

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID**

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**



**Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de  
Telecomunicación**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**Phase array de antenas impresas con varactores en banda Ku**

**Alejandro Juan Martín Trueba  
Tutor: José Luis Masa Campos**

**JUNIO 2018**



# Phase array de antenas impresas con varactores en banda Ku

**AUTOR: Alejandro Juan Martín Trueba**

**TUTOR: José Luis Masa Campos**



**Grupo de Radiofrecuencia: Circuitos, Antenas y Sistemas (RFCAS)**

**Dpto. de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones**

**Escuela Politécnica Superior**

**Universidad Autónoma de Madrid**

**Junio 2018**



# Resumen (castellano)

En el presente Trabajo de Fin de Grado se ha llevado a cabo el diseño de una red de alimentación para desfasar una antena plana común en la banda Ku. Dicha antena será un *array* de parches circulares apilados que se unirá a la red de alimentación. La red de alimentación y la antena se realizarán a una frecuencia de 17 GHz sobre un sustrato RF-35 con  $\epsilon_r=3.5$  y de tangente de pérdidas 0.005 a 17 GHz.

Este trabajo es la continuación del TFG de D. Javier Herranz Alpanseque: “Diseño de desfasadores con varactores para antenas planas” [1] y del documento de investigación: “*Electronically Reconfigurable Microstrip Array Antenna with Reflective Phase Shifters at Ku Band*” [2].

El desfase de la señal se hará mediante varactores situados en los diferentes acopladores híbridos de la red de alimentación. Un varactor es un dispositivo capaz de comportarse como un condensador con capacidad regulable según la tensión de alimentación.

El proyecto se realiza teniendo en cuenta que los conectores de cada puerto son de 50 Ohm y el diseño de los desfasadores son del TFG de Javier, aunque en el primer anexo se muestra un ejemplo de diseño a 70 Ohm, el cual mostraba una mejor adaptación y transmisión, pero empeoraba el rango de fase.

Para que la tensión de un desfasador no afecte a los demás se necesita un aislante de tensión continua como se observa en la fase de diseño de este proyecto. En esta misma sección se incluirán los pasos del desarrollo de la red de alimentación y del diseño del *array* de parches.

Debido a la necesidad de reparto de tensión para las diferentes ramas de la red de alimentación es necesario un circuito regulador como se expone en la parte final del apartado del diseño.

Se enseñará el proceso de diseño de los prototipos y estos una vez construidos, con sus respectivas medidas y estimaciones para la mejor comprensión de este trabajo.

Al final de este trabajo se explicarán las conclusiones obtenidas y el trabajo futuro.



# Abstract (English)

This Bachelor Thesis has been carried out the design of a power network to offset a flat antenna common in the Ku band.

This antenna will be an array of stacked circular patches that will be attached to the feed network. Both the power supply network and the antenna will be made at a frequency of 17GHz on a substrate RF-35 with  $\epsilon_r=3.5$  and loss tangent 0.005 to 17GHz.

This work is the continuation of the TFG of Mr. Javier Herranz Alpanseque: "Design of phase shifters with varifiers for flat antennas" and the paper: "Electronically Reconfigurable Microstrip Array Antenna with Reflective Phase Shifters at Ku Band" [2].

The signal offset will be made by means of varactors located in the different hybrid couplers of the power supply network forming a phase shifter. A varactor is a device capable of behaving like a capacitor with capacity regulated by its supply voltage.

This work is done taking into account that the connectors of each port are 50 Ohm and the design of the phase shifters are from Javier's TFG, although the first annex shows an example of a design at 70 Ohm, which showed a better adaptation and transmission, but worsened the phase range.

In order for the voltage of one phase shifter not to affect the others, a DC voltage insulator is required which is shown in the design phase of this project. This same section will include steps in the development of the power grid and the design of the patch array.

Due to the need for voltage distribution for the different branches of the power supply network, a control circuit is required which is shown at the end of the design section.

It will show the design process of the prototypes and these once built, with their respective measurements and estimates for the best compression of this work.

At the end of this work the conclusions obtained and the future work will be shown.



## Palabras clave (castellano)

Banda Ku, Impedancia de entrada, adaptación y transmisión de la puerta N a la puerta M, diagrama de radicación, varactor, Acoplos, Adaptación activa, desfasador, cambio estado de fase, agrupación o *array* de parches, parches apilados, lóbulo principal, lóbulos secundarios, lóbulos replica o lóbulos de difracción.

## Keywords (English)

Ku band, Input impedance, impedance matching and transmission from the N gate to the M gate, radiation chart of an antenna, varicap diode, coupler, active adaptación, phase shifter, patches array, staked array, first lobe, secondary lobes, granting lobes.



## *Agradecimientos*

Vamos. Ahora toca los más fácil... o tal vez no. Ya me hubiese poner en esta sección un: “Muchas Gracias y a Pastar”, pero no puedo, ha sido un TFG largo y hay mucha gente que me ha acompañado en este camino.

Antes de nada, déjate que te presente, a mi gente, a mi familia. Tengo que agradecerles (a mis padres y a Madi) el haberme apoyado, cada uno a su manera, estos dos cuatrimestres con el TFG. O bien empezamos con la familia, o bien empezamos con los amigos. Citar que son mis amigos, en la calle pasábamos las horas, son mis amigos, por encima de todas las cosas. He de meter aquí a tanta gente que no sé por dónde empezar. O a lo mejor sí, empezare con Patxi y Jaime por las veces que me han sacado de la cueva para ya sea tomar algo, ver al Real o al Atleti, ya sea en Shempions o en Liga, o simplemente para tomar algo.

Vivir, los momentos con Belt, Gats y Lems en la escuela o en cualquier sitio que hayamos ido, ha sido una de las cosas más grandes que me ha podido pasar, gracias concilio. A Javivi, por ser la base y cimiento de este TFG, y que narices, un grande. Indio, digo Víctor, gracias por ser un buen técnico auxiliar de laboratorio (guiño, guiño), Sito eres un crack. Se masca la tragedia, gracias Julio, Rober y Papito. A la Topacia por sus sustos y los momentos cafés con el grupo de investigación ese que se dedica al video (No digo el nombre porque no me publicitan).

Toca agradecer ahora a D. José Luis Masa Campos por darme la oportunidad de hacer este trabajo y continuar lo que hizo Javivi el año pasado. Resaltar a Edu y a Pablo, por las veces que me he pasado a pedir ayuda y nunca me han dicho que no, gracias. A David y a Irene, por las mañanas y tardes que pasamos durante todo el año para terminar nuestros respectivos trabajos.

Gracias a todos de todo corazón. Al final no me ha quedado tan largo los agradecimientos (¡Toma, me he ahorrado unos céntimos!). Raramente escribo tanto (equisdé). Ordenar estos agradecimientos no ha sido nada fácil (¡Qué va a estar esto ordenado Hulio!). Si me he dejado a alguno por el camino, lo siento, no me apetece escribir más, así que:

4D554348415320475241434941532059204120504153544152<sub>16</sub>



# INDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Organización de la memoria.....	2
2	Estado del arte .....	3
2.1	Principios básicos de antenas .....	3
2.1.1	Concepto de antena.....	3
2.1.2	Conceptos básicos .....	3
2.1.2.1	Coefficiente de reflexión.....	3
2.1.2.2	Definición de parámetros S .....	4
2.1.2.3	Parámetros S: Acoplos y adaptación activa.....	5
2.1.2.4	Directividad y ganancia .....	6
2.1.2.5	Diagrama de radiación.....	6
2.1.2.6	Características del diagrama de radiación .....	7
2.1.3	Tipos de antenas .....	7
2.1.4	Antenas de parche.....	8
2.1.5	Array de antenas .....	9
2.2	Varactor .....	10
3	Diseño.....	11
3.1	Consideraciones previas .....	11
3.2	Red de Alimentación .....	11
3.2.1	Aislante de continua .....	12
3.2.2	Desfasador con aislante .....	13
3.2.3	Red final .....	14
3.3	Circuito Regulador .....	15
3.4	Array de parche .....	15
4	Desarrollo de prototipos .....	19
4.1	Red de Alimentación .....	19
4.1.1	Diseño del prototipo a construir .....	19
4.2	Circuito regulador.....	21
4.2.1	Prototipo individual .....	21
4.2.2	Prototipo final .....	22
4.3	Array de parches .....	23
4.4	Red de alimentación y antena.....	24
5	Integración, pruebas y resultados .....	25
5.1	Resultados y pruebas de la red de alimentación .....	25
5.2	Resultados y pruebas del array de parches .....	29
5.3	Resultados y pruebas de la antena .....	31
6	Conclusiones y trabajo futuro.....	37
6.1	Conclusiones.....	37
6.2	Trabajo futuro .....	37
7	Referencias .....	39
	Glosario .....	41
	Anexos.....	XLIII
A	Diseño de la red de alimentación a 70 Ohm.....	XLIII
B	Desarrollo de la red.....	LXIX
C	Medidas adicionales .....	LXXV
D	Herramientas utilizadas .....	CI



# INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1-1. DEPARTAMENTO DE BOMBEROS DE JAPÓN [3].	1
FIGURA 2.1-1. AGRUPACIÓN DE ANTENAS Y RED DE ALIMENTACIÓN.	5
FIGURA 2.1-2. EJEMPLO DIAGRAMA DE RADIACIÓN.	6
FIGURA 2.1-3. PARÁMETROS DEL DIAGRAMA DE RADIACIÓN.	7
FIGURA 2.1-4. PARCHE CIRCULAR Y PARCHE RECTANGULAR.	8
FIGURA 2.1-5. PARCHE APILADO.	8
FIGURA 2.1-6. AGRUPACIÓN DE ANTENAS DE PARCHE CIRCULARES [9].	9
FIGURA 2.2-1. ELEMENTOS DE LA RED DE ALIMENTACIÓN CONSTRUIDA. (A) DESFASADOR. (B) VARACTOR SOLDADO.	10
FIGURA 3.2-1. RED DE ALIMENTACIÓN	11
FIGURA 3.2-2. AISLANTE DE TENSIÓN CONTINUA.	12
FIGURA 3.2-3. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] DEL AISLANTE DE TENSIÓN CONTINUA.	12
FIGURA 3.2-4. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] DEL AISLANTE DE TENSIÓN CONTINUA.	12
FIGURA 3.2-5. $S_{11}$ [CARTA DE SMITH] DEL AISLANTE DE TENSIÓN CONTINUA.	12
FIGURA 3.2-6. DESFASADOR CON AISLANTE.	13
FIGURA 3.2-7. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] DEL DESFASADOR CON AISLANTE.	13
FIGURA 3.2-8. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] DEL DESFASADOR CON AISLANTE.	13
FIGURA 3.2-9. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] DEL DESFASADOR CON AISLANTE.	13
FIGURA 3.2-10. RED FINAL.	14
FIGURA 3.2-11. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] DE LA RED FINAL.	14
FIGURA 3.2-12. $S_{N1}$ [MAGNITUD EN DB] DE LA RED FINAL.	14
FIGURA 3.2-13. $S_{N1}$ [FASE EN GRADOS] DE LA RED FINAL.	14
FIGURA 3.3-1. ESQUEMÁTICO CIRCUITO REGULADOR.	15
FIGURA 3.4-1. DISEÑO DEL ARRAY DE PARCHES.	15
FIGURA 3.4-2. DIVISIÓN DE LOS PARCHES.	16

FIGURA 3.4-3. ACOPLOS PARCHE INTERIORES. ....	16
FIGURA 3.4-4. ADAPTACIÓN ACTIVA DE LOS PARCHES INTERIORES SEGÚN EL APUNTAMIENTO. ....	16
FIGURA 3.4-5. ACOPLOS PARCHE EXTERIORES. ....	16
FIGURA 3.4-6. ADAPTACIÓN ACTIVA DE LOS PARCHES EXTERIORES SEGÚN EL APUNTAMIENTO. ....	16
FIGURA 3.4-7. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] DE LOS PARCHES. ....	16
FIGURA 3.4-8. DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE CADA PARCHE A 17 GHZ. ....	17
FIGURA 3.4-9. DIAGRAMA DE RADIACIÓN DEL ARRAY DE PARCHES TEÓRICO A 17 GHZ. ....	17
FIGURA 4.1-1. DISEÑO DEL PROTOTIPO DE LA RED. ....	19
FIGURA 4.1-2. ELEMENTOS DE LA RED DE ALIMENTACIÓN CONSTRUIDA. (A) DESFASADOR. (B) VARACTOR SOLDADO .....	20
FIGURA 4.1-3. PROTOTIPO DE LA RED CONSTRUIDO. ....	20
FIGURA 4.2-1. DISEÑO PROTOTIPO INDIVIDUAL. ....	21
FIGURA 4.2-2. PROTOTIPO CONSTRUIDO. ....	21
FIGURA 4.2-3. PROTOTIPO FINAL CIRCUITO REGULADOR. ....	22
FIGURA 4.2-4. HUELLA DE LOS COMPONENTES DEL PROTOTIPO FINAL DEL CIRCUITO REGULADOR. ....	22
FIGURA 4.2-5. CIRCUITO REGULADOR CONSTRUIDO. ....	23
FIGURA 4.3-1. ARRAY DE PARCHES CONSTRUIDO. ....	23
FIGURA 4.4-1. RED DE ALIMENTACIÓN Y ANTENA. ....	24
FIGURA 5.1-1. CARACTERIZACIÓN DE LA RED DE ALIMENTACIÓN. ....	25
FIGURA 5.1-2. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] VARIANDO LA ALIMENTACIÓN. ....	25
FIGURA 5.1-3. PERDIDAS INSERCIÓN RED DE ALIMENTACIÓN. ....	25
FIGURA 5.1-4. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] RAMA 1, RAMA A 17 V. ....	27
FIGURA 5.1-5. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] RAMA 2, RAMA A 17 V. ....	27
FIGURA 5.1-6. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] RAMA 3, RAMA B 17 V. ....	27
FIGURA 5.1-7. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] RAMA 4, RAMA B 17 V. ....	27
FIGURA 5.1-8. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] RAMA A, RAMA 1 17 V. ....	27

FIGURA 5.1-9. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] RAMA B, RAMA 4 17 V. ....	27
FIGURA 5.1-10. ESTIMACIÓN DIAGRAMA DE RADIACIÓN A 17 GHz. (A) PARCHE APILADO: ELEMENTO UNITARIO. (B) DIAGRAMA DE RADIACIÓN DEL ELEMENTO UNITARIO A 17 GHz. (C) RED DE ALIMENTACIÓN. (D) DIAGRAMA DE RADIACIÓN ESTIMADO DEL ARRAY A 17 GHz.....	28
FIGURA 5.2-1. ARRAY DE PARCHES CONSTRUIDO.....	29
FIGURA 5.2-2. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] DE CADA PARCHE DEL ARRAY. ....	29
FIGURA 5.2-3. ACOPLOS DEL PARCHE 1. ....	29
FIGURA 5.2-4. ADAPTACIÓN ACTIVA PARCHE 1.....	29
FIGURA 5.2-5. ACOPLOS DEL PARCHE 2. ....	30
FIGURA 5.2-6. ADAPTACIÓN ACTIVA PARCHE 2.....	30
FIGURA 5.2-7. ACOPLOS DEL PARCHE 3. ....	30
FIGURA 5.2-8. ADAPTACIÓN ACTIVA PARCHE 3.....	30
FIGURA 5.2-9. ACOPLOS DEL PARCHE 4. ....	30
FIGURA 5.2-10. ADAPTACIÓN ACTIVA PARCHE 4.....	30
FIGURA 5.3-1. MONTAJE DE LA ANTENA EN LA CÁMARA ANECOICA 1.....	31
FIGURA 5.3-2. MONTAJE DE LA ANTENA EN LA CÁMARA ANECOICA 2.....	31
FIGURA 5.3-3. DIAGRAMAS DE RADIACIÓN CON DISTINTOS APUNTAMIENTOS A 17 GHz. ....	32
FIGURA 5.3-4. DIAGRAMA DE RADIACIÓN A 0° DE APUNTAMIENTO A 17GHz.....	32
FIGURA 5.3-5. DIAGRAMA DE RADIACIÓN A -13° DE APUNTAMIENTO A 17GHz.....	33
FIGURA 5.3-6. DIAGRAMA DE RADIACIÓN A 13° DE APUNTAMIENTO A 17GHz.....	33
FIGURA 5.3-7. DIAGRAMA DE RADIACIÓN A -7° DE APUNTAMIENTO A 17GHz.....	33
FIGURA 5.3-8. DIAGRAMA DE RADIACIÓN A 7° DE APUNTAMIENTO A 17GHz.....	33
FIGURA 5.3-9. DIAGRAMA DE RADIACIÓN A -3° DE APUNTAMIENTO A 17GHz.....	33
FIGURA 5.3-10. DIAGRAMA DE RADIACIÓN A 3° DE APUNTAMIENTO A 17GHz.....	33
FIGURA 5.3-11. GANANCIA DE LA ANTENA SEGÚN APUNTAMIENTO. ....	34
FIGURA 5.3-12. COMPARACIÓN DIAGRAMAS A 0° Y 17 GHz.....	34
FIGURA 5.3-13. COMPARACIÓN DIAGRAMAS A -13° Y A 17GHz.....	35

FIGURA 5.3-14. COMPARACIÓN DIAGRAMAS A 13° Y A 17GHZ. ....	35
FIGURA 5.3-15. COMPARACIÓN DIAGRAMAS A -7° Y A 17GHZ.....	35
FIGURA 5.3-16. COMPARACIÓN DIAGRAMAS A 7° Y A 17GHZ. ....	35
FIGURA 5.3-17. COMPARACIÓN DIAGRAMAS A -3° Y A 17GHZ.....	35
FIGURA 5.3-18. COMPARACIÓN DIAGRAMAS A 3° Y A 17GHZ. ....	35
FIGURA A-1. ACOPLADOR 70 OHM. ....	XLIII
FIGURA A-2. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] DEL ACOPLADOR. ....	XLIII
FIGURA A-3. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] DEL ACOPLADOR. ....	XLIII
FIGURA A-4. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] DEL ACOPLADOR.....	XLIII
FIGURA A-5. AISLANTE DE 70 OHM. ....	XLIV
FIGURA A-6. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] DEL AISLANTE DE 70 OHMN.....	XLIV
FIGURA A-7. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] DEL AISLANTE DE 70 OHMN.....	XLIV
FIGURA A-8. $S_{11}$ [CARTA DE SMITH] DEL AISLANTE DE 70 OHM. ....	XLIV
FIGURA A-9. AISLANTE 70/50 OHM. ....	XLV
FIGURA A-10. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] DEL AISLANTE 70/50 OHM.....	XLV
FIGURA A-11. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] DEL AISLANTE 70/50 OHM. ....	XLV
FIGURA A-12. $S_{11}$ [CARTA DE SMITH] DEL AISLANTE 70/50 OHM. ....	XLV
FIGURA A-13. DESFASADOR CON AISLANTE. ....	XLVI
FIGURA A-14. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] DEL DESFASADOR CON AISLANTE. ....	XLVI
FIGURA A-15. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] DEL DESFASADOR CON AISLANTE. ....	XLVI
FIGURA A-16. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] DEL DESFASADOR CON AISLANTE.....	XLVI
FIGURA A-17. DESFASADOR AISLANTE CON TRANSFORMADOR. ....	XLVII
FIGURA A-18. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] DEL DESFASADOR AISLANTE CON TRANSFORMADOR...XLVII	
FIGURA A-19. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] DEL DESFASADOR CON AISLANTE. ....	XLVII
FIGURA A-20. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] DEL DESFASADOR CON AISLANTE.....	XLVII
FIGURA A-21. DIVISOR 70/50 OHM.....	XLVIII

FIGURA A-22. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] DEL DIVISOR 70/50 OHM.....	XLVIII
FIGURA A-23. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] DEL DIVISOR 70/50 OHM.....	XLVIII
FIGURA A-24. $S_{11}$ [CARTA DE SMITH] DEL DIVISOR 70/50 OHM. ....	XLVIII
FIGURA A-25. DOBLE DESFASADOR CON AISLANTE. ....	XLIX
FIGURA A-26. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] DEL DOBLE DESFASADOR.....	XLIX
FIGURA A-27. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] DEL DOBLE DESFASADOR.....	XLIX
FIGURA A-28. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] DEL DOBLE DESFASADOR. ....	XLIX
FIGURA A-29. $S_{31}$ [MAGNITUD EN DB] DEL DOBLE DESFASADOR.....	XLIX
FIGURA A-30. $S_{31}$ [FASE EN GRADOS] DEL DOBLE DESFASADOR. ....	XLIX
FIGURA A-31-A. DIVISOR 70 OHM.....	L
FIGURA A-32. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] DEL DIVISOR DE 70 OHM.....	L
FIGURA A-33. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] DEL DIVISOR DE 70 OHM.....	L
FIGURA A-34. $S_{11}$ [CARTA DE SMITH] DEL DIVISOR DE 70 OHM. ....	L
FIGURA A-35. RED FINAL. ....	LI
FIGURA A-36. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] DE LA RED FINAL.....	LI
FIGURA A-37. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] DE LA RED FINAL.....	LI
FIGURA A-38. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] DE LA RED FINAL. ....	LI
FIGURA A-39. PROTOTIPO 1. ....	LII
FIGURA A-40. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] DEL PROTOTIPO 1. ....	LII
FIGURA A-41. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] DEL PROTOTIPO 1. ....	LII
FIGURA A-42. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] DEL PROTOTIPO 1.....	LII
FIGURA A-43. PROTOTIPO 2. ....	LIII
FIGURA A-44. ESQUEMÁTICA MEDIDA DINC. ....	LIV
FIGURA A-45. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA DERECHA, IZQUIERDA DESCONECTADA. ....	LIV
FIGURA A-46. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA DERECHA, IZQUIERDA DESCONECTADA. ....	LIV
FIGURA A-47. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] RAMA DERECHA, IZQUIERDA DESCONECTADA. ....	LIV

FIGURA A-48. ESQUEMÁTICA MEDIDA DI0.....	LIV
FIGURA A-49. S <sub>11</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA DERECHA, IZQUIERDA 0 V.....	LIV
FIGURA A-50. S <sub>21</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA DERECHA, IZQUIERDA 0 V.....	LIV
FIGURA A-51. S <sub>21</sub> [FASE EN GRADOS] RAMA DERECHA, IZQUIERDA 0 V. ....	LIV
FIGURA A-52. ESQUEMÁTICA MEDIDA DI5.....	LVI
FIGURA A-53. S <sub>11</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA DERECHA, IZQUIERDA 5 V.....	LVI
FIGURA A-54. S <sub>21</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA DERECHA, IZQUIERDA 5 V.....	LVI
FIGURA A-55. S <sub>21</sub> [FASE EN GRADOS] RAMA DERECHA, IZQUIERDA 5 V. ....	LVI
FIGURA A-56. ESQUEMÁTICA MEDIDA DI17.....	LVII
FIGURA A-57. S <sub>11</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA DERECHA, IZQUIERDA 17 V.....	LVII
FIGURA A-58. S <sub>21</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA DERECHA, IZQUIERDA 17 V.....	LVII
FIGURA A-59. S <sub>21</sub> [FASE EN GRADOS] RAMA DERECHA, IZQUIERDA 17 V. ....	LVII
FIGURA A-60. ESQUEMÁTICA MEDIDA IDNC. ....	LVIII
FIGURA A-61. S <sub>11</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA IZQUIERDA, DERECHA DESCONECTADA. ....	LVIII
FIGURA A-62. S <sub>21</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA IZQUIERDA, DERECHA DESCONECTADA. ....	LVIII
FIGURA A-63. S <sub>21</sub> [FASE EN GRADOS] RAMA IZQUIERDA, DERECHA DESCONECTADA. ....	LVIII
FIGURA A-64. ESQUEMÁTICA MEDIDA ID0.....	LIX
FIGURA A-65. S <sub>11</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA IZQUIERDA, DERECHA 0V.....	LIX
FIGURA A-66. S <sub>21</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA IZQUIERDA, DERECHA 0V.....	LIX
FIGURA A-67. S <sub>21</sub> [FASE EN GRADOS] RAMA IZQUIERDA, DERECHA 0V. ....	LIX
FIGURA A-68. ESQUEMÁTICA MEDIDA ID5.....	LX
FIGURA A-69. S <sub>11</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA IZQUIERDA, DERECHA 5V.....	LX
FIGURA A-70. S <sub>21</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA IZQUIERDA, DERECHA 5V.....	LX
FIGURA A-71. S <sub>21</sub> [FASE EN GRADOS] RAMA IZQUIERDA, DERECHA 5V. ....	LX
FIGURA A-72. ESQUEMÁTICA MEDIDA ID17.....	LXI
FIGURA A-73. S <sub>11</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA IZQUIERDA, DERECHA 17V.....	LXI

FIGURA A-74. S <sub>21</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA IZQUIERDA, DERECHA 17V.....	LXI
FIGURA A-75. S <sub>21</sub> [FASE EN GRADOS] RAMA IZQUIERDA, DERECHA 17V. ....	LXI
FIGURA A-76. ESQUEMÁTICA MEDIDA D0I.....	LXII
FIGURA A-77. S <sub>11</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA DERECHA 0 V, VARIACIÓN IZQUIERDA.....	LXII
FIGURA A-78. S <sub>21</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA DERECHA 0 V, VARIACIÓN IZQUIERDA.....	LXII
FIGURA A-79. S <sub>21</sub> [FASE EN GRADOS] RAMA DERECHA 0 V, VARIACIÓN IZQUIERDA. ....	LXII
FIGURA A-80. ESQUEMÁTICA MEDIDA D5I.....	LXIII
FIGURA A-81. S <sub>11</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA DERECHA 5 V, VARIACIÓN IZQUIERDA.....	LXIII
FIGURA A-82. S <sub>21</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA DERECHA 5 V, VARIACIÓN IZQUIERDA.....	LXIII
FIGURA A-83. S <sub>21</sub> [FASE EN GRADOS] RAMA DERECHA 5 V, VARIACIÓN IZQUIERDA. ....	LXIII
FIGURA A-84. ESQUEMÁTICA MEDIDA D17I.....	LXIV
FIGURA A-85. S <sub>11</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA DERECHA 17 V, VARIACIÓN IZQUIERDA.....	LXIV
FIGURA A-86. S <sub>21</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA DERECHA 17 V, VARIACIÓN IZQUIERDA.....	LXIV
FIGURA A-87. S <sub>21</sub> [FASE EN GRADOS] RAMA DERECHA 17 V, VARIACIÓN IZQUIERDA. ....	LXIV
FIGURA A-88. ESQUEMÁTICA MEDIDA I0D.....	LXV
FIGURA A-89. S <sub>11</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA IZQUIERDA 0 V, VARIACIÓN DERECHA.....	LXV
FIGURA A-90. S <sub>21</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA IZQUIERDA 0 V, VARIACIÓN DERECHA.....	LXV
FIGURA A-91. S <sub>21</sub> [FASE EN GRADOS] RAMA IZQUIERDA 0 V, VARIACIÓN DERECHA. ....	LXV
FIGURA A-92. ESQUEMÁTICA MEDIDA I5D.....	LXVI
FIGURA A-93. S <sub>11</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA IZQUIERDA 5 V, VARIACIÓN DERECHA.....	LXVI
FIGURA A-94. S <sub>21</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA IZQUIERDA 5 V, VARIACIÓN DERECHA.....	LXVI
FIGURA A-95. S <sub>21</sub> [FASE EN GRADOS] RAMA IZQUIERDA 5 V, VARIACIÓN DERECHA. ....	LXVI
FIGURA A-96. ESQUEMÁTICA MEDIDA I17D.....	LXVII
FIGURA A-97. S <sub>11</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA IZQUIERDA 17 V, VARIACIÓN DERECHA.....	LXVII
FIGURA A-98. S <sub>21</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA IZQUIERDA 17 V, VARIACIÓN DERECHA.....	LXVII
FIGURA A-99. S <sub>21</sub> [FASE EN GRADOS] RAMA IZQUIERDA 17 V, VARIACIÓN DERECHA. ....	LXVII

FIGURA B-1. DIVISOR RAMA. ....	LXIX
FIGURA B-2. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] DEL DIVISOR RAMA .....	LXIX
FIGURA B-3. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] DEL DIVISOR RAMA. ....	LXIX
FIGURA B-4. $S_{11}$ [CARTA DE SMITH] DEL DIVISOR RAMA. ....	LXIX
FIGURA B-5. DIVISOR RAMA CON DESFASADORES.....	LXX
FIGURA B-6. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] DEL DIVISOR RAMA. ....	LXX
FIGURA B-7. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] DEL DIVISOR RAMA. ....	LXX
FIGURA B-8. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] DEL DIVISOR RAMA.....	LXX
FIGURA B-9. DESFASADOR LATERAL CON AISLANTE.....	LXXI
FIGURA B-10. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] DEL DESFASADOR LATERAL.....	LXXI
FIGURA B-11. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] DEL DESFASADOR LATERAL.....	LXXI
FIGURA B-12. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] DEL DESFASADOR LATERAL.....	LXXI
FIGURA B-13. DIVISOR EN GIRO.....	LXXII
FIGURA B-14. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] DEL DIVISOR EN GIRO.....	LXXII
FIGURA B-15. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] DEL DIVISOR EN GIRO.....	LXXII
FIGURA B-16. $S_{11}$ [CARTA DE SMITH] DEL DIVISOR EN GIRO.....	LXXII
FIGURA B-17. DESFASADOR LATERAL Y DIVISOR.....	LXXIII
FIGURA B-18. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] DEL DESFASADOR LATERAL Y DIVISOR.....	LXXIII
FIGURA B-19. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] DEL DESFASADOR LATERAL Y DIVISOR.....	LXXIII
FIGURA B-20. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] DEL DESFASADOR LATERAL Y DIVISOR.....	LXXIII
FIGURA B-21. DIVISOR GENERAL.....	LXXIV
FIGURA B-22. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] DEL DIVISOR GENERAL.....	LXXIV
FIGURA B-23. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] DEL DIVISOR GENERAL.....	LXXIV
FIGURA B-24. $S_{11}$ [CARTA DE SMITH] DEL DIVISOR GENERAL.....	LXXIV
FIGURA C-1. CARACTERIZACIÓN DE LA RED.....	LXXV
FIGURA C-2. ESQUEMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA RED .....	LXXV

FIGURA C-3. ESQUEMÁTICA MEDIDA R1A1.....	LXXVI
FIGURA C-4. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA 1, RAMA A 1V.....	LXXVI
FIGURA C-5. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA 1, RAMA A 1V.....	LXXVI
FIGURA C-6. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] RAMA 1, RAMA A 1V.....	LXXVI
FIGURA C-7. ESQUEMÁTICA MEDIDA R1A8.....	LXXVII
FIGURA C-8. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA 1, RAMA A 8 V.....	LXXVII
FIGURA C-9. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA 1, RAMA A 8 V.....	LXXVII
FIGURA C-10. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] RAMA 1, RAMA A 8 V.....	LXXVII
FIGURA C-11. ESQUEMÁTICA MEDIDA R1A17.....	LXXVIII
FIGURA C-12. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA 1, RAMA A 17 V.....	LXXVIII
FIGURA C-13. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA 1, RAMA A 17 V.....	LXXVIII
FIGURA C-14. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] RAMA 1, RAMA A 17 V.....	LXXVIII
FIGURA C-15. ESQUEMÁTICA MEDIDA R2A1.....	LXXIX
FIGURA C-16. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA 2, RAMA A 1 V.....	LXXIX
FIGURA C-17. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA 2, RAMA A 1 V.....	LXXIX
FIGURA C-18. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] RAMA 2, RAMA A 1 V.....	LXXIX
FIGURA C-19. ESQUEMÁTICA MEDIDA R2A8.....	LXXX
FIGURA C-20. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA 2, RAMA A 8 V.....	LXXX
FIGURA C-21. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA 2, RAMA A 8 V.....	LXXX
FIGURA C-22. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] RAMA 2, RAMA A 8 V.....	LXXX
FIGURA C-23. ESQUEMÁTICA MEDIDA R2A17.....	LXXXI
FIGURA C-24. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA 2, RAMA A 17 V.....	LXXXI
FIGURA C-25. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA 2, RAMA A 17 V.....	LXXXI
FIGURA C-26. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] RAMA 2, RAMA A 17 V.....	LXXXI
FIGURA C-27. ESQUEMÁTICA MEDIDA R3B1.....	LXXXII
FIGURA C-28. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA 3, RAMA B 1 V.....	LXXXII

FIGURA C-29. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA 3, RAMA B 1 V.....	LXXXII
FIGURA C-30. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] RAMA 3, RAMA B 1 V.....	LXXXII
FIGURA C-31. ESQUEMÁTICA MEDIDA R3B8.....	LXXXIII
FIGURA C-32. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA 3, RAMA B 8 V.....	LXXXIII
FIGURA C-33. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA 3, RAMA B 8 V.....	LXXXIII
FIGURA C-34. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] RAMA 3, RAMA B 8 V.....	LXXXIII
FIGURA C-35. ESQUEMÁTICA MEDIDA R3B17.....	LXXXIV
FIGURA C-36. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA 3, RAMA B 17 V.....	LXXXIV
FIGURA C-37. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA 3, RAMA B 17 V.....	LXXXIV
FIGURA C-38. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] RAMA 3, RAMA B 17 V.....	LXXXIV
FIGURA C-39. ESQUEMÁTICA MEDIDA R4B1.....	LXXXV
FIGURA C-40. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA 4, RAMA B 1 V.....	LXXXV
FIGURA C-41. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA 4, RAMA B 1 V.....	LXXXV
FIGURA C-42. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] RAMA 4, RAMA B 1 V.....	LXXXV
FIGURA C-43. ESQUEMÁTICA MEDIDA R4B8.....	LXXXVI
FIGURA C-44. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA 4, RAMA B 8 V.....	LXXXVI
FIGURA C-45. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA 4, RAMA B 8 V.....	LXXXVI
FIGURA C-46. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] RAMA 3, RAMA B 8 V.....	LXXXVI
FIGURA C-47. ESQUEMÁTICA MEDIDA R4B17.....	LXXXVII
FIGURA C-48. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA 4, RAMA B 17 V.....	LXXXVII
FIGURA C-49. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA 4, RAMA B 17 V.....	LXXXVII
FIGURA C-50. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] RAMA 3, RAMA B 17 V.....	LXXXVII
FIGURA C-51. ESQUEMÁTICA MEDIDA RA11.....	LXXXVIII
FIGURA C-52. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA A, RAMA 1 1 V.....	LXXXVIII
FIGURA C-53. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA A, RAMA 1 1 V.....	LXXXVIII
FIGURA C-54. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] RAMA A, RAMA 1 1 V.....	LXXXVIII

FIGURA C-55. ESQUEMÁTICA MEDIDA RA18.....	LXXXIX
FIGURA C-56. S <sub>11</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA A, RAMA 1 8 V.....	LXXXIX
FIGURA C-57. S <sub>21</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA A, RAMA 1 8 V.....	LXXXIX
FIGURA C-58. S <sub>21</sub> [FASE EN GRADOS] RAMA A, RAMA 1 8 V. ....	LXXXIX
FIGURA C-59. ESQUEMÁTICA MEDIDA RA117.....	XC
FIGURA C-60. S <sub>11</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA A, RAMA 1 17 V.....	XC
FIGURA C-61. S <sub>21</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA A, RAMA 1 17 V.....	XC
FIGURA C-62. S <sub>21</sub> [FASE EN GRADOS] RAMA A, RAMA 1 17 V. ....	XC
FIGURA C-63. ESQUEMÁTICA MEDIDA RA12.....	XCI
FIGURA C-64. S <sub>11</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA A, RAMA 2 1 V.....	XCI
FIGURA C-65. S <sub>21</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA A, RAMA 2 1 V.....	XCI
FIGURA C-66. S <sub>21</sub> [FASE EN GRADOS] RAMA A, RAMA 121 V. ....	XCI
FIGURA C-67. ESQUEMÁTICA MEDIDA RA28.....	XCII
FIGURA C-68. S <sub>11</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA A, RAMA 2 8 V.....	XCII
FIGURA C-69. S <sub>21</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA A, RAMA 2 8 V.....	XCII
FIGURA C-70. S <sub>21</sub> [FASE EN GRADOS] RAMA A, RAMA 2 8 V. ....	XCII
FIGURA C-71. ESQUEMÁTICA MEDIDA RA217.....	XCIII
FIGURA C-72. S <sub>11</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA A, RAMA 2 17 V.....	XCIII
FIGURA C-73. S <sub>21</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA A, RAMA 1 17 V.....	XCIII
FIGURA C-74. S <sub>21</sub> [FASE EN GRADOS] RAMA A, RAMA 1 17 V. ....	XCIII
FIGURA C-75. ESQUEMÁTICA MEDIDA RB31.....	XCIV
FIGURA C-76. S <sub>11</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA B, RAMA 3 1 V.....	XCIV
FIGURA C-77. S <sub>21</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA B, RAMA 3 1 V.....	XCIV
FIGURA C-78. S <sub>21</sub> [FASE EN GRADOS] RAMA B, RAMA 3 1 V.....	XCIV
FIGURA C-79. ESQUEMÁTICA MEDIDA RB38.....	XCIV
FIGURA C-80. S <sub>11</sub> [MAGNITUD EN DB] RAMA B, RAMA 3 8 V.....	XCIV

FIGURA C-81. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA B, RAMA 3 8 V.....	XCV
FIGURA C-82. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] RAMA B, RAMA 3 8 V.....	XCV
FIGURA C-83. ESQUEMÁTICA MEDIDA RB317.....	XCVI
FIGURA C-84. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA B, RAMA 3 17 V.....	XCVI
FIGURA C-85. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA B, RAMA 3 17 V.....	XCVI
FIGURA C-86. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] RAMA B, RAMA 3 17 V.....	XCVI
FIGURA C-87. ESQUEMÁTICA MEDIDA RB41.....	XCVII
FIGURA C-88. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA B, RAMA 4 1 V.....	XCVII
FIGURA C-89. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA B, RAMA 4 1 V.....	XCVII
FIGURA C-90. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] RAMA B, RAMA 4 1 V.....	XCVII
FIGURA C-91. ESQUEMÁTICA MEDIDA RB48.....	XCVIII
FIGURA C-92. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA B, RAMA 4 8 V.....	XCVIII
FIGURA C-93. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA B, RAMA 4 8 V.....	XCVIII
FIGURA C-94. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] RAMA B, RAMA 4 8 V.....	XCVIII
FIGURA C-95. ESQUEMÁTICA MEDIDA RB417.....	XCIX
FIGURA C-96. $S_{11}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA B, RAMA 4 17 V.....	XCIX
FIGURA C-97. $S_{21}$ [MAGNITUD EN DB] RAMA B, RAMA 4 17 V.....	XCIX
FIGURA C-98. $S_{21}$ [FASE EN GRADOS] RAMA B, RAMA 4 17 V.....	XCIX
FIGURA D-1. LOGOTIPO CST. ....	CI
FIGURA D-2. LOGOTIPO ADS.....	CI
FIGURA D-3. LOGOTIPO AUTOCAD.....	CI
FIGURA D-4. LOGOTIPO MATLAB.....	CI

## INDICE DE TABLAS

TABLA 2-1. NOMBRE, FRECUENCIA, LONGITUD DE ONDA DE LA BANDA DE FRECUENCIAS.....	3
TABLA 4-1. LISTA DE COMPONENTES DEL CIRCUITO REGULADOR. ....	21
TABLA 5-1. RANGO DE FASES DE CADA RAMA POR FRECUENCIAS.....	26
TABLA 5-2. AMPLITUDES Y DESFASES PARA EL DIAGRAMA A 17 GHZ.....	28



# 1 Introducción

---

## 1.1 Motivación

En la era digital que nos encontramos, las tecnologías de la información y la comunicación han marcado el inicio de una revolución en la forma de relacionarnos y de ver las cosas. En la sociedad actual, existe la necesidad de acceder a información constantemente, en cada momento, desde cualquier medio, por ello siempre estamos en alerta de mantenernos conectados o tener cobertura a la red. Esto ha llevado al desarrollo e investigación de un gran número de tecnologías para mantenernos conectados.

