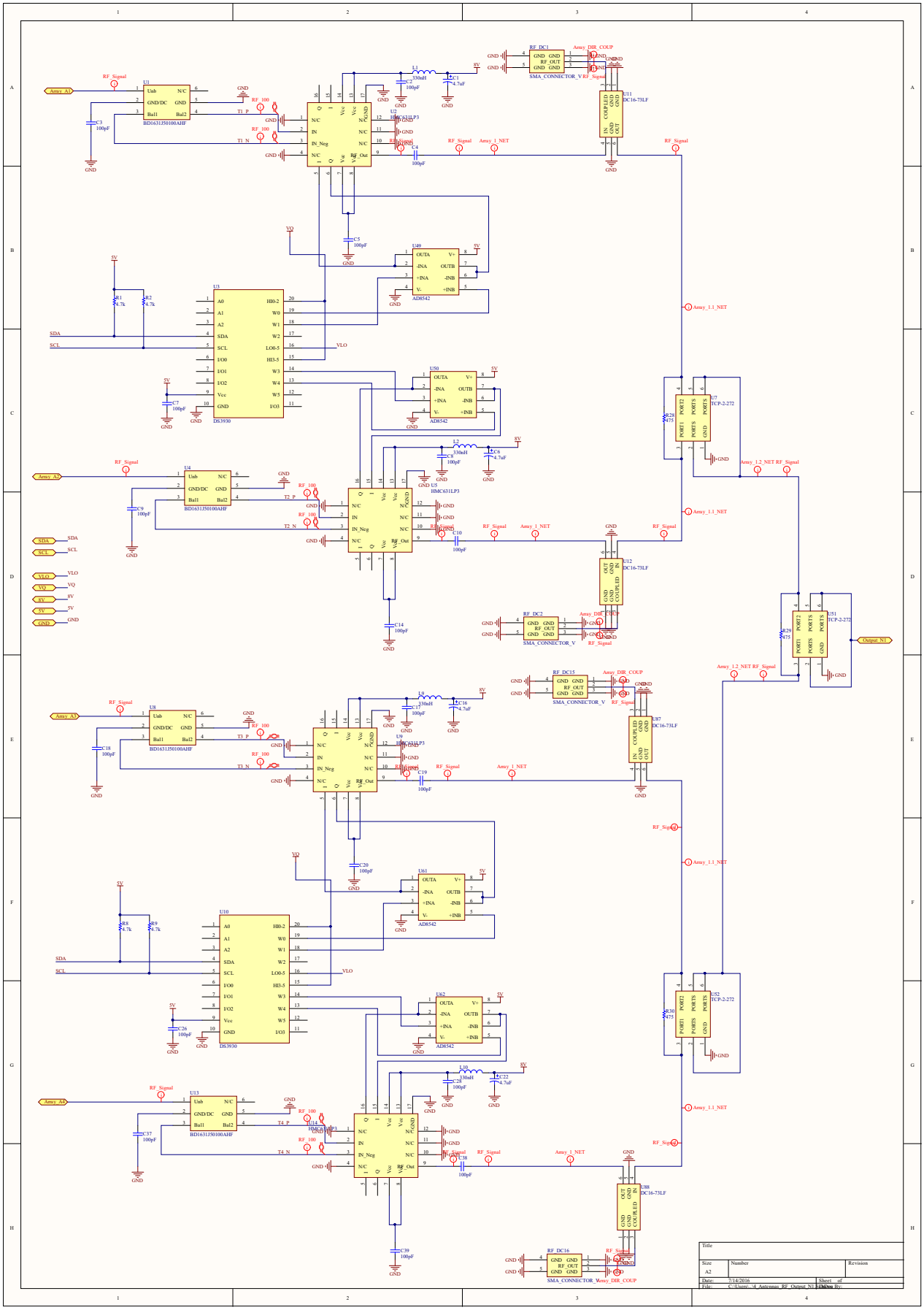


Figura A.1: Esquemático - Antenas 1 a 4

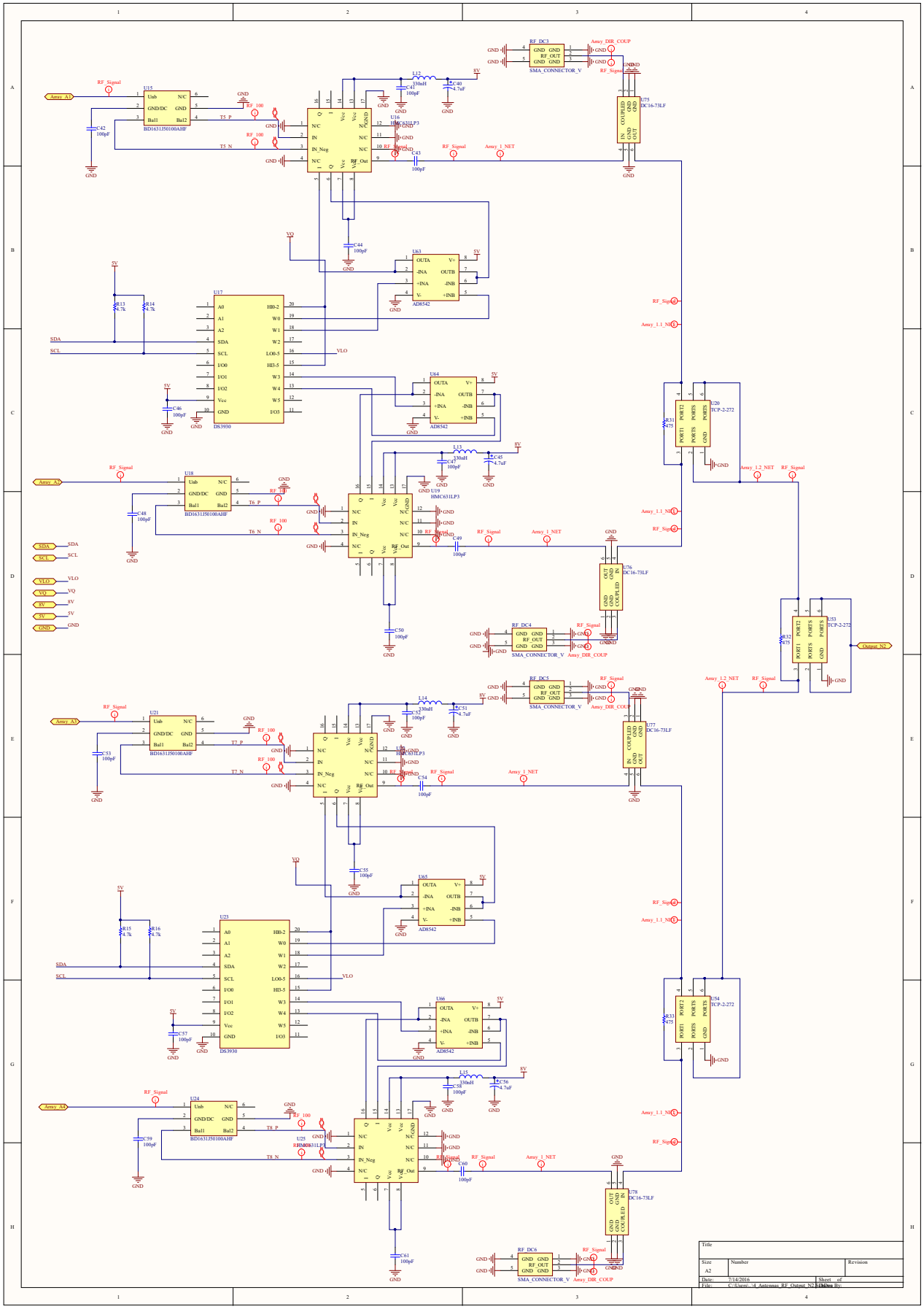


Figura A.2: Esquemático - Antenas 5 a 8

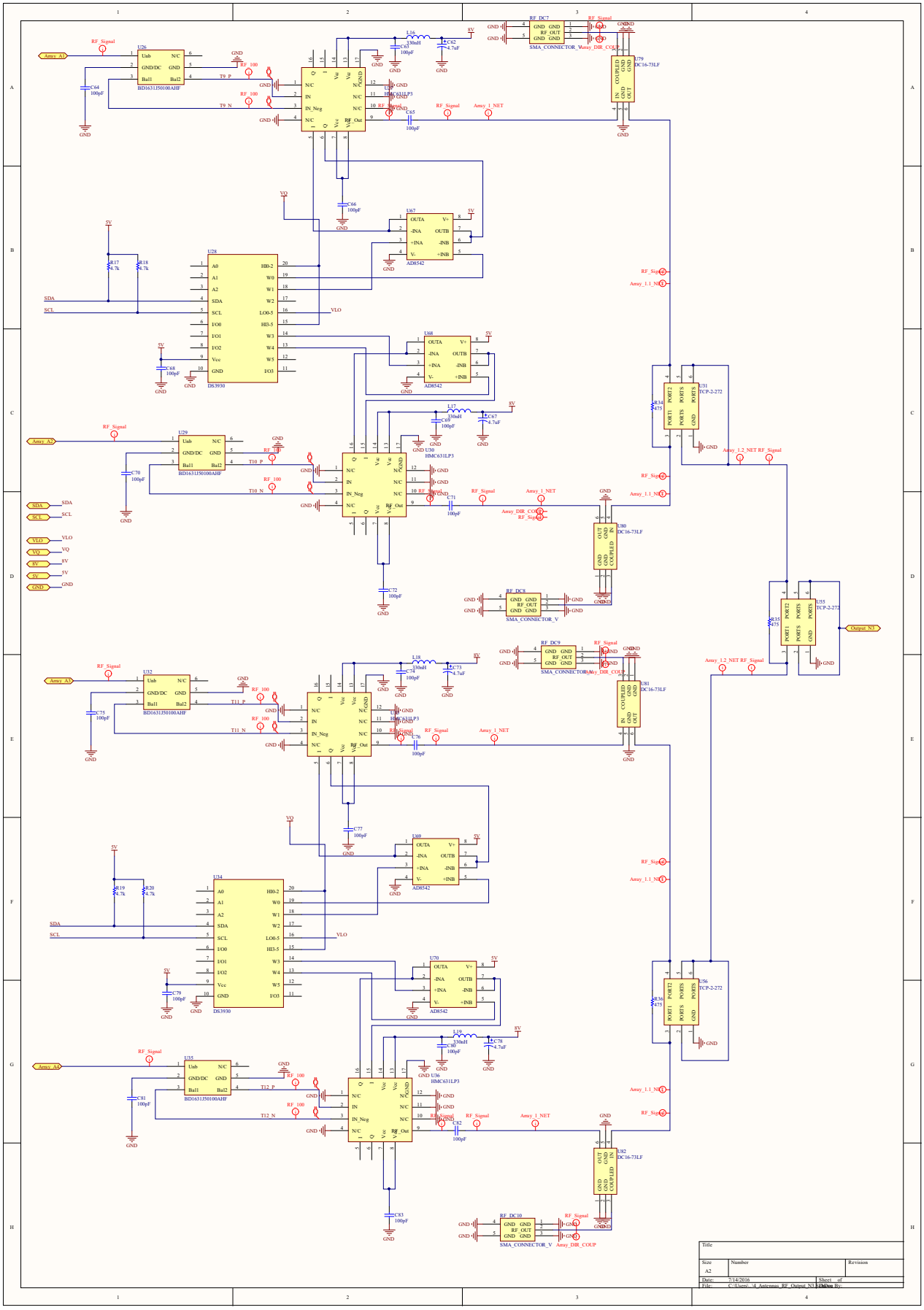


Figura A.3: Esquemático - Antenas 9 a 12

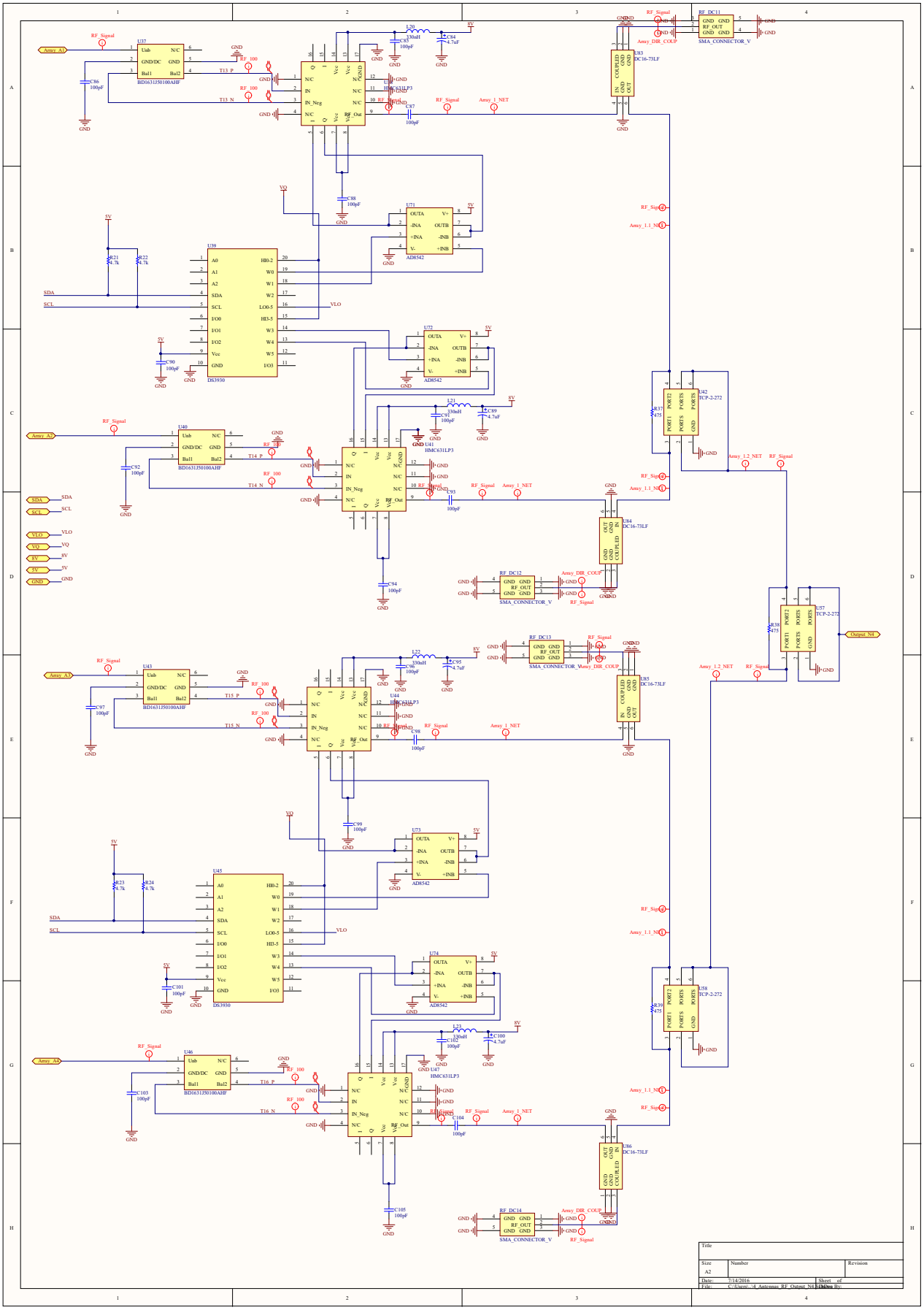


Figura A.4: Esquemático - Antenas 13 a 16

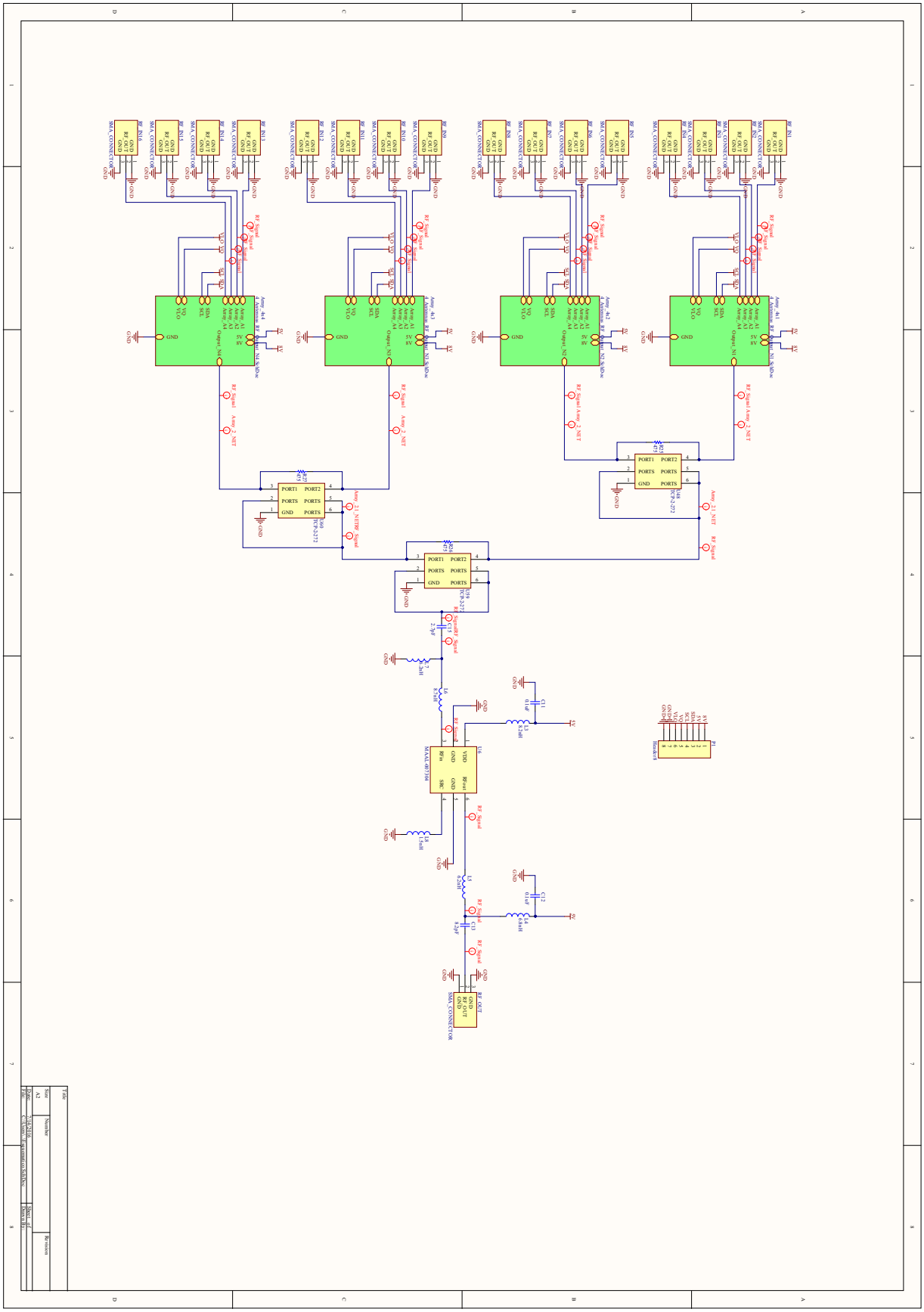
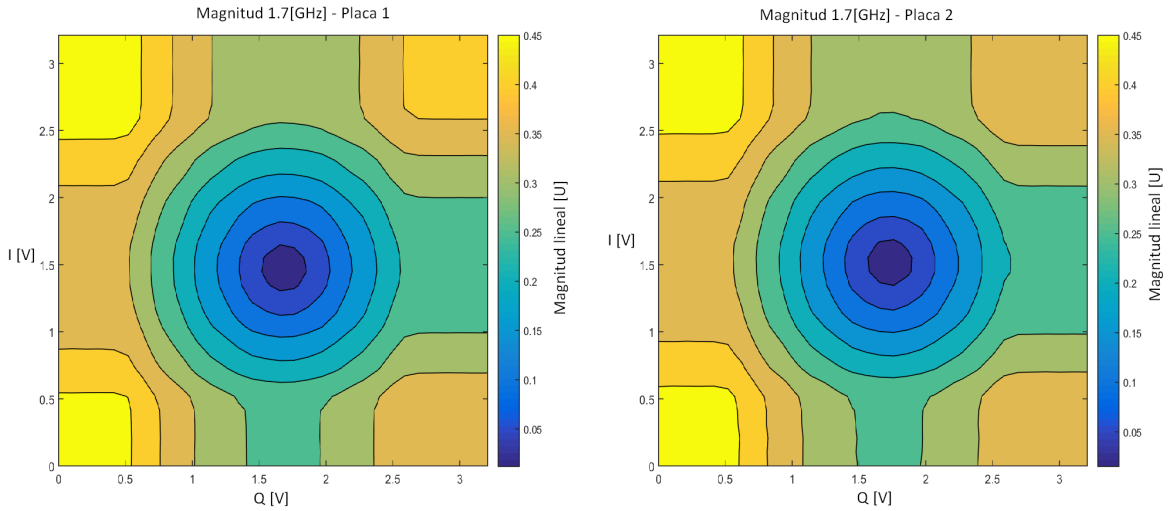