Este trabajo tiene como finalidad el poder configurar una antena que pueda llevar cobertura a zonas donde antes no había, sin tener que desplazar la antena. Esto es posible porque las antenas al radiar tienen un haz principal que indica la zona donde podemos tener cobertura. Este proyecto consigue modificar ese haz para que apunte a la zona donde queramos tener cobertura, esto se denomina antena inteligente. Para ello se utilizarán unos diodos especiales llamados varactores que se desarrollarán más adelante.

La banda de frecuencias sobre la que tratará este trabajo es la banda Ku, de 12.4 GHz a 18 GHz, ajustando el rango de frecuencias de 16 GHz a 18 GHz con una frecuencia central de trabajo de 17 GHz. Esta banda es utilizada principalmente en sistemas radar y comunicaciones. En E.E.U.U, esta banda es utilizada principalmente para el servicio DBS (Direct Broadcast Satellite), este servicio permite la recepción de audio, video y datos a través de terminales de pequeño diámetro.

En situaciones de emergencia o catástrofe, la mayoría de las comunicaciones se hacen a través de la banda Ku. Este trabajo permitiría poder mejorar las comunicaciones con aquellas zonas donde la cobertura sea escasa o nula.



**Figura 1.1-1. Departamento de bomberos de Japón [3].**

## **1.2 Objetivos**

El principal objetivo de este trabajo es el desarrollo de una agrupación de antenas de parche y una red de alimentación en banda Ku para comunicaciones satelitales, capaz de realizar un apuntamiento electrónico de su haz principal mediante el uso de desfasadores de radiofrecuencia. Estos, implementan varactores controlables por tensión para cambiar su estación de fase.

Se diseñará un circuito electrónico para poder regular la tensión que controlará a los distintos desfasadores de radiofrecuencia.

Se desarrollarán prototipos de antena y de red, y se realizará su medida en la cámara anecoica de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Autónoma de Madrid.

## **1.3 Organización de la memoria**

La memoria consta de los siguientes capítulos:

- El capítulo 1 incluye la motivación, objetivos y la organización de la memoria.
- El capítulo 2 incluye el estado del arte donde se introducen conceptos teóricos sobre Fundamentos de Transmisión y Propagación de Ondas (FTPO), Medios de Transmisión (MTX) y Antenas, Electrónica de Comunicaciones (ELECOM) y Compatibilidad Electromagnética (ACEM).
- El capítulo 3 contempla las consideraciones previas que se tendrán en cuenta en los diseños, el proceso que se ha seguido al diseñar y las simulaciones resultantes por cada proceso.
- El capítulo 4 consta del desarrollo de los prototipos y su construcción.
- El capítulo 5 incluye las medidas de los prototipos construidos.
- El capítulo 6 incluye las conclusiones y el trabajo futuro.
- El capítulo 7 incluye las referencias y el glosario.

## 2 Estado del arte

---

### 2.1 Principios básicos de antenas

#### 2.1.1 Concepto de antena

Se llama antena a la parte de un sistema transmisor o receptor que está diseñado para radiar o recibir ondas electromagnéticas [4].

El diseño de la antena se basa en la oscilación de dichas ondas a la banda de frecuencia que deseamos. La banda más frecuente es la de microondas, la cual abarca desde los 300 MHz hasta los 300 GHz, esta misma a su vez se divide en otras más pequeñas que data desde los orígenes del sistema radar (1935):

Banda	Frecuencia	Longitud onda
L	1 - 2 GHz	30 – 15 cm
S	2 - 4 GHz	15 – 7.5 cm
C	4 – 8 GHz	7.5 – 3.75 cm
X	8 – 12.4 GHz	3.75 – 2.42 cm
Ku	12.4 – 18 GHz	2.42 – 1.66 cm
K	18 – 26.5 GHz	1.66 – 1.11 cm
Ka	26.5 – 40 GHz	11.1 – 7.5 mm
mm	40 – 300 GHz	7.5 – 1 mm

Tabla 2-1. Nombre, frecuencia, longitud de onda de la banda de frecuencias.

#### 2.1.2 Conceptos básicos

##### 2.1.2.1 Coeficiente de reflexión

El coeficiente de reflexión es aquel que muestra la relación entre la onda incidente  $V_i$  y la onda reflejada  $V_r$ , se define como (1).

$$\rho = \frac{V_r}{V_i} \quad (1)$$

Se puede calcular el coeficiente de reflexión a la entrada  $\rho_A$  en una línea de transmisión, donde  $Z_A$  sea la impedancia de entrada y  $Z_0$  sea la impedancia característica (2).

$$\rho_A = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \quad (2)$$

### 2.1.2.2 Definición de parámetros S

Como en cualquier otro circuito, debe haber una manera común de poder analizar los resultados en RF. El método universal es el de la matriz S o también llamada matriz de *scattering*, la cual se basa en la relación en los niveles de potencia que se perciben desde los terminales de las K puertas del circuito según las ondas de tensión normalizadas  $v_k$  que inciden en esas puertas. Los niveles de potencia se pueden definir como onda de potencia incidente  $a_k$  (3) y onda de potencia reflejada  $b_k$  (4).

$$a_k = \frac{v_k + i_k Z_{0k}}{\sqrt{8Z_{0k}}} \quad (3) \quad b_k = \frac{v_k - i_k Z_{0k}}{\sqrt{8Z_{0k}}} \quad (4)$$

Donde  $i_k$  es la corriente que entra a la puerta k, y  $Z_{0k}$  la impedancia de referencia en la puerta k. Estas ondas de potencia se relacionan, como acabamos de ver, en la matriz de parámetros S (5) [5].

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1k} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{k1} & S_{k2} & \dots & S_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_k \end{bmatrix} \quad (5)$$

Para calcular el parámetro de dispersión  $S_{ji}$  (6) es necesario que todos los accesos a la red se carguen con su impedancia característica a excepción del puerto i-ésimo en el cual irá el generador que produzca una onda incidente  $a_i$ .

$$S_{ji} = \left( \frac{b_j}{a_i} \right)_{\text{para } a_k=0, k \neq i} \quad (6)$$

De esta manera, se puede definir los coeficientes de reflexión  $S_{ii}$  (7) y los coeficientes de transmisión o ganancia inversa  $S_{ji}$  (8):

$$|S_{ii}|^2 = \frac{\text{Potencia reflejada en la puerta } i}{\text{Potencia disponible del generador en la puerta } i} \quad (7)$$

$$|S_{ji}|^2 = \frac{\text{Potencia entregada a la carga de la puerta } j}{\text{Potencia disponible del generador en la puerta } i}, j \neq i \quad (8)$$

Gracias a los parámetros S podemos definir parámetros importantes para nuestro circuito [6]:

- Pérdidas de retorno (dB) (9) =  $-20 \log_{10}(S_{ii})$  (9)

- Pérdidas de inserción (dB) (10) =  $-20 \log_{10}(S_{ji})$  (10)

Para la red de alimentación de esta antena, un total de 5 puertos, las pérdidas de inserción serían (11):

- Pérdidas de inserción (dB) (11) =  $-10 \log_{10}(|S_{21}|^2 + |S_{31}|^2 + |S_{41}|^2 + |S_{51}|^2 + |S_{11}|^2)$

### 2.1.2.3 Parámetros S: Acoplos y adaptación activa.

Los parámetros S, como se ha dicho anteriormente, nos permite sacar la adaptación y transmisión de los circuitos de RF. En un circuito de dos puertas, la adaptación del circuito se medirá según el origen de la alimentación (si se alimenta en el puerto 1, será el  $S_{11}$ ).

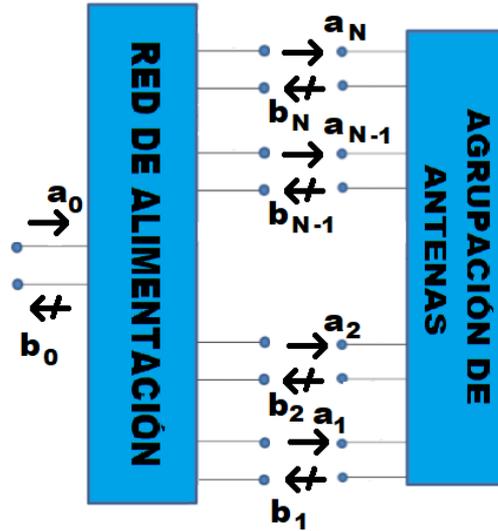


Figura 2.1-1. Agrupación de antenas y red de alimentación.

En agrupaciones de antenas o *arrays* con N elementos, cada una irá alimentada por una onda de potencia  $a_N$  (12), en amplitud y fase, y tendrá su propia onda reflejada  $b_N$  (figura 2.1-1).

$$A_N = a_N \cdot e^{j\phi_N} \quad (12)$$

Las interacciones entre las antenas dentro de la agrupación se denominan acoplos, estos vienen reflejados en la matriz  $[S_\alpha]$  de acoplos entre antenas referidos a sus entradas (13), que establece las adaptaciones pasivas de cada elemento radiante de la agrupación y parámetros de transmisión de las señales acopladas entre las antenas de dicho *array*.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}^\alpha & S_{12}^\alpha & \dots & S_{1N}^\alpha \\ S_{21}^\alpha & S_{22}^\alpha & \dots & S_{2N}^\alpha \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{N1}^\alpha & S_{N2}^\alpha & \dots & S_{NN}^\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_N \end{bmatrix} \Rightarrow (b) = [S_\alpha] \cdot (a) \quad (13)$$

Para obtener el coeficiente de adaptación activa del elemento i (aquel que alimentamos) (14), se necesita: los coeficientes de alimentación  $a_n$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ), la adaptación pasiva del elemento i  $S_{ii}^\alpha$  y los coeficientes de acoplamiento mutuo entre elementos  $S_{Ni}^\alpha = S_{iN}^\alpha$  [7].

$$\Gamma_{act.i} = \sum_{n=1}^N S_{iN}^\alpha \frac{a_n}{a_i} = S_{ii}^\alpha + \sum_{\substack{n=1 \\ i \neq n}}^N S_{iN}^\alpha \frac{a_n}{a_i} \quad (14)$$

#### 2.1.2.4 Directividad y ganancia

Según los estándares del IEE se utiliza la intensidad de radiación  $U(\theta, \phi)$ , la cual se define como la potencia radiada por unidad de ángulo sólido, para calcular la directividad. La directividad  $D(\theta, \phi)$  (15) es la relación entre la intensidad de radiación en una determinada dirección, y la intensidad de radiación de una antena isotrópica  $U_{iso}$  que radiase la misma potencia total  $P_{rad}$  pero uniformemente en todas direcciones:

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{iso}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \quad (15)$$

La ganancia de una antena (16) queda definida como el cociente entre la intensidad de radiación en una dirección determinada y la intensidad de radiación de una antena isotrópica que aceptara la misma potencia de entrada ( $P_{in}$ ) que la antena bajo estudio.

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (16)$$

#### 2.1.2.5 Diagrama de radiación

El diagrama de radiación es la representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en campo lejano en función de las coordenadas espaciales. Se llama campo lejano a la distribución del campo angular que no depende de la distancia de la antena, se suelen considerar distancias superiores a  $\frac{2D^2}{\lambda}$ , siendo D la dimensión máxima de la antena y  $\lambda$  la longitud de onda a la que trabaja la misma.

El diagrama de radiación se puede representar de forma tridimensional utilizando diferentes cortes en planos o diferentes técnicas gráficas cuyas coordenadas utilizadas son las esféricas.

Para representaciones en dos dimensiones, los planos se indican con coordenadas polares y cartesianas. Se pueden diferenciar dos planos principales que representan la mayor parte de la información, el plano E y el plano H.

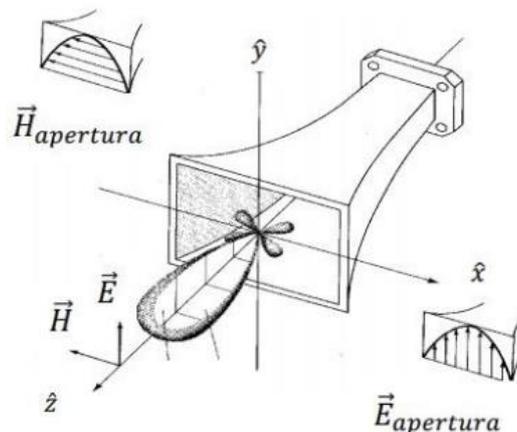


Figura 2.1-2. Ejemplo diagrama de radiación.

### 2.1.2.6 Características del diagrama de radiación

El diagrama de radiación nos muestra una serie de parámetros que deben saber interpretarse para poder obtener de este la información que se requiere para caracterizar a nuestra antena [8].

- La dirección de apuntamiento es la dirección máxima de radiación. En la Figura 2.1-3 se sitúa a  $0^\circ$ .
- Los lóbulos son aquellas porciones del diagrama delimitadas por regiones de radiación más débiles. Se pueden distinguir diferentes tipos:
  - El lóbulo principal, es el margen angular en torno a la dirección de máxima radiación. Define la dirección de máximo apuntamiento.
  - Los lóbulos laterales, son aquellos distintos al lóbulo principal. Los podemos clasificar en lóbulos secundarios, aquellos adyacentes al lóbulo principal; y lóbulos posteriores, situados a  $180^\circ$  del lóbulo principal.
- Los nulos son la región de menor radiación.
- El ancho de haz ( $\Delta\theta$ ) nos indica la separación angular. Puede medirse en una caída de 3 dB respecto del máximo ( $\Delta\theta_{-3dB}$ ), o bien entre nulos ( $\Delta\theta_n$ ).
- Nivel de lóbulos secundario o *Side Lobe Level* (S.L.L.). Mide la relación de potencia que hay entre el máximo (el lóbulo principal) y los lóbulos secundarios.

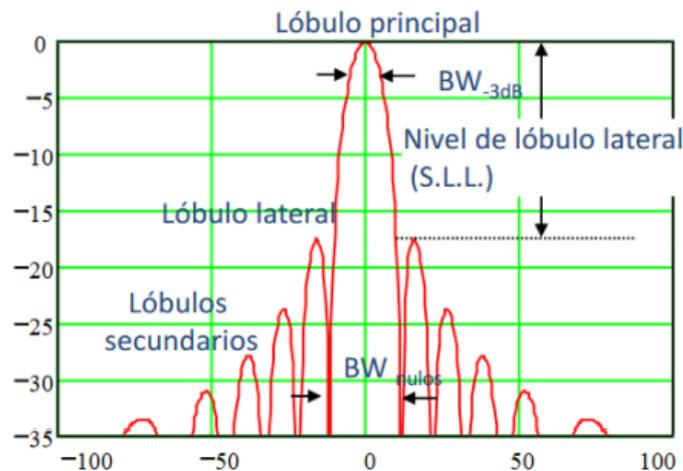


Figura 2.1-3. Parámetros del diagrama de radiación.

### 2.1.3 Tipos de antenas

Los diferentes tipos de antenas se caracterizan según su topología: antenas lineales, antenas impresas, antenas de apertura, agrupaciones de antenas y antenas inteligentes.

## 2.1.4 Antenas de parche

Las antenas de parche son aquellas fabricadas sobre tecnología de circuito impreso, cuyo espesor ronda el orden de  $0.005\lambda_0$  y  $0.2\lambda_0$ . La línea *microstrip* es un modelo de línea de transmisión construida en tecnología impresa utilizada para transmitir señales de microondas. El campo se genera en el sustrato, en su mayor parte, y en el aire. Por esto, se suele considerar que el modo propagado por las líneas microstrip no es puramente TEM (Transversal Electromagnético), sino un quasi-TEM.

La forma de los parches *microstrip* viene dada según el diseñador, aunque las más comunes son la rectangular o la circular. La alimentación de este tipo de antenas suele ser a través de una línea *microstrip* (es el caso de este trabajo) o coaxial.

Son antenas de bajo perfil con un coste de fabricación bajo, ya que se pueden construir utilizando placas e impresoras de circuitos impresos o PCBs. Además, gracias a su tecnología, son muy fáciles de integrar en una red de alimentación.

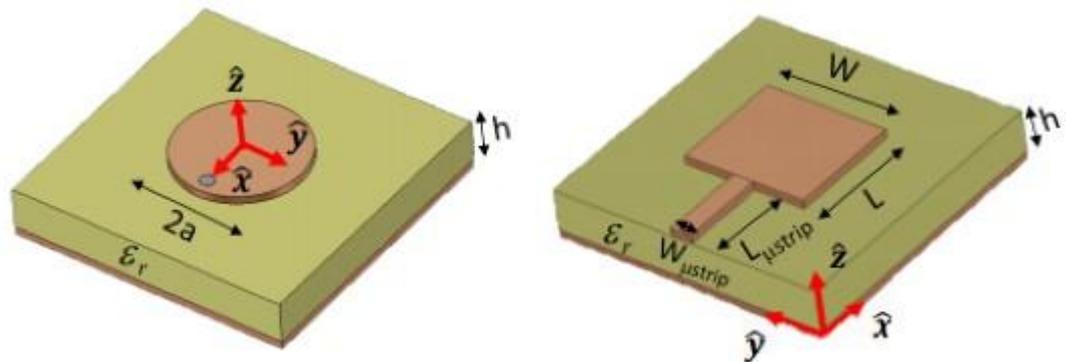


Figura 2.1-4. Parche circular y parche rectangular.

Una de las desventajas de las antenas de parche, es que su ancho de banda es bastante pequeño y de un nivel limitado de potencia máxima. Para solventar este problema, se añade un parche apilado a la antena de parche inicial, los cuales generan dos resonancias muy próximas en frecuencia, resultando un ancho de banda combinado mucho mayor [9].

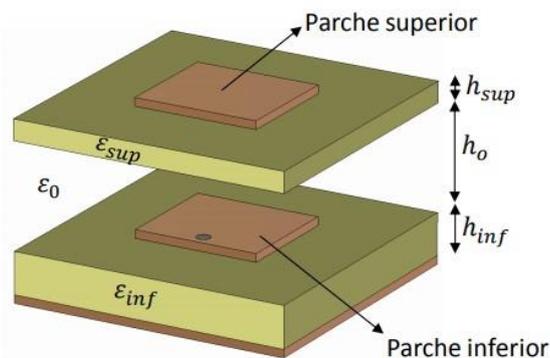


Figura 2.1-5. Parche apilado.

## 2.1.5 Array de antenas

Como se dijo en el punto 2.1.3.4, las agrupaciones de antenas o *array* de antenas son aquellas formadas por un conjunto de antenas cuyo diagrama de radiación se puede controlar con la amplitud y fase de cada una de ellas.

El campo total radiado de un *array* (17) se puede calcular con el sumatorio de todos los campos radiados  $\vec{E}_n(r, \theta, \Phi)$  de cada elemento  $n$  del *array* con una alimentación (18).

$$\vec{E}_A(r, \theta, \Phi) = \sum_{n=1}^N \vec{E}_n(r, \theta, \Phi) = \vec{E}_0(r, \theta, \Phi) \sum_{n=1}^N A_n \cdot e^{jk_0 \hat{r} \cdot \vec{r}_n} \quad (17)$$

$$A_n = a_n \cdot e^{jn\alpha} \quad (18)$$

Cuyo vector unitario es (19)  $\hat{r} = \sin\theta \cos\Phi \cdot \hat{x} + \sin\theta \sin\Phi \cdot \hat{y} + \cos\theta \cdot \hat{z}$ . (19)

Si elementos iguales se disponen según el vector de posición (20), siendo  $d$  la distancia entre elementos situados en el eje  $\hat{z}$ , se puede descomponer la ecuación del campo total radiado en campo eléctrico radiado del elemento unitario  $\vec{E}_0(r, \theta, \Phi)$  y en el factor de array (21).

$$\vec{r}_n = n \cdot d \cdot \cos\theta \cdot \hat{z} \quad (20)$$

$$F_A(\theta, \Phi) = \sum_0^{N-1} a_n \cdot e^{jn(k_0 d \cos\theta + \alpha)} \quad (21)$$

Siendo  $\alpha$  el desfase entre elementos. En el caso de este TFG, se trata de un array de fase progresiva, el cual se cambia el valor de  $\alpha$  para conseguir que el lóbulo principal del campo radiado consiga desapuntarse, es decir, fijar este lóbulo en la dirección que queramos. [7]



Figura 2.1-6. Agrupación de antenas de parche circulares [9].

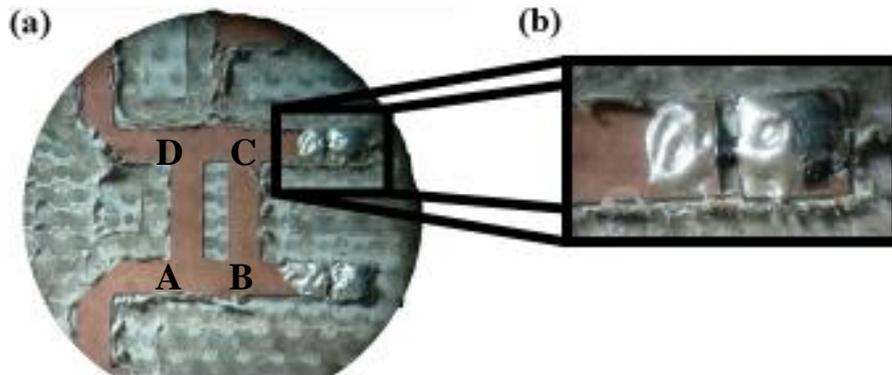
## 2.2 Varactor

Un varactor o diodo varicap basa su funcionamiento en el fenómeno que hace que la anchura de la barrera de potencial, en una unión PN, varíe en función de la tensión inversa aplicada entre sus extremos. Si aumentamos la tensión, aumenta la anchura de la barrera, haciendo que disminuya la capacidad del diodo. Gracias a esto obtenemos un condensador variable controlado por tensión  $V_d$  (22). En el cual valores altos de voltaje conllevaran valores bajos de capacidad, y viceversa [11].

$$C_v = \frac{C}{\sqrt{1 + 2|V_d|}} \text{ pF} \quad (22)$$

En la figura 2.2-1 (a) se muestra un modelo desfasador. Se considera que la puerta A es la entrada y la D es la salida. La configuración de esta figura permite que en la salida D tenga la potencia de entrada de la puerta A, con la suma de las fases de las puertas B y C, en las cuales están los varactores [12].

El presente trabajo utilizara los varactores como un componente distribuido situado en un acoplador híbrido para crear un desfasador o desplazador de fase (*“Phase shifter”*) (figura 2.2-1).



**Figura 2.2-1. Elementos de la red de alimentación construida. (a) Desfasador. (b) Varactor soldado.**

## 3 Diseño

Como se había indicado antes, este trabajo es la continuación del TFG de D. Javier Herranz Alpanseque: “Diseño de desfases con varactores para antenas planas”. En el cual se toma el diseño de los desfases.

Al principio de este trabajo se quiso mejorar los resultados de adaptación del proyecto precio, por lo que se empezó a diseñar un desfase distinto como viene reflejado en el anexo A: “Diseño de la red de alimentación a 70 Ohm”, el cual se abandonó ya que el rango de fase resultante de ese circuito era menor que el circuito diseñado a 50 Ohm.

En esta sección se presenta cómo se ha realizado el diseño de la red de alimentación, el circuito regulador de tensión para alimentar los varactores y el array de parches apilados.

El apartado de la red de alimentación constará de las distintas fases que el diseño ha sufrido, empezando por el desarrollo del aislante de continua, y cómo este afecta al desfase formado por los varactores. También se mostrará el resultado final de la red. El resto de los pasos vienen reflejados en el anexo B:” Desarrollo de la red”.

Para el circuito regulador de tensión se enseñará el esquemático del circuito necesario para nuestra necesidad de repartir el voltaje a todas las ramas donde haya varactores.

Por último, se mostrará el diseño del array del parche circular apilado con sus respectivas simulaciones y una estimación del diagrama de radiación del array.

### 3.1 Consideraciones previas

El rango de frecuencias de este trabajo es de 16 GHz a 18 GHz, con una frecuencia central de trabajo de 17 GHz. El dieléctrico utilizado es Taconic RF-35, un sustrato con una constante dieléctrica  $\epsilon_r = 3.5$ , con una tangente de pérdidas de 0.005 y espesor de 0.5 mm. Las pistas de RF tienen un espesor de 0.018 mm. Los varactores tendrán una capacitancia variable de 0.13 pF a 2.2 pF, según varíe su alimentación, de 17 V a 0 V; y, con una resistencia interna de 15 Ohmios.

### 3.2 Red de Alimentación

En esta etapa del diseño se explicarán las diversas partes que forman el circuito desfaseador.

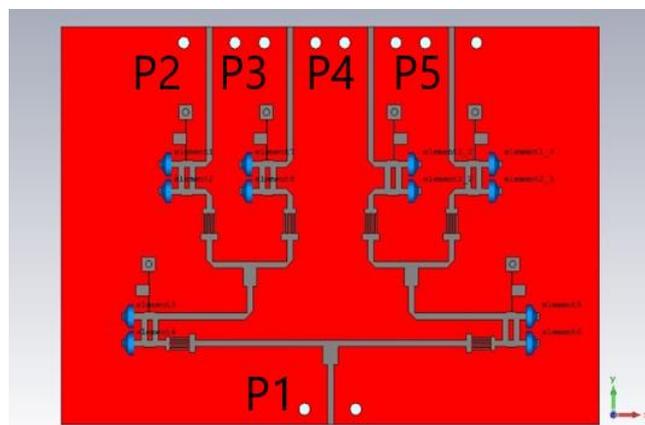


Figura 3.2-1. Red de alimentación

### 3.2.1 Aislante de continua

La parte más importante de este trabajo son los varactores, y estos tienen que ser alimentados por una tensión continua para que puedan dar la fase que necesitamos. El problema surge porque los distintos desfases, con sus respectivos varactores, están conectados en una misma red de alimentación, lo que no permitiría variar el desfase cada uno.

Para solventar este problema se recurre al diseño de un dispositivo que sea capaz de traspasar la señal y evitar el paso de la tensión continua. Para evitar posibles errores en la construcción se fijó una distancia mínima entre los “pelos” del peine de 0.26 mm.

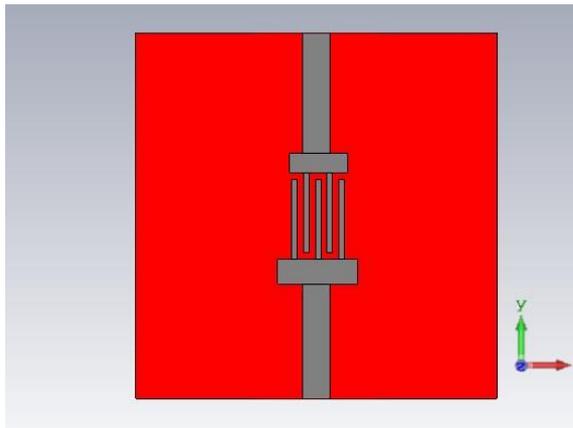


Figura 3.2-2. Aislante de tensión continua.

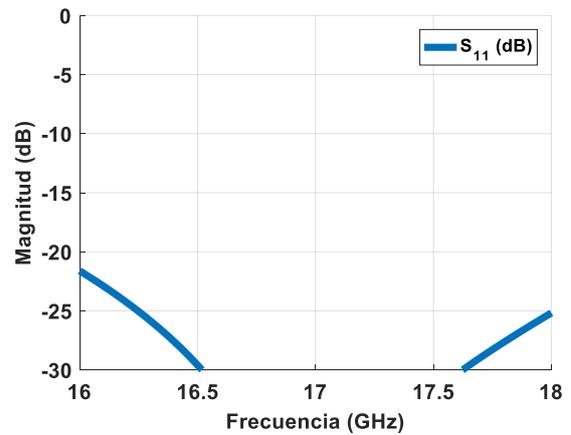


Figura 3.2-3.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] del aislante de tensión continua.

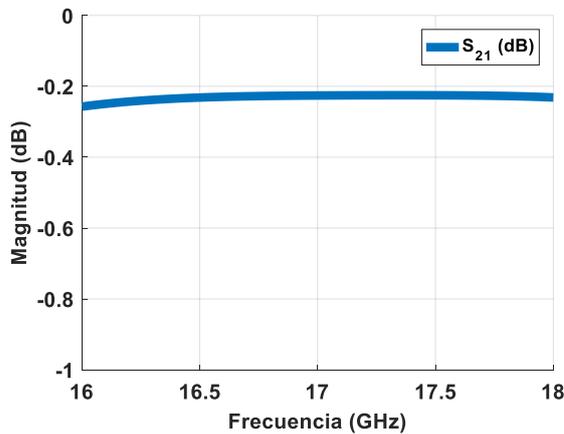


Figura 3.2-4.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] del aislante de tensión continua.

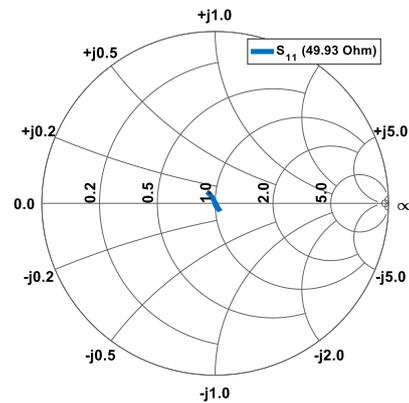


Figura 3.2-5.  $S_{11}$  [Carta de Smith] del aislante de tensión continua.

### 3.2.2 Desfasador con aislante

Para poder dar una variación de fase a la salida, se necesita un circuito capaz de dar una amplitud uniforme pudiendo variar su fase. Se precisa de un desfasador a 50 Ohm al que se le añade el aislante para ver cómo influye en este. Se incluye también un elemento agrupado (“*Lumped component*”) que simulará, aproximadamente, el comportamiento del varactor con las características citadas en la sección 3.1.

Con esto se observa la adaptación aproximada que tendrá cada rama del circuito, además de obtener un valor inicial para el rango de fase posible por rama. Según se aprecia en la figura 3.2-8, el rango de fase simulado por una rama individual sería de 130 grados.

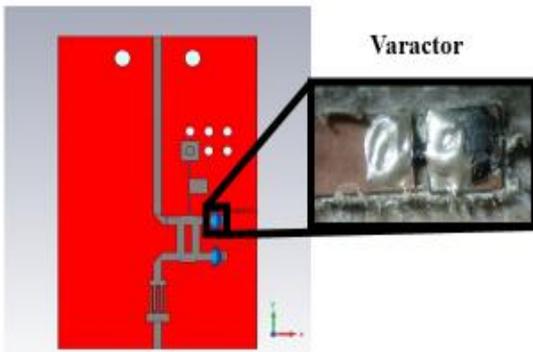


Figura 3.2-6. Desfasador con aislante.

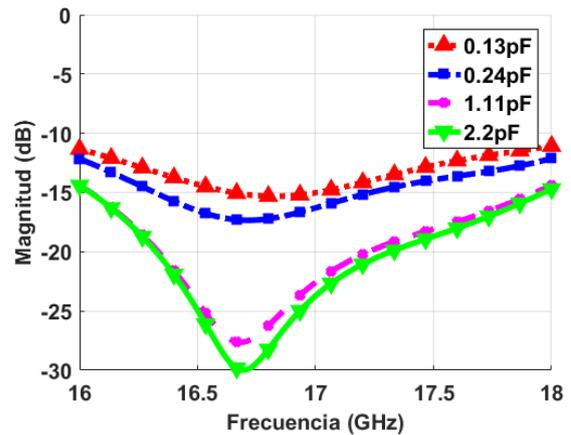


Figura 3.2-7.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] del desfasador con aislante.

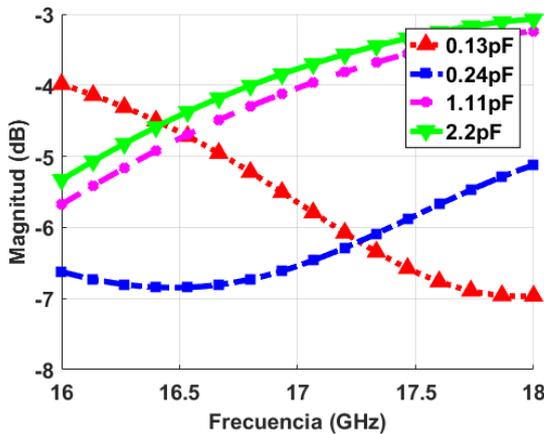


Figura 3.2-8.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] del desfasador con aislante.

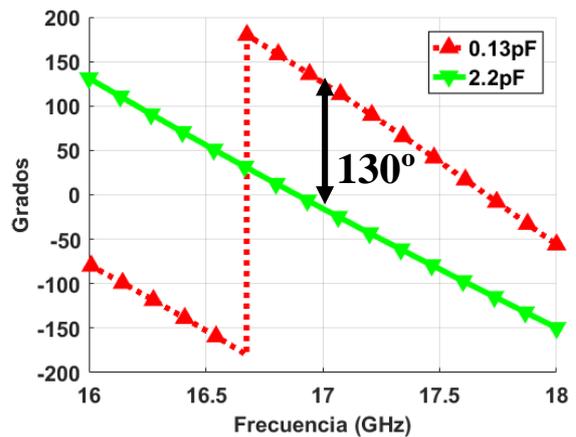


Figura 3.2-9.  $S_{21}$  [Fase en grados] del desfasador con aislante.

### 3.2.3 Red final

En este apartado se explica el conjunto del diseño de la red. El primer objetivo era fijar la distancia de separación de  $0.85\lambda_0$  (15 mm), la necesaria para mantener los lóbulos de réplica a un nivel reducido y que no interfieran en la radiación del *array* ni generen acoplos entre puertas.

Otro de los objetivos era la obtención de un mayor rango de fase. Considerando que en el diseño de un solo desfasador con aislante se obtienen aproximadamente 130 grados de rango de fase, al poner otro desfasador en las dos ramas en las que se dividen los cuatro desfasadores, se consigue duplicar el rango de fase, obteniendo un total de 260 grados.

En cuanto a temas de adaptación, se buscaba obtener el mayor ancho de banda para el rango de frecuencias de trabajo y mantener una cierta resonancia en la frecuencia central. Esto se consiguió diseñando cada parte del circuito por separado, tanto los desfasadores como los divisores, y manteniendo una simetría en el diseño en todo momento. Al ser un diseño completamente simétrico, el resultado de las simulaciones es el mismo en todas las puertas.

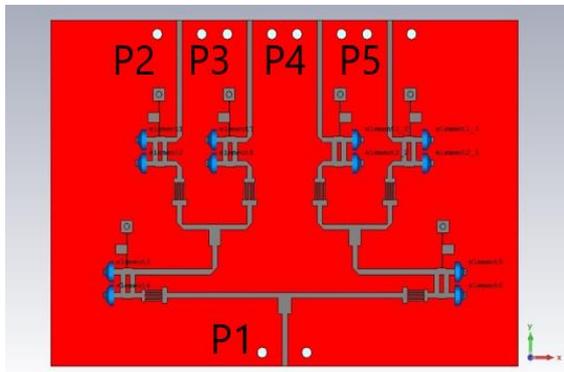


Figura 3.2-10. Red final.

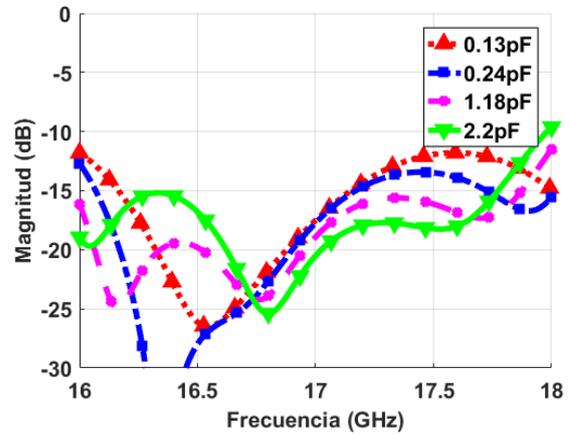


Figura 3.2-11.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] de la red final.

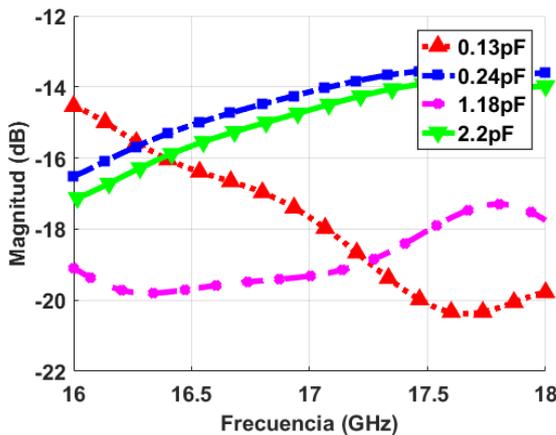


Figura 3.2-12.  $S_{NI}$  [Magnitud en dB] de la red final.

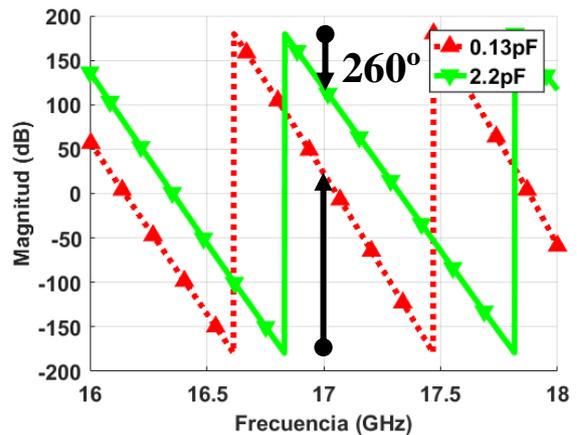


Figura 3.2-13.  $S_{NI}$  [Fase en grados] de la red final.

### 3.3 Circuito Regulador

Debido a la necesidad de llevar tensión a los distintos desfases de la red, para que los varactores den la fase que se precisa, se propone diseñar un circuito regulador que reparta la tensión requerida a cada desfase. Para ello se utiliza el regulador LM317 en cuyo *datasheet* viene el siguiente circuito esquemático de ejemplo:

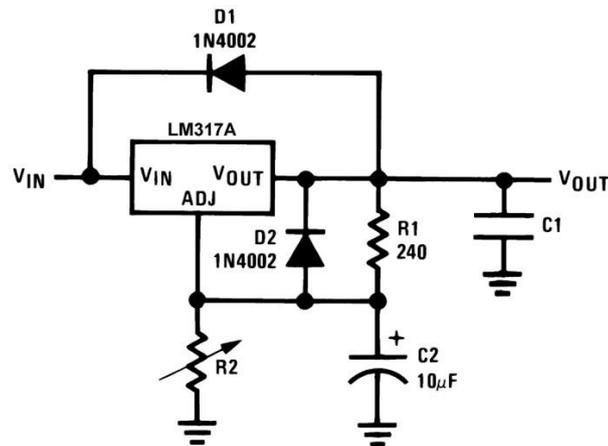


Figura 3.3-1. Esquemático circuito regulador.

Este circuito es capaz de repartir una tensión variable teórica a la salida entre 1.2 V y 25 V.

### 3.4 Array de parche

Una vez construida la red de alimentación, se procede a realizar el diseño del *array* de parches. Se basa principalmente en reproducir el elemento unitario según el número de parches con los que se desea hacer la antena, en este caso 4 veces.

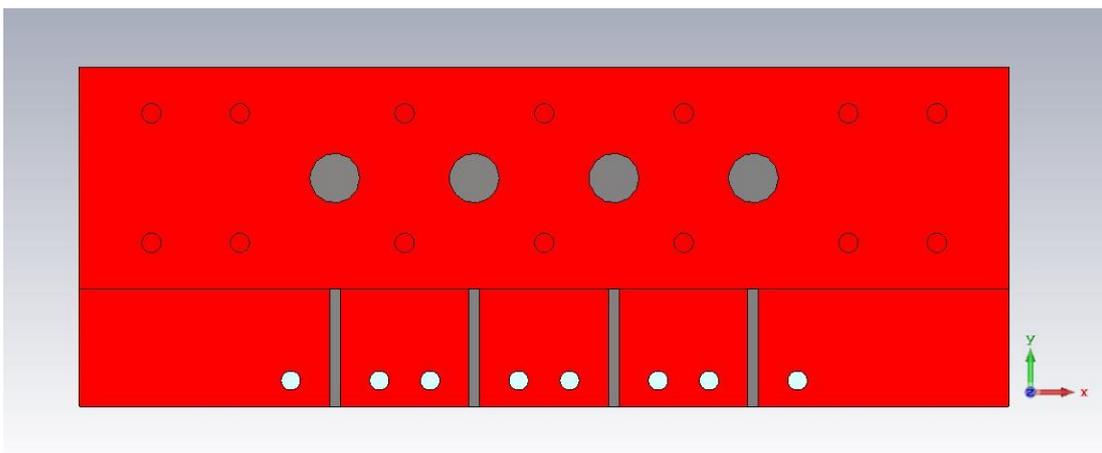


Figura 3.4-1. Diseño del array de parches

A continuación, se exponen los resultados de las simulaciones. Al ser los mismos parches, la adaptación de estos es la misma por cada parche. La adaptación activa (14) y los acoplos, se dividen en parches exteriores (puertos 1 y 4) e interiores (puertos 2 y 3).

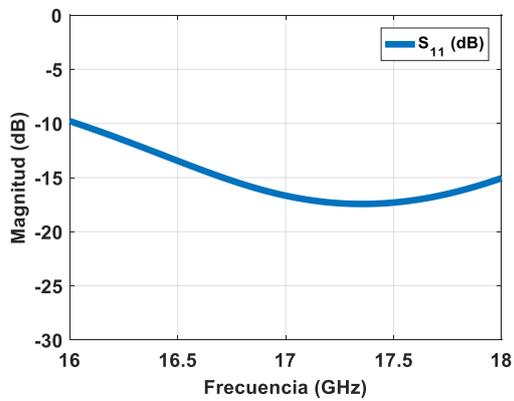


Figura 3.4-7.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] de los parches.

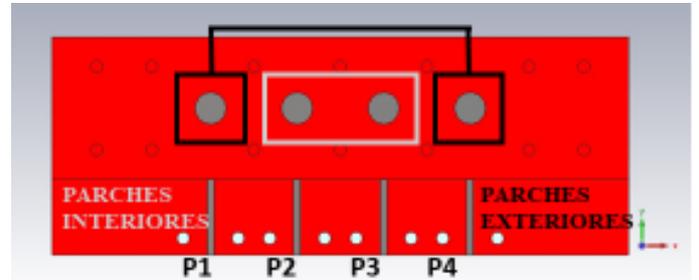


Figura 3.4-2. División de los parches.

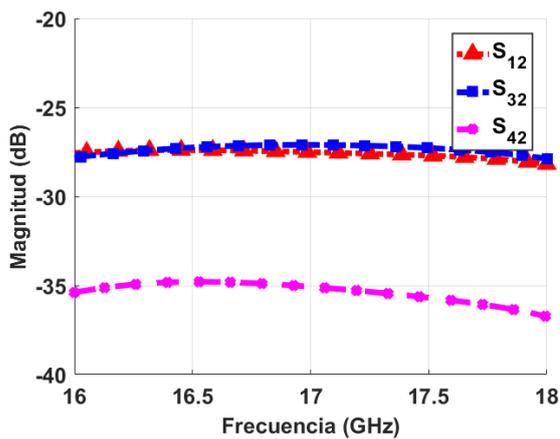


Figura 3.4-3. Acoplos parche interiores.

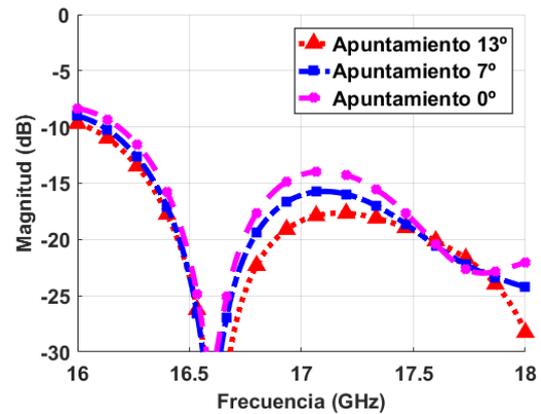


Figura 3.4-4. Adaptación activa de los parches interiores según el apuntamiento.

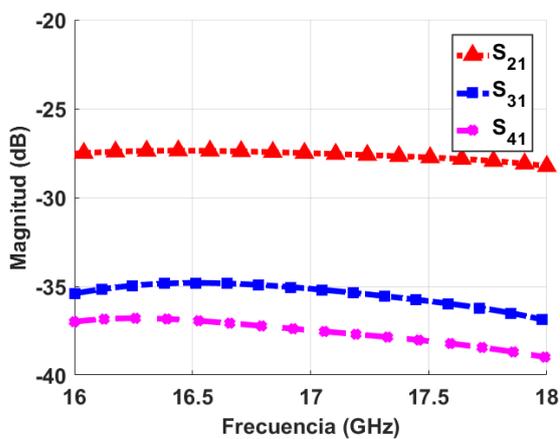


Figura 3.4-5. Acoplos parche exteriores.

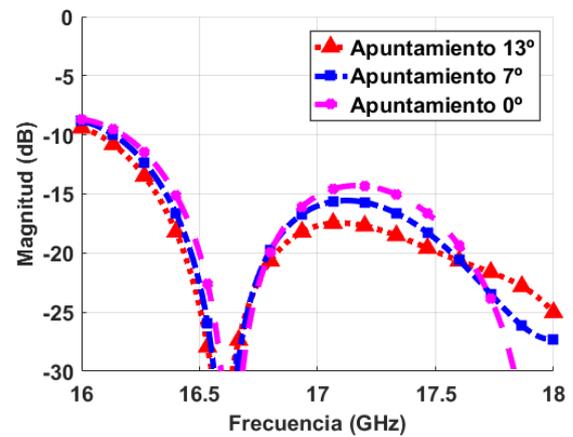


Figura 3.4-6. Adaptación activa de los parches exteriores según el apuntamiento.

En la figura 3.4-8, se muestra el diagrama de radiación simulado de cada parche del *array*. Una vez obtenido el rango de fase de la simulación total de la red, se procede a sacar el desajuste teórico total que se puede llegar a tener.

En la red se consigue un valor máximo de 13 grados de apuntamiento con amplitud uniforme y desfase entre parches de -70 grados. También se muestra el desajuste a 7 grados (-40 grados de desfase entre parches) y a 0 grados (todos los parches a la misma fase). Esto viene reflejando en la figura 3.4-9 a la frecuencia de 17 GHz.

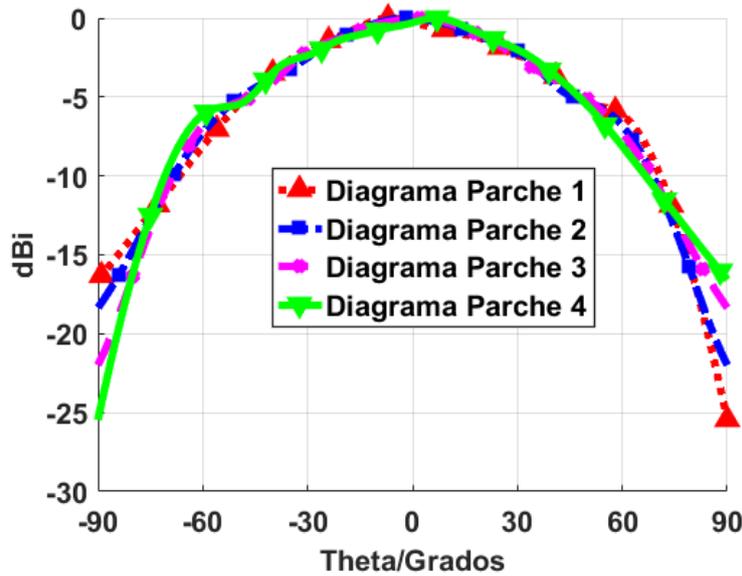


Figura 3.4-8. Diagrama de radiación de cada parche a 17 GHz.

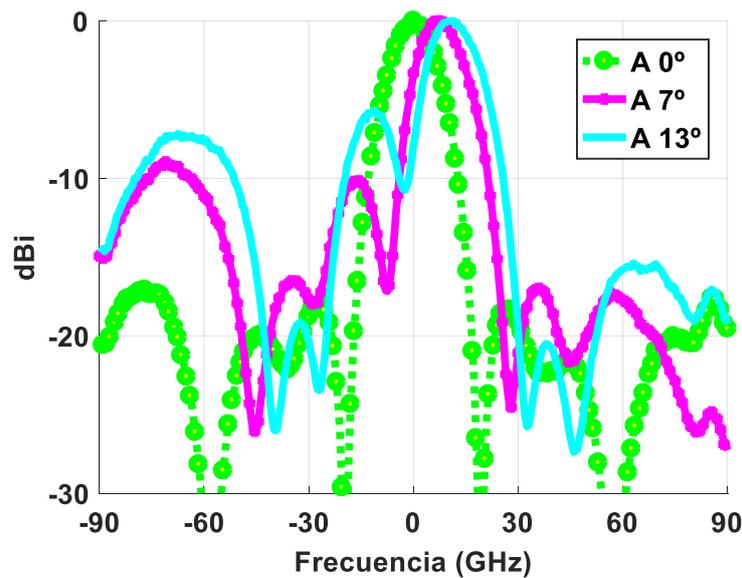


Figura 3.4-9. Diagrama de radiación del array de parches teórico a 17 GHz.



## 4 Desarrollo de prototipos

En esta sección se mostrarán los distintos prototipos que se construirán y medirán a través de los diseños propuestos.

Para que la red y el circuito regulador estén lo más próximo uno del otro y se evite en la mayoría de la posible la utilización de cables, se decide construir la red de alimentación encima del circuito regulador.

### 4.1 Red de Alimentación

El primer diseño de esta placa de RF viene dado en la sección 3.2.3, donde se realiza un diseño válido para construir. Como se ha dicho en la introducción del apartado 4, se pretende unir la red con el circuito regulador. Para ello hay que tener en cuenta los taladros para los conectores y vías, las propias cabezas de las vías, y un hueco para la clema que alimentara todo el circuito. Después, se modificará el primer prototipo en uno apto para incluir el circuito regulador.

#### 4.1.1 Diseño del prototipo a construir

En la figura 4.1-1, se puede observar el diseño previo a la construcción de la red de alimentación. Sus dimensiones son 69.3 mm de largo y 123.5 mm de ancho. Se indican los diferentes tipos de taladros, para las vías y los conectores *Southwest*; los cortes hechos en la parte inferior de la placa de cobre, para que la tensión llegue correctamente a los varactores; y las ventanas en la placa, para evitar que la cabeza de las vías de la placa reguladora choque la capa de cobre inferior y mejorar así el contacto entre las dos placas haciendo un único plano de masa.

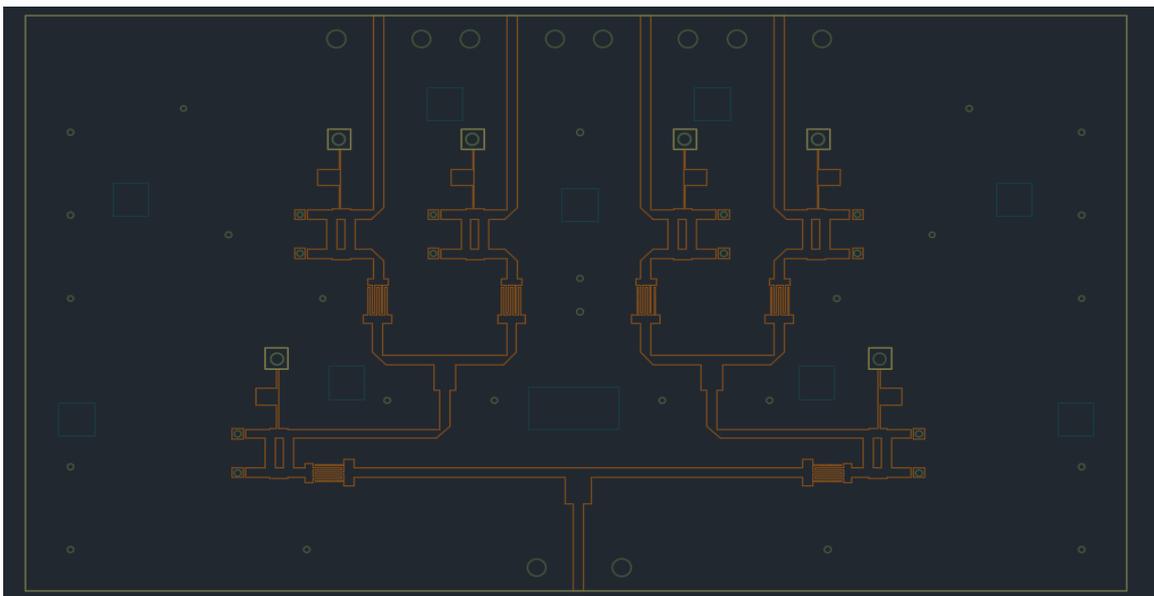
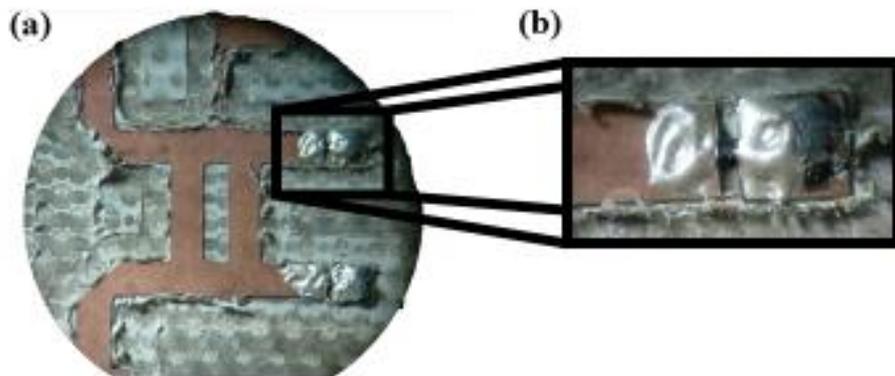


Figura 4.1-1. Diseño del prototipo de la red.

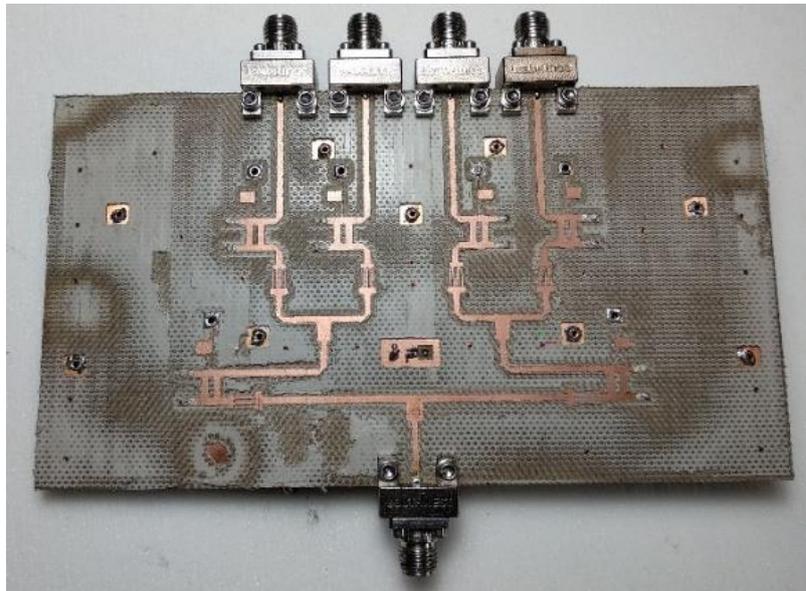
Una vez construido el circuito impreso, se procede al remache y soldadura de las vías. Se añaden y se sueldan los conectores *Southwest* a las pistas. Para finalizar la construcción de la red, se realiza la “unión” de los varactores al circuito con una mezcla formada por pasta adhesiva y pasta conductora y, con ayuda del microscopio y pinzas de precisión, se “unen” los varactores al circuito.

Se sabrá si se ha realizado este proceso correctamente, es necesario mantener conectado el analizador de redes constantemente para ver si los varactores hacen un buen contacto entre la pista del desfasador y la isleta.

Una vez unido los 12 varactores, el resultado es el mostrado en la figura 4.1-2.



**Figura 4.1-2. Elementos de la red de alimentación construida. (a) Desfasador. (b) Varactor soldado**



**Figura 4.1-3. Prototipo de la red construido.**

## 4.2 Circuito regulador

Para comprobar el circuito de ejemplo del *datasheet*, se realiza un primer diseño donde se estudia su funcionamiento y aplicación al trabajo. Si este es válido, se diseña un esquemático para repartir el voltaje entre los desfasadores y un prototipo para construir, teniendo en cuenta que estará en la otra cara de la red de alimentación.

El objetivo de este circuito regulador es realizar uno válido para componentes de montaje superficial. El material donde se han realizado estos prototipos de circuitos reguladores ha sido fibra de vidrio de 1 mm de espesor y, los componentes utilizados, obtenidos del distribuidor *RS Components* han sido los siguientes:

Componente	Código RS
Regulador LM317	533-5705
Potenciómetro	726-3804
Condensador 33 uF	741-6809
Condensador 10 uF	515-8485
Diodo	545-2456
Resistencia 240 Ohm	866-7351

Tabla 4-1. Lista de componentes del circuito regulador.

### 4.2.1 Prototipo individual

En este primer prototipo se procede al diseño del el esquemático planteado en la sección 3.3. Se obtienen las huellas de los distintos componentes (cada uno de su *Datasheet*), situados según el diseño, y se deja un hueco a la entrada y a la salida del circuito para poder caracterizarlo.

En la figura 4.2-1 se observa el diseño final. Se muestran las huellas de los componentes y las vías necesarias (taladros de 1.4 mm de diámetro) para hacer contacto con el plano de masa. Se incluyen una vía a la entrada y otra a la salida del circuito donde se realiza un vaciado del plano de masa para evitar cortocircuitos y poder caracterizarlo.

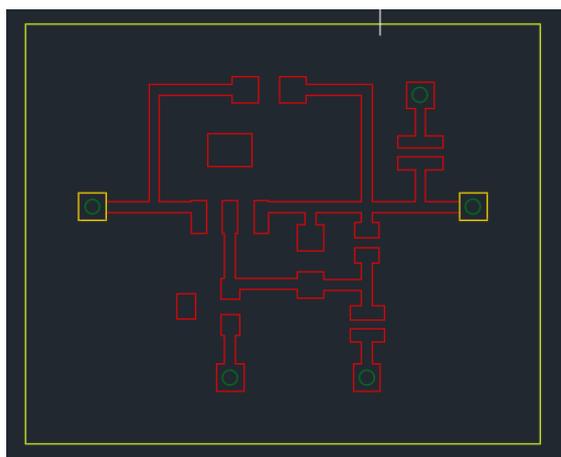


Figura 4.2-1. Diseño prototipo individual.

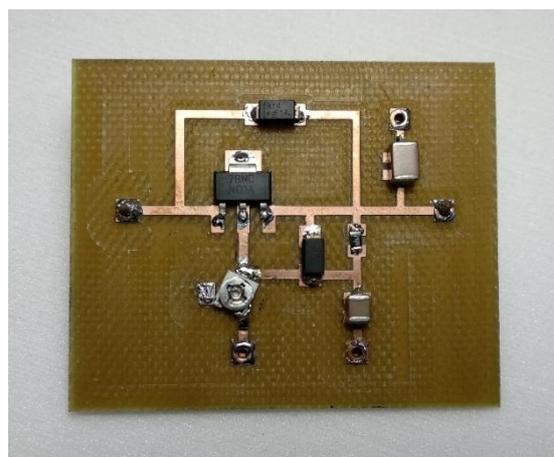


Figura 4.2-2. Prototipo construido.

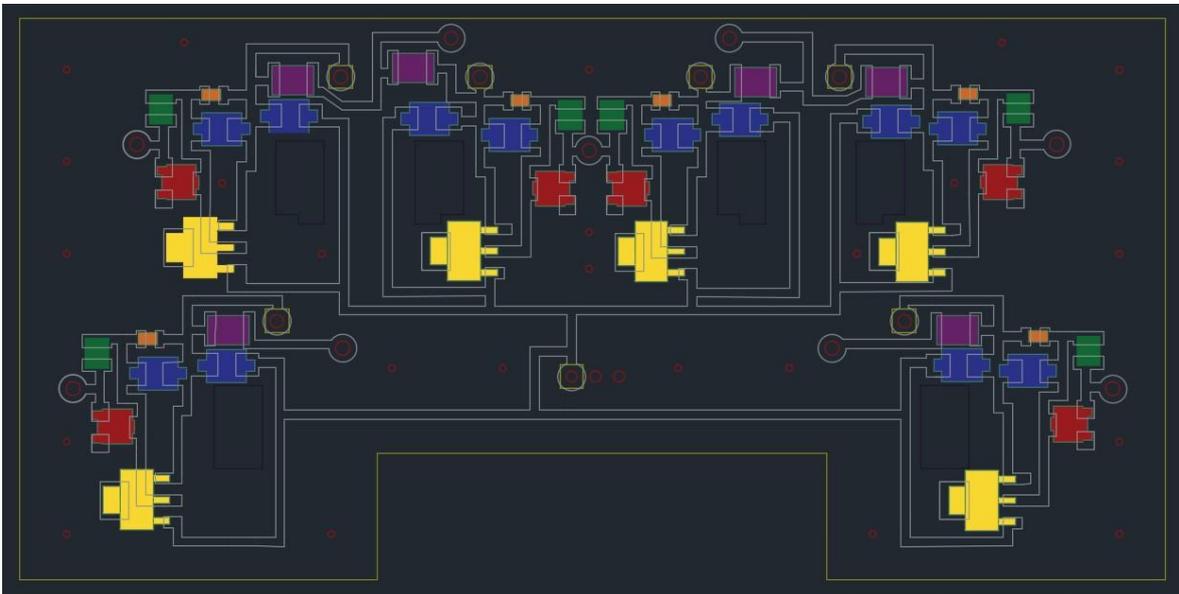
Una vez construido (figura 4.2-2) se comprueba que, para un voltaje de entrada de 18 V, el rango de salida es entre 1 V y 17 V.

## 4.2.2 Prototipo final

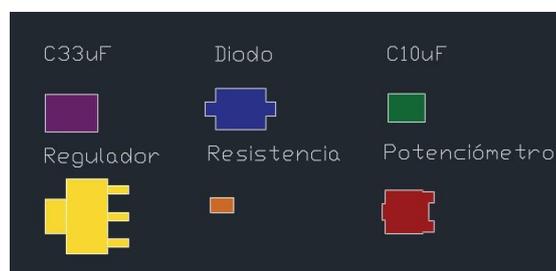
Para la realización de este prototipo hay que tener en cuenta las posiciones de las tomas de alimentación de los varactores de la placa de RF para la distribución correcta de los componentes y de los taladros necesarios.

Las dimensiones de este prototipo (Figura 4.2-3) son 60.3 mm de largo y 123.5 mm de ancho. Se puede observar la predisposición de los componentes del circuito regulador (las huellas de los componentes se muestran en la Figura 4.2-4) y las distintas ventanas que hay en el diseño para la soldadura de las vías de la placa de RF. En cuanto a los taladros, los de 0.7 mm de diámetro se utilizan para la sujeción entre placas, los de 2.2 mm para atravesar las dos placas, y los 3 taladros del medio para las patas de la clema.

Resaltar que esta placa es más pequeña que la de RF para que los conectores *Southwest* hagan bien el contacto con el plano de masa. El resultado del prototipo una vez construido se muestra en la Figura 4.2-5.

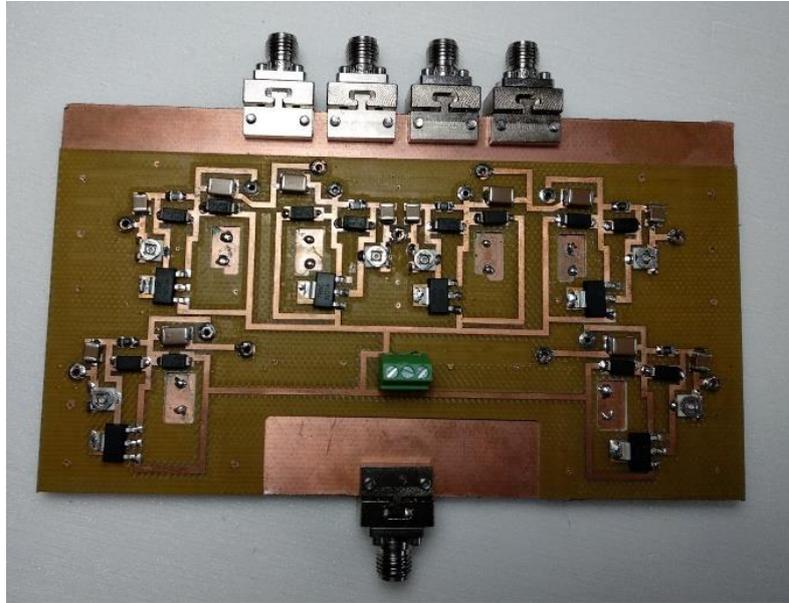


**Figura 4.2-3. Prototipo final circuito regulador.**



**Figura 4.2-4. Huella de los componentes del prototipo final del circuito regulador.**

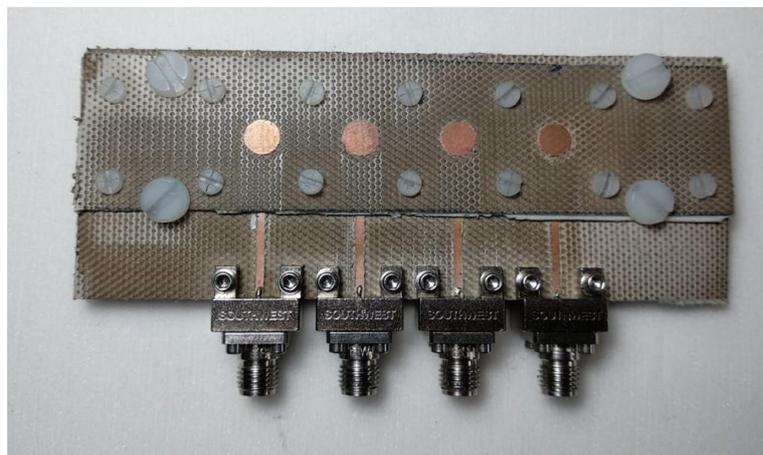
Una vez se obtuvo la construcción del circuito impreso, se procedió a la soldadura de cada componente y, a la vez que se completaban las secciones, se iba comprobando la funcionalidad del circuito regulador. Los resultados de este prototipo se muestran en la sección 5.1.



**Figura 4.2-5. Circuito regulador construido.**

### **4.3 Array de parches**

Este prototipo se construyó a partir del diseño de la sección 3.4 de este trabajo. Para la construcción de este, se imprimieron por separado los parches apilados de los interiores, y se introdujo una placa de *foam* de 1 mm de espesor entre ellos, uniendo todo con catorce tornillos de teflón de métrica 2 y cuatro de métrica 4. Los resultados de adaptación y de acoplos entre parches de este prototipo se encuentran en la sección 5.2.



**Figura 4.3-1. Array de parches construido**

## 4.4 Red de alimentación y antena

Después de medir la red y el *array*, se comprobó que las medidas del *array* no eran las que se buscaban. Analizando los pasos previos de la construcción del *array*, se observó que la impresora, al hacer el parche superior del *array*, retiró más dieléctrico de la parte inferior, haciendo que la adaptación de los parches empeorase. Para solventar este error mecánico, se fabricaron pequeños cuadrados de dieléctrico que se situaron encima del *array*, haciendo que la adaptación mejorase.

La red de alimentación se unió al *array* de parches a través de 4 conectores macho-macho SMA.

Para poder medir en la cámara anecoica, se necesitó una placa de fibra de vidrio debido al peso de la red de alimentación. Se sujetó el *array* con los tornillos de métrica 4 del diseño previo, y la red de alimentación, con seis tornillos de métrica 4 unidos con cinta aislante debido a la imposibilidad de taladrar el circuito. Estos resultados se pueden observar en la sección 5.3.

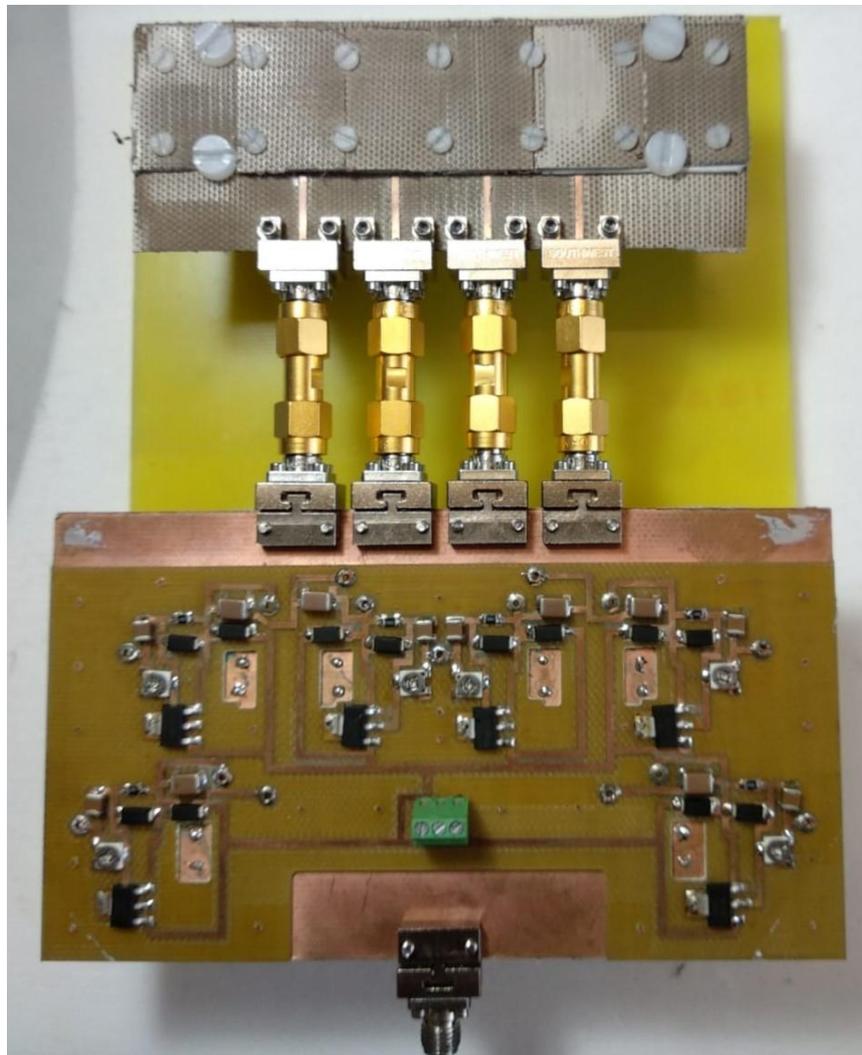
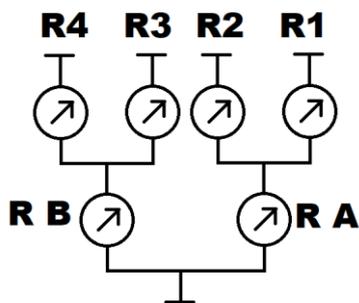


Figura 4.4-1. Red de alimentación y antena.

# 5 Integración, pruebas y resultados

## 5.1 Resultados y pruebas de la red de alimentación

Las medidas realizadas a la red de alimentación han sido principalmente la adaptación y la transmisión entre la entrada de la red y las distintas puertas. En este apartado se exponen los resultados más característicos de la red y el conjunto total de las medidas se mostrará en el anexo C apartado 1: "Medidas adicionales de la red".



Para poder caracterizar la red, se denominan los desfasadores laterales como A y B, y los puertos con los números 1, 2, 3 y 4 (como se indica en la figura 5.1-1), por lo que las medidas del desfasador derecho serán las medidas del A1.

Figura 5.1-1. Caracterización de la red de alimentación.

En las ilustraciones 5.1-2 y 5.1-3 se observa la adaptación y las pérdidas de inserción del circuito a través de la fórmula (11) mostrada previamente. Analizando los resultados, se consigue un buen ancho de banda por debajo de -10 dB. A pesar del alto nivel por pérdidas de transmisión, estas son coherentes si analizamos las pérdidas por separado de los elementos de la red, los dos desfasadores y los dos divisores.

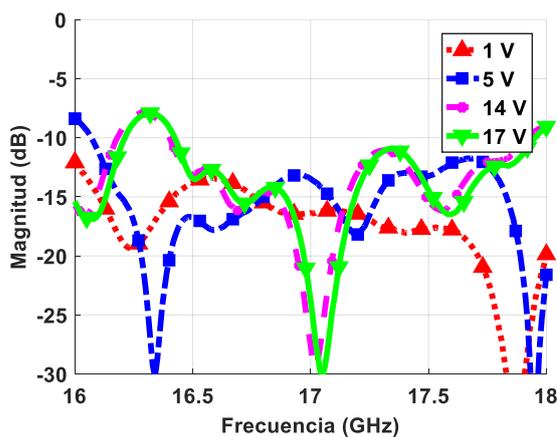


Figura 5.1-2. S<sub>11</sub> [Magnitud en dB] variando la alimentación.

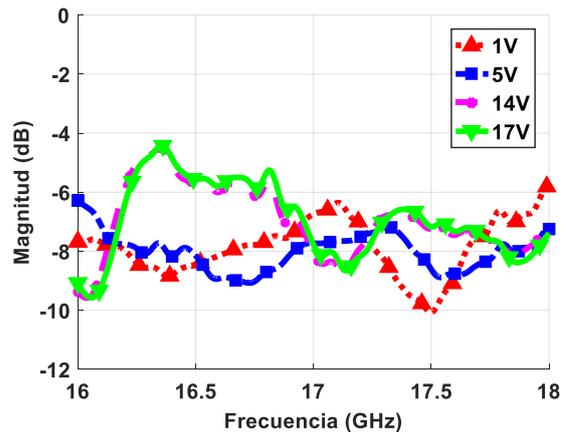


Figura 5.1-3. Pérdidas inserción red de alimentación.

Para obtener las medidas de la red, se fijaron los valores de 1 V, 5 V, 14 V y 17 V como valores base en todas las medidas y se procuró fijar las tensiones de las ramas laterales y variar las ramas de los puertos (Esto se repitió por cada puerto y rama).

Debido a la gran cantidad de medidas obtenidas, a continuación, se exponen distintas gráficas para ver el rango de fase de cada rama. Estas se sacaron fijando la tensión de las ramas laterales a 17 V, para la medida de las ramas 1, 2, 3, 4, y posteriormente, la de las ramas 1 y 4 a 17 V para la medida de las laterales A y B.

En la tabla 5-1 se observan los valores de rango de fase medidos a distintas frecuencias dentro de nuestro rango de trabajo.

<b>Rama</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
<b>Rango de fase en grados a 16 GHz.</b>	<b>111°</b>	<b>115°</b>	<b>106°</b>	<b>113°</b>	<b>102°</b>	<b>103°</b>
<b>Rango de fase en grados a 16.5 GHz.</b>	<b>112°</b>	<b>121°</b>	<b>119°</b>	<b>118°</b>	<b>124°</b>	<b>112°</b>
<b>Rango de fase en grados a 17 GHz.</b>	<b>115°</b>	<b>124°</b>	<b>122°</b>	<b>117°</b>	<b>114°</b>	<b>113°</b>
<b>Rango de fase en grados a 17.5 GHz.</b>	<b>120°</b>	<b>122°</b>	<b>123°</b>	<b>114°</b>	<b>118°</b>	<b>111°</b>
<b>Rango de fase en grados a 18 GHz.</b>	<b>117°</b>	<b>111°</b>	<b>102°</b>	<b>97°</b>	<b>90°</b>	<b>93°</b>

**Tabla 5-1. Rango de fases de cada rama por frecuencias.**

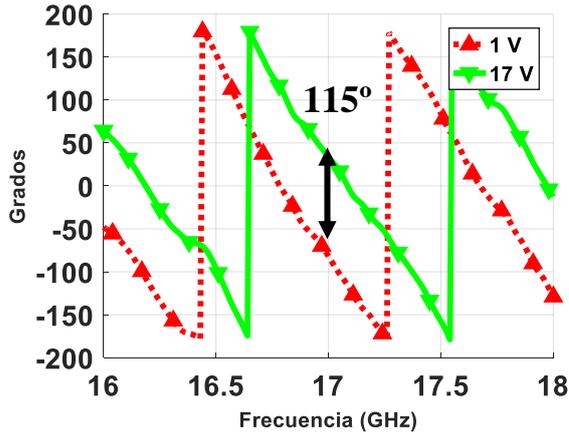


Figura 5.1-4.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama 1, rama A 17 V.

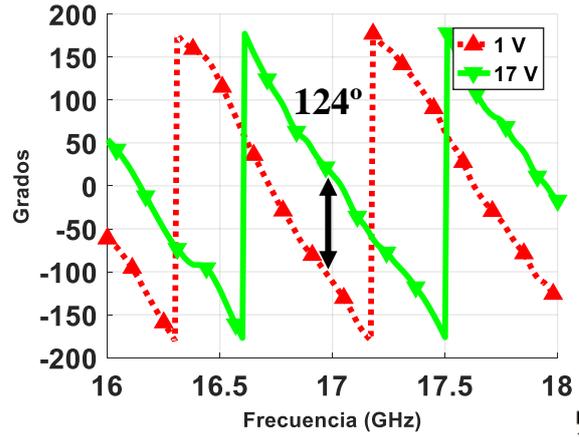
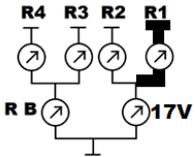


Figura 5.1-5.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama 2, rama A 17 V.

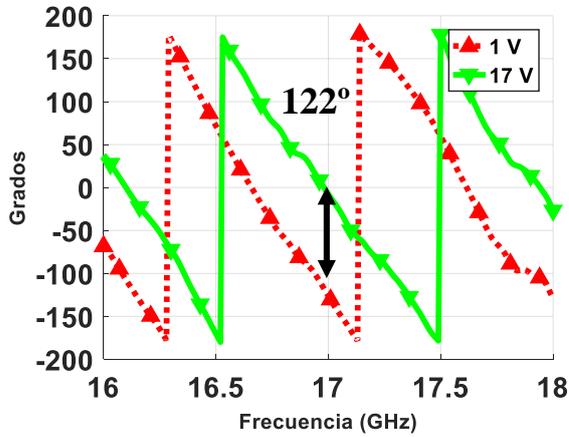
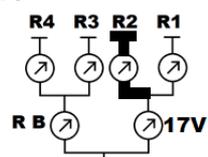


Figura 5.1-6.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama 3, rama B 17 V.