Figura A.5: Esquemático - Suma de todas las antenas, amplificador y salida

Apéndice B

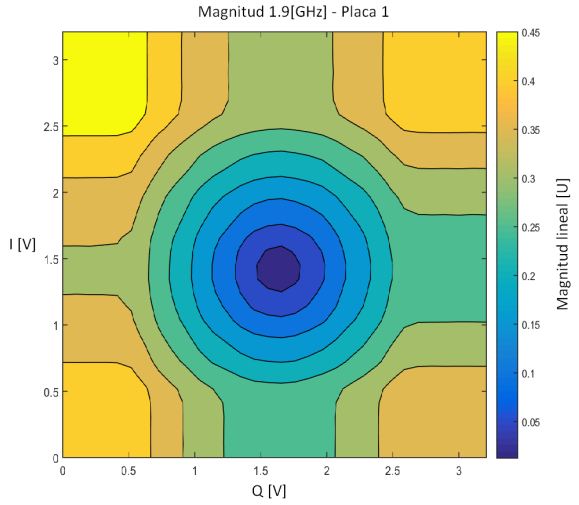
Mediciones para el modulador vectorial - Magnitud



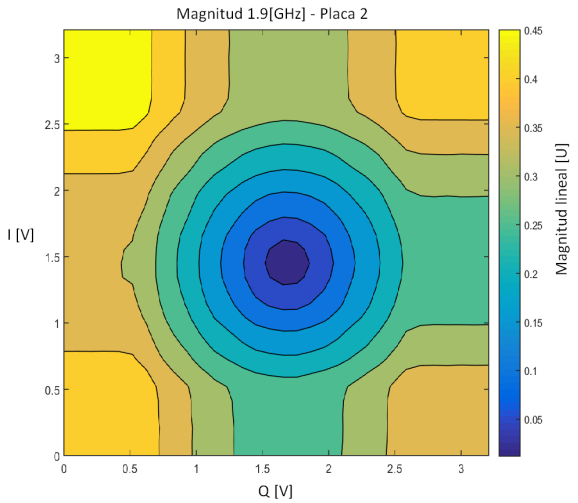
(a) Magnitud modulador vectorial placa 1 a 1.7[GHz]

(b) Magnitud modulador vectorial placa 2 a 1.7[GHz]

Figura B.1: Comparación magnitud placa 1 y placa 2 a 1.7[GHz]