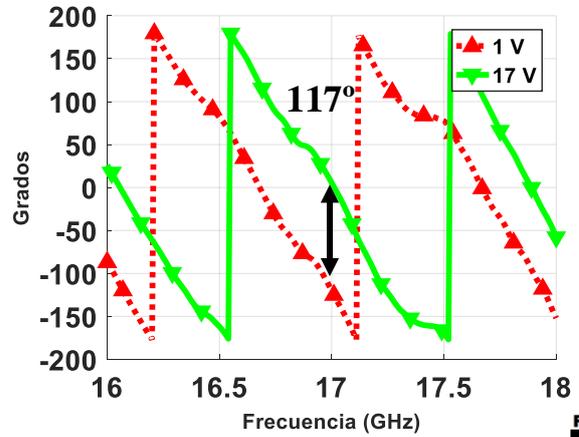
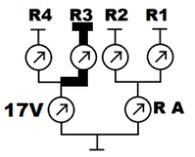


Figura 5.1-7.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama 4 rama B 17 V.

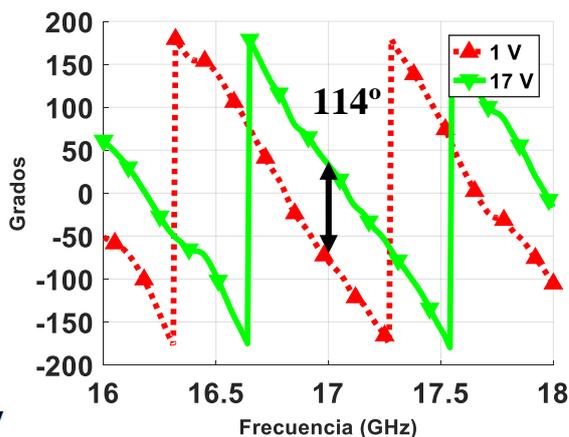
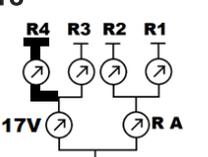


Figura 5.1-8.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama A, rama 1 17 V.

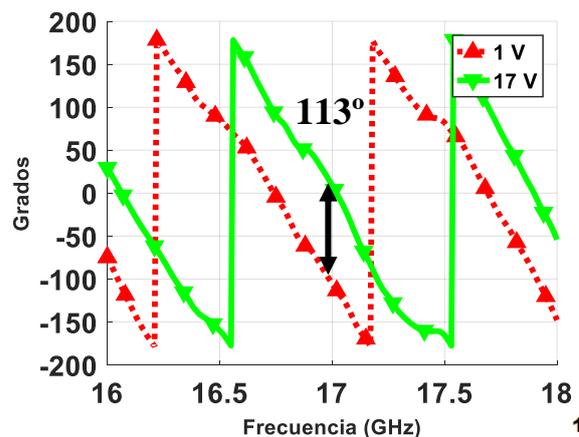
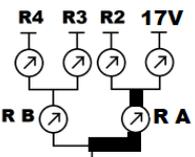
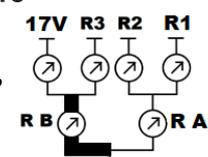


Figura 5.1-9.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama B, rama 4 17 V.



Con estos resultados y el diagrama de radiación del elemento unitario, se puede hacer una estimación del diagrama de radiación del *array* completo. Para ello, se multiplica el diagrama de radiación del elemento unitario por el factor de *array*.

Con las medidas obtenidas, amplitudes en densidad de potencia normalizada ( $|S_{N0}|^2$ ) por puerto ( $P_N$ ) y el desfase entre ellos ( $\alpha$ ) en grados (reflejados en la tabla 5-2), se puede calcular el factor de *array* para así poder apuntar la antena.

Estos valores, a la frecuencia central de 17 GHz, nos permiten generar los diagramas estimados mostrados en la figura 5.1-10 (d).

Apuntamiento	Amplitud teórica	Amplitudes en naturales				$\Delta\phi_{Teórico}$ (Grados)	$\Delta\phi_{Real}$ (Grados)		
		P1	P2	P3	P4		$\Delta\phi_{12}$	$\Delta\phi_{23}$	$\Delta\phi_{34}$
-13	0.25	0.16	0.24	0.16	0.16	+70	+73	+68	+72
-7	0.25	0.15	0.18	0.16	0.19	+40	+38	+43	+40
0	0.25	0.11	0.21	0.19	0.18	+0	+2	+0	+0
7	0.25	0.17	0.17	0.22	0.22	-40	-41	-41	-39
13	0.25	0.11	0.21	0.21	0.21	-70	-68	-67	-69

Tabla 5-2. Amplitudes y desfases para el diagrama a 17 GHz.

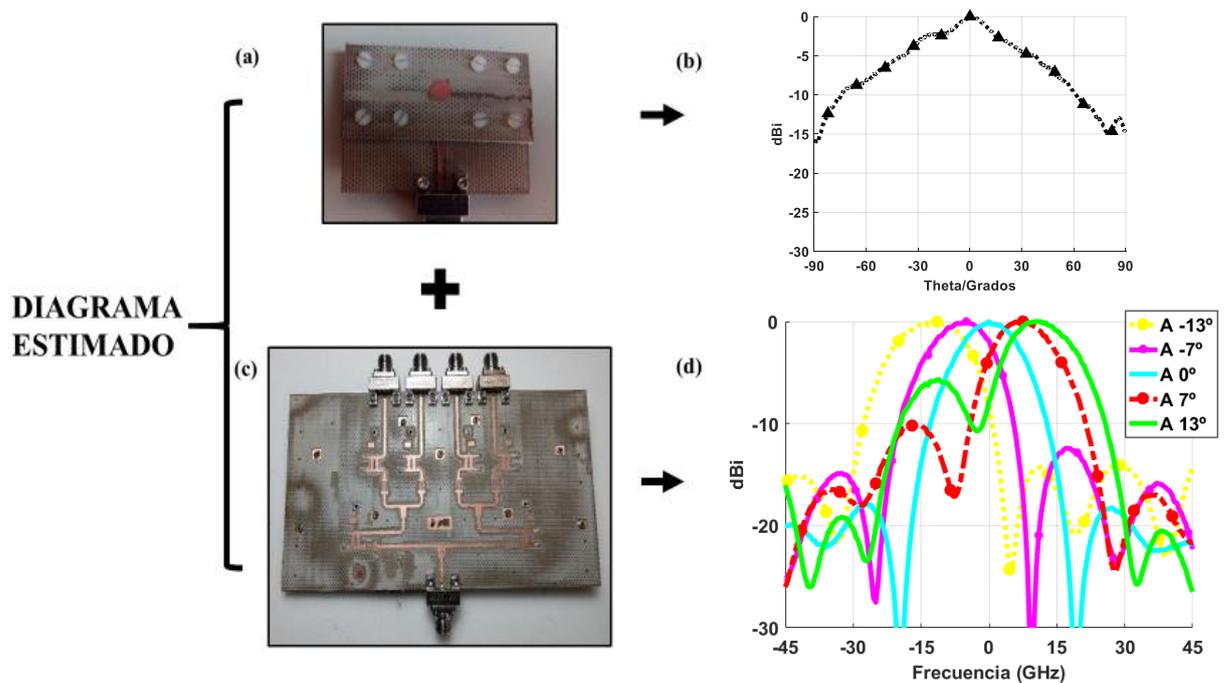


Figura 5.1-10. Estimación diagrama de radiación a 17 GHz. (a) Parche apilado: elemento unitario. (b) Diagrama de radiación del elemento unitario a 17 GHz. (c) Red de alimentación. (d) Diagrama de radiación estimado del *array* a 17 GHz.

## 5.2 Resultados y pruebas del array de parches

Los resultados que se han obtenido del *array* de parches han sido las adaptaciones de cada parche y los acoplos entre ellos. A continuación, se muestran los acoplos de cada parche y la adaptación activa para una amplitud uniforme y un desfase progresivo teórico para los apuntamientos de  $0^\circ$ ,  $7^\circ$  y  $13^\circ$ .

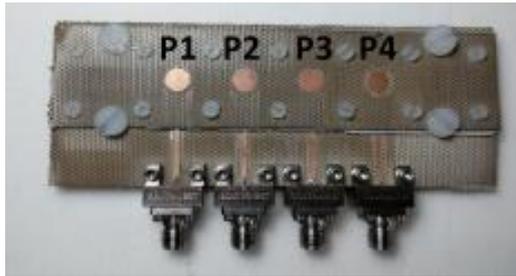


Figura 5.2-1. Array de parches construido.

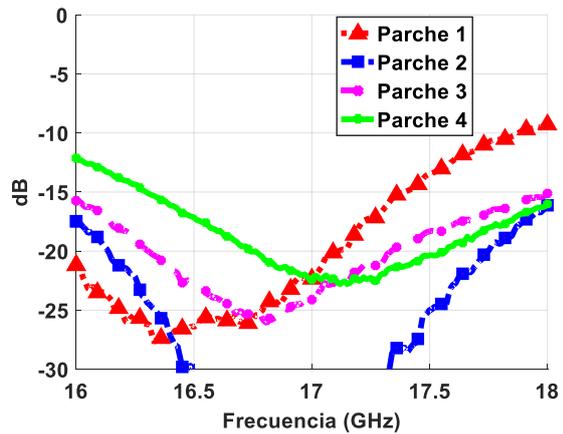


Figura 5.2-2.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] de cada parche del array.

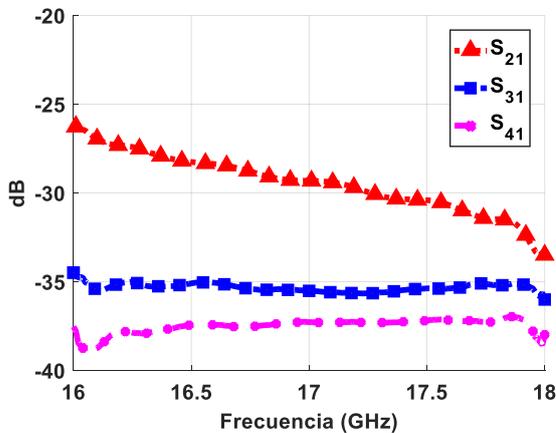


Figura 5.2-3. Acoplos del parche 1.

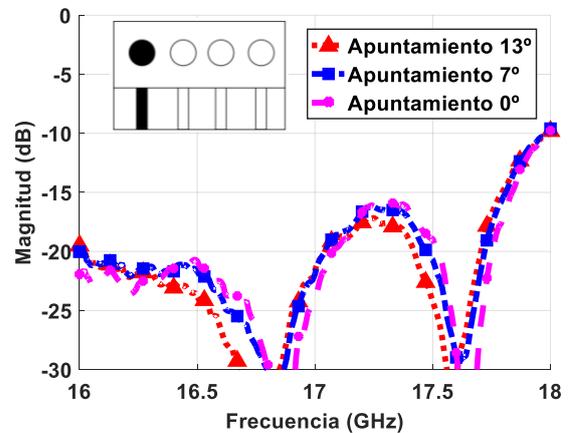


Figura 5.2-4. Adaptación activa parche 1.

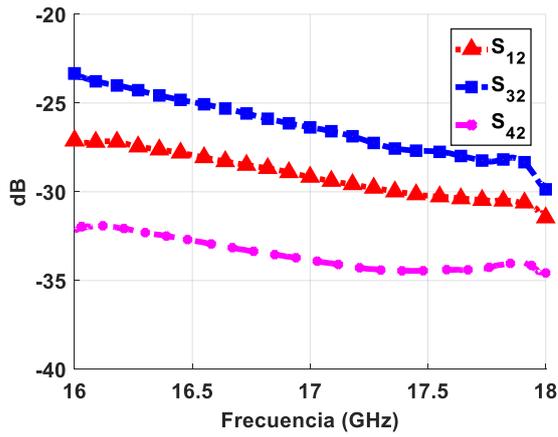


Figura 5.2-5. Acoplos del parche 2.

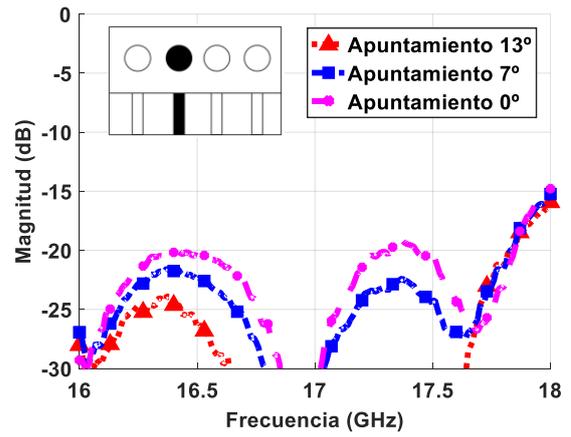


Figura 5.2-6. Adaptación activa parche 2.

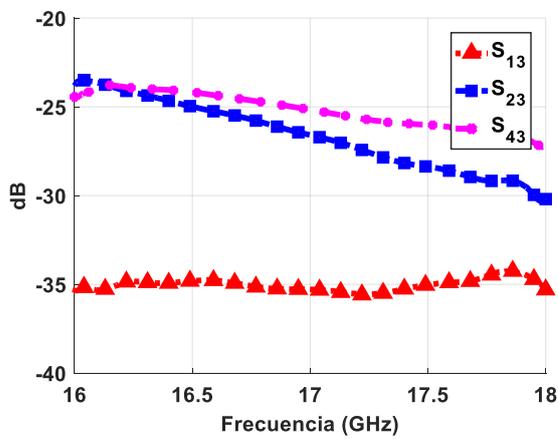


Figura 5.2-7. Acoplos del parche 3.

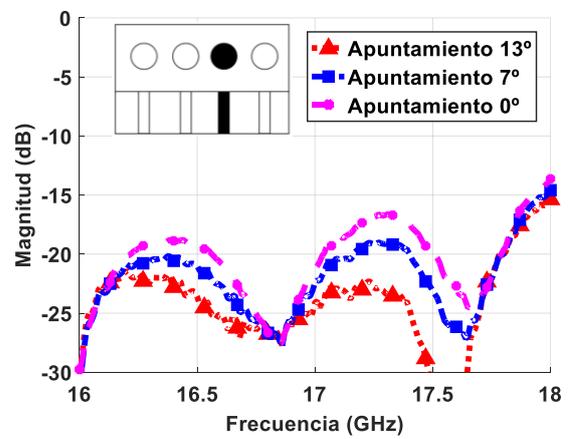


Figura 5.2-8. Adaptación activa parche 3.

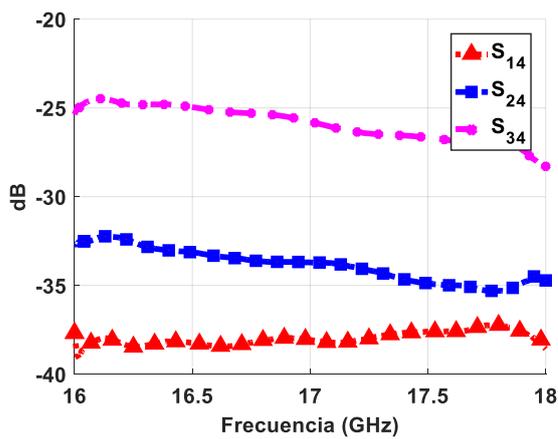


Figura 5.2-9. Acoplos del parche 4.

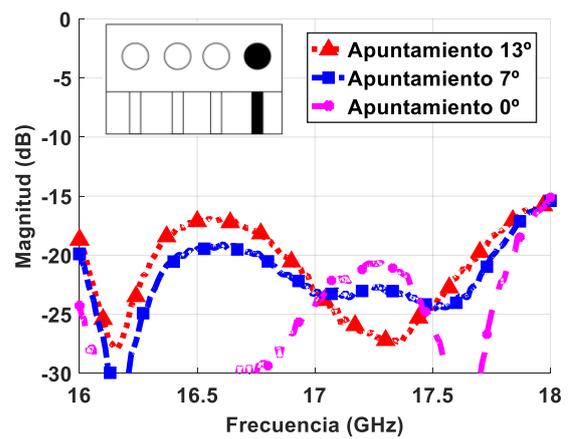


Figura 5.2-10. Adaptación activa parche 4.

### 5.3 Resultados y pruebas de la antena

La medida de la antena se realizó en la cámara anecoica de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Autónoma de Madrid. Antes de medirla, se precisó a unir la red de alimentación al *array* de parches a través de los conectores macho-macho SMA, como se indica en la figura 5.3-1. La antena se atornilló a la placa de fibra de vidrio mencionada (sección 4.4 de este trabajo) con los tornillos de métrica 4 y con unos separadores entre medias para intentar mantener tanto el array como la red de alimentación lo más firme posible. Se conectaron a la clema los cables de alimentación situados en el suelo de la cámara y el cable de la entrada de señal, según viene reflejado en la figura 5.3-2.

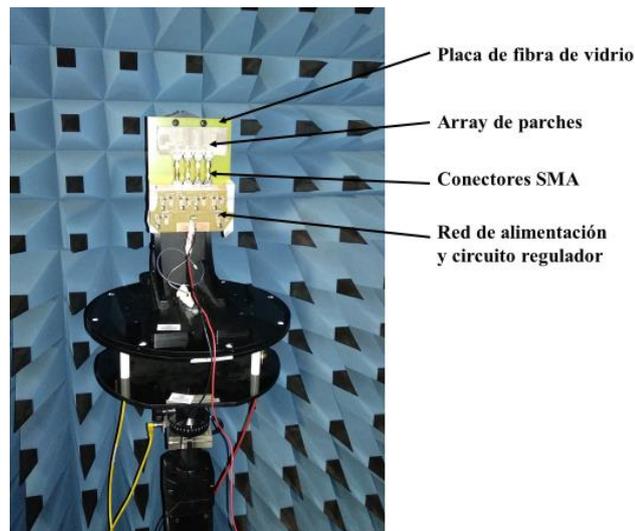


Figura 5.3-1. Montaje de la antena en la cámara anecoica 1.

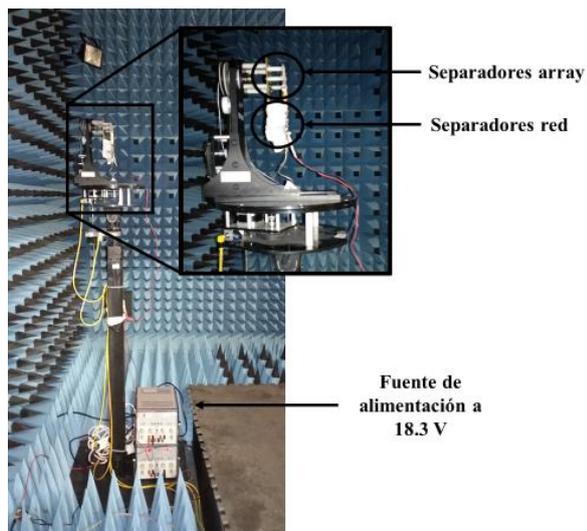


Figura 5.3-2. Montaje de la antena en la cámara anecoica 2.

Los resultados que se exponen a continuación son los distintos diagramas de radiación y ganancia de la antena (figura 5.3-11). Los diagramas de radiación muestran la componente copolar en plano H de la antena. En la figura 5.3-3 se observa los distintos apuntamientos obtenidos.

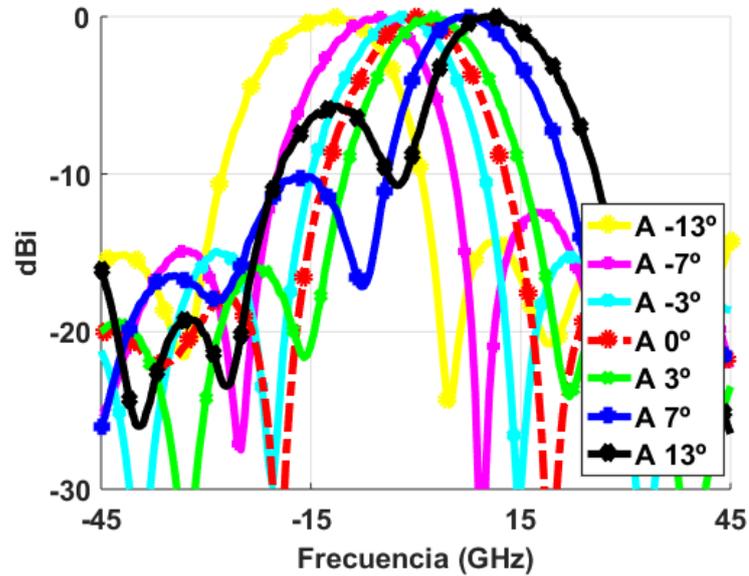


Figura 5.3-3. Diagramas de radiación con distintos apuntamientos a 17 GHz.

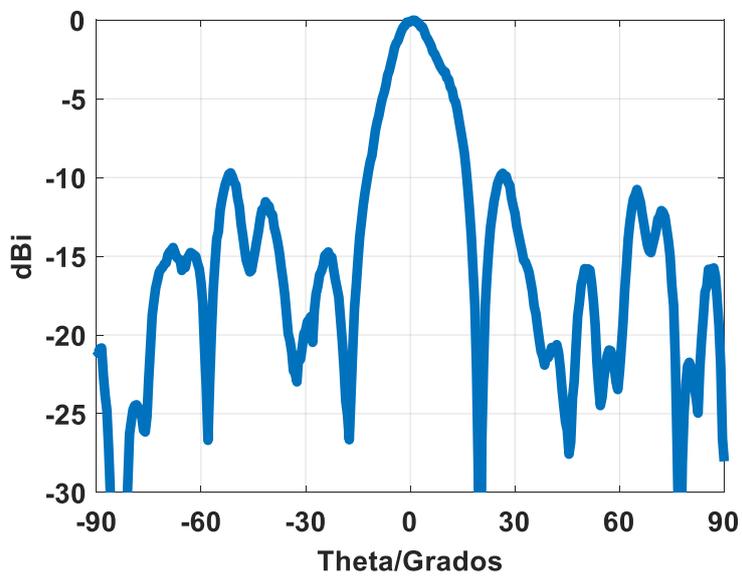
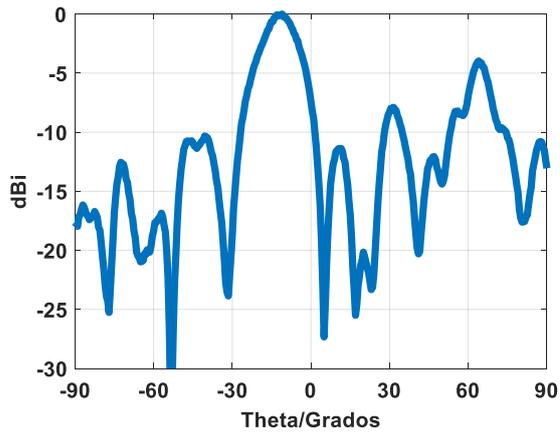
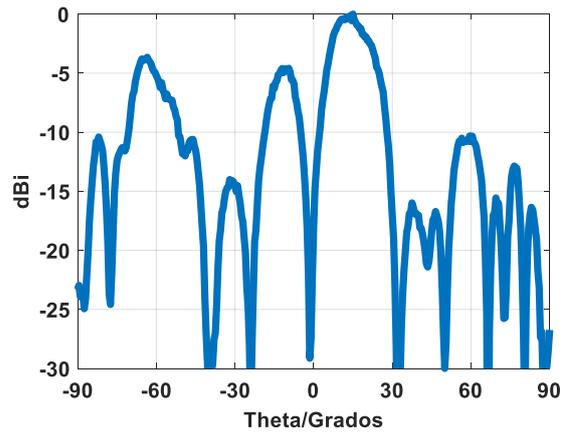


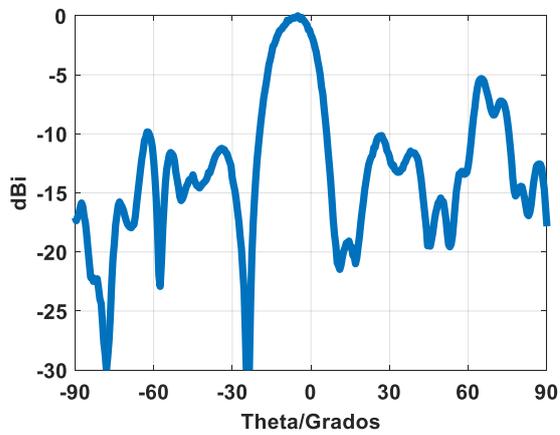
Figura 5.3-4. Diagrama de radiación a 0° de apuntamiento a 17GHz.



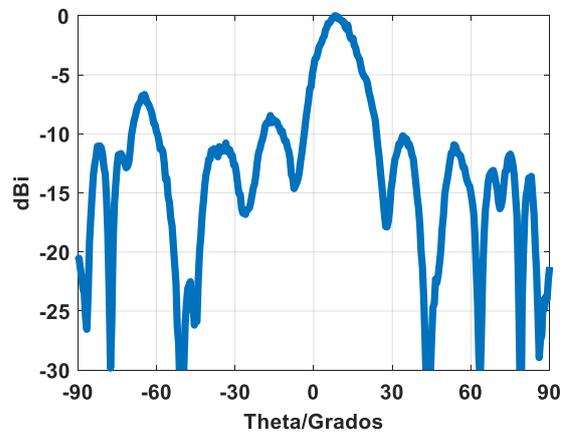
**Figura 5.3-5. Diagrama de radiación a  $-13^\circ$  de apuntamiento a 17GHz.**



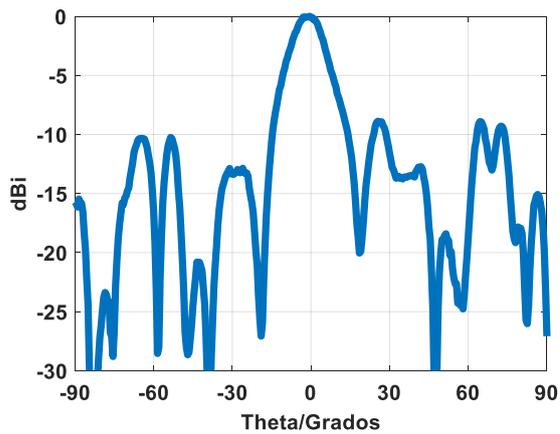
**Figura 5.3-6. Diagrama de radiación a  $13^\circ$  de apuntamiento a 17GHz.**



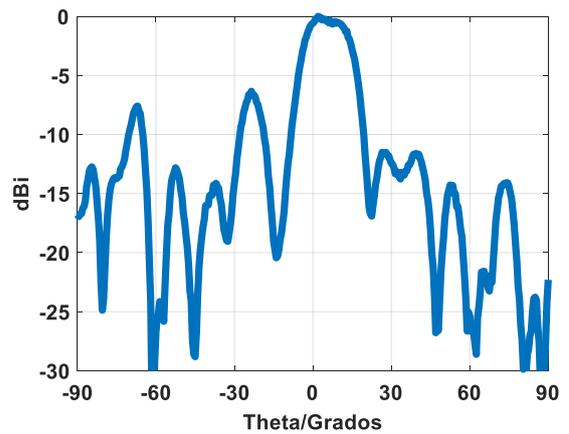
**Figura 5.3-7. Diagrama de radiación a  $-7^\circ$  de apuntamiento a 17GHz.**



**Figura 5.3-8. Diagrama de radiación a  $7^\circ$  de apuntamiento a 17GHz.**



**Figura 5.3-9. Diagrama de radiación a  $-3^\circ$  de apuntamiento a 17GHz.**



**Figura 5.3-10. Diagrama de radiación a  $3^\circ$  de apuntamiento a 17GHz.**

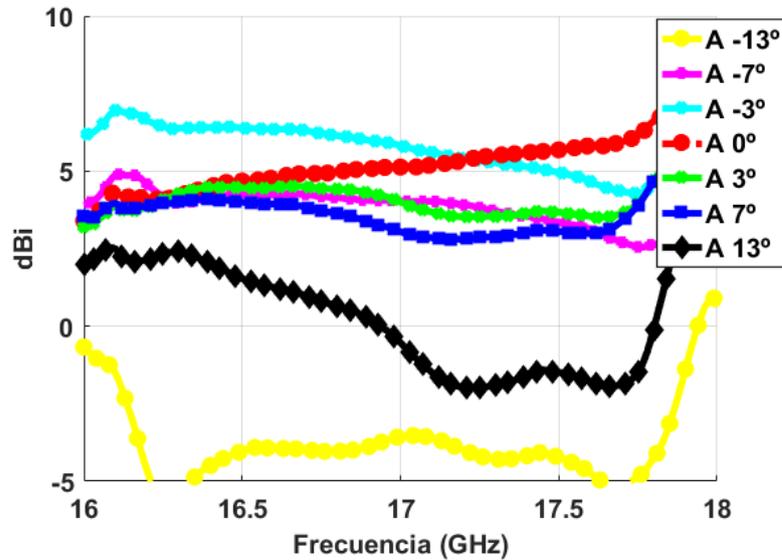


Figura 5.3-11. Ganancia de la antena según apuntamiento.

A continuación, se expone una comparación entre el diagrama de radiación del *array* teórico de la sección 3.4, el diagrama de radiación estimado en la sección 5.1 (donde se obtenía a través del diagrama del elemento unitario multiplicado por el factor de array con los valores obtenidos de la red de alimentación), y las medidas de la cámara anecoica previamente mostradas.

En los resultados, se observan los distintos diagramas de radiación por cada apuntamiento medido. Se aprecia que tanto los lóbulos laterales como el *grating lobe* o lóbulo posterior, son relativamente más grandes en el diagrama medido que en el diagrama teórico. Además, se observa que los nulos no llegan a serlo completamente y, esto puede ser, debido a las imperfecciones del parche, o por los acoplos entre ellos.

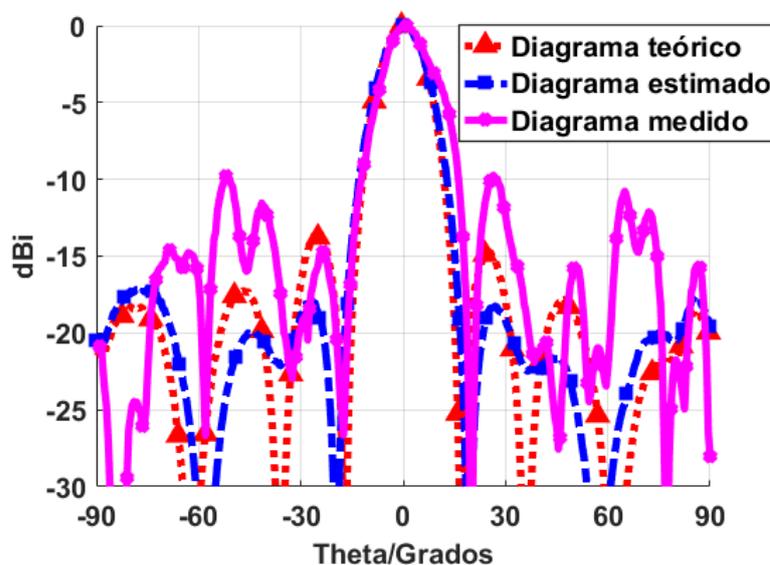


Figura 5.3-12. Comparación diagramas a 0° y 17 GHz.

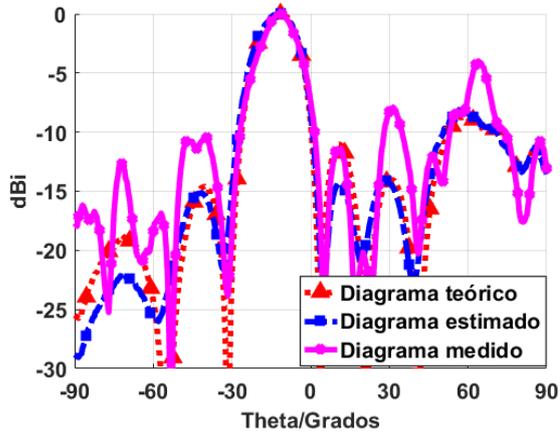


Figura 5.3-13. Comparación diagramas a  $-13^\circ$  y a 17GHz.

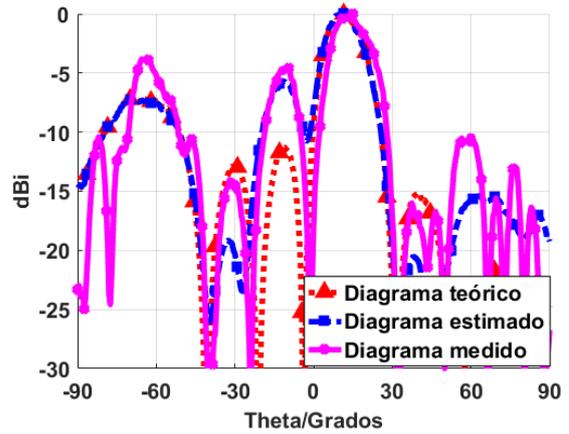


Figura 5.3-14. Comparación diagramas a  $13^\circ$  y a 17GHz.

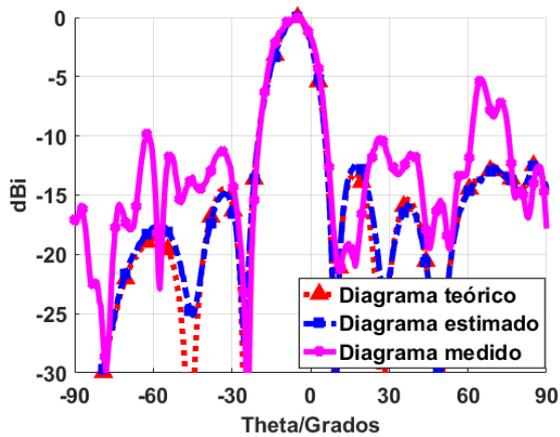


Figura 5.3-15. Comparación diagramas a  $-7^\circ$  y a 17GHz.

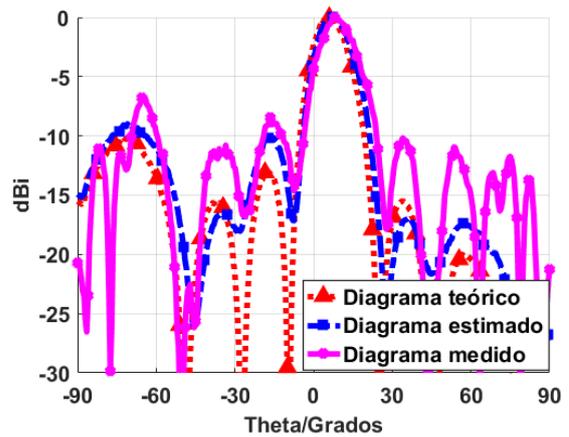


Figura 5.3-16. Comparación diagramas a  $7^\circ$  y a 17GHz.

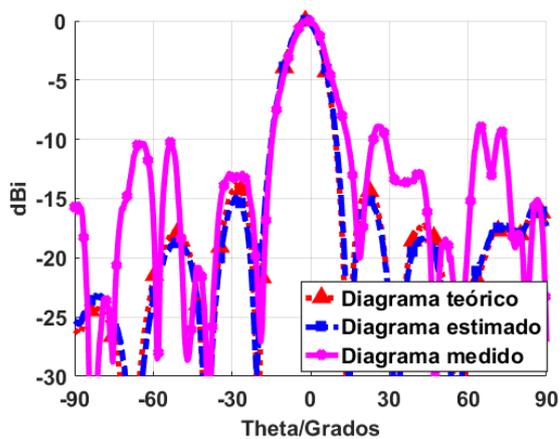


Figura 5.3-17. Comparación diagramas a  $-3^\circ$  y a 17GHz.

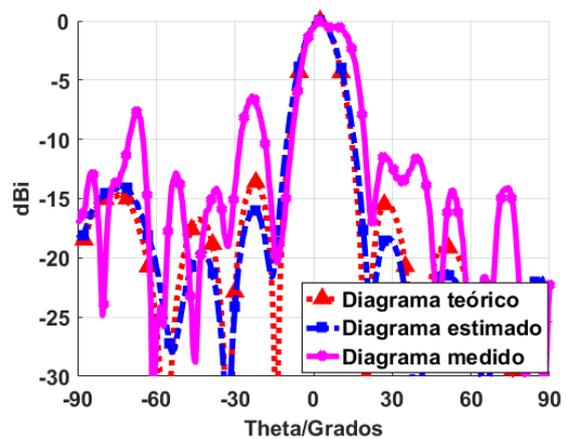


Figura 5.3-18. Comparación diagramas a  $3^\circ$  y a 17GHz.



# 6 Conclusiones y trabajo futuro

---

## 6.1 Conclusiones

En este Trabajo de Fin de Grado se ha conseguido el diseño, construcción y medida de una red de alimentación capaz de dar una amplitud uniforme y una fase específica, dentro del rango de fase que nos dan los desfasadores, a cuatro parches apilados unidos en *array* para poder cambiar el apuntamiento del haz principal de la antena.

Se ha logrado el diseño y la construcción de un circuito regulador de tensión, con componentes electrónicos, que permite repartir la tensión necesaria a los distintos desfasadores de la red de alimentación.

En cuanto a los resultados obtenidos se ha observado que, los rangos de fases han sido aproximadamente  $120^\circ$  por desfasador, pudiendo dar un total de rango de fase de  $240^\circ$ . Gracias a los diagramas de radiación representados se comprueba que, a pesar de tener unos lóbulos secundarios un poco elevados, la antena construida permite mover el haz principal  $26^\circ$  (desde  $-13^\circ$  a  $+13^\circ$ ).

## 6.2 Trabajo futuro

Para un trabajo futuro se debería poder aumentar el rango de fase total. Esto podría ser, por ejemplo, cambiando la red de alimentación 1 a 4 con 6 desfasadores, a una red 1 a 8 con 14 desfasadores. Necesitando así un *array* de 8 parches en vez de 4.

También se debería digitalizar más el circuito, es decir, sustituir los actuales potenciómetros del circuito regulador por unos digitales controlables, por ejemplo, con un Arduino.

Otra opción, sería integrar tanto la red de alimentación como el *array* de parches en un mismo circuito impreso. El problema de esta situación es que no se sabría si los varactores están bien soldados, por eso se necesitaría desarrollar una idea para poder ir comprobándolo. Un posible método sería la utilización de acoplos entre líneas de transmisión para poder llevar una pista paralela de un desfasador por un coaxial (o línea de transmisión), y unir esta a un conector para poder medirlo.



## 7 Referencias

---

- [1] J. Herranz-Alpanseque, “Diseño de desfasadores con varactores para antenas planas”, *Trabajo de fin de grado. Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid*, Julio 2017.
- [2] E. García-Marin, P. Sanchez-Olivares, J. Herranz-Alpanseque, A.J. Martín-Trueba, J.L. Masa-Campos, J. Córcoles-Ortega, “Electronically Reconfigurable Microstrip Array Antenna with Reflective Phase Shifters at Ku Band”, *11th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1-4, 2018.
- [3] C-COM Satellite Systems Inc., “Japanese Fire Dept with 1201 Drive”, <http://www.c-comsat.com/solutions/emergency-satcom/japanese-fire-dept-with-1201-drive-2/>, 2018.
- [4] “IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas”, *IEEE Std 145-2013* (Revision of IEEE Std 145-1993), pp. 1-50, Marzo 2014.
- [5] J.A. Ruiz-Cruz, “Tema 5.3. Definición de la matriz de parámetros S”, Asignatura: *Medios de Transmisión, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid*, 2014.
- [6] J. Córcoles-Ortega, “Tema 1. Conceptos básicos de electrónica de Electrónica de Comunicaciones”, Asignatura: *Electrónica de Comunicaciones, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid*, 2017.
- [7] J. L Masa-Campos, “Tema 4. Agrupaciones antenas (Arrays)”, Asignatura: *Antenas y Compatibilidad Electromagnética, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid*, pp. 51-57, 2017.
- [8] J. L Masa-Campos, “Tema 2. Conceptos básicos de antenas”, Asignatura: *Antenas y Compatibilidad Electromagnética, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid*, 2017.
- [9] J. L Masa-Campos, “Tema 3.2 Antenas impresas”, Asignatura: *Antenas y Compatibilidad Electromagnética, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid*, pp. 51-57, 2017.
- [10] E. García-Marin, J. L Masa-Campos, P. Sanchez-Olivares. “Implementation of 4 x 4 Stacked Patch Array with Corporate Feeding Network for Ku-band Applications”, *10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1 - 4, 2016.
- [11] K. Buisman, C.uang, L.C.N. de Vreede, “RF Power Insensitive Varactors”, *IEEE Microwave and Wireless components letters*, vol. 22, no. 8, Agosto 2012.
- [12] P.Padilla, A.Muñoz-Acevedo, M. Sierra-Castañer, M. Sierra-Perez, “Electronically Reconfigurable Transmitarray at Ku Band for Microwave Applications”, *IEEE Transactions on antennas and propagation*, vol. 58, no. 8, pp. 1-4, Agosto 2010.



## Glosario

---

ADS	Siglas programa: <i>Advance Design Technology</i> .
<i>Array</i>	Traducción de “conjuntos” en inglés.
<i>Datasheet</i>	Hoja de datos de un componente.
dB	Decibelio. Unidad para expresar la relación entre dos valores.
CST	Siglas programa: <i>Computer Simulation Technology</i> .
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> .
RF	Radiofrecuencia.
RFCAS	grupo RFCAS (Radiofrecuencia: Circuitos, Antenas y Sistemas).
TFG	Trabajo de Fin de Grado.
$\lambda_0$	Longitud de onda en el vacío.
PCBs	<i>Printed Circuit Board</i> .



## Anexos

### A Diseño de la red de alimentación a 70 Ohm

Este diseño viene con la búsqueda de mejorar la adaptación de la red de alimentación de 50 Ohm. Para ello se muestra como fue el diseño del desfaseador, así como de los aislantes y transformadores necesarios.

#### 1. Fase de diseño.

##### 1.1 Diseño del Acoplador Híbrido junto con los varactores.

Para poder hacer llegar el desfase producido por los varactores a nuestro elemento radiante, es necesario un circuito que permita hacer este cambio de fase sin cambiar la amplitud. Se propone este diseño de acoplador híbrido a 70 Ohm.

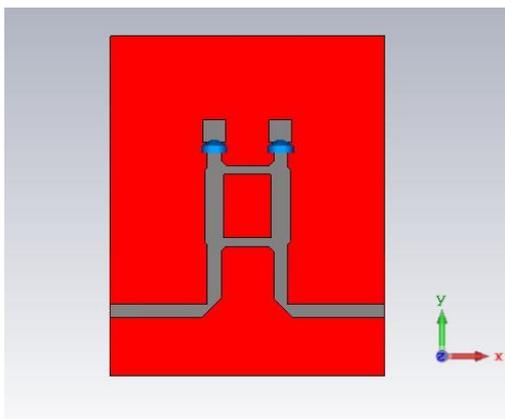


Figura A-1. Acoplador 70 Ohm.

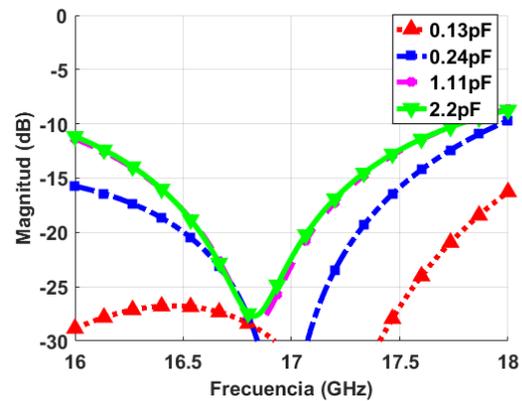


Figura A-2.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] del acoplador.

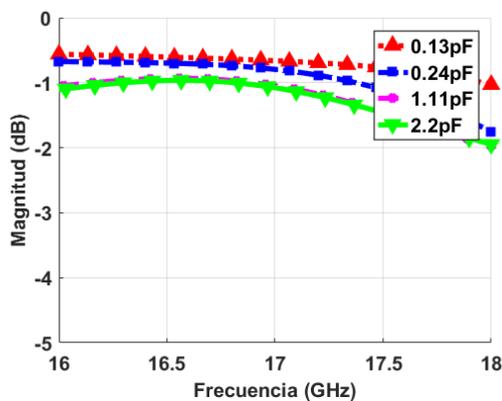


Figura A-3.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] del acoplador.

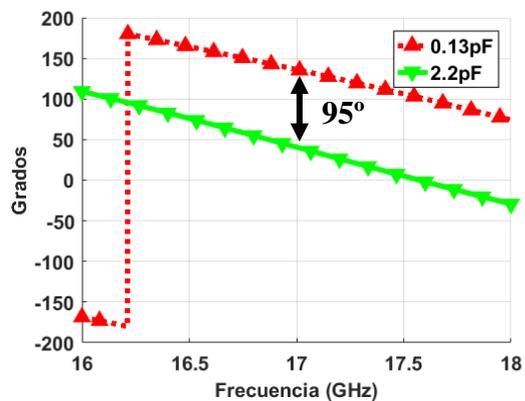


Figura A-4.  $S_{21}$  [Fase en grados] del acoplador.

## 1.2 Aislante continua 70 Ohm.

La parte más importante de este trabajo son los varactores, y estos tienen que ser alimentados por una tensión continua para que puedan dar la fase que se necesita. El problema ocurre cuando todos los desfases, que contienen los varactores, están conectados en una misma red de alimentación porque no se podría variar el desfase de la antena. Para ello se recurre al diseño de un dispositivo que sea capaz de traspasar la señal y evitar el paso de la tensión continua. Para evitar problemas en la construcción se fijó una distancia mínima entre ‘pelos’ del peine de 0.26 mm.

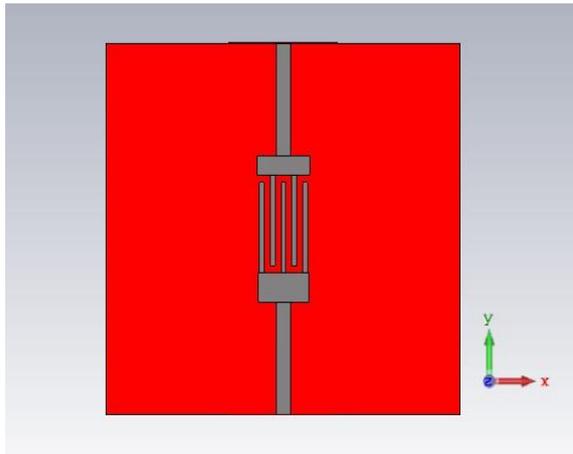


Figura A-5. Aislante de 70 Ohm.

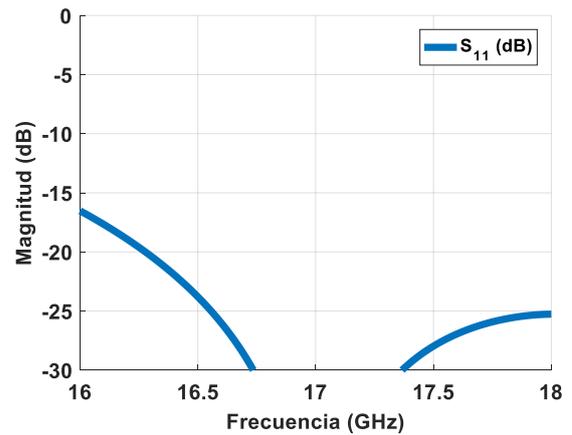


Figura A-6.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] del aislante de 70 Ohm.

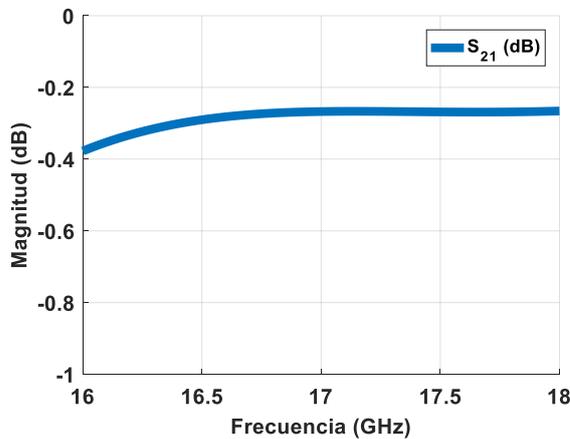


Figura A-7.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] del aislante de 70 Ohm.

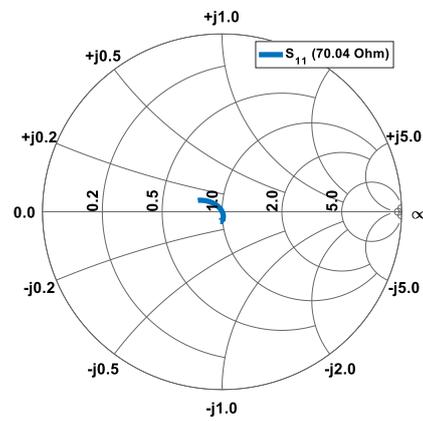


Figura A-8.  $S_{11}$  [Carta de Smith] del aislante de 70 Ohm.

### 1.3 Aislante continua 70/50 Ohm.

En un principio se pensó en un aislante que, a la vez que elimine el paso de continua, transforme la impedancia de 70 a 50 Ohm para poder caracterizarlo con el analizador de redes. Finalmente, se descartó ya que se conseguía más ancho de banda con el aislante de 70 Ohmios.

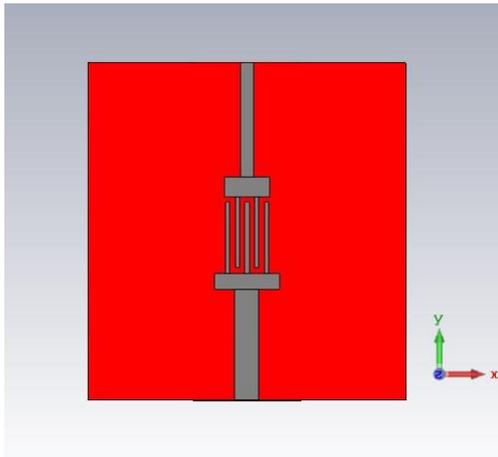


Figura A-9. Aislante 70/50 Ohm.

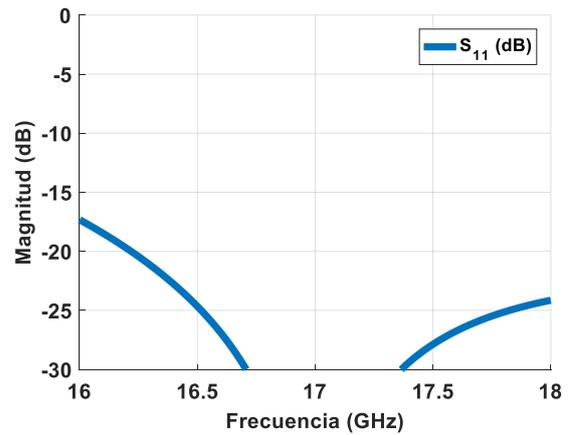


Figura A-10.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] del aislante 70/50 Ohm.

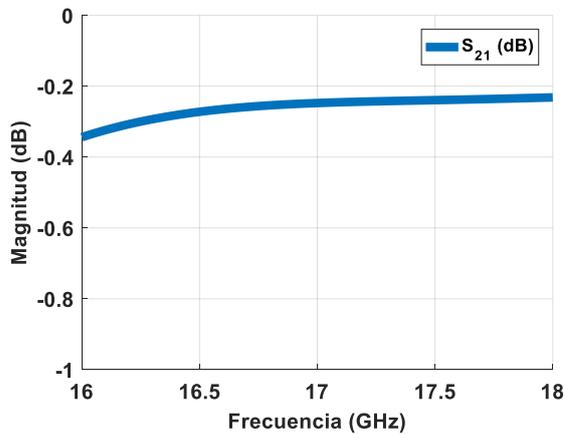


Figura A-11.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] del aislante 70/50 Ohm.

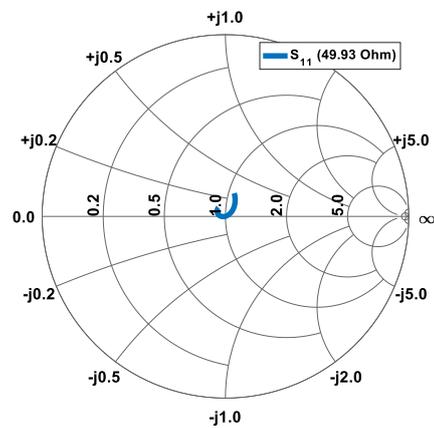


Figura A-12.  $S_{11}$  [Carta de Smith] del aislante 70/50 Ohm.

## 1.4 Desfasador con aislante.

Una vez se alargan las pistas y se añade el aislante de continua, se introduce también una pista de alimentación de los varactores. Esta pista está formada por dos líneas lambda cuarto, una de alta impedancia y otra de baja impedancia, para que nuestro desfasador lo vea como un circuito abierto y no se desvíe la señal por la pista de alimentación. También se añaden los taladros para la clema que se usará para la pista de alimentación y los de los conectores *Southwest*.

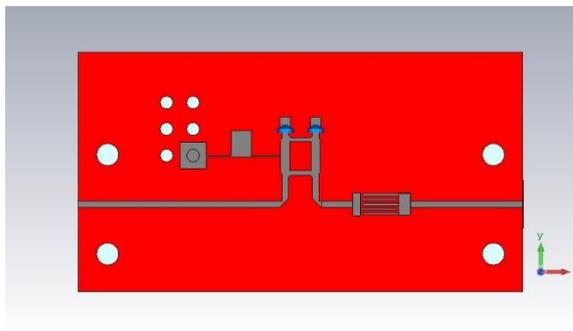


Figura A-13. Desfasador con aislante.

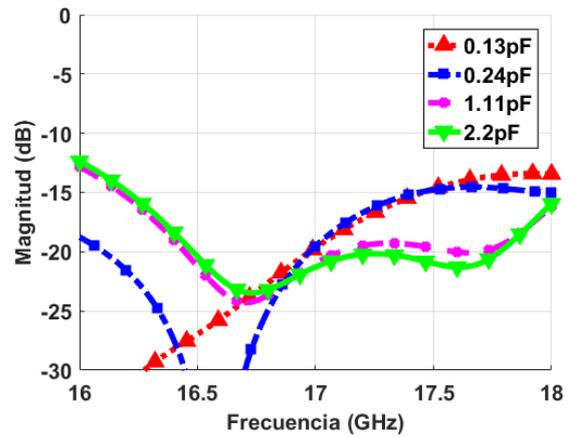


Figura A-14.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] del desfasador con aislante.

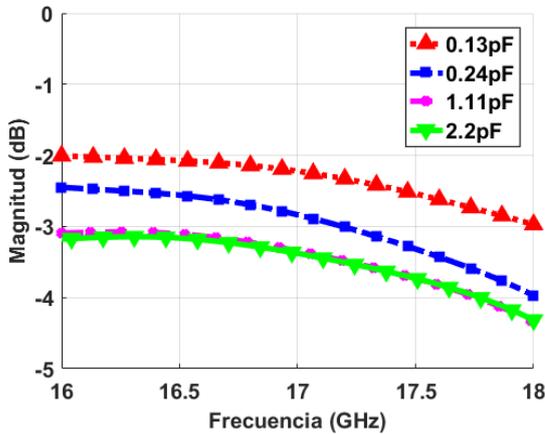


Figura A-15.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] del desfasador con aislante.

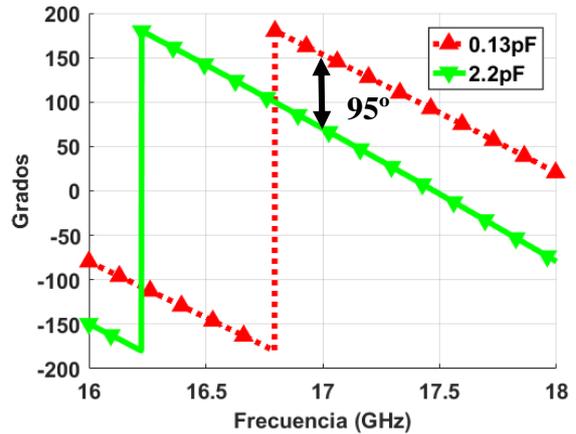


Figura A-16.  $S_{21}$  [Fase en grados] del desfasador con aislante.

## 1.5 Desfasador aislante transformado.

Para poder caracterizar los parámetros S de este circuito una vez construido, es necesario que las salidas estén referidas a una impedancia de 50 Ohm. Por eso, se añaden dos transformadores lambda cuarto en los extremos del circuito.

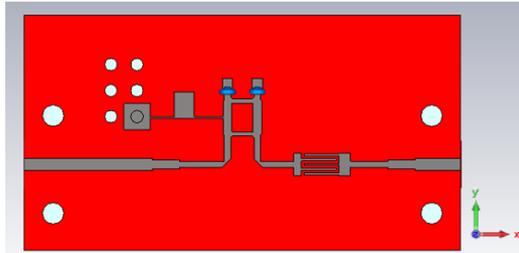


Figura A-17. Desfasador aislante con transformador.

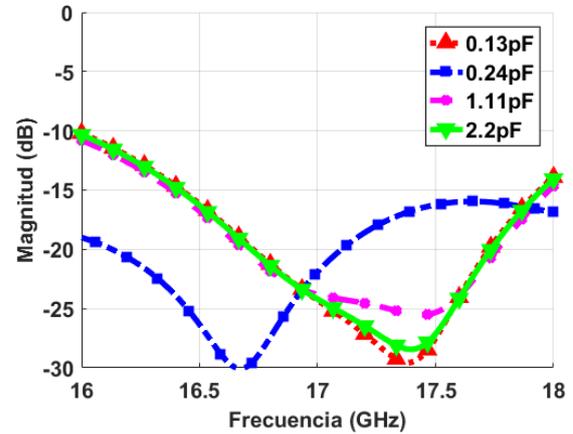


Figura A-18.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] del desfasador aislante con transformador.

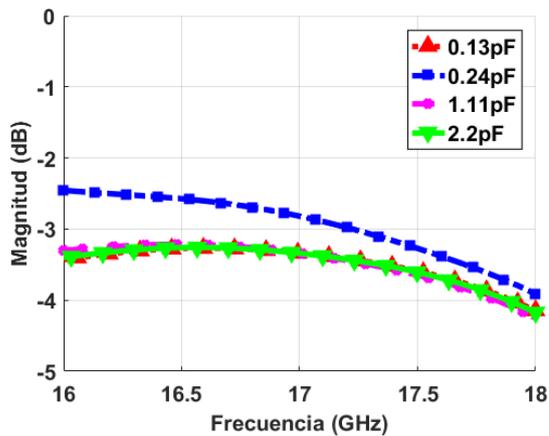


Figura A-19.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] del desfasador con aislante.

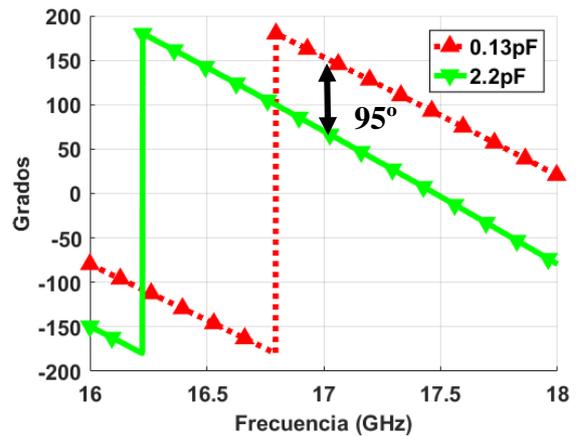


Figura A-20.  $S_{21}$  [Fase en grados] del desfasador con aislante.

## 1.6 Divisor de potencia 50 Ohm.

Para poder dividir la señal de entrada, es necesaria un divisor que transforme la impedancia de entrada al circuito a 50 Ohm.

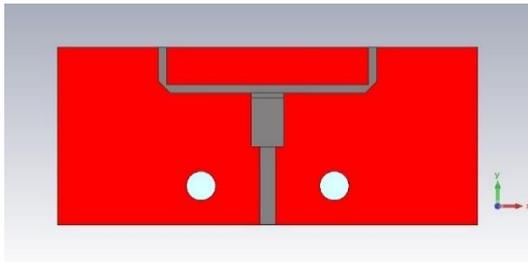


Figura A-21. Divisor 70/50 Ohm.

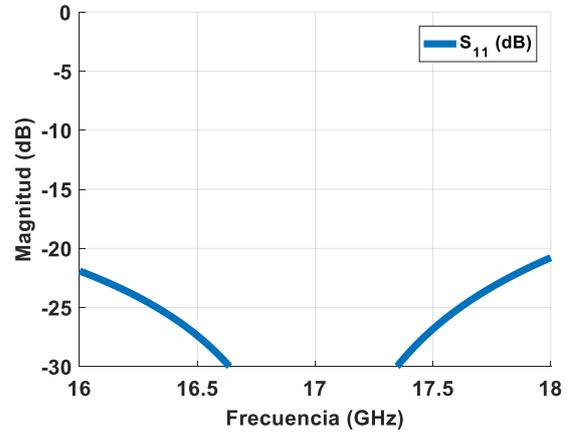


Figura A-22. S<sub>11</sub> [Magnitud en dB] del divisor 70/50 Ohm.

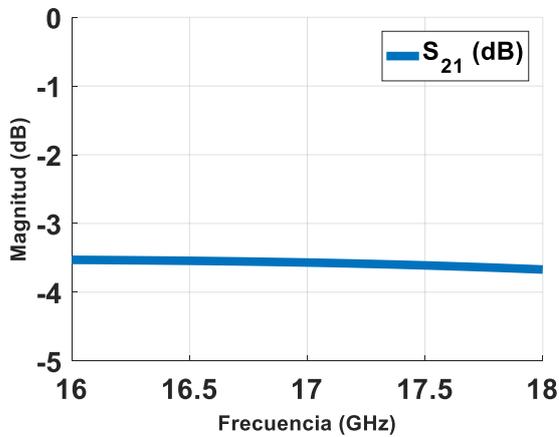


Figura A-23. S<sub>21</sub> [Magnitud en dB] del divisor 70/50 Ohm.

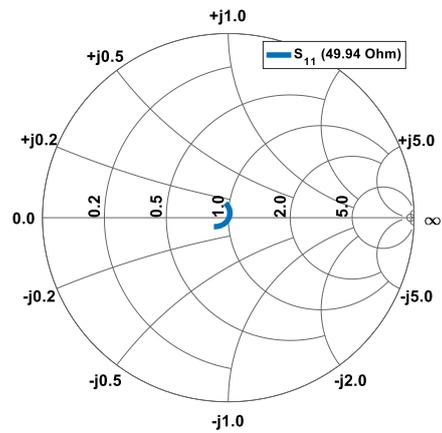


Figura A-24. S<sub>11</sub> [Carta de Smith] del divisor 70/50 Ohm.

## 1.7 Doble desfasador con aislante.

Se procede ahora a unir el divisor de 50 Ohmios con dos desfasadores. Este diseño se construirá para poder comprobar el funcionamiento del aislante.

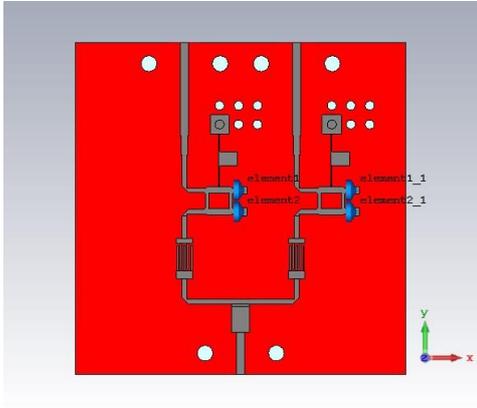


Figura A-25. Doble desfasador con aislante.

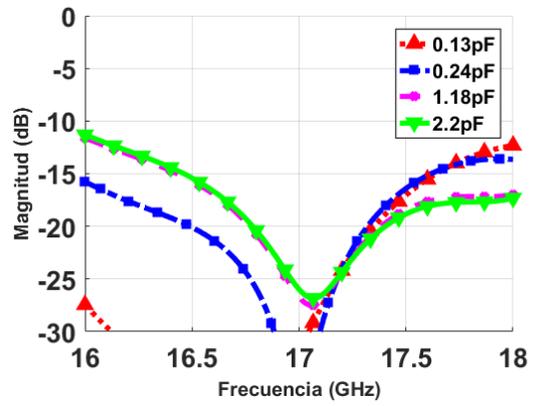


Figura A-26.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] del doble desfasador.

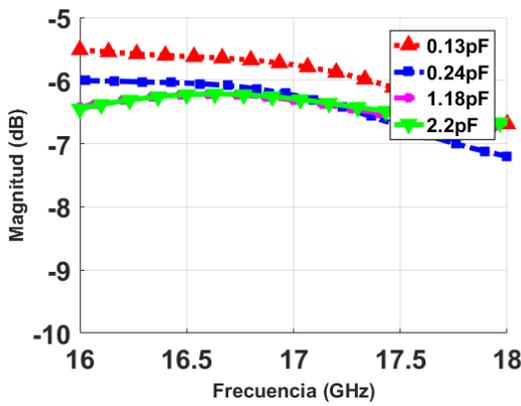


Figura A-27.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] del doble desfasador.

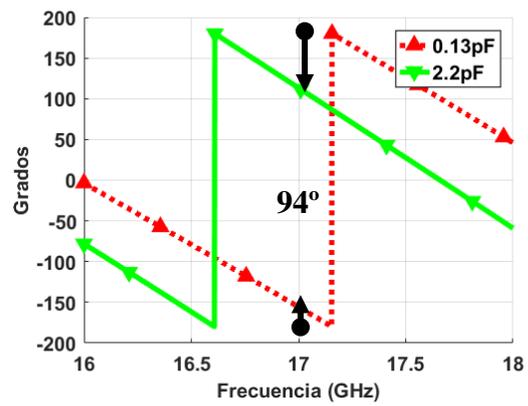


Figura A-28.  $S_{21}$  [Fase en grados] del doble desfasador.

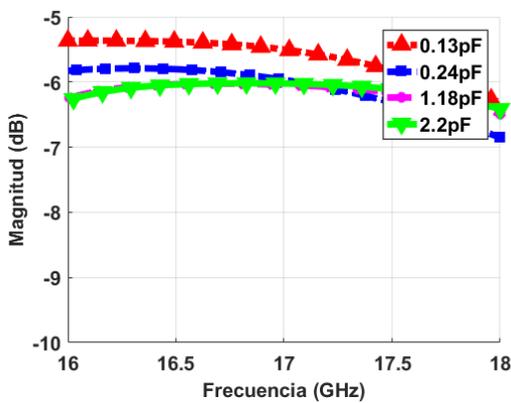


Figura A-29.  $S_{31}$  [Magnitud en dB] del doble desfasador.

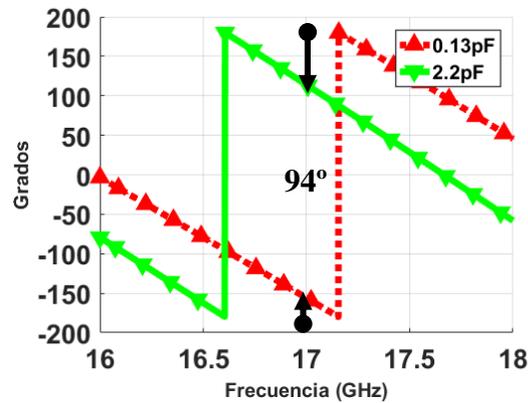


Figura A-30.  $S_{31}$  [Fase en grados] del doble desfasador.

## 1.8 Divisor de potencia 70 Ohm.

Para poder dividir de 4 a 2 ramas, se necesitan dos divisores que sigan la impedancia de 70 Ohmios.

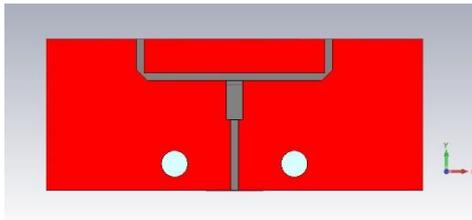


Figura A-31-A. Divisor 70 Ohm.

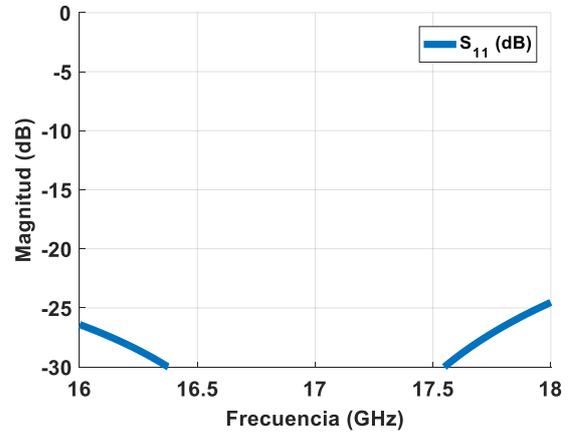


Figura A-32.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] del divisor de 70 Ohm.

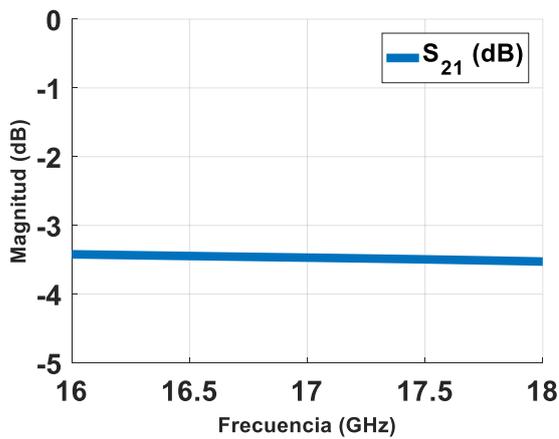


Figura A-33.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] del divisor de 70 Ohm.

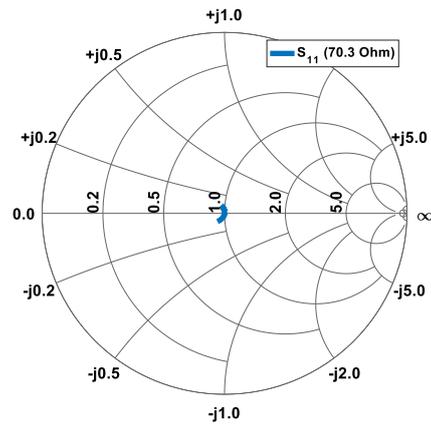


Figura A-34.  $S_{11}$  [Carta de Smith] del divisor de 70 Ohm.

## 1.9 Red de alimentación final.

Se procede a la unión de las distintas partes del circuito y a la simulación de este. Este diseño no se llegó a construir porque el rango de fase obtenido era mucho menor que el deseado. Por esto, se volvió al diseño del desfasador de 50 Ohm. Al ser las ramas iguales y prácticamente simétricas, se muestra solo el resultado de la puerta 2.

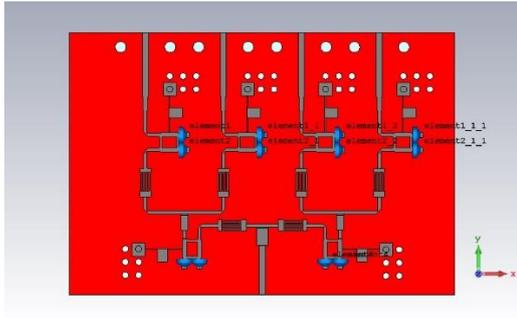


Figura A-35. Red final.

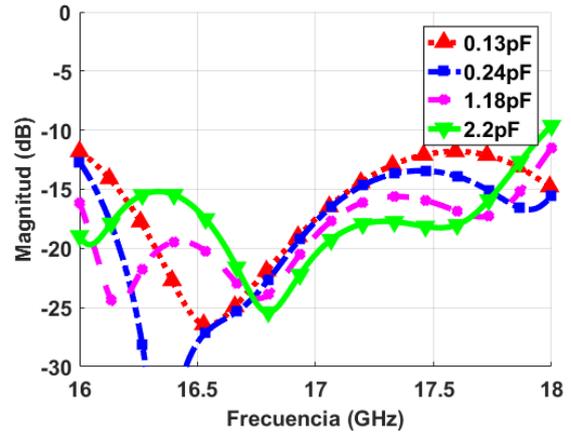


Figura A-36.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] de la red final.

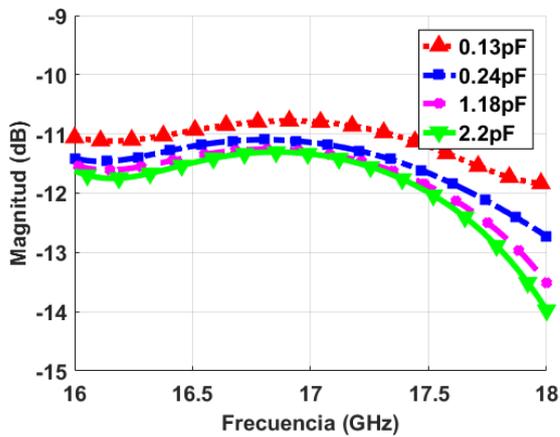


Figura A-37.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] de la red final.

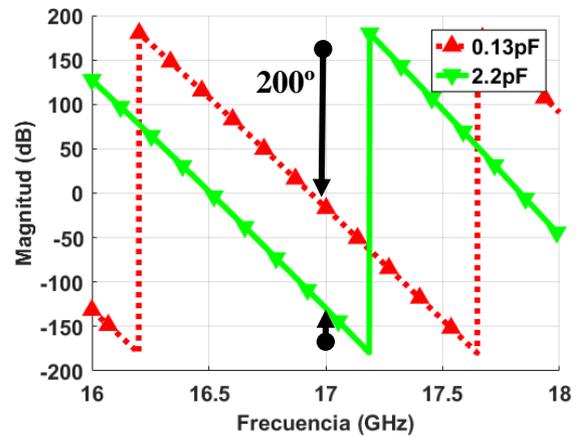


Figura A-38.  $S_{21}$  [Fase en grados] de la red final.

## 2. Fase de construcción de prototipos

### 2.1. Prototipo 1: Desfasador con aislante

Se procede a la construcción del prototipo basado en el diseño 1.4 de este anexo. Se observa que la adaptación y el rango de fase empeoran un poco los resultados obtenidos en la simulación. Esto puede deberse a factores como la propia soldadura de los varactores o porque al ser una placa muy fina, esta pudo doblarse y modificar un poco los resultados.

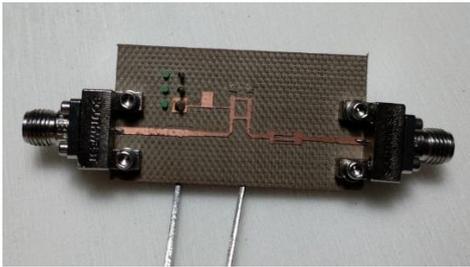


Figura A-39. Prototipo 1.

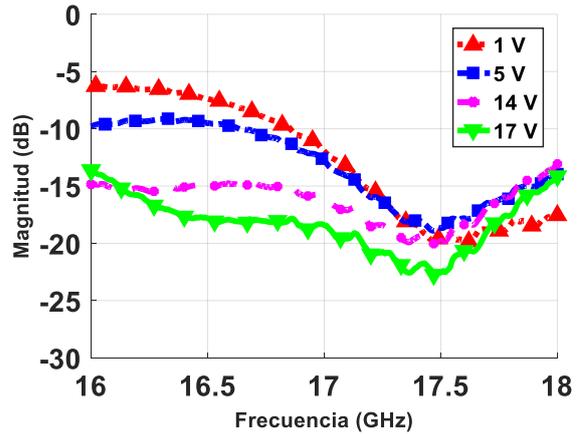


Figura A-40.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] del prototipo 1.

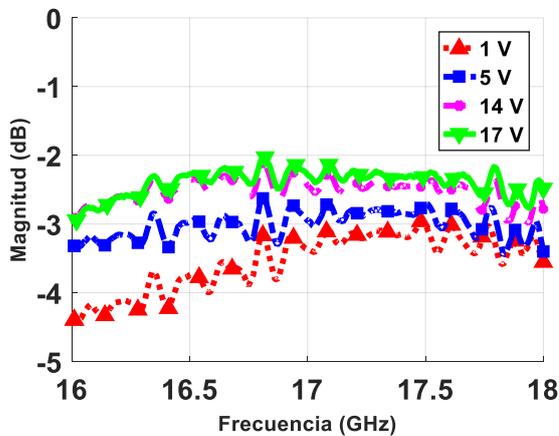


Figura A-41.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] del prototipo 1.

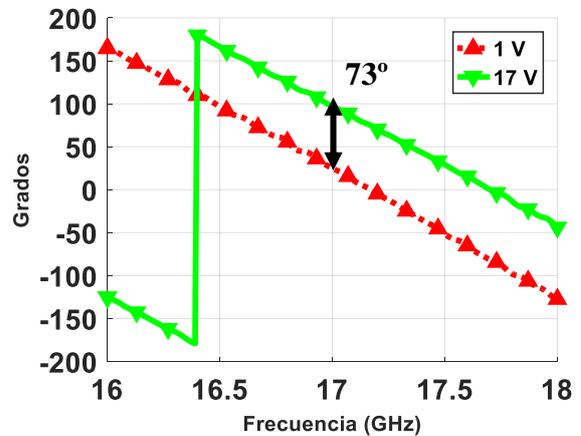


Figura A-42.  $S_{21}$  [Fase en grados] del prototipo 1.

## 2.2 Prototipo 2: Doble desfasador con aislante.

Se construye el prototipo del diseño 1.7 de este anexo. Se utiliza este divisor con dos desfasadores para comprobar el funcionamiento del aislante y para obtener un rango de fase orientativo de los desfasadores.

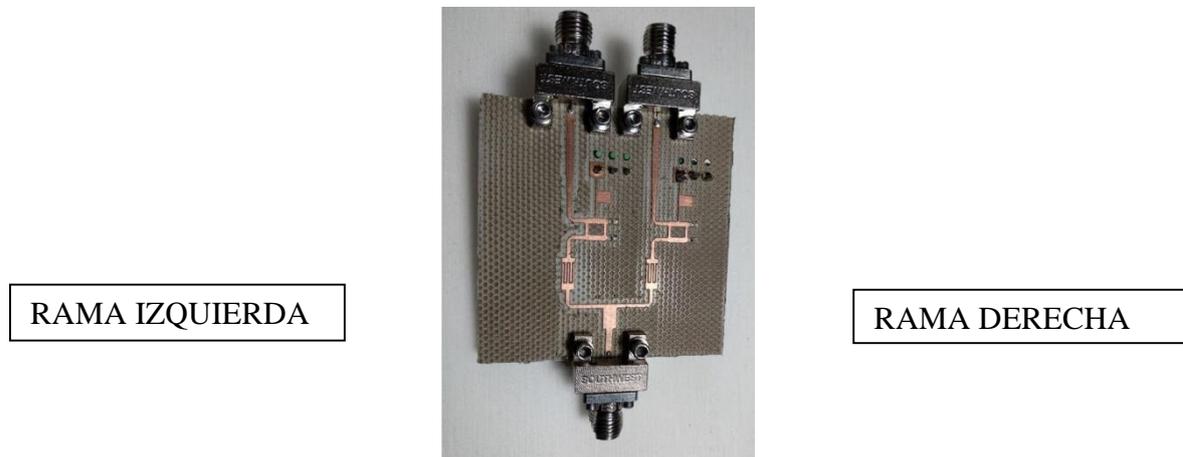


Figura A-43. Prototipo 2.