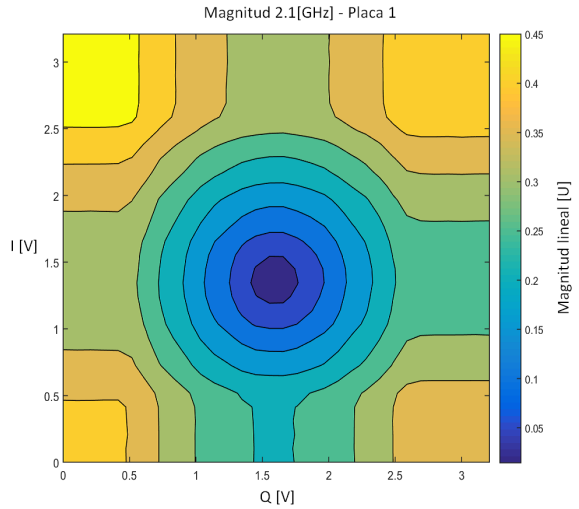


(a) Magnitud modulador vectorial placa 1 a 1.9$[GHz]$

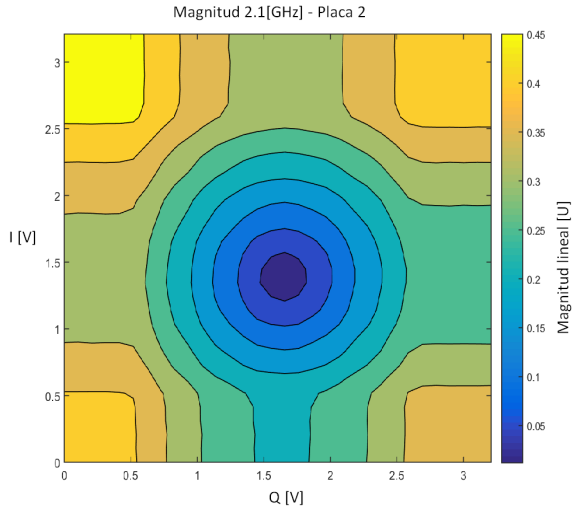


(b) Magnitud modulador vectorial placa 2 a 1.9$[GHz]$

Figura B.2: Comparación magnitud placa 1 y placa 2 a 1.9$[GHz]$

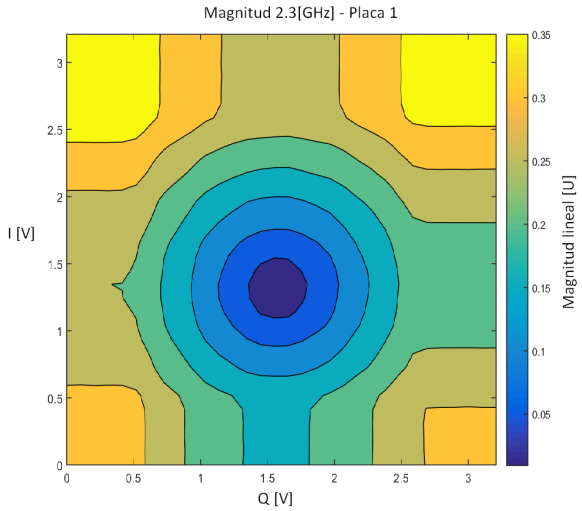


(a) Magnitud modulador vectorial placa 1 a 2.1$[GHz]$

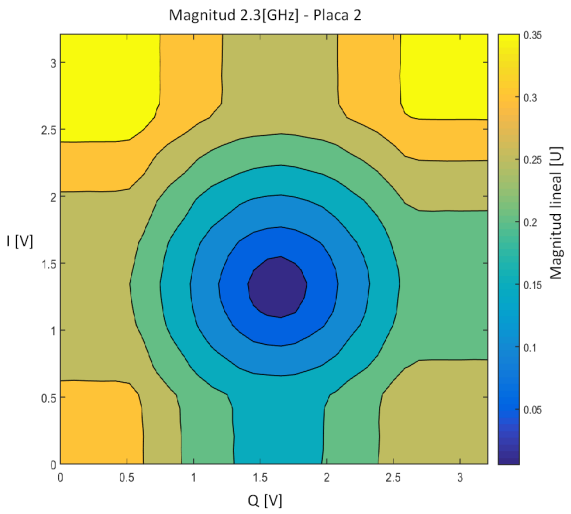


(b) Magnitud modulador vectorial placa 2 a 2.1$[GHz]$

Figura B.3: Comparación magnitud placa 1 y placa 2 a 2.1$[GHz]$

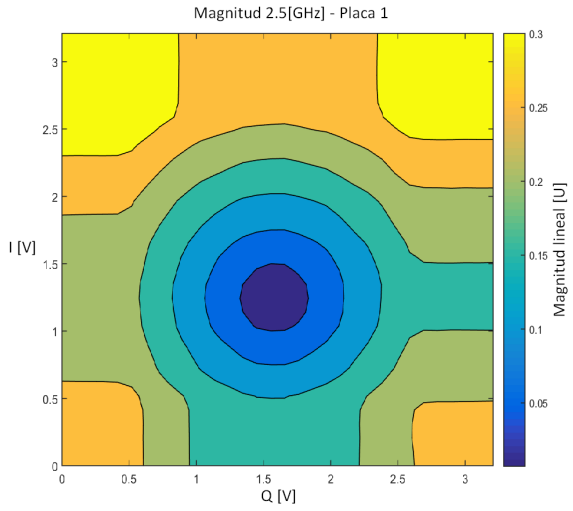


(a) Magnitud modulador vectorial placa 1 a 2.3$[GHz]$

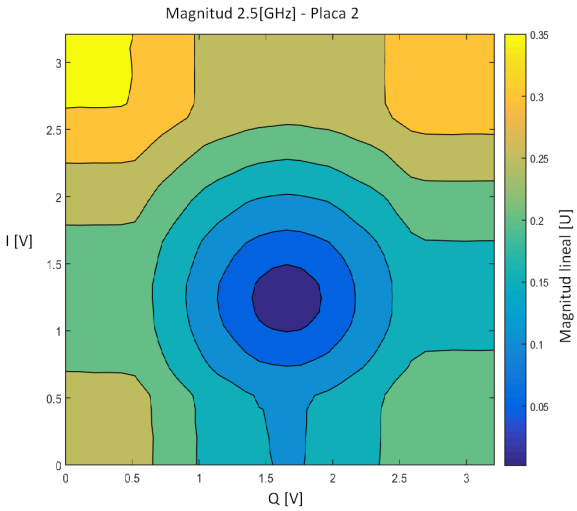


(b) Magnitud modulador vectorial placa 2 a 2.3$[GHz]$

Figura B.4: Comparación magnitud placa 1 y placa 2 a 2.3$[GHz]$

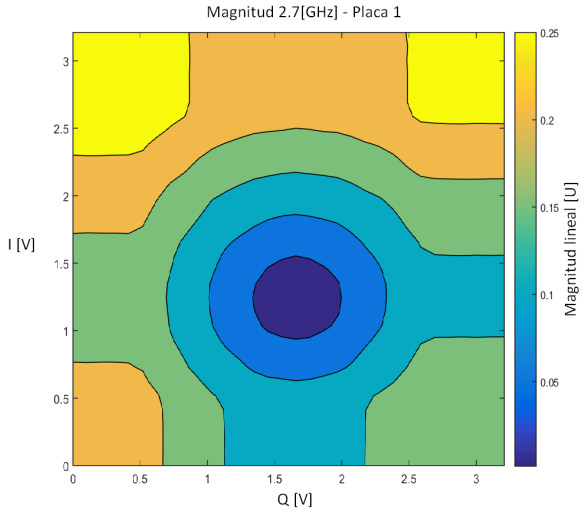


(a) Magnitud modulador vectorial placa 1 a 2.5$[GHz]$

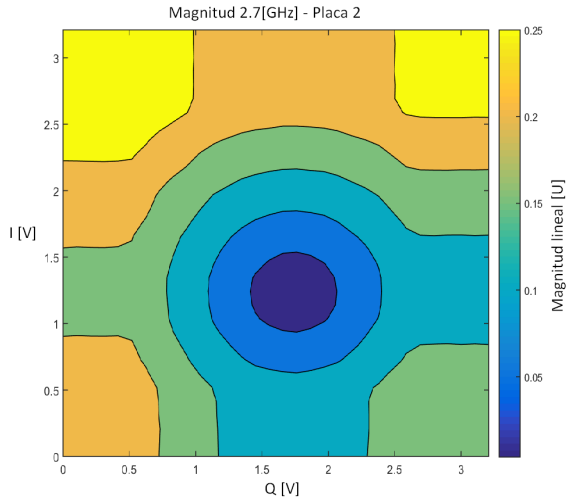


(b) Magnitud modulador vectorial placa 2 a 2.5$[GHz]$

Figura B.5: Comparación magnitud placa 1 y placa 2 a 2.5$[GHz]$

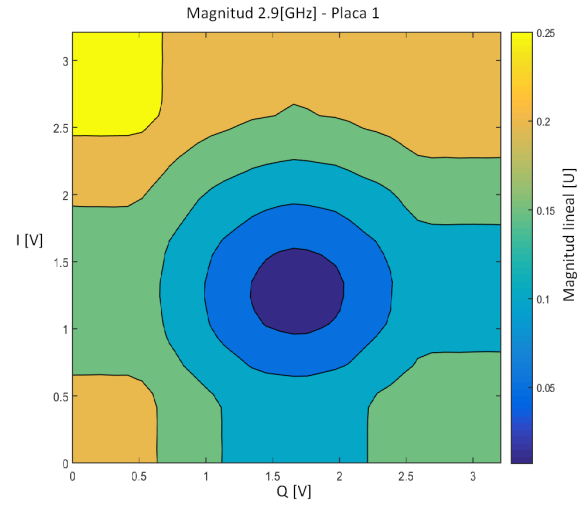


(a) Magnitud modulador vectorial placa 1 a 2.7$[GHz]$

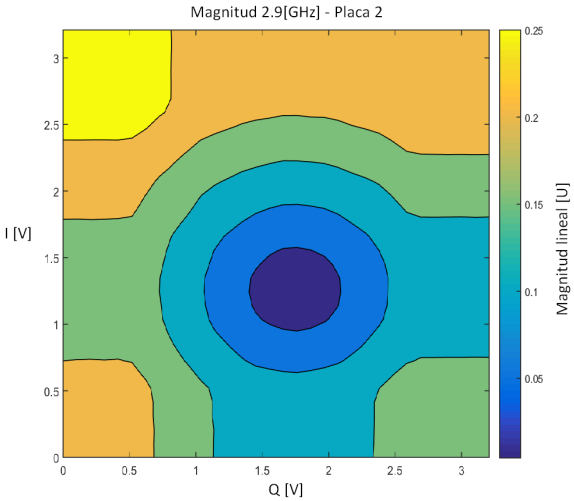


(b) Magnitud modulador vectorial placa 2 a 2.7$[GHz]$

Figura B.6: Comparación magnitud placa 1 y placa 2 a 2.7$[GHz]$



(a) Magnitud modulador vectorial placa 1 a 2.9$[GHz]$

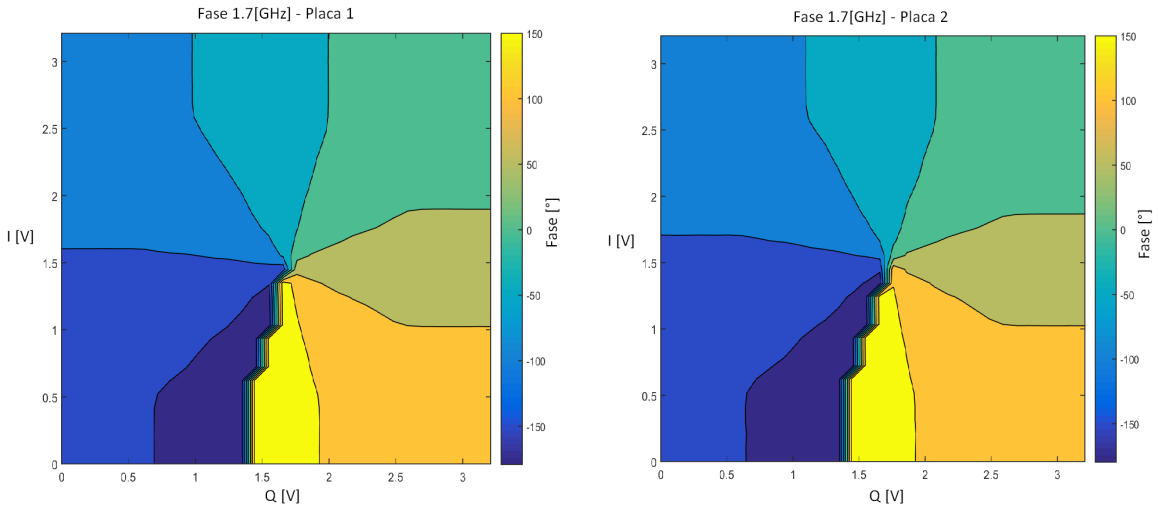


(b) Magnitud modulador vectorial placa 2 a 2.9$[GHz]$

Figura B.7: Comparación magnitud placa 1 y placa 2 a 2.9$[GHz]$

Apéndice C

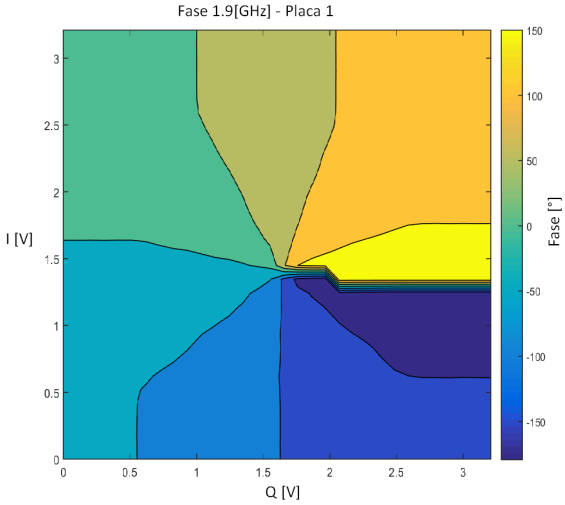
Mediciones para el modulador vectorial - Fase



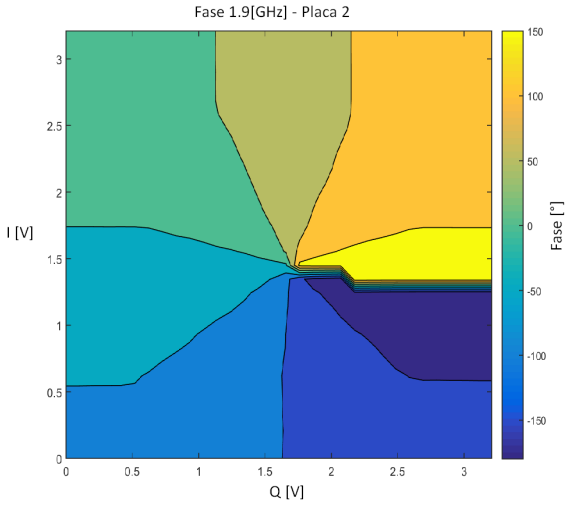
(a) Fase modulador vectorial placa 1 a $1.7[GHz]$

(b) Fase modulador vectorial placa 2 a $1.7[GHz]$

Figura C.1: Comparación fase placa 1 y placa 2 a $1.7[GHz]$

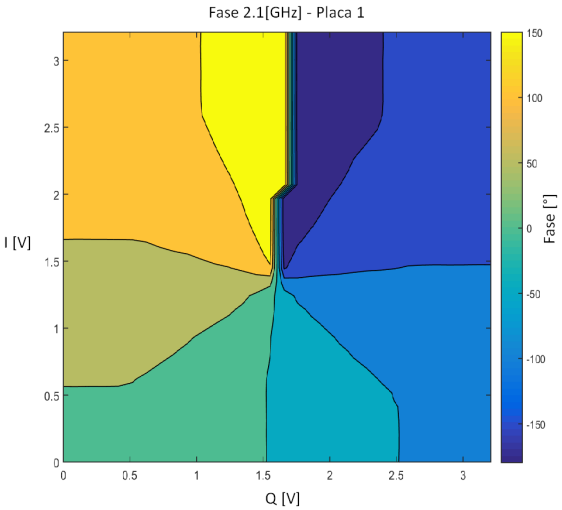


(a) Fase modulador vectorial placa 1 a 1.9$[GHz]$

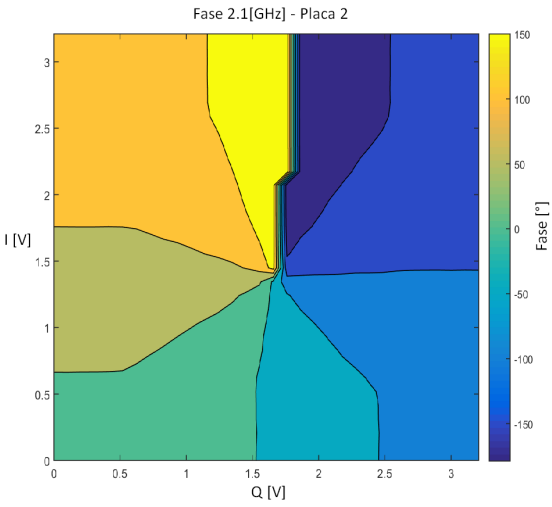


(b) Fase modulador vectorial placa 2 a 1.9$[GHz]$

Figura C.2: Comparación fase placa 1 y placa 2 a 1.9$[GHz]$

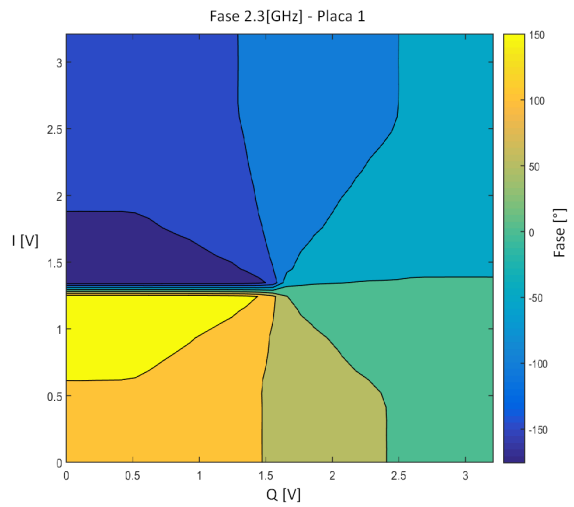


(a) Fase modulador vectorial placa 1 a 2.1$[GHz]$

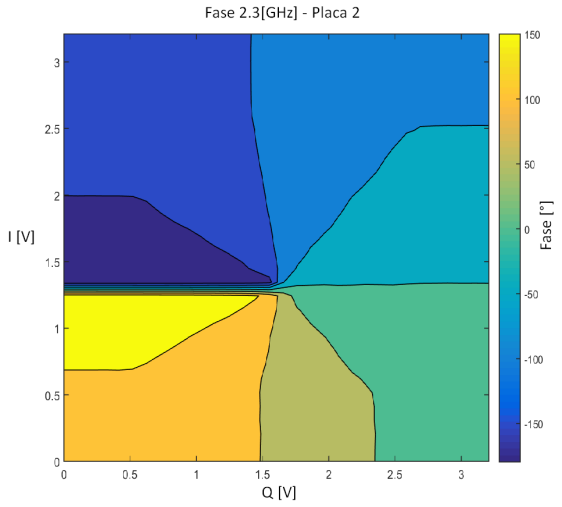


(b) Fase modulador vectorial placa 2 a 2.1$[GHz]$

Figura C.3: Comparación fase placa 1 y placa 2 a 2.1$[GHz]$

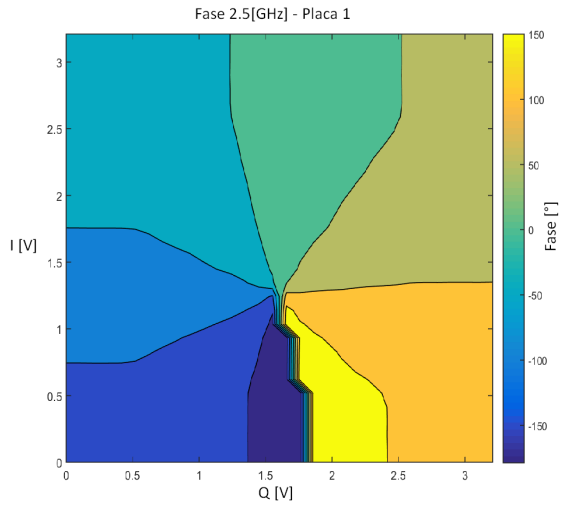


(a) Fase modulador vectorial placa 1 a 2.3$[GHz]$

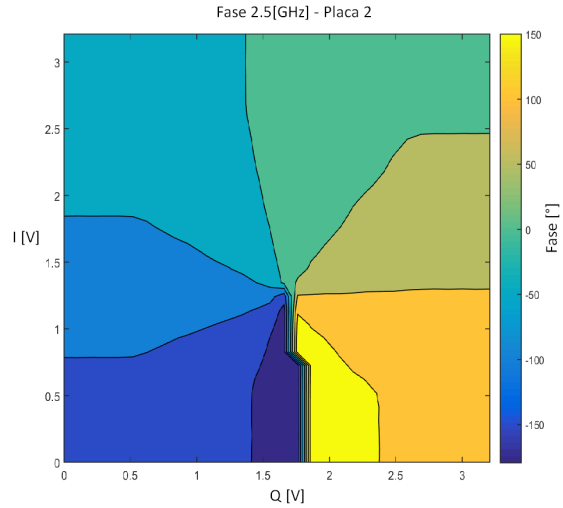


(b) Fase modulador vectorial placa 2 a 2.3$[GHz]$

Figura C.4: Comparación fase placa 1 y placa 2 a 2.3$[GHz]$

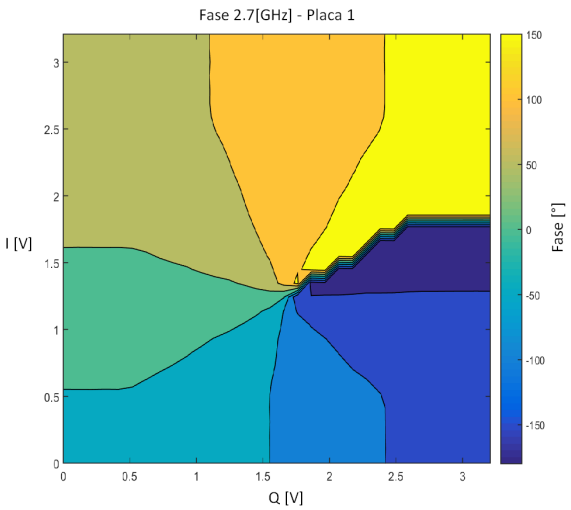


(a) Fase modulador vectorial placa 1 a 2.5$[GHz]$

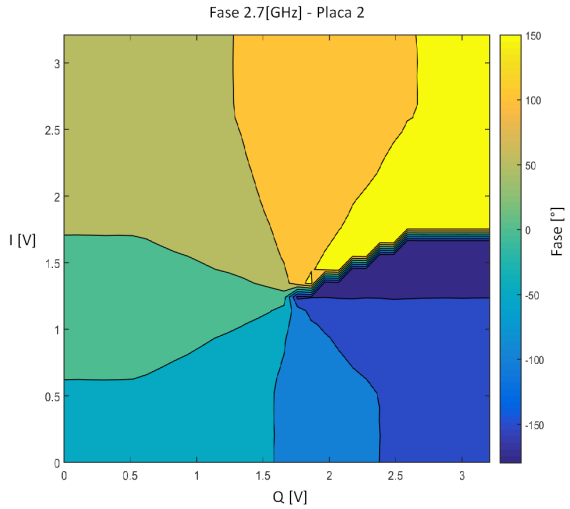


(b) Fase modulador vectorial placa 2 a 2.5$[GHz]$

Figura C.5: Comparación fase placa 1 y placa 2 a 2.5$[GHz]$

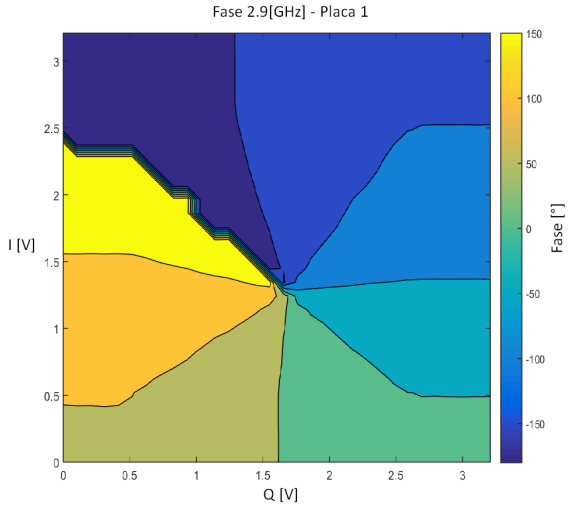


(a) Fase modulador vectorial placa 1 a 2.7[GHz]

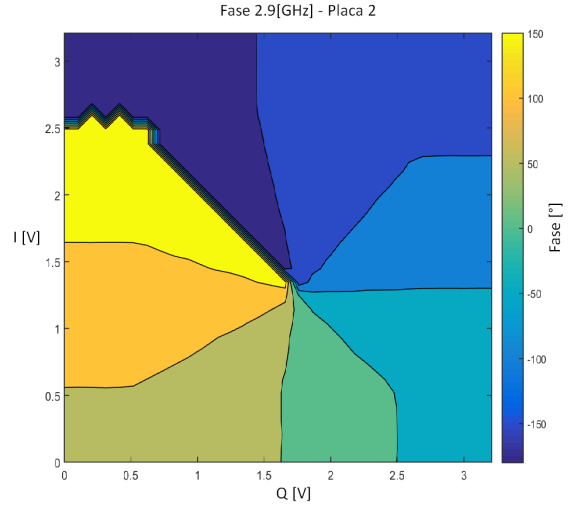


(b) Fase modulador vectorial placa 2 a 2.7[GHz]

Figura C.6: Comparación fase placa 1 y placa 2 a 2.7[GHz]



(a) Fase modulador vectorial placa 1 a 2.9[GHz]