Debido a que el analizador de red solo tiene dos puertos, solo se puede ir haciendo el análisis rama por rama, y los resultados se mostrarán según la posición del conector de la puerta dos, ya sea rama derecha o izquierda.

### 2.2.1 Medidas prototipo 2.

La primera parte de las medidas se realizan con la otra rama sin alimentar, las siguientes se procede a medir con variaciones de la tensión de la rama no principal.

### 2.2.1.1 Medidas rama derecha.

La otra rama se considera desconectada.

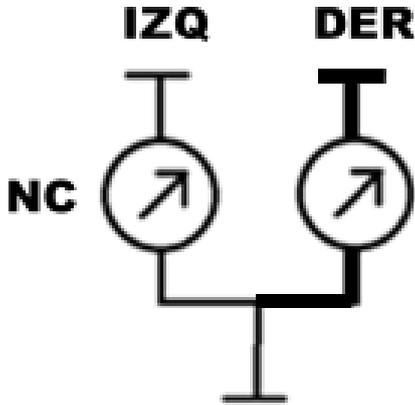


Figura A-44. Esquemática medida DINC.

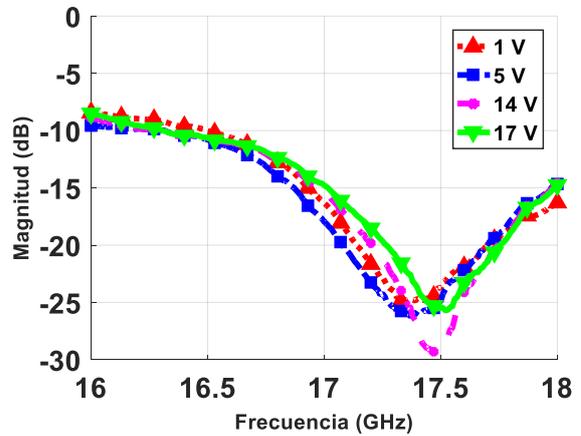


Figura A-45.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama derecha, izquierda desconectada.

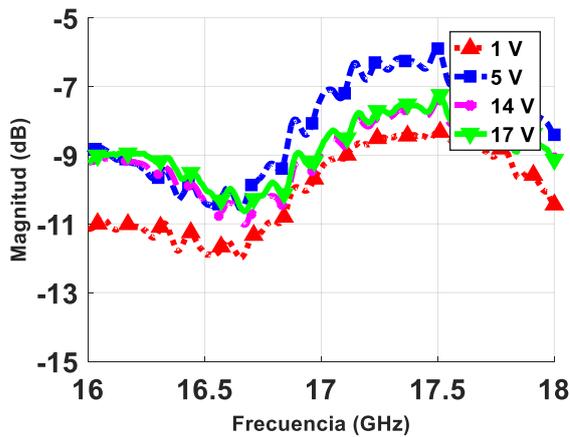


Figura A-46.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama derecha, izquierda desconectada.

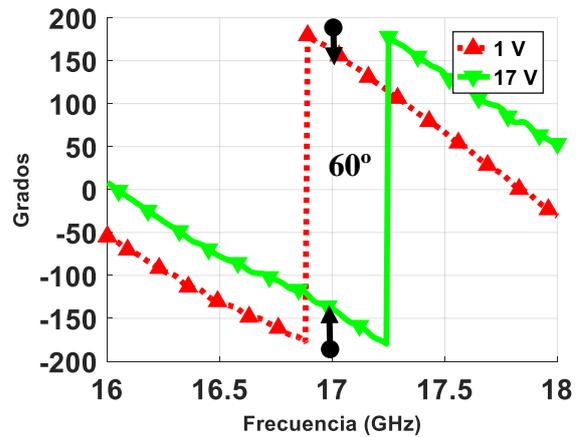


Figura A-47.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama derecha, izquierda desconectada.

2.2.1.1.1 *Medidas rama derecha, para rama izquierda 0V.*

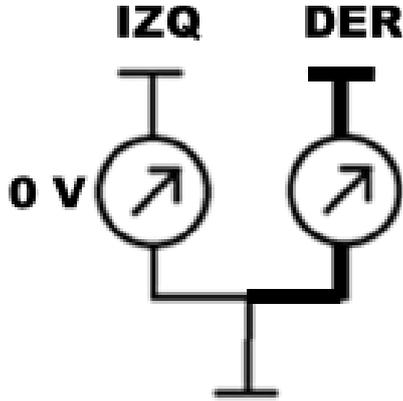


Figura A-48. Esquemática medida DI0.

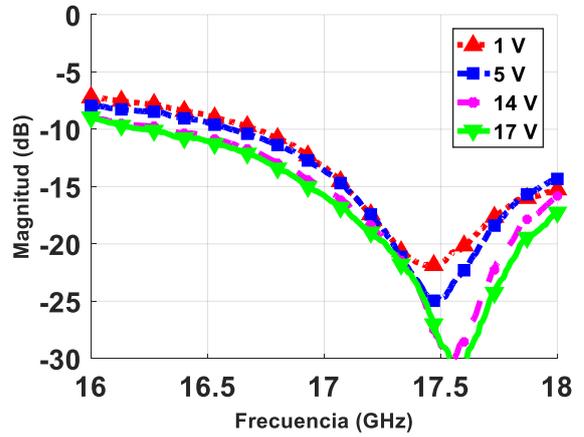


Figura A-49.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama derecha, izquierda 0 V.

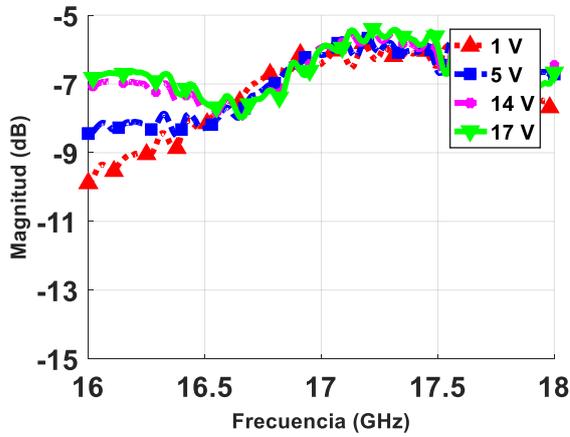


Figura A-50.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama derecha, izquierda 0 V.

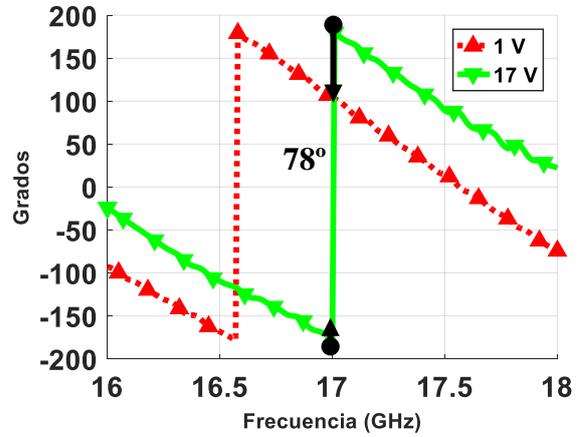


Figura A-51.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama derecha, izquierda 0 V.

2.2.1.1.2 Medidas rama derecha, para rama izquierda 5V.

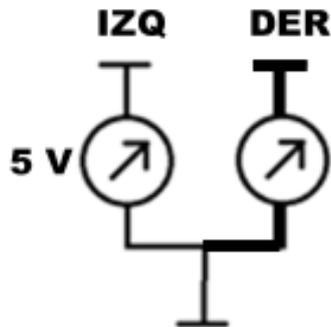


Figura A-52. Esquemática medida DI5.

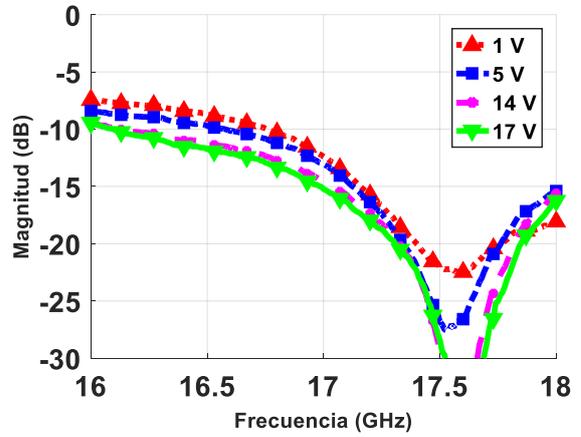


Figura A-53.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama derecha, izquierda 5 V.

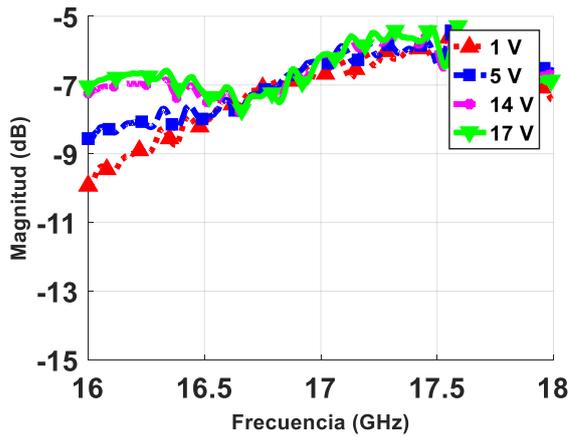


Figura A-54.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama derecha, izquierda 5 V.

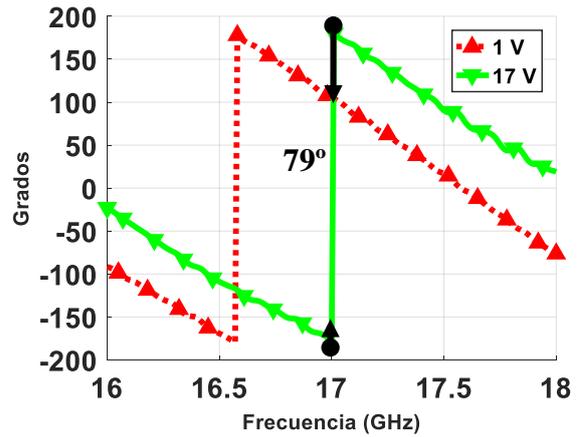


Figura A-55.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama derecha, izquierda 5 V.

2.2.1.1.3 *Medidas rama derecha, para rama izquierda 17V.*

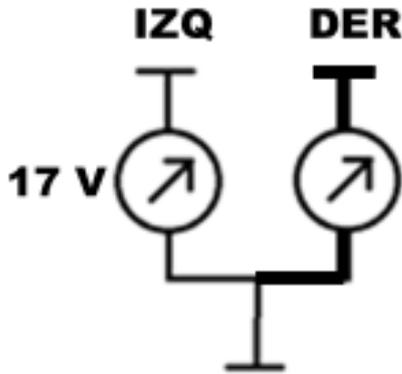


Figura A-56. Esquemática medida DI17.

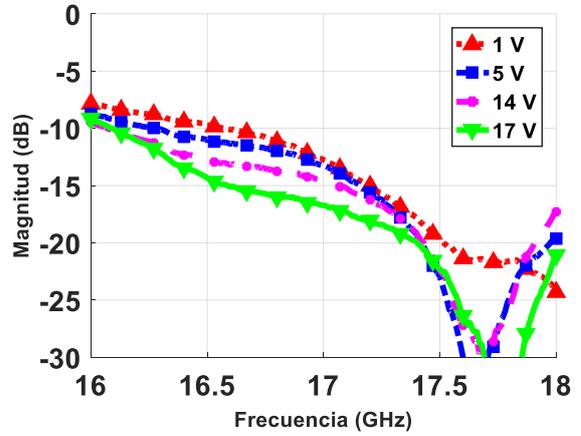


Figura A-57.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama derecha, izquierda 17 V.

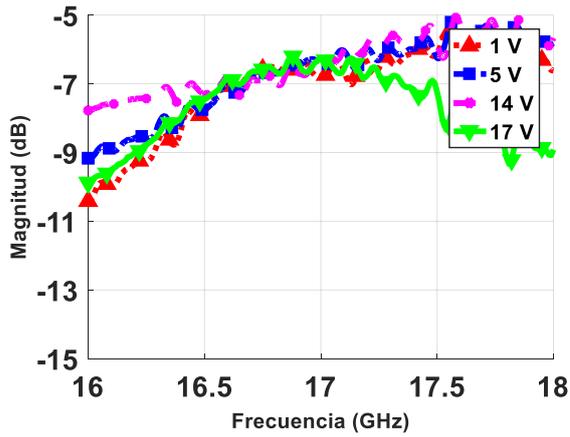


Figura A-58.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama derecha, izquierda 17 V.

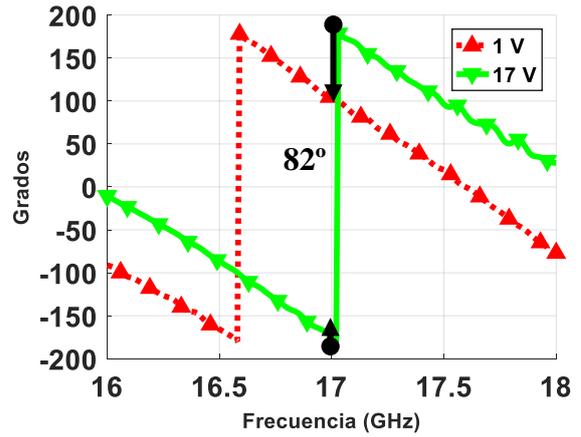


Figura A-59.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama derecha, izquierda 17 V.

### 2.2.1.2 Medidas rama izquierda.

La otra rama se considera desconectada.

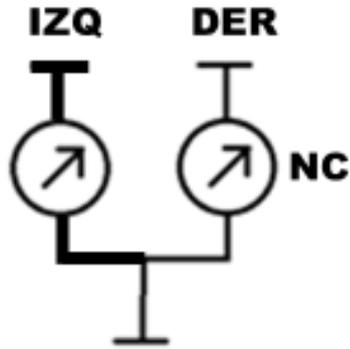


Figura A-60. Esquemática medida IDNC.

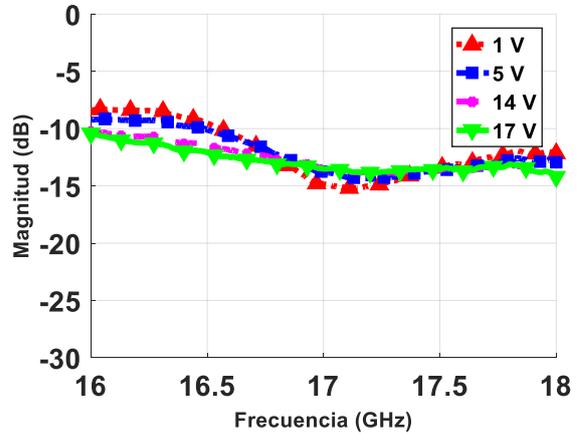


Figura A-61.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama izquierda, derecha desconectada.

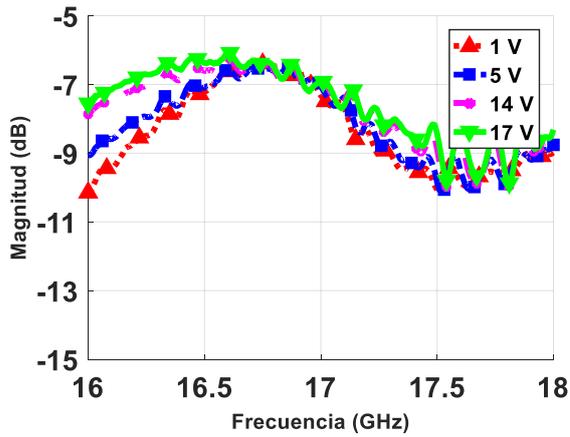


Figura A-62.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama izquierda, derecha desconectada.

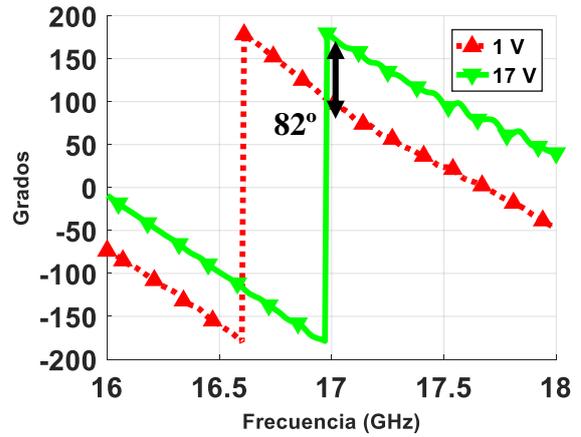


Figura A-63.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama izquierda, derecha desconectada.

2.2.1.2.1 *Medidas rama izquierda, para rama derecha 0V.*

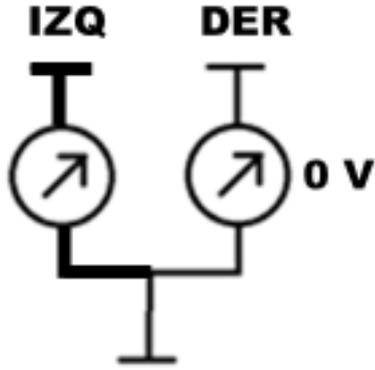


Figura A-64. Esquemática medida ID0.

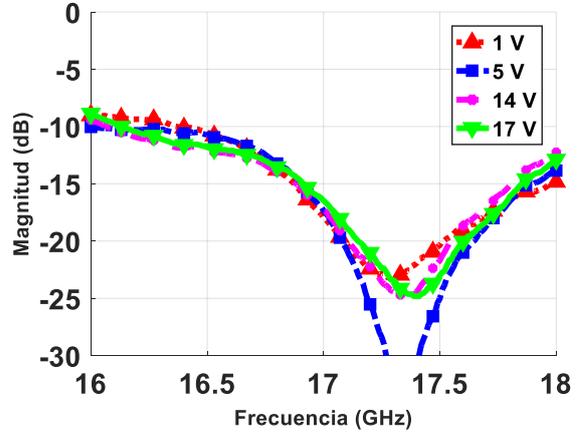


Figura A-65.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama izquierda, derecha 0V.

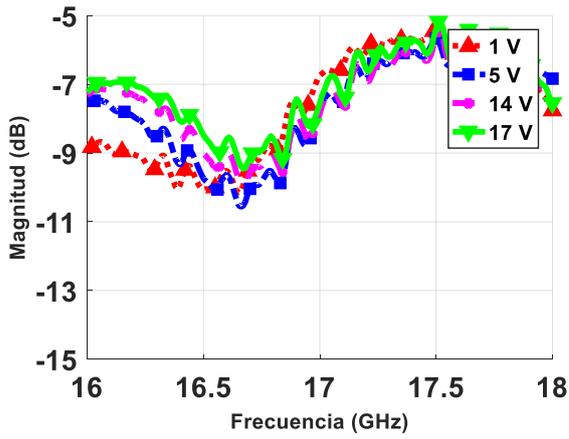


Figura A-66.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama izquierda, derecha 0V.

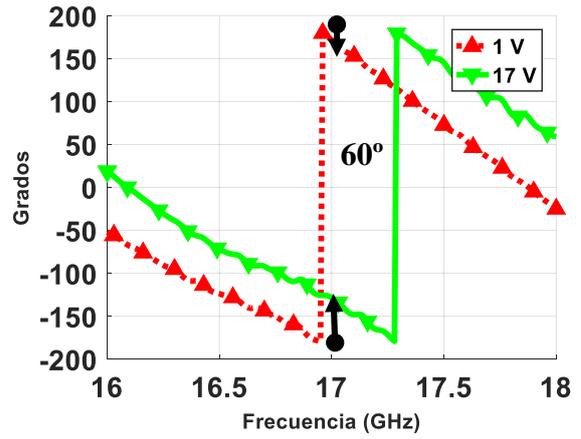


Figura A-67.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama izquierda, derecha 0V.

2.2.1.2.2 *Medidas rama izquierda, para rama derecha 5V.*

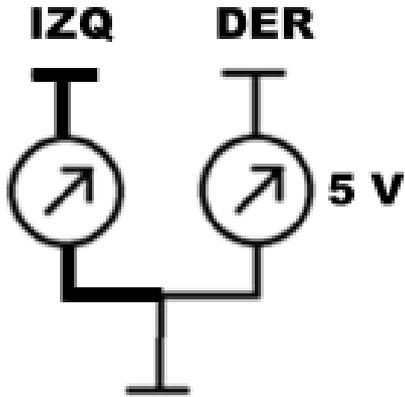


Figura A-68. Esquemática medida ID5.

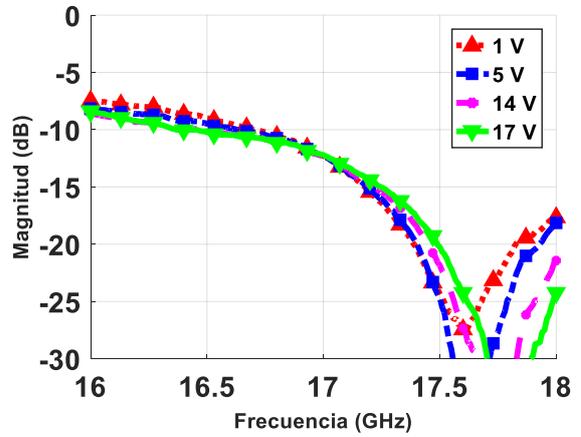


Figura A-69.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama izquierda, derecha 5V.

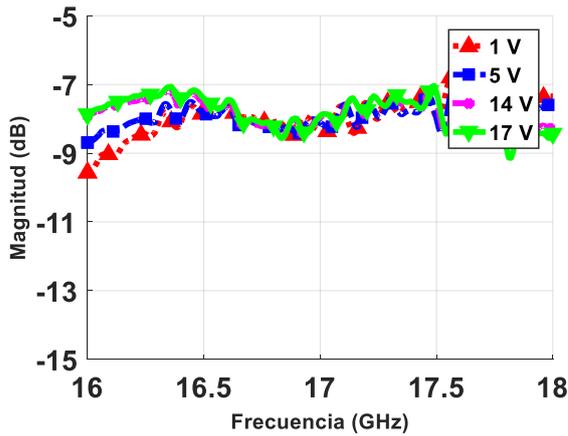


Figura A-70.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama izquierda, derecha 5V.

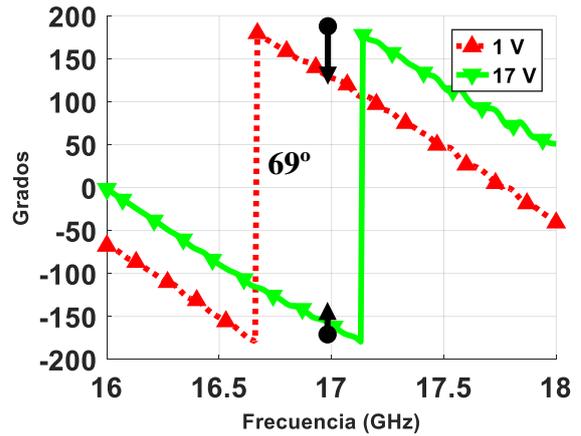


Figura A-71.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama izquierda, derecha 5V.

2.2.1.2.3 *Medidas rama izquierda, para rama derecha 17V.*

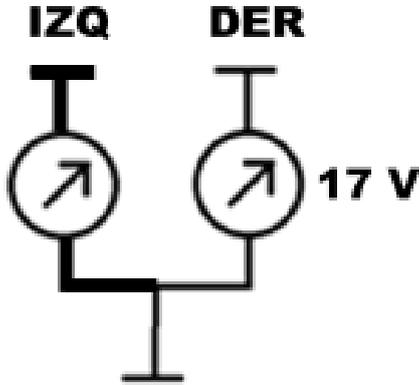


Figura A-72. Esquemática medida ID17.

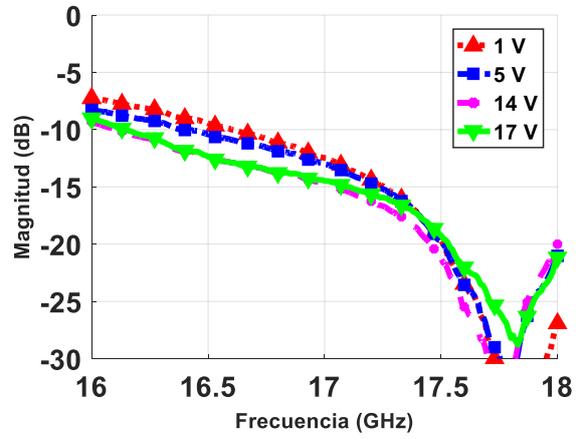


Figura A-73.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama izquierda, derecha 17V.

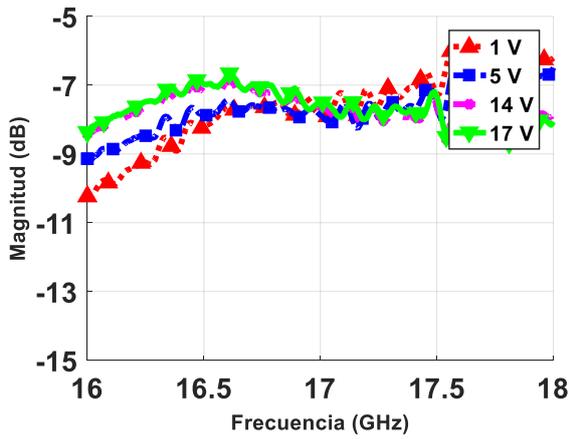


Figura A-74.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama izquierda, derecha 17V.

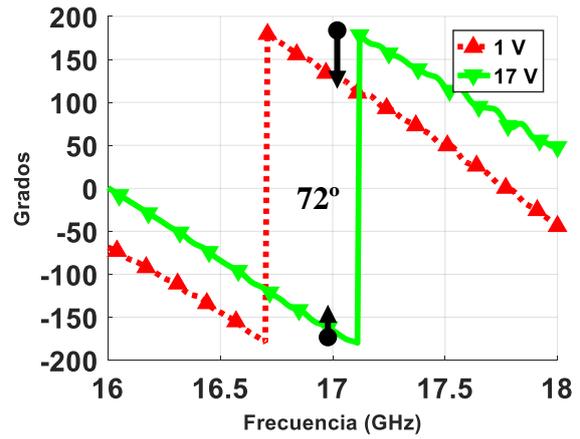


Figura A-75.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama izquierda, derecha 17V.

### 2.2.1.3 Medidas para comprobar el aislamiento de continua entre las ramas.

Para comprobar el funcionamiento del aislante de continua, se procede a fijar la tensión de la rama que medimos y cambiar la tensión de la otra, así se observa si existe variación de la fase de la rama que se trabaja cambiando la otra.

#### 2.2.1.3.1 Medidas aislamiento rama derecha.

- Fuente de la derecha fija a 0 V, la fuente de la izquierda con valores de 0 V, 6 V, 12 V y 17 V.

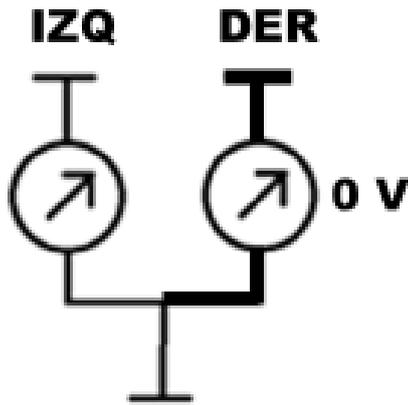


Figura A-76. Esquemática medida DOI

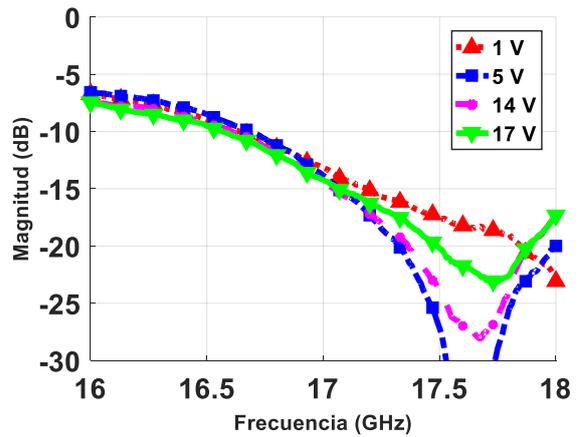


Figura A-77.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama derecha 0 V, variación izquierda.

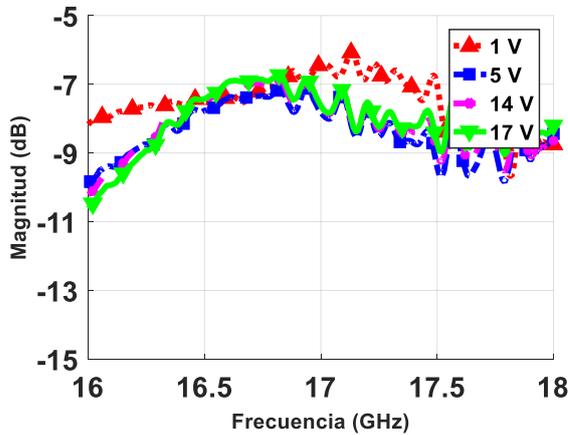


Figura A-78.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama derecha 0 V, variación izquierda.

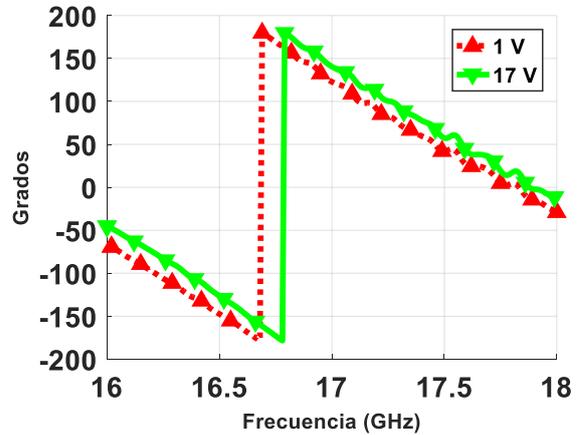


Figura A-79.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama derecha 0 V, variación izquierda.

- Fuente de la derecha fija a 5 V, la fuente de la izquierda con valores de 0 V, 6 V, 12 V y 17 V.

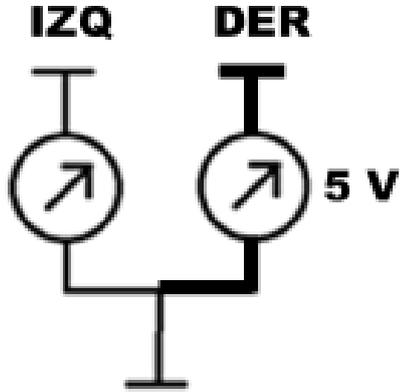


Figura A-80. Esquemática medida D5I.

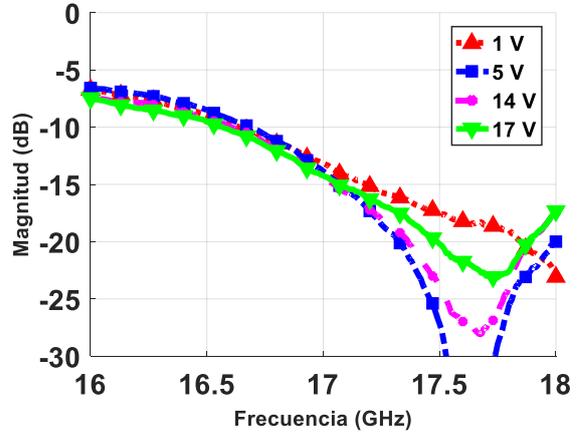


Figura A-81.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama derecha 5 V, variación izquierda.

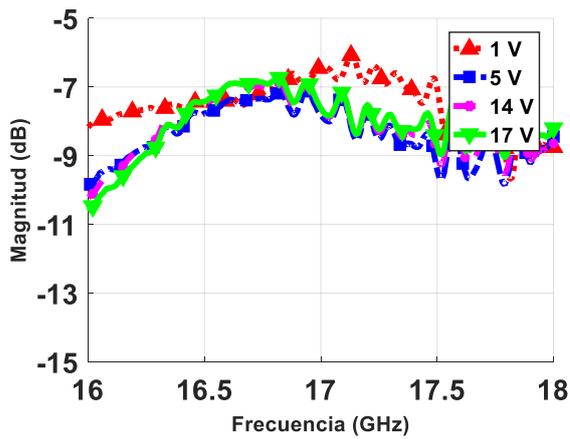


Figura A-82.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama derecha 5 V, variación izquierda.

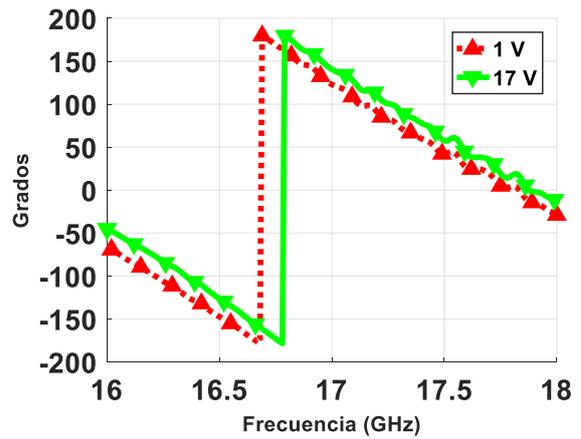


Figura A-83.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama derecha 5 V, variación izquierda.

- Fuente de la derecha fija a 17 V, la fuente de la izquierda con valores de 0 V, 6 V, 12 V y 17 V.

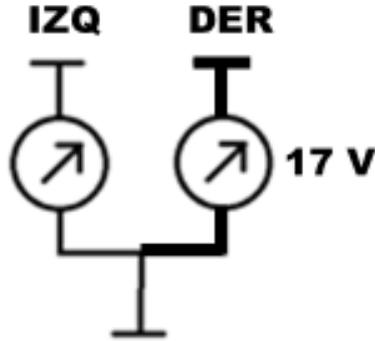


Figura A-84. Esquemática medida D17I.

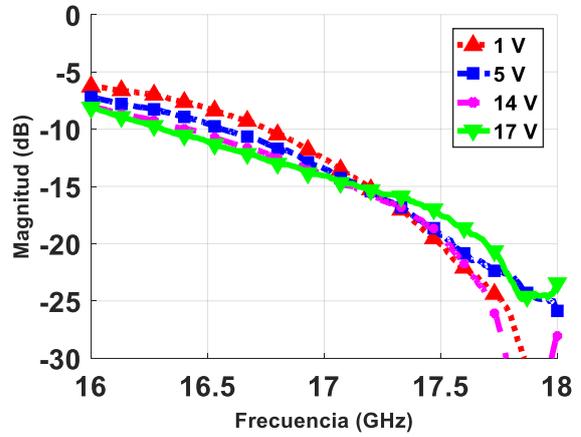


Figura A-85.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama derecha 17 V, variación izquierda.

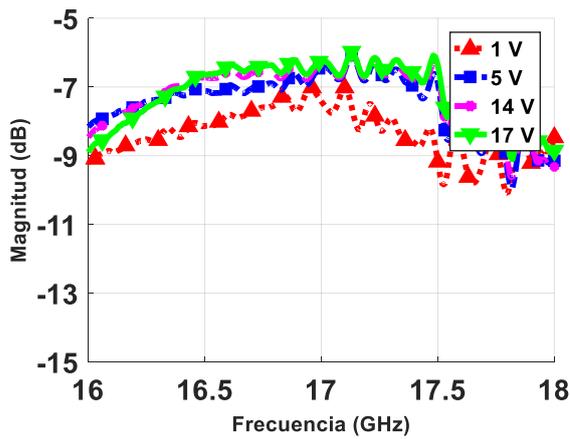


Figura A-86.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama derecha 17 V, variación izquierda.

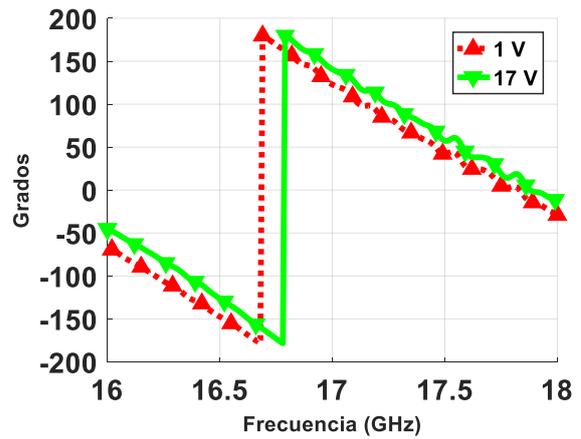


Figura A-87.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama derecha 17 V, variación izquierda.

### 2.2.1.3.2 Medidas aislamiento rama izquierda.

- Fuente de la izquierda fija a 0 V, la fuente de la derecha con valores de 0 V, 6 V, 12 V y 17 V.

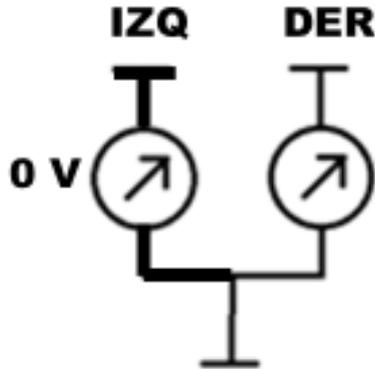


Figura A-88. Esquemática medida I0D.

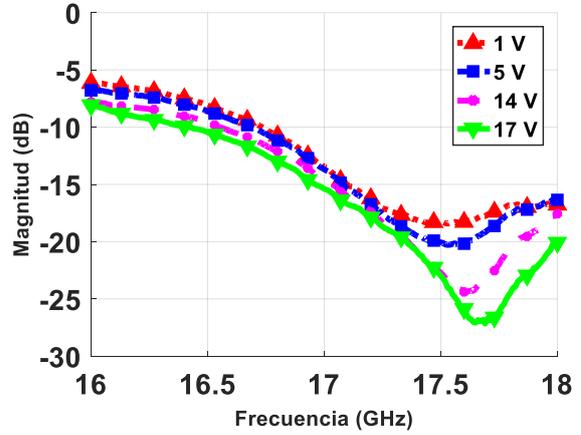


Figura A-89.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama izquierda 0 V, variación derecha.

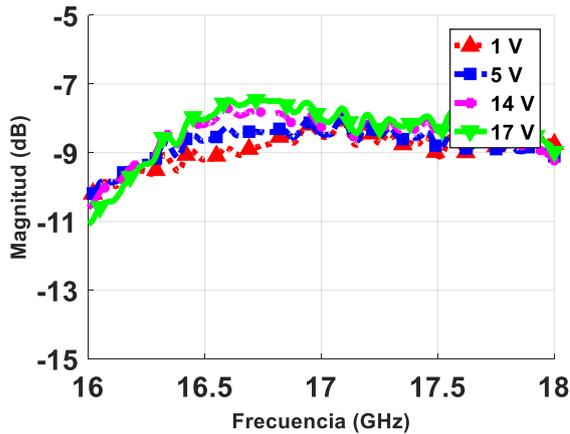


Figura A-90.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama izquierda 0 V, variación derecha.