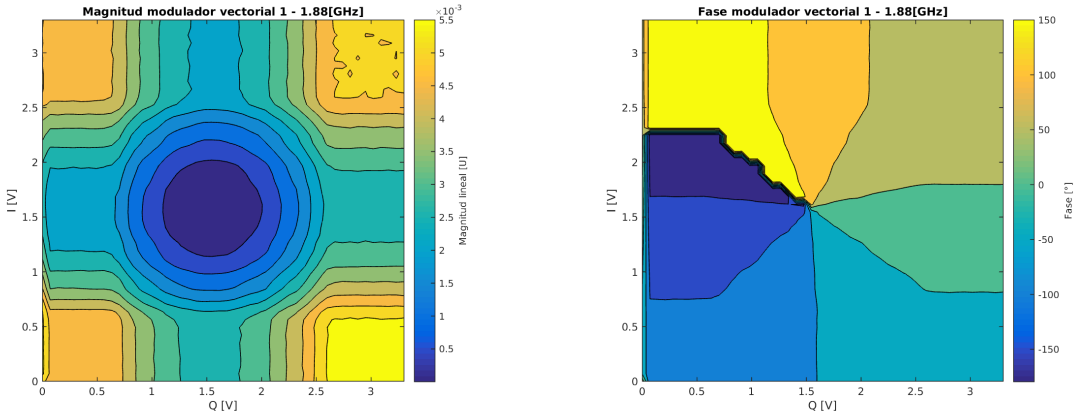


(b) Fase modulador vectorial placa 2 a 2.9[GHz]

Figura C.7: Comparación fase placa 1 y placa 2 a 2.9[GHz]

Apéndice D

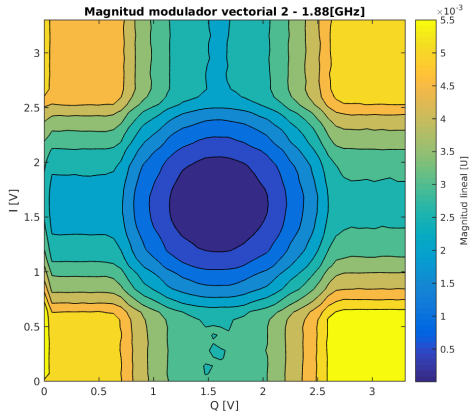
Caracterización placa electrónica



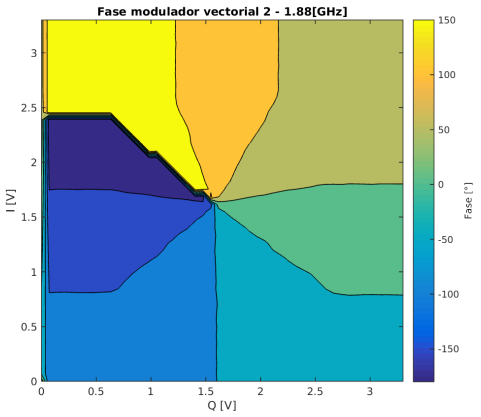
(a) Magnitud del modulador vectorial 1 para 1.88[GHz]

(b) Fase del modulador vectorial 1 para 1.88[GHz]

Figura D.1: Medición modulador vectorial 1

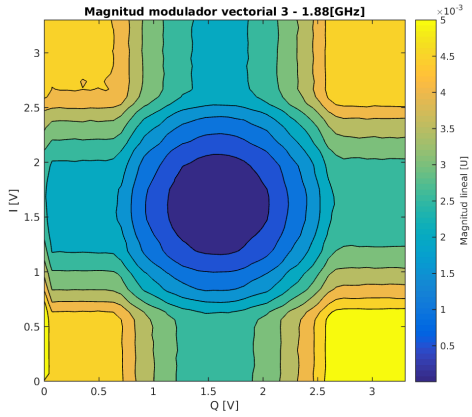


(a) Magnitud del modulador vectorial 2 para 1.88$[GHz]$

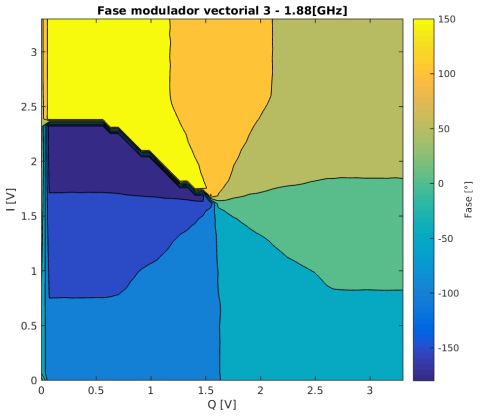


(b) Fase del modulador vectorial 2 para 1.88$[GHz]$

Figura D.2: Medición modulador vectorial 2

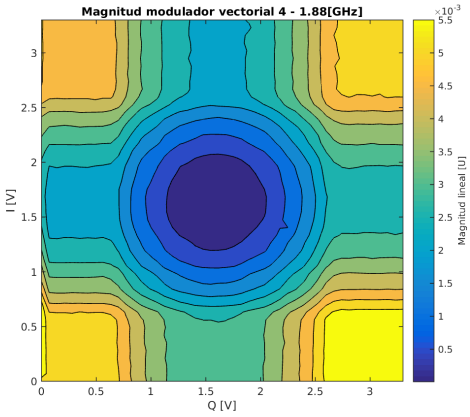


(a) Magnitud del modulador vectorial 3 para 1.88$[GHz]$

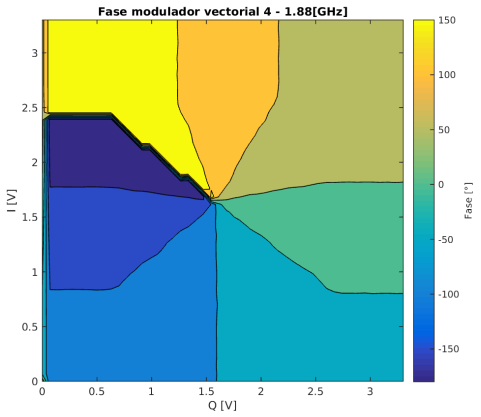


(b) Fase del modulador vectorial 3 para 1.88$[GHz]$

Figura D.3: Medición modulador vectorial 3

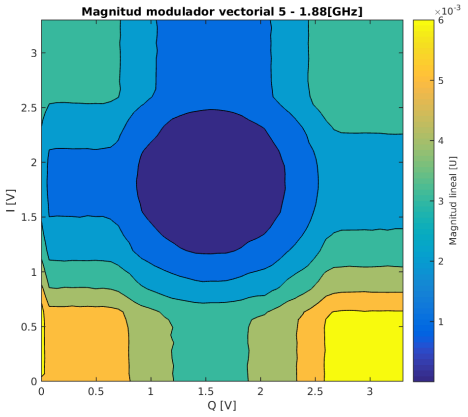


(a) Magnitud del modulador vectorial 4 para 1.88[GHz]

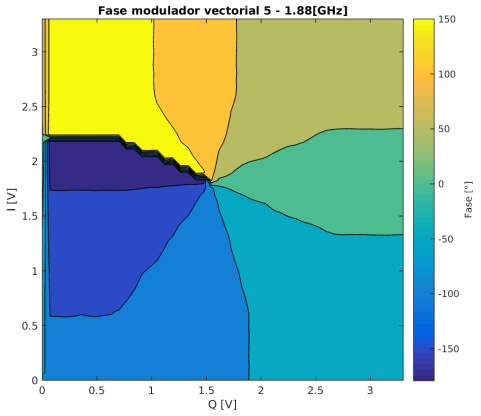


(b) Fase del modulador vectorial 4 para 1.88[GHz]

Figura D.4: Medición modulador vectorial 4

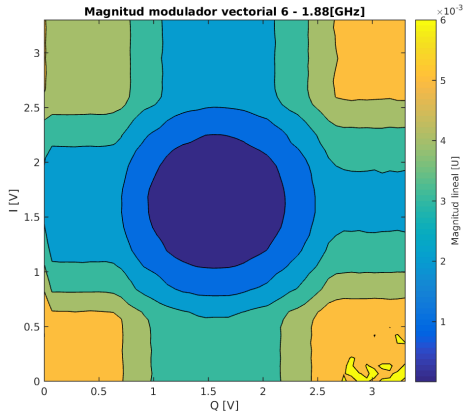


(a) Magnitud del modulador vectorial 5 para 1.88[GHz]

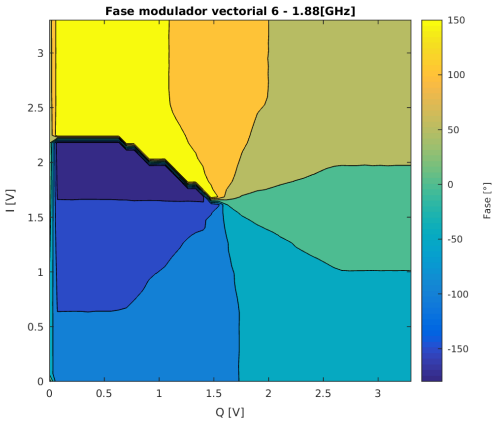


(b) Fase del modulador vectorial 5 para 1.88[GHz]

Figura D.5: Medición modulador vectorial 5

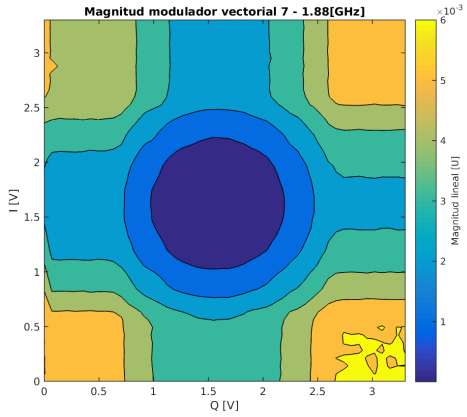


(a) Magnitud del modulador vectorial 6 para $1.88[GHz]$

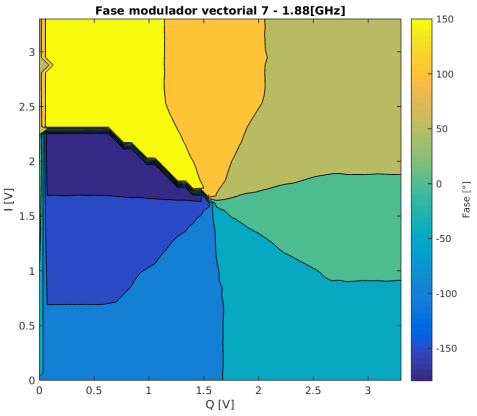


(b) Fase del modulador vectorial 6 para $1.88[GHz]$

Figura D.6: Medición modulador vectorial 6

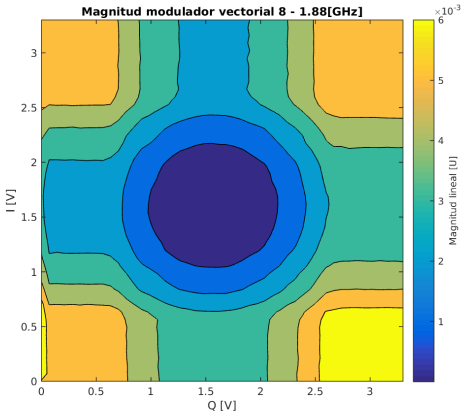


(a) Magnitud del modulador vectorial 7 para $1.88[GHz]$

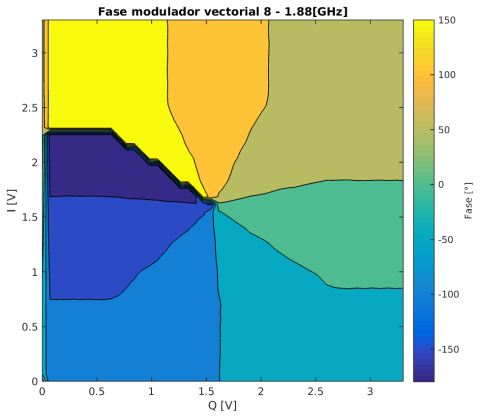


(b) Fase del modulador vectorial 7 para $1.88[GHz]$

Figura D.7: Medición modulador vectorial 7

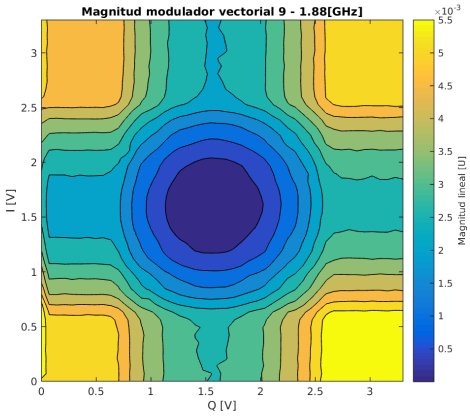


(a) Magnitud del modulador vectorial 8 para $1.88[GHz]$

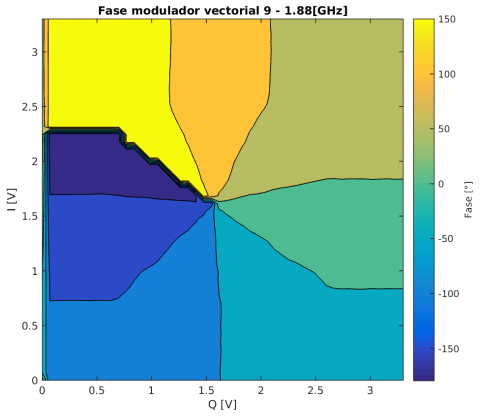


(b) Fase del modulador vectorial 8 para $1.88[GHz]$

Figura D.8: Medición modulador vectorial 8

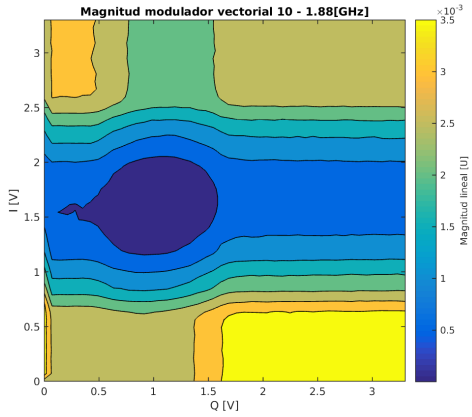


(a) Magnitud del modulador vectorial 9 para $1.88[GHz]$

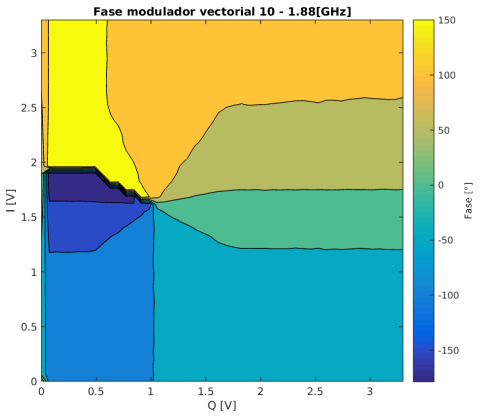


(b) Fase del modulador vectorial 9 para $1.88[GHz]$

Figura D.9: Medición modulador vectorial 9

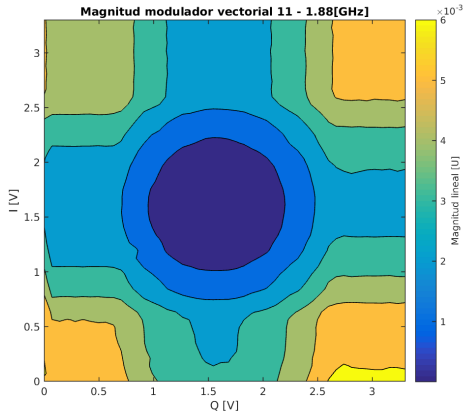


(a) Magnitud del modulador vectorial 10 para 1.88[GHz]

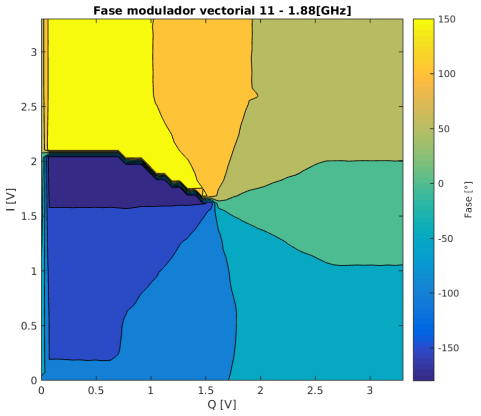


(b) Fase del modulador vectorial 10 para 1.88[GHz]

Figura D.10: Medición modulador vectorial 10

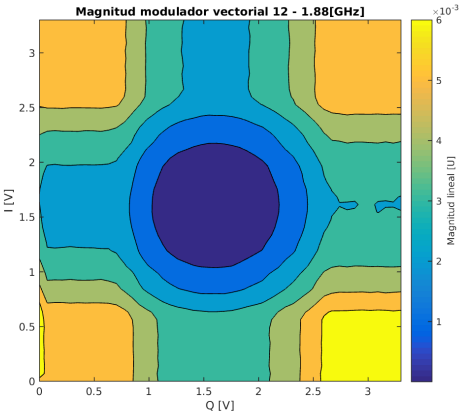


(a) Magnitud del modulador vectorial 11 para 1.88[GHz]

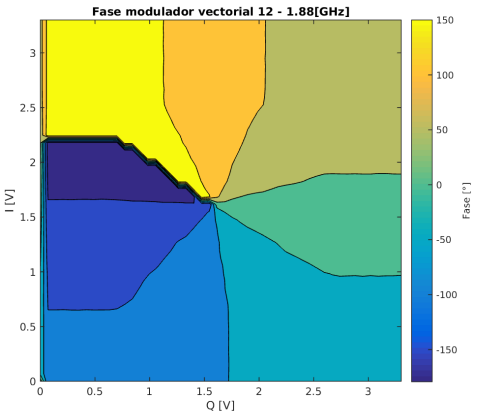


(b) Fase del modulador vectorial 11 para 1.88[GHz]

Figura D.11: Medición modulador vectorial 11

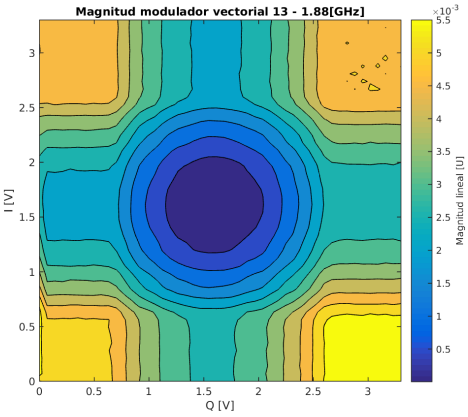


(a) Magnitud del modulador vectorial 12 para 1.88[GHz]

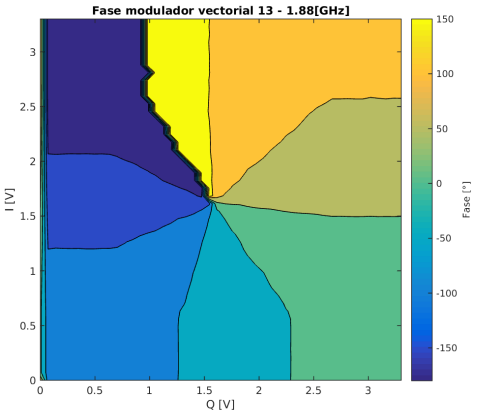


(b) Fase del modulador vectorial 12 para 1.88[GHz]

Figura D.12: Medición modulador vectorial 12

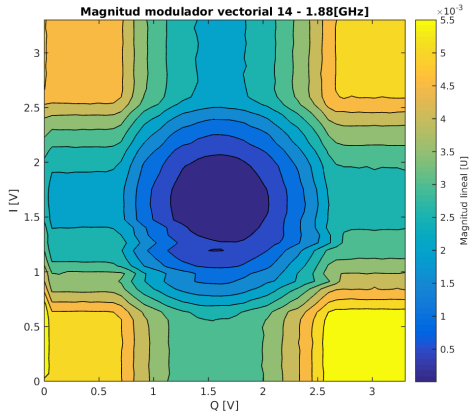


(a) Magnitud del modulador vectorial 13 para 1.88[GHz]