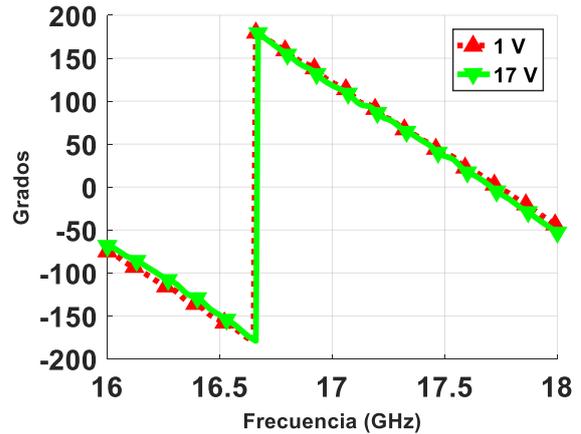


Figura A-91.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama izquierda 0 V, variación derecha.

- Fuente de la izquierda fija a 5 V, la fuente de la derecha con valores de 0V,6V,12V y 17V.

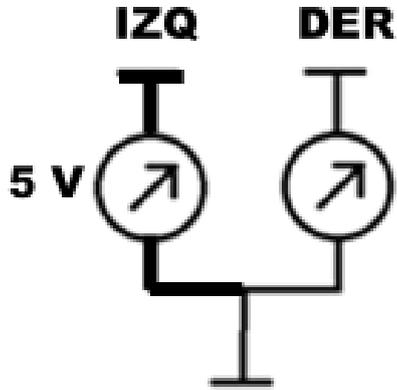


Figura A-92. Esquemática medida I5D.

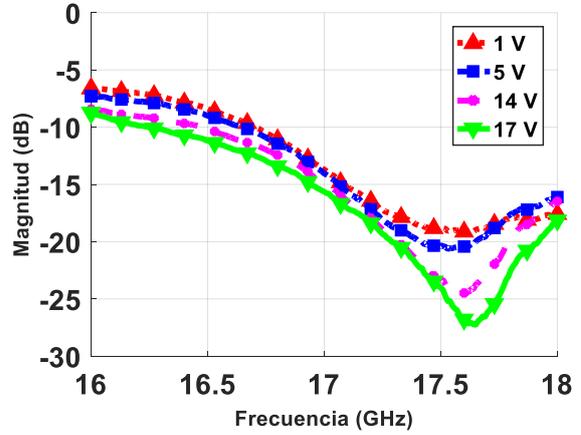


Figura A-93.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama izquierda 5 V, variación derecha.

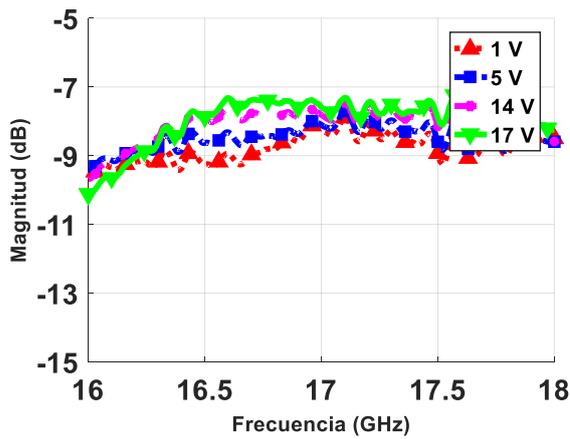


Figura A-94.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama izquierda 5 V, variación derecha.

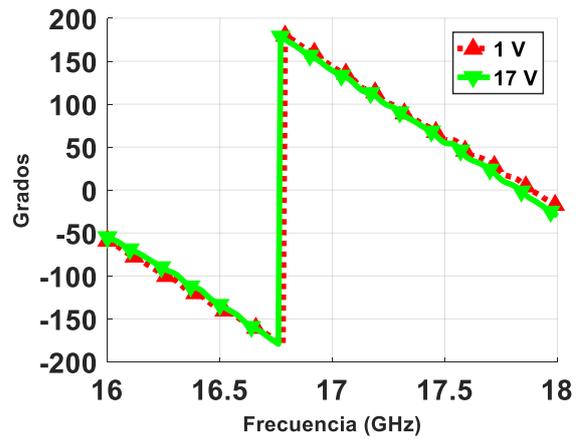


Figura A-95.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama izquierda 5 V, variación derecha.

- Fuente de la izquierda fija a 17 V, la fuente de la derecha con valores de 0 V, 6 V, 12 V y 17 V.

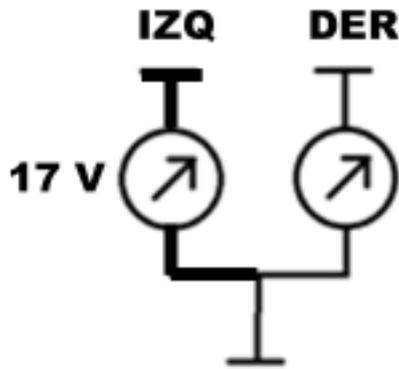


Figura A-96. Esquemática medida I17D.

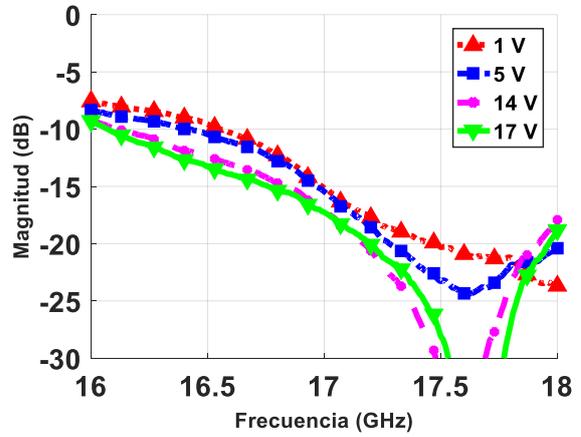


Figura A-97.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama izquierda 17 V, variación derecha.

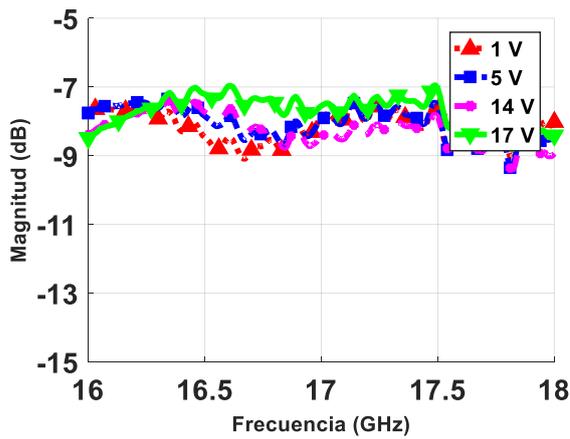


Figura A-98.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama izquierda 17 V, variación derecha.

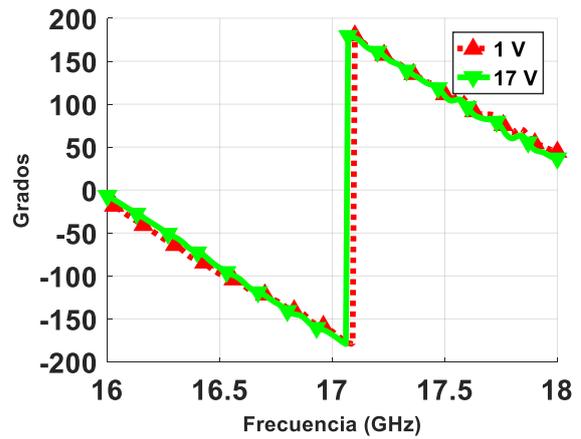


Figura A-99.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama izquierda 17 V, variación derecha.



## B Desarrollo de la red

Este apartado muestra el desarrollo del diseño de la red de alimentación adicional que no aparece en el apartado 3.2.

### 1. Divisor rama

Este divisor en T une en parejas de dos los cuatro desfases externos. Este circuito mantiene la impedancia de 50 Ohmios, haciendo una transformación en T, cuya impedancia es de 35 Ohmios.

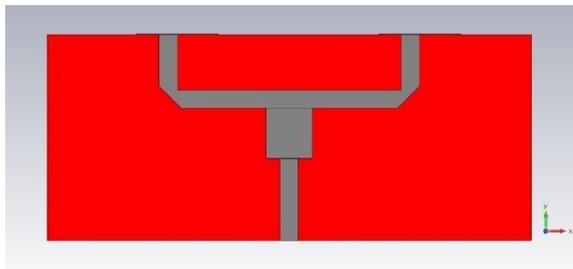


Figura B-1. Divisor rama.

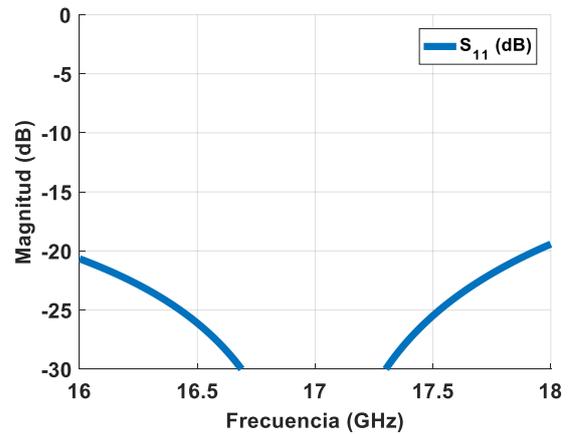


Figura B-2.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] del divisor rama

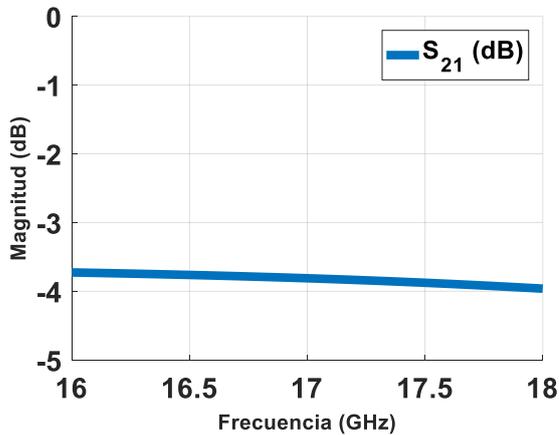


Figura B-3.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] del divisor rama.

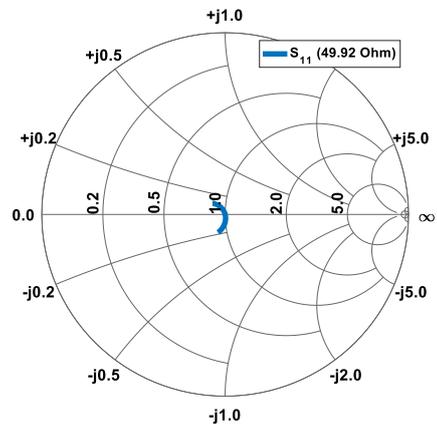


Figura B-4.  $S_{11}$  [Carta de Smith] del divisor rama.

## 2. Divisor rama con desfases.

Una vez diseñado el divisor, se procede a la unión de dos ramas con sus respectivos desfases. En los resultados de las simulaciones, se observa que la adaptación se mantiene parecida y el rango de fase no cambia. Al ser los dos desfases iguales, la respuesta es la misma para los dos, se muestran los resultados de la puerta 2.

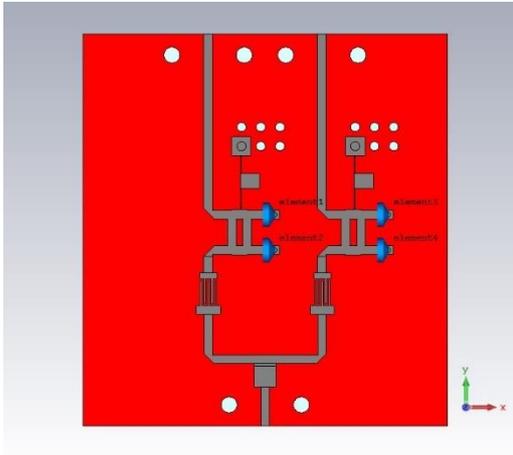


Figura B-5. Divisor rama con desfases.

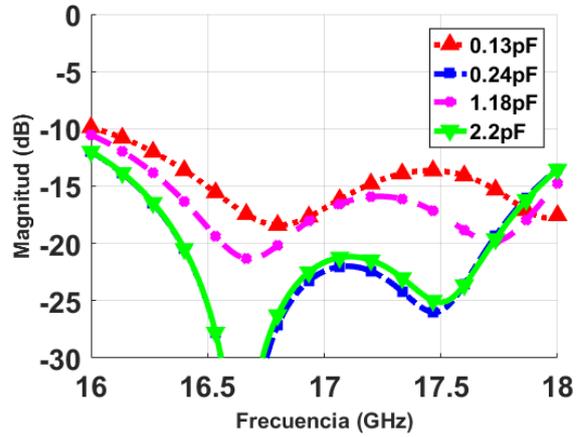


Figura B-6.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] del divisor rama.

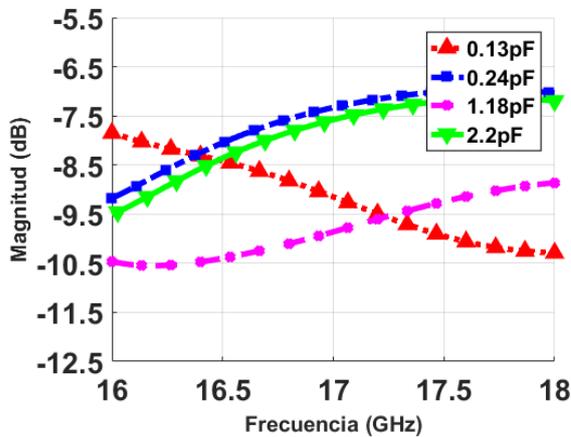


Figura B-7.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] del divisor rama.

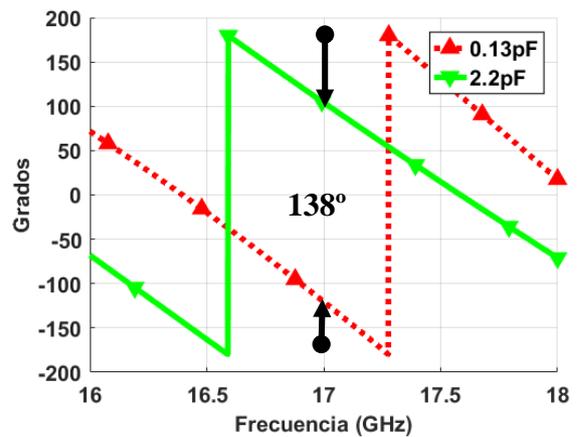


Figura B-8.  $S_{21}$  [Fase en grados] del divisor rama.

### 3. Desfasador lateral con aislante

Una vez terminado con el diseño de los cuatro desfasadores de las ramas, es necesario simular el mismo desfasador, quitando los codos que giraban la pista y añadiendo el aislante de continua. En las simulaciones se observa que, a pesar de que la resonancia se desplaza hacia frecuencias más bajas, el ancho de banda y el rango de fase es el mismo.

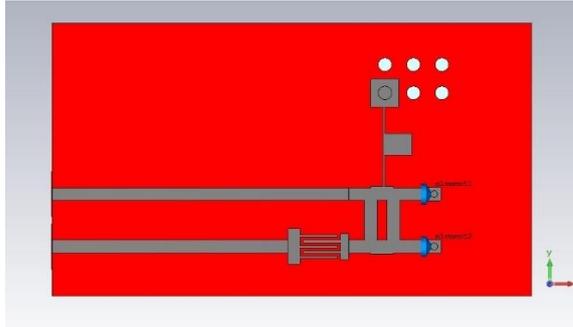


Figura B-9. Desfasador lateral con aislante.

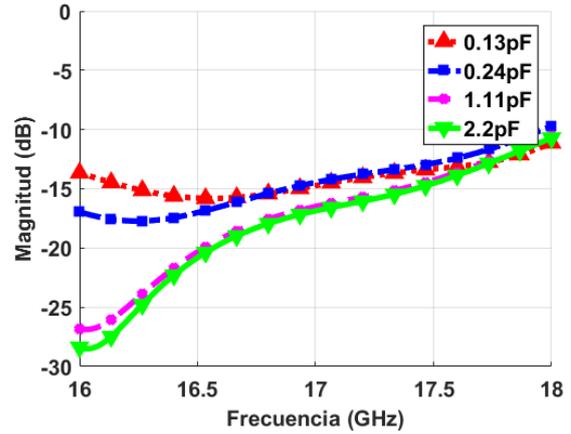


Figura B-10.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] del desfasador lateral.

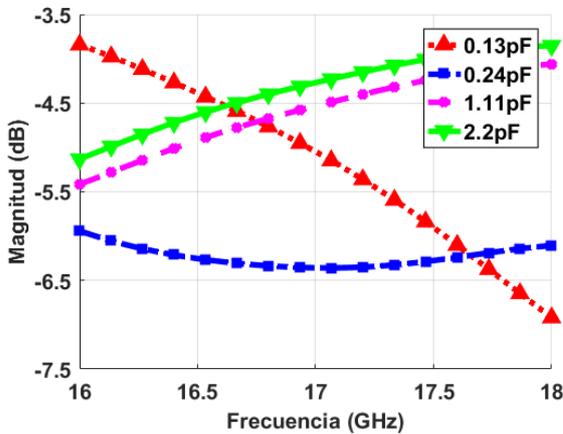


Figura B-11.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] del desfasador lateral.

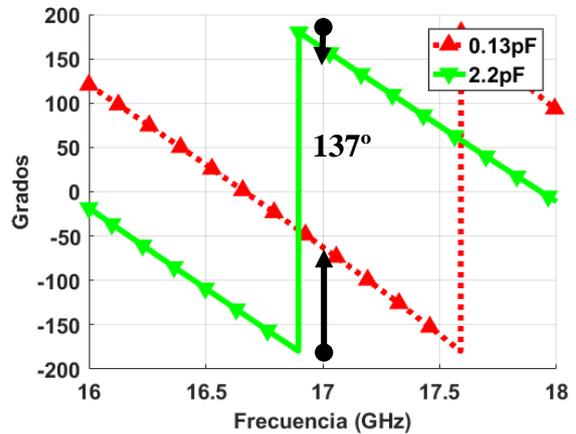


Figura B-12.  $S_{21}$  [Fase en grados] del desfasador lateral.

#### 4. Divisor en giro

Al divisor rama se le añade un codo y pista para poder unir el desfaseador lateral con dos ramas con sus respectivos desfaseadores.

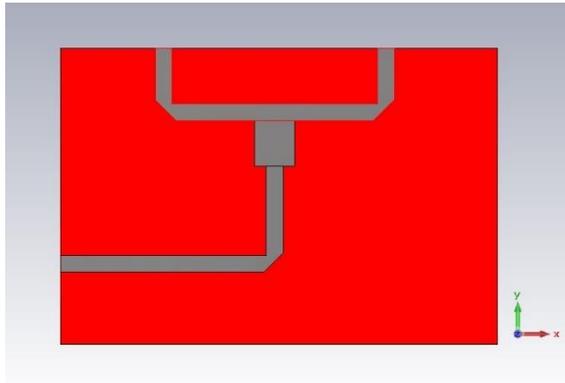


Figura B-13. Divisor en giro.

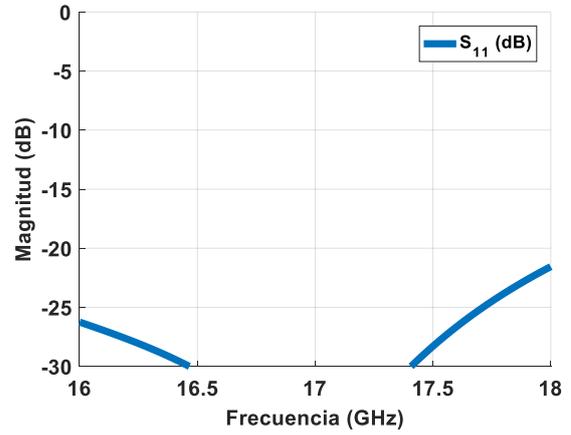


Figura B-14.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] del divisor en giro.

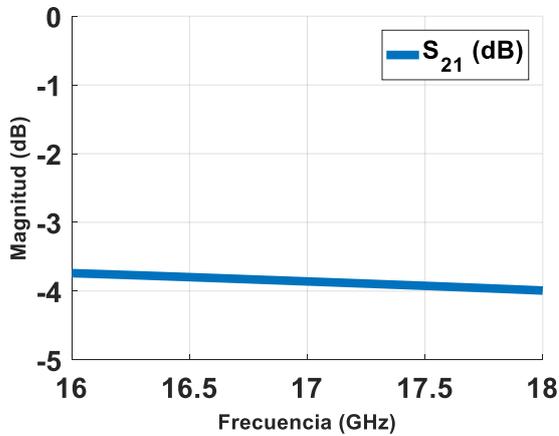


Figura B-15.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] del divisor en giro.

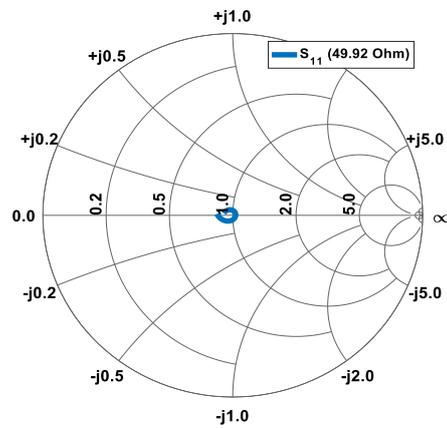


Figura B-16.  $S_{11}$  [Carta de Smith] del divisor en giro.

## 5. Desfasador lateral con aislante y divisor

Una vez se ha realizado el diseño del desfasador lateral y del divisor rama, se comprueba, al juntarlos, que los resultados de las simulaciones no cambian, manteniendo la misma adaptación y rango de fase que se obtuvo en la simulación del desfasador lateral solo. Al ser los dos desfasadores iguales, la respuesta es la misma para los dos, se muestran los resultados de la puerta 2.

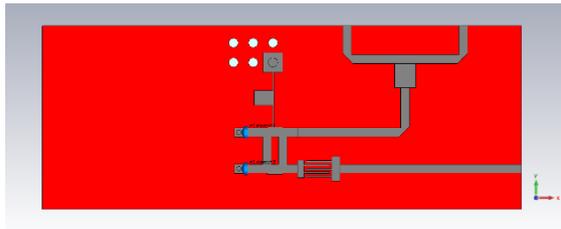


Figura B-17. Desfasador lateral y divisor.

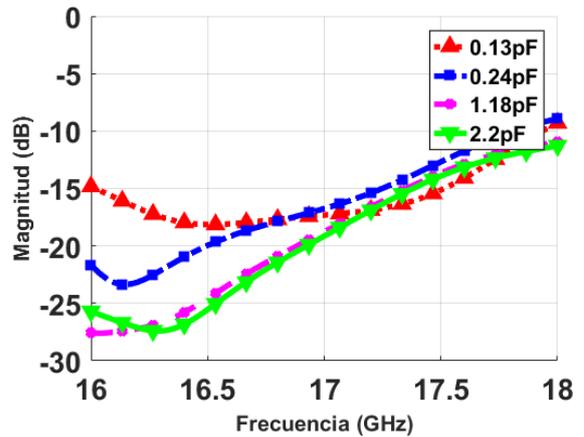


Figura B-18.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] del desfasador lateral y divisor.

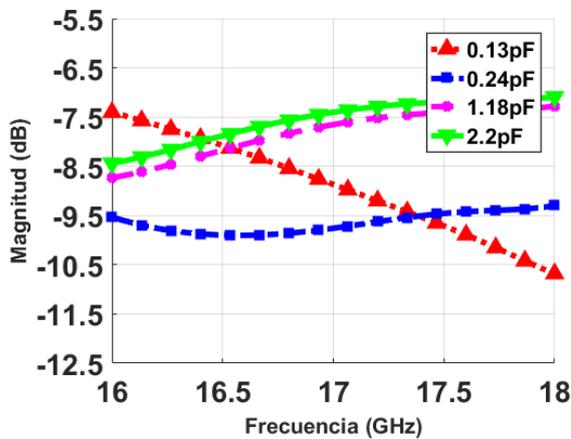


Figura B-19.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] del desfasador lateral y divisor.

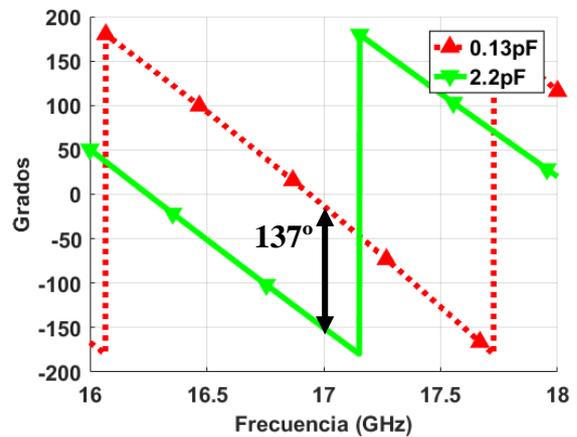


Figura B-20.  $S_{21}$  [Fase en grados] del desfasador lateral y divisor.

## 6. Divisor general

Este divisor tiene la longitud necesaria para poder unir los dos desfases laterales con sus respectivas ramas. Tiene una impedancia de entrada y de salida de 50 Ohm, y su transformador en la T, tiene una impedancia de aproximadamente 35 Ohm.

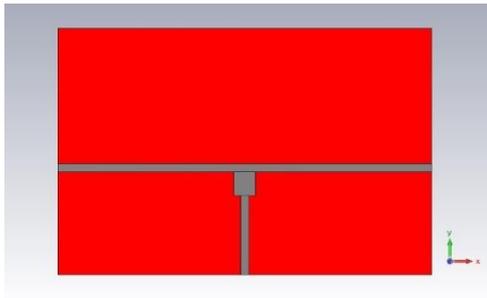


Figura B-21. Divisor general.

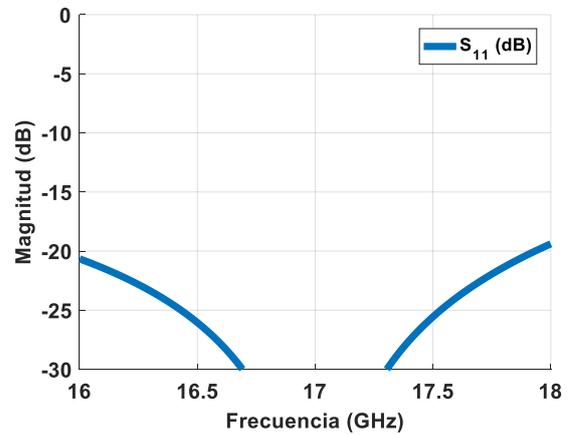


Figura B-22.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] del divisor general.

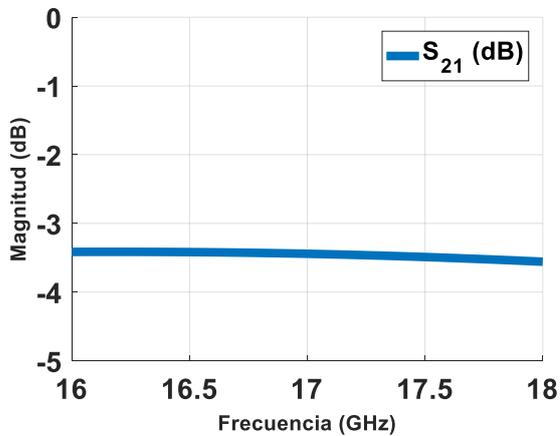


Figura B-23.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] del divisor general.

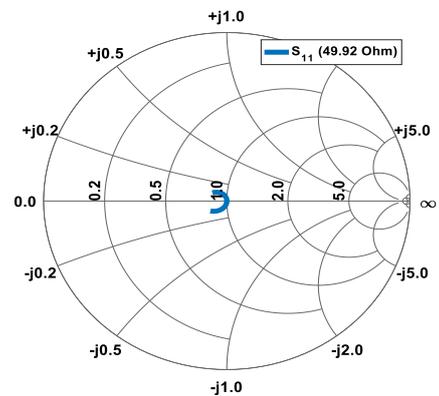


Figura B-24.  $S_{11}$  [Carta de Smith] del divisor general.

## C Medidas adicionales

### 1. Medidas adicionales de la red.

Para poder caracterizar la red, denominaremos los desfases laterales como A y B, y los puertos serán los números 1, 2, 3 y 4, por lo que las medidas del desfase izquierdo serán las medidas del A1, como se explica en la figura C-1 y C-2.

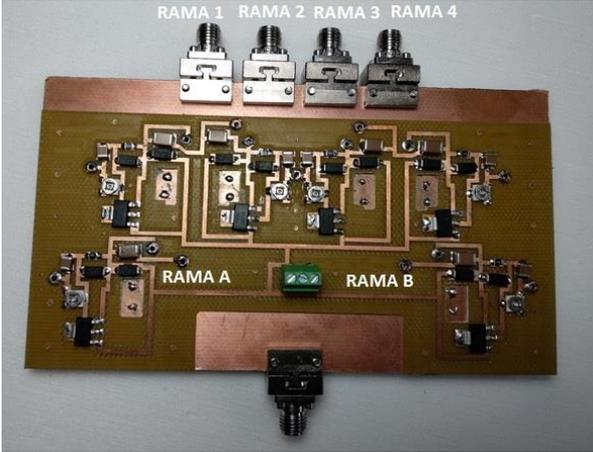


Figura C-1. Caracterización de la red.

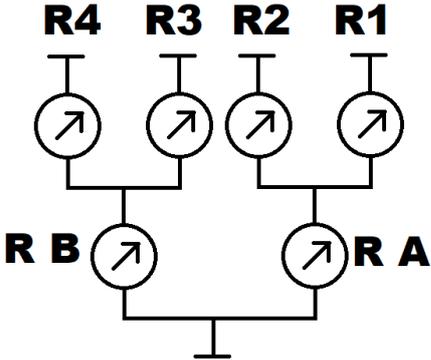


Figura C-2. Esquema para la caracterización de la red

## 1.1. Medidas rama 1.

### 1.1.1. Rama A 1 V.

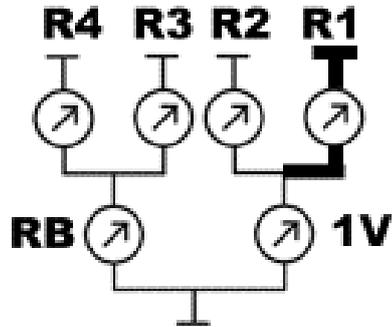


Figura C-3. Esquemática medida R1A1.

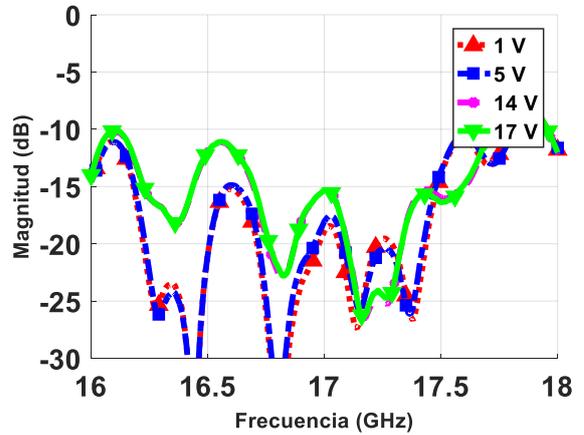


Figura C-4.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama 1, rama A 1V.

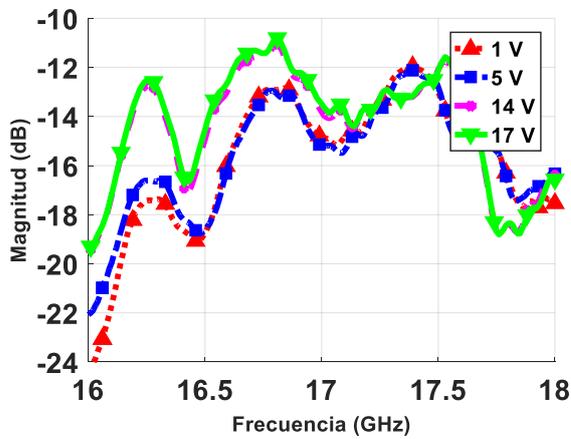


Figura C-5.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama 1, rama A 1V.

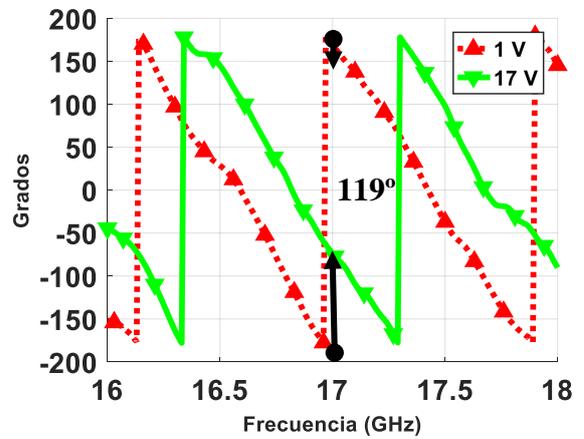


Figura C-6.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama 1, rama A 1V.

### 1.1.2. Rama A 8 V.

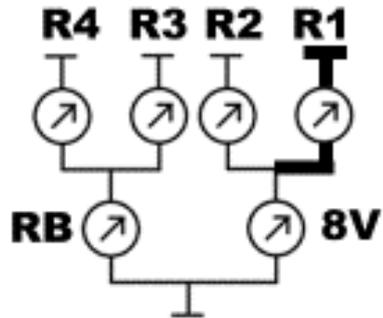


Figura C-7. Esquemática medida R1A8.

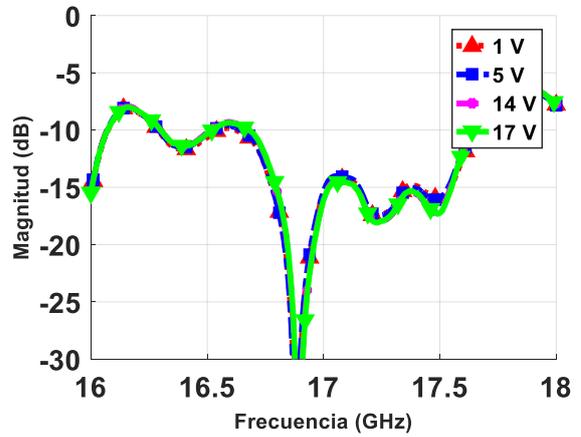


Figura C-8.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama 1, rama A 8 V.

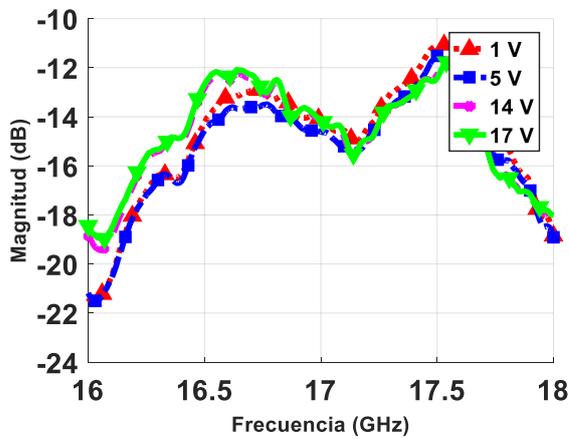


Figura C-9.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama 1, rama A 8 V.

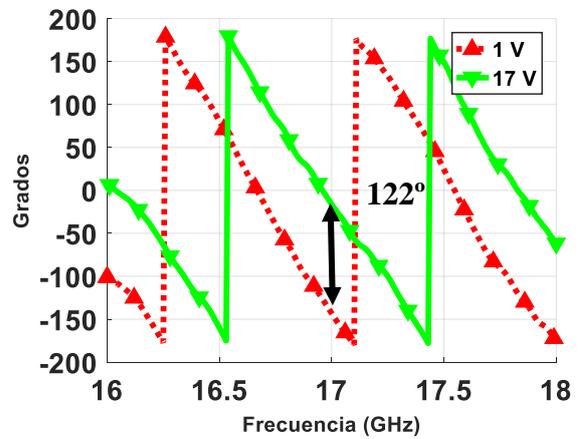


Figura C-10.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama 1, rama A 8 V.

### 1.1.3. Rama A 17 V.

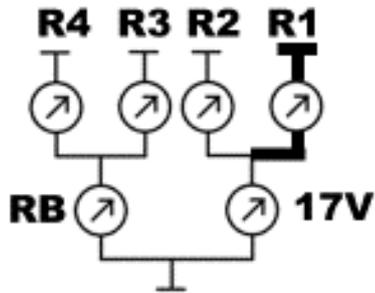


Figura C-11. Esquemática medida R1A17.

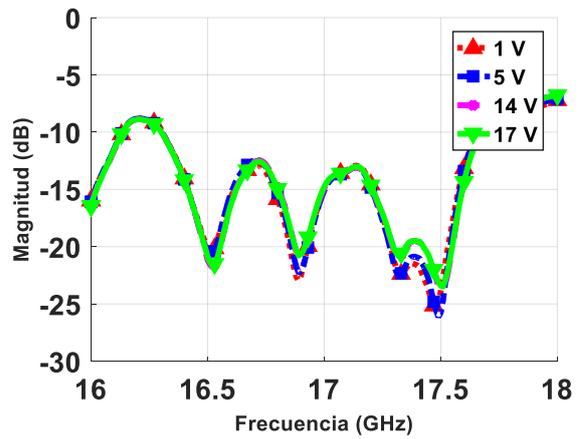


Figura C-12.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama 1, rama A 17 V.

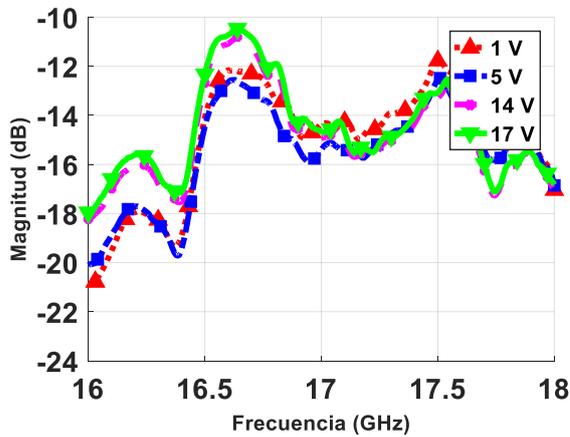


Figura C-13.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama 1, rama A 17 V.

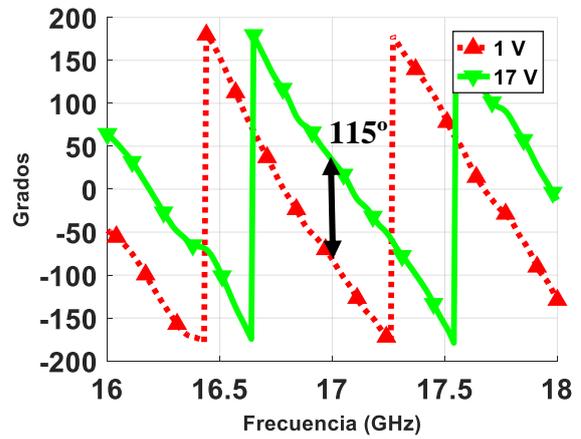


Figura C-14.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama 1, rama A 17 V.