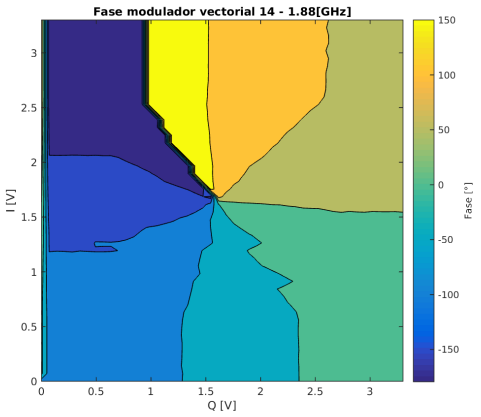


(b) Fase del modulador vectorial 13 para 1.88[GHz]

Figura D.13: Medición modulador vectorial 13

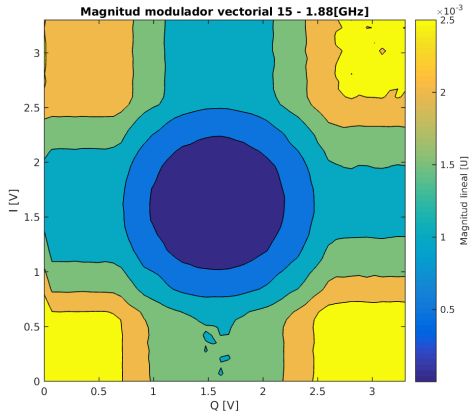


(a) Magnitud del modulador vectorial 14 para $1.88[GHz]$

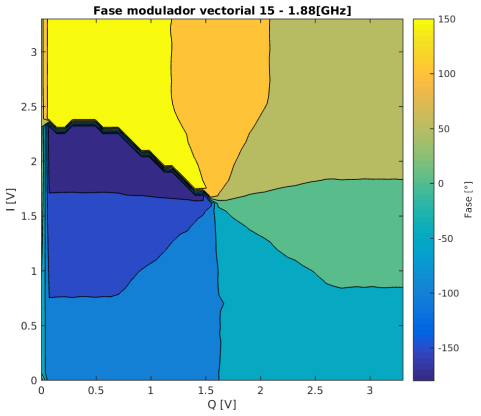


(b) Fase del modulador vectorial 14 para $1.88[GHz]$

Figura D.14: Medición modulador vectorial 14

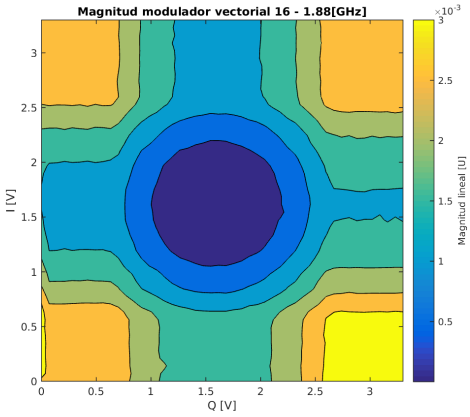


(a) Magnitud del modulador vectorial 15 para $1.88[GHz]$

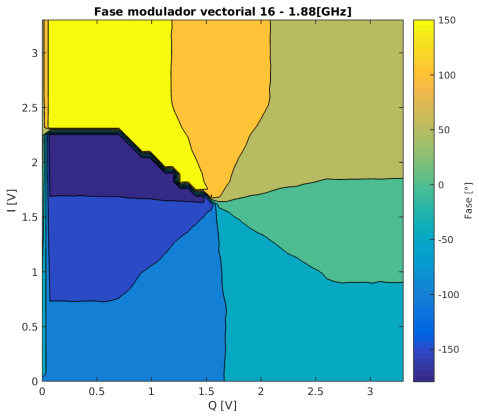


(b) Fase del modulador vectorial 15 para $1.88[GHz]$

Figura D.15: Medición modulador vectorial 15



(a) Magnitud del modulador vectorial 16 para 1.88[GHz]



(b) Fase del modulador vectorial 16 para 1.88[GHz]

Figura D.16: Medición modulador vectorial 16

Apéndice E

Código para caracterización placa electrónica

```
import paramiko
import visa
import numpy as np
import time
import potentiometer as pot

# This script makes a sweep on I and Q, gets the values on certain
    ↪ markers
# placed on the VNA and save the values for magnitude and phase
    ↪ for each marker

t = time.time()

# Markers
NMarkers = 6
Fstart = 1.5
Fstop = 2.2
markers = np.linspace(Fstart, Fstop, NMarkers)

# Raspberry SSH connection instance
ssh = paramiko.SSHClient()
ssh.set_missing_host_key_policy(paramiko.AutoAddPolicy())

# VNA Visa instance
rm = visa.ResourceManager('@py')

# Connection to both devices
VNA_obj = None
''' :type VNA_obj : TCPIPInstrSession '''
try:
```

```
        VNA_obj = rm.open_resource('TCPIP0::192.168.1.30::hpib7,16::
            ↪ INSTR')
        ''' :type VNA_obj : TCPIPInstrSession '''
    except OSError:
        print('Can\'t connect to VNA')
        exit()

    try:
        ssh.connect('192.168.1.115', username='pi', password='
            ↪ raspberry')
    except OSError:
        print('Can\'t connect to Raspberry')
        exit()

    # Gets the traces displayed on the VNA
    tempStr = VNA_obj.query('CALC:PAR:CAT?')
    tempStr = tempStr.rstrip()
    tempStr = tempStr.replace('"', '')
    measurementsVNA = tempStr.split(',')
    VNA_obj.write('INIT:CONT OFF')

    # Magnitude markers
    VNA_obj.write('CALC1:PAR:SEL %s' %measurementsVNA[0])
    VNA_obj.write('CALC1:FORM MLOG')
    for i in range(0, NMarkers):
        VNA_obj.write('CALC1:MARK%d ON' %(i+1))
        VNA_obj.write('CALC1:MARK%d:TYPE NORM' %(i+1))
        VNA_obj.write('CALC1:MARK%d:X %3.3f Ghz' %((i+1), markers[i])
            ↪ )
        VNA_obj.write('CALC1:MARK%d:FORM MLOG' %(i+1))

    VNA_obj.write('CALC1:MARK%d ON' %(NMarkers+1))
    VNA_obj.write('CALC1:MARK%d:TYPE NORM' %(NMarkers+1))
    VNA_obj.write('CALC1:MARK%d:X %3.3f Ghz' %((NMarkers+1), 1.84))
    VNA_obj.write('CALC1:MARK%d:FORM MLOG' %(NMarkers+1))

    VNA_obj.write('CALC1:MARK%d ON' %(NMarkers+2))
    VNA_obj.write('CALC1:MARK%d:TYPE NORM' %(NMarkers+2))
    VNA_obj.write('CALC1:MARK%d:X %3.3f Ghz' %((NMarkers+2), 1.88))
    VNA_obj.write('CALC1:MARK%d:FORM MLOG' %(NMarkers+2))

    # Phase markers
    VNA_obj.write('CALC1:PAR:SEL %s' %measurementsVNA[2])
    VNA_obj.write('CALC1:FORM PHASE')
    for i in range(0, NMarkers):
        VNA_obj.write('CALC1:MARK%d ON' %(i+1))
        VNA_obj.write('CALC1:MARK%d:TYPE NORM' %(i+1))
```

```
        VNA_obj.write('CALC1:MARK%d:X %3.3f Ghz' % ((i+1), markers[i])
            ↪ )
        VNA_obj.write('CALC1:MARK%d:FORM PHAS' % (i+1))

VNA_obj.write('CALC1:MARK%d ON' % (NMarkers+1))
VNA_obj.write('CALC1:MARK%d:TYPE NORM' % (NMarkers+1))
VNA_obj.write('CALC1:MARK%d:X %3.3f Ghz' % ((NMarkers+1), 1.84))
VNA_obj.write('CALC1:MARK%d:FORM PHAS' % (NMarkers+1))

VNA_obj.write('CALC1:MARK%d ON' % (NMarkers+2))
VNA_obj.write('CALC1:MARK%d:TYPE NORM' % (NMarkers+2))
VNA_obj.write('CALC1:MARK%d:X %3.3f Ghz' % ((NMarkers+2), 1.88))
VNA_obj.write('CALC1:MARK%d:FORM PHAS' % (NMarkers+2))

# Measurement arrays
I_array = np.linspace(0, 255, 48)
Q_array = np.linspace(0, 255, 48)

magnitudeMat = np.zeros((len(I_array), len(Q_array), NMarkers+2))
phaseMat = np.zeros((len(I_array), len(Q_array), NMarkers+2))

# Main routine
for i in range(0, len(I_array)):
    for j in range(0, len(Q_array)):
        print('I = %d, Q = %d' % (I_array[i], Q_array[j]))
        addr, subAddr = pot.antenna2hex(1)
        ssh.exec_command('sudo ./GCC/scan_mod/writePotentiometer '
            ↪ + hex(addr) + ' ' + hex(subAddr) + ' ' +
                    hex(int(I_array[i])) + ' ' + hex(int(
                        ↪ Q_array[j])))

        VNA_obj.write('INIT1:IMM')
        while 1:
            TempString = VNA_obj.query('*OPC?')
            TempString = TempString.rstrip()
            if TempString == '+1':
                break
            else:
                pass

        VNA_obj.write('CALC1:PAR:SEL %s' %measurementsVNA[0])
        for k in range(0, NMarkers+2):
            tempStr = VNA_obj.query('CALC1:MARK%d:Y?' % (k+1))
            tempStr = tempStr.rstrip()
            tempStr = tempStr.split(',')
            magnitudeMat[i, j, k] = float(tempStr[0])
```

```
            VNA_obj.write('CALC1:PAR:SEL %s' %measurementsVNA[2])
            for k in range(0, NMarkers + 2):
                tempStr = VNA_obj.query('CALC1:MARK%d:Y?' %(k+1))
                tempStr = tempStr.rstrip()
                tempStr = tempStr.split(',')
                phaseMat[i, j, k] = float(tempStr[0])

# Elapsed time
elapsed = time.time() - t
print(elapsed)

# Save values
np.save('antenna_1_mag', magnitudeMat)
np.save('antenna_1_pha', phaseMat)

# End script
VNA_obj.close()
exit()
```