## 1.2. Medidas rama 2.

### 1.2.1. Rama A 1 V.

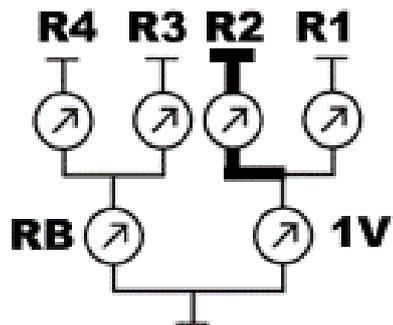


Figura C-15. Esquemática medida R2A1.

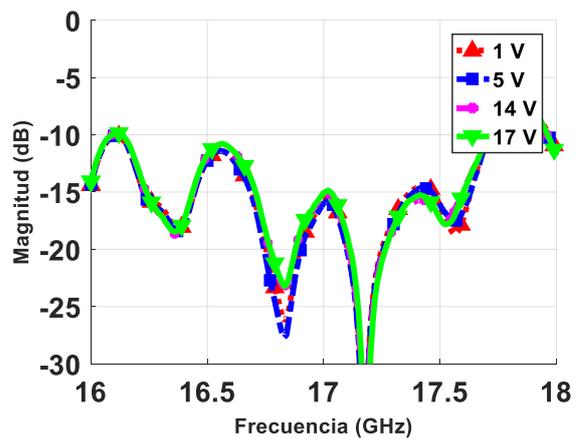


Figura C-16.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama 2, rama A 1 V.

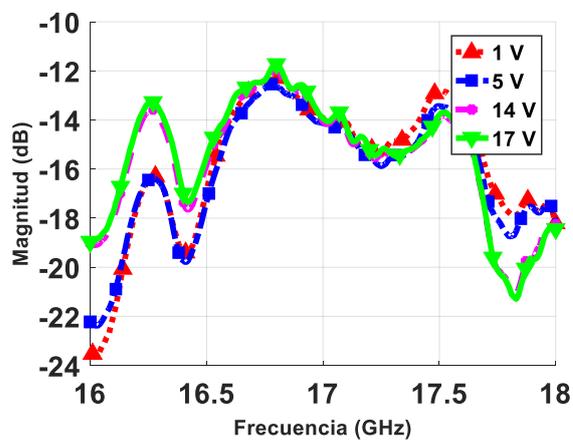


Figura C-17.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama 2, rama A 1 V.

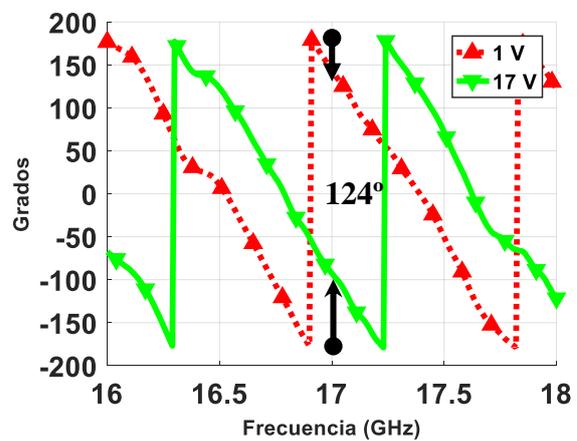


Figura C-18.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama 2, rama A 1 V.

### 1.2.2. Rama A 8 V.

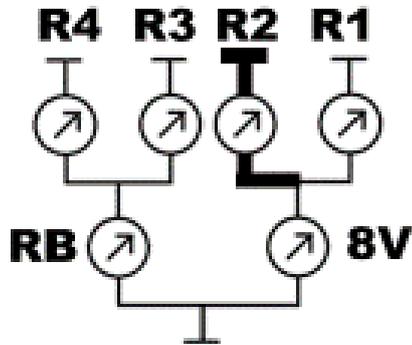


Figura C-19. Esquemática medida R2A8.

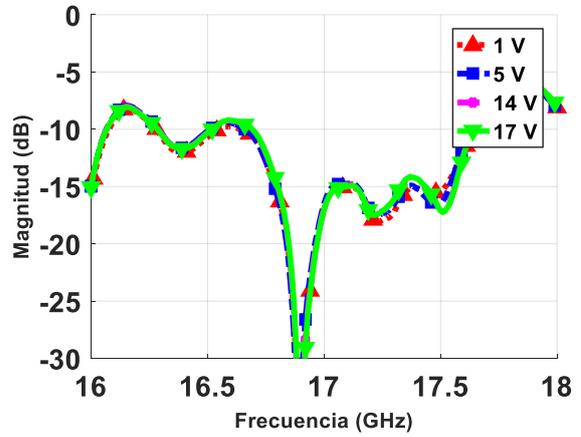


Figura C-20.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama 2, rama A 8 V.

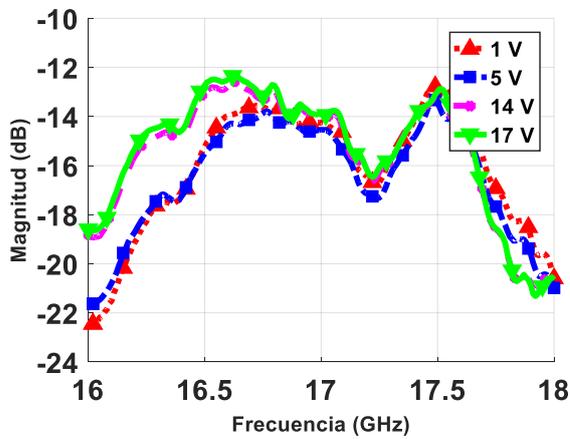


Figura C-21.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama 2, rama A 8 V.

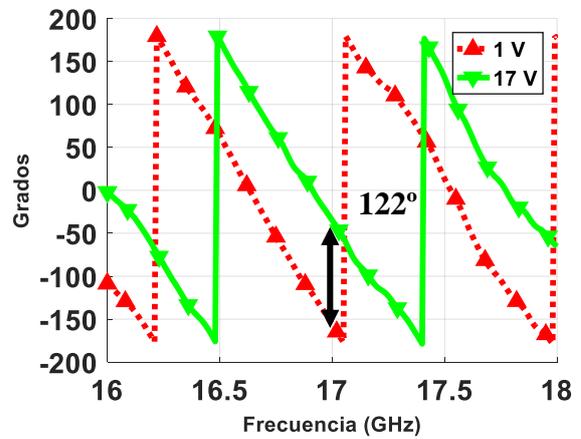


Figura C-22.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama 2, rama A 8 V.

### 1.2.3. Rama A 17 V.

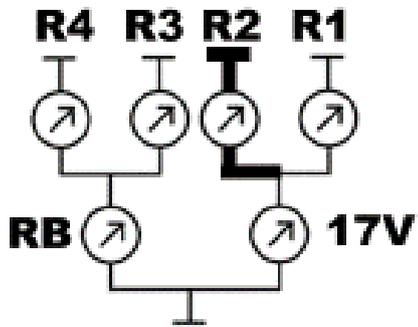


Figura C-23. Esquemática medida R2A17.

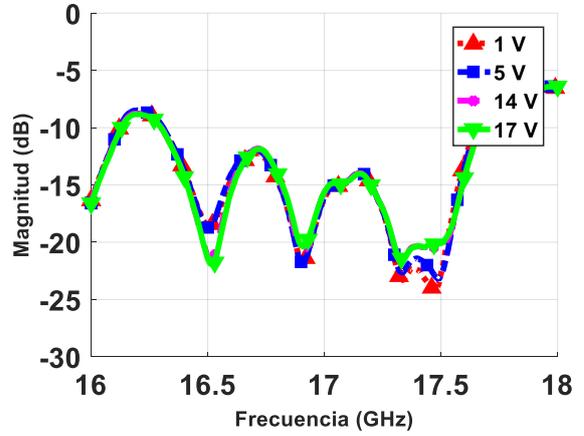


Figura C-24.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama 2, rama A 17 V.

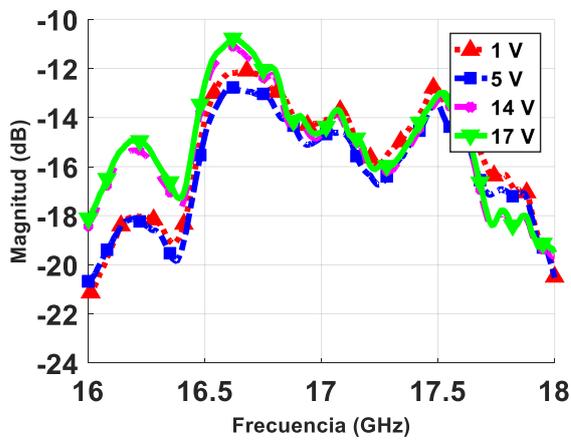


Figura C-25.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama 2, rama A 17 V.

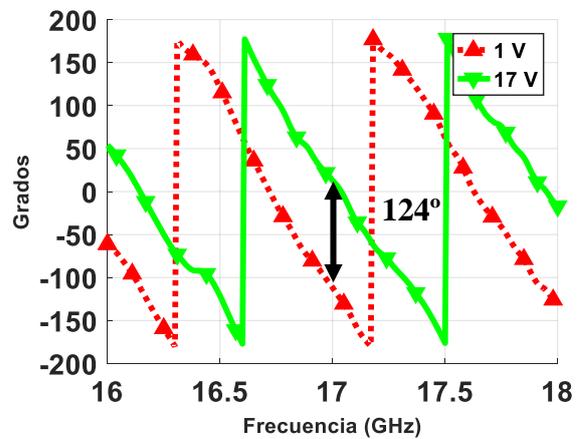


Figura C-26.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama 2, rama A 17 V.

### 1.3. Medidas rama 3.

#### 1.3.1. Rama B 1 V.

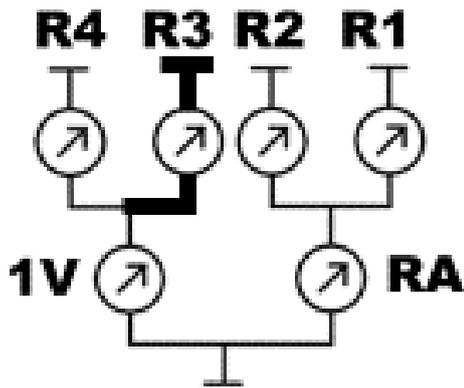


Figura C-27. Esquemática medida R3B1.

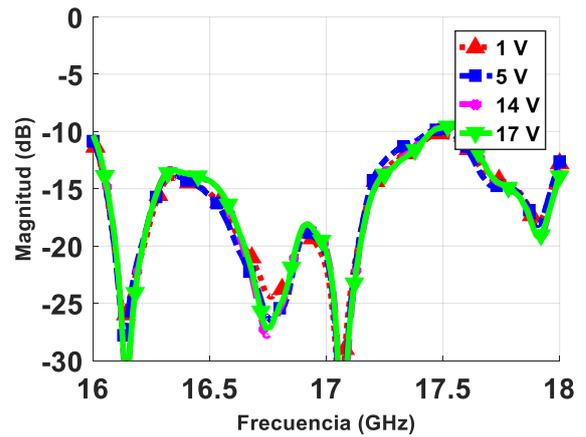


Figura C-28.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama 3, rama B 1 V.

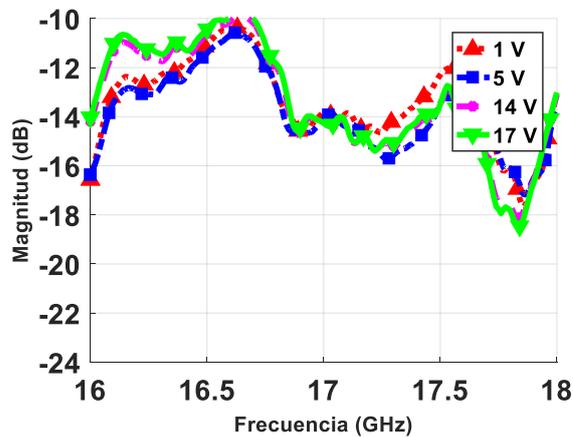


Figura C-29.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama 3, rama B 1 V.

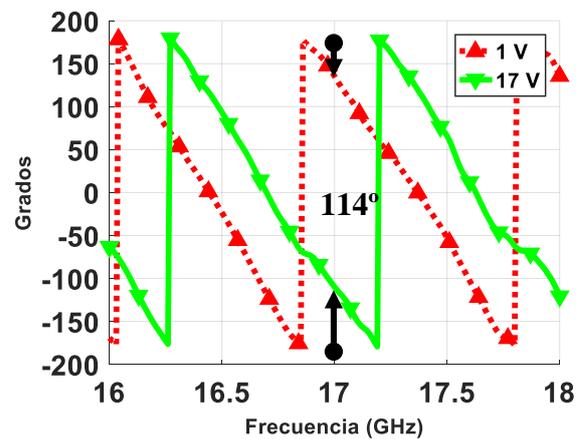


Figura C-30.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama 3, rama B 1 V.

### 1.3.2. Rama B 8 V.

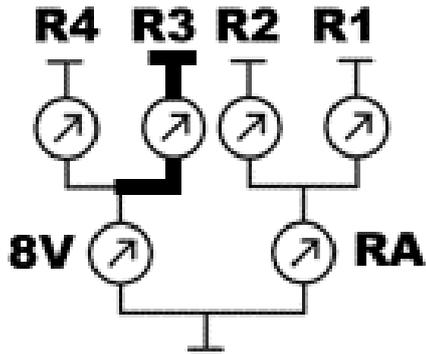


Figura C-31. Esquemática medida R3B8.

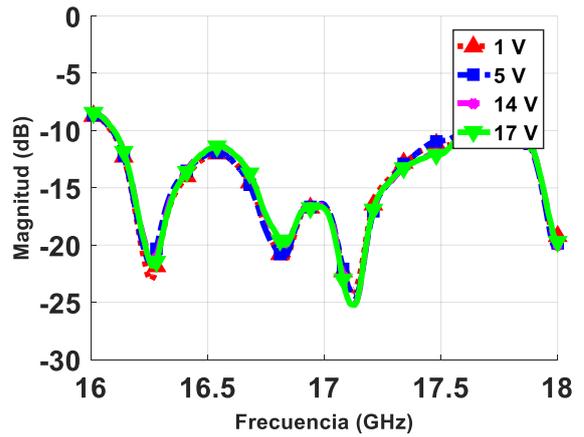


Figura C-32.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama 3, rama B 8 V.

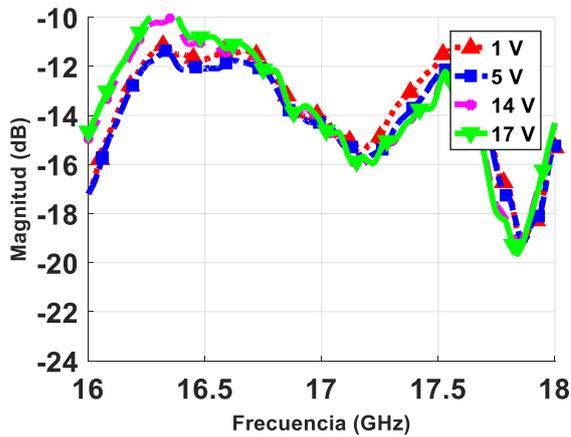


Figura C-33.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama 3, rama B 8 V.

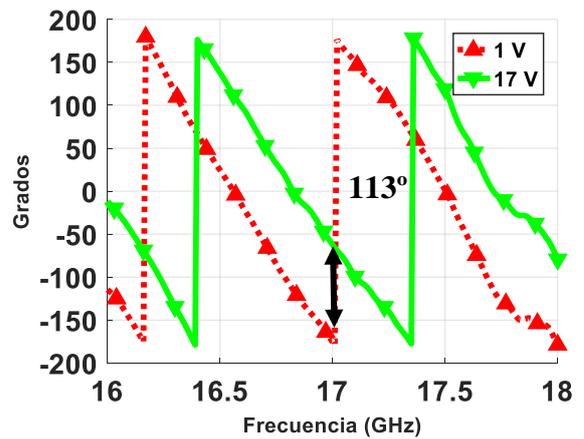


Figura C-34.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama 3, rama B 8 V.

### 1.3.3. Rama B 17 V.

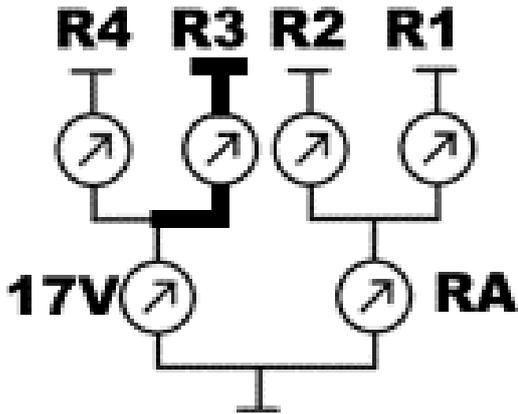


Figura C-35. Esquemática medida R3B17.

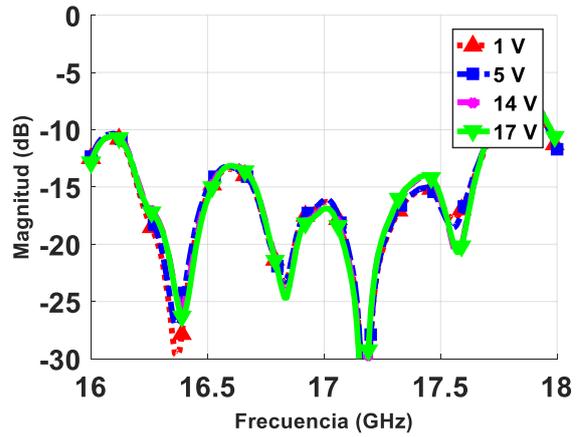


Figura C-36.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama 3, rama B 17 V.

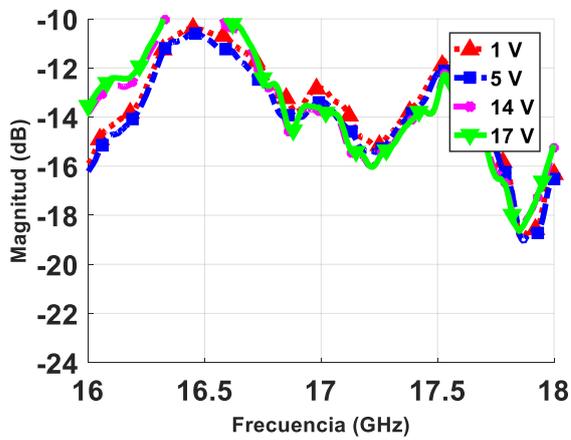


Figura C-37.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama 3, rama B 17 V.

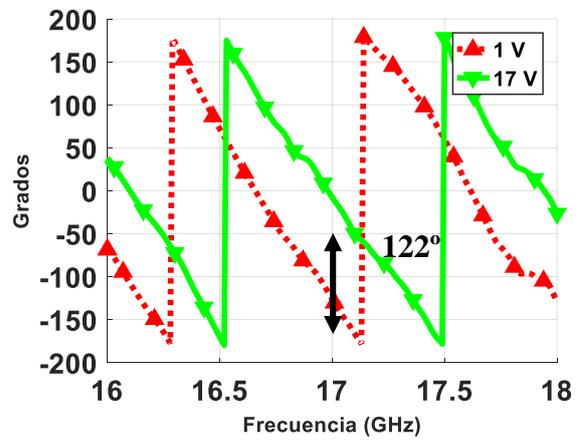


Figura C-38.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama 3, rama B 17 V.

## 1.4. Medidas rama 4.

### 1.4.1. Rama B 1 V.

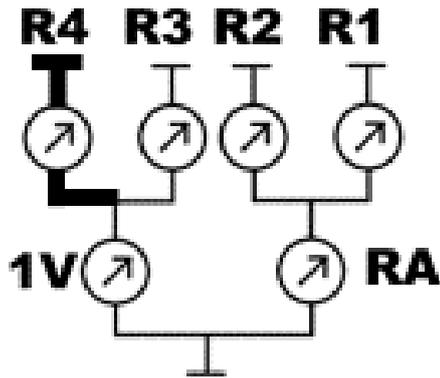


Figura C-39. Esquemática medida R4B1.

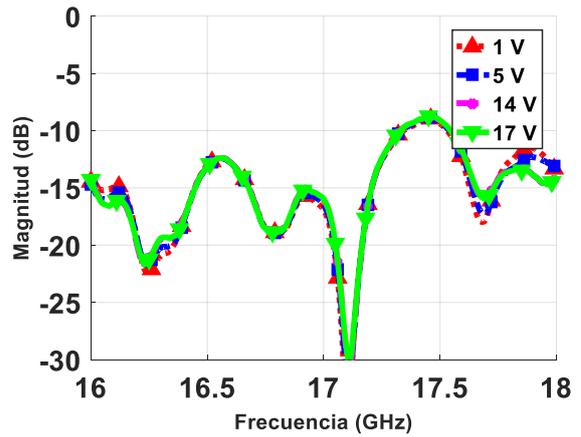


Figura C-40.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama 4, rama B 1 V.

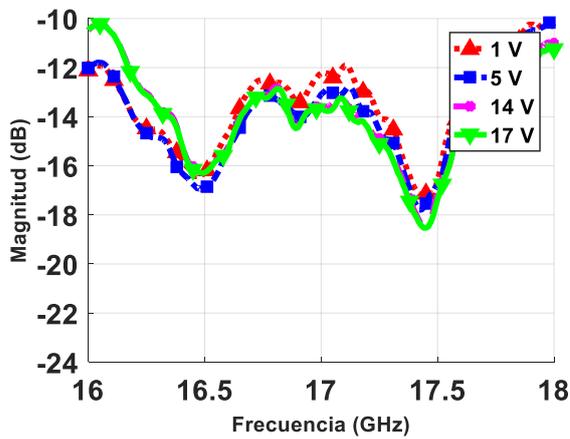


Figura C-41.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama 4, rama B 1 V.

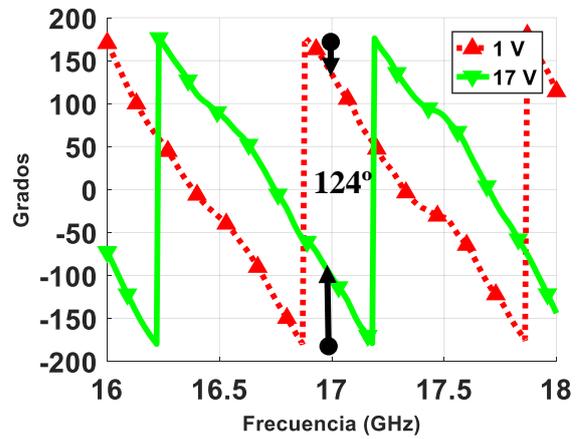


Figura C-42.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama 4, rama B 1 V.

### 1.4.2. Rama B 8 V.

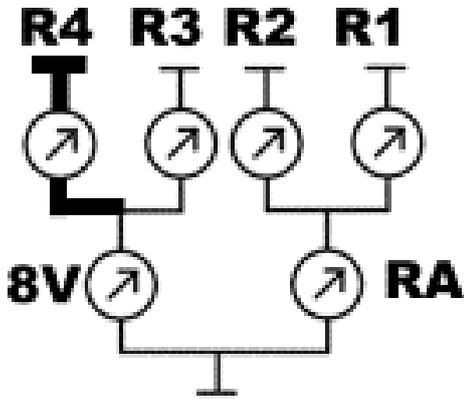


Figura C-43. Esquemática medida R4B8.

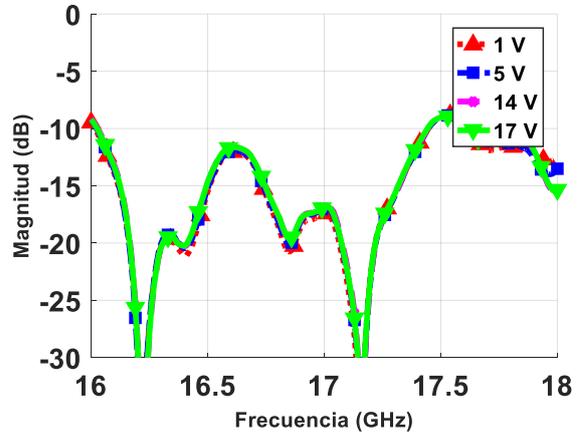


Figura C-44.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama 4, rama B 8 V.

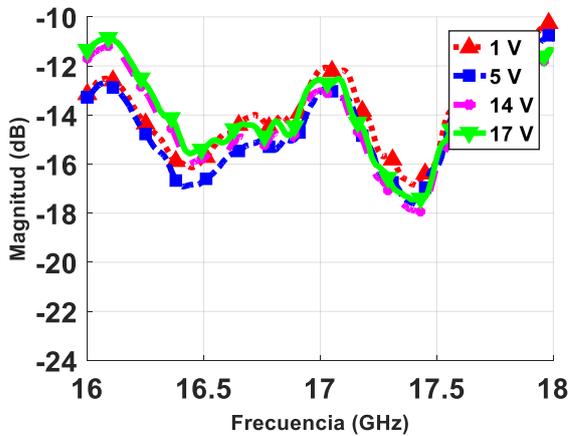


Figura C-45.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama 4, rama B 8 V.

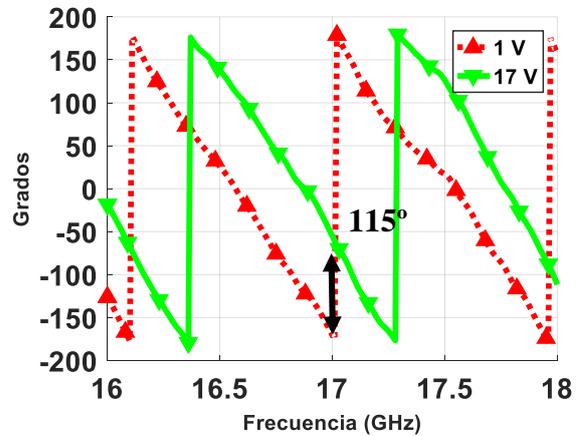


Figura C-46.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama 3, rama B 8 V.

1.4.3. Rama B 17 V.

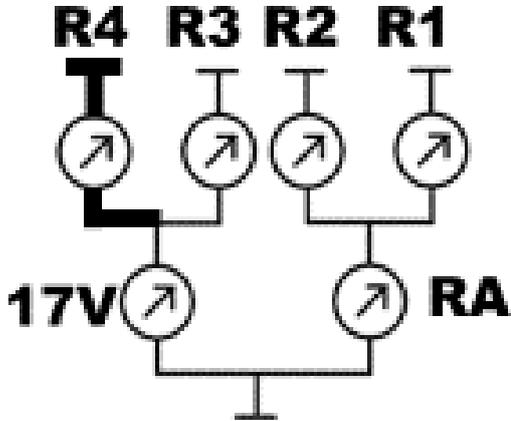


Figura C-47. Esquemática medida R4B17.

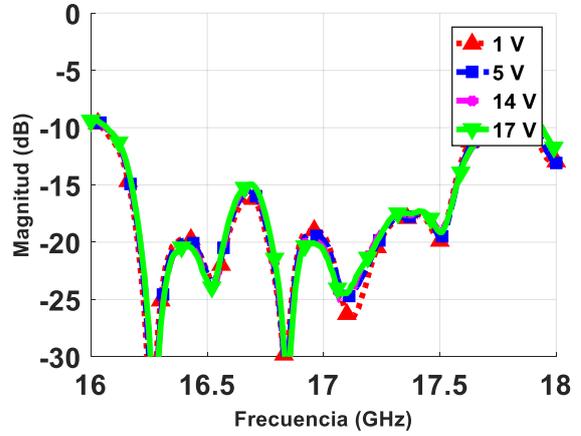


Figura C-48.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama 4, rama B 17 V.

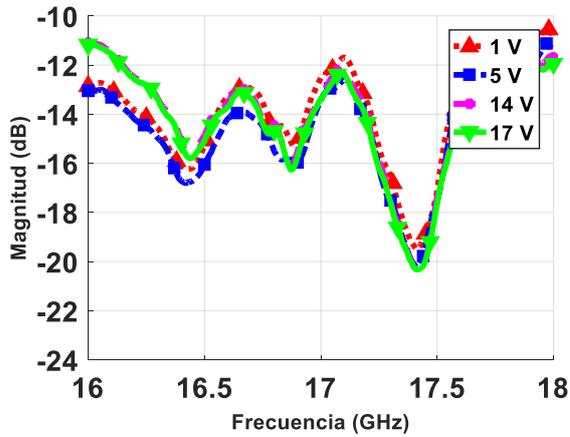


Figura C-49.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama 4, rama B 17 V.

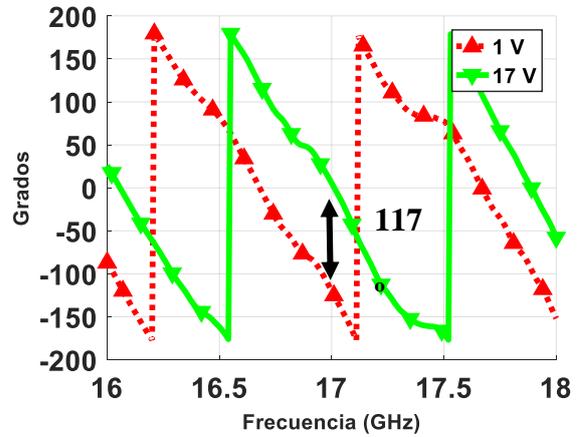


Figura C-50.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama 3, rama B 17 V.

## 1.5. Medidas rama A.

### 1.5.1. Rama 1 1 V.

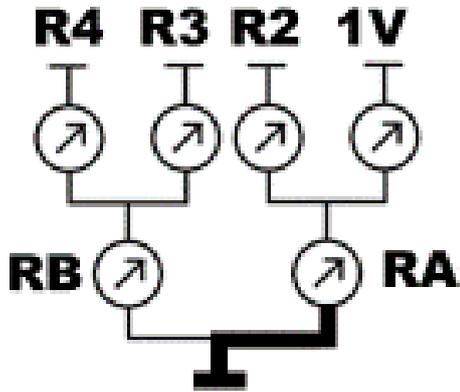


Figura C-51. Esquemática medida RA11.

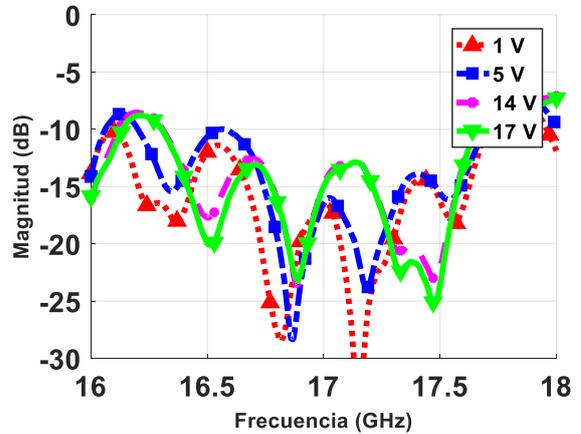


Figura C-52.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama A, rama 1 1 V.

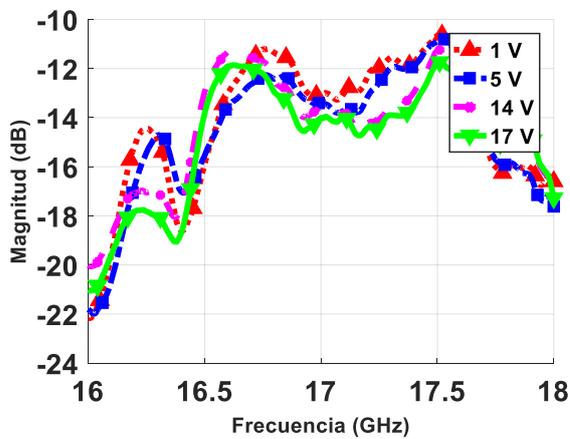


Figura C-53.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama A, rama 1 1 V.

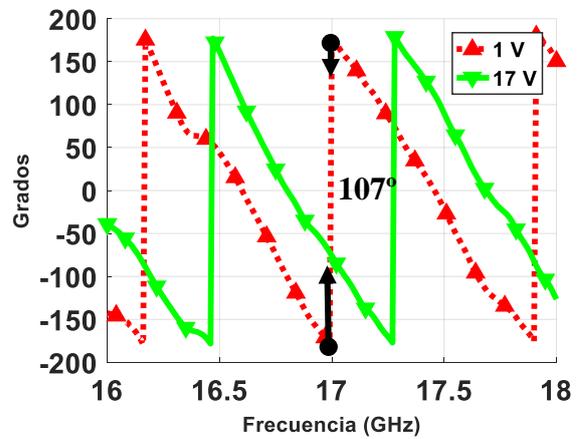


Figura C-54.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama A, rama 1 1 V.

1.5.2. Rama 1 8 V.

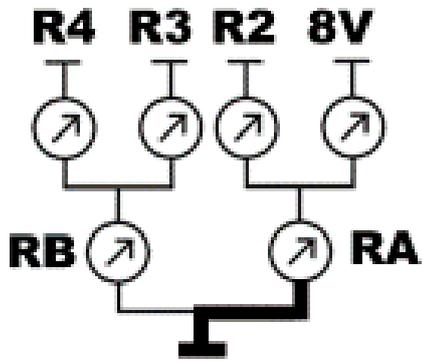


Figura C-55. Esquemática medida RA18.

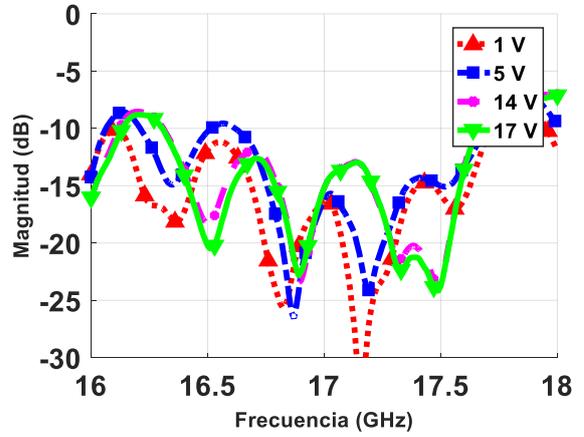


Figura C-56.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama A, rama 1 8 V.

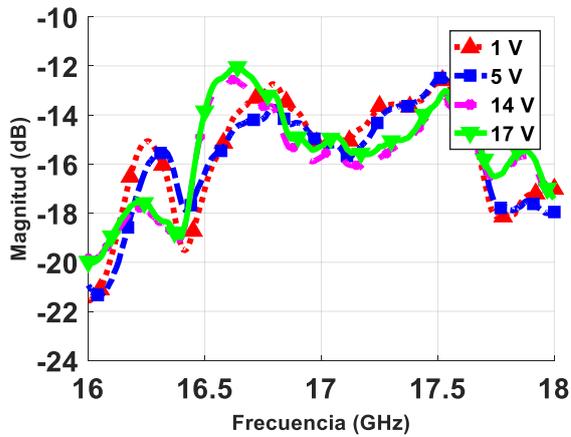


Figura C-57.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama A, rama 1 8 V.

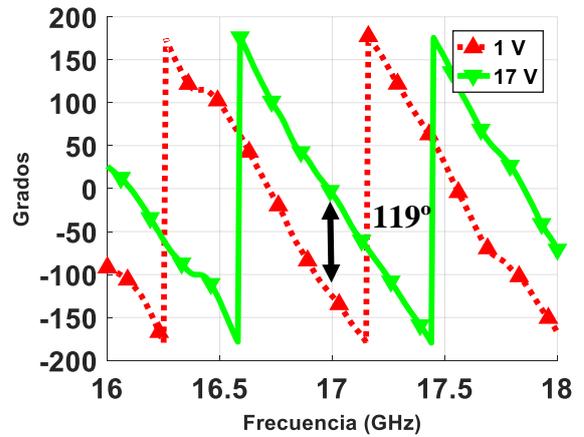


Figura C-58.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama A, rama 1 8 V.

1.5.3. Rama 1 17 V.

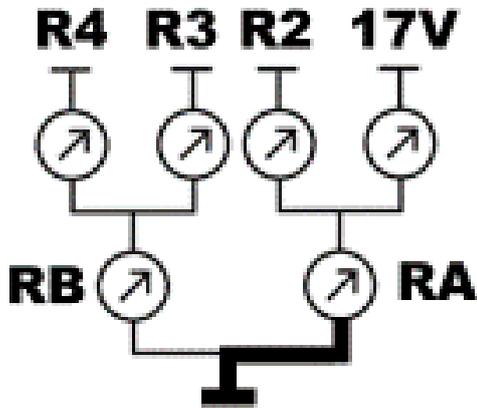


Figura C-59. Esquemática medida RA117.

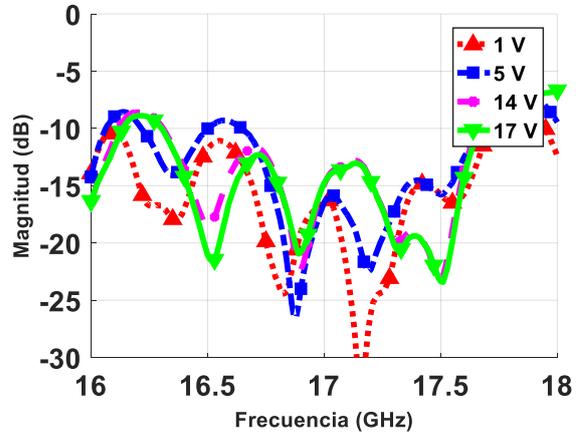


Figura C-60.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama A, rama 1 17 V.

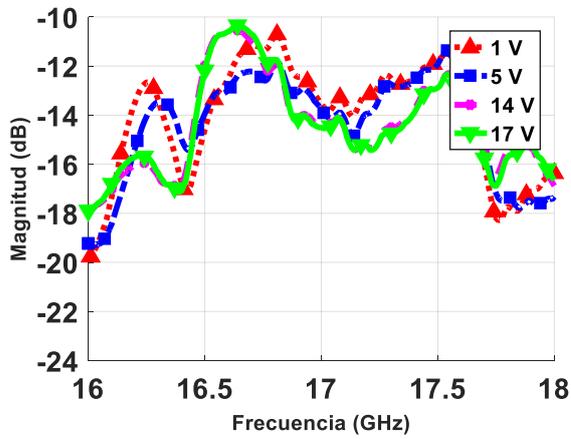


Figura C-61.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama A, rama 1 17 V.

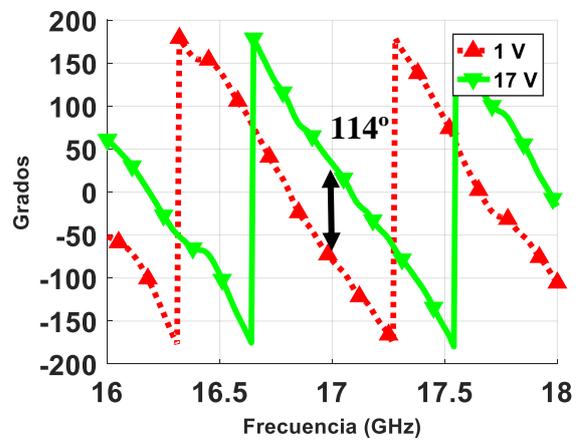


Figura C-62.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama A, rama 1 17 V.

1.5.4. Rama 2 1 V.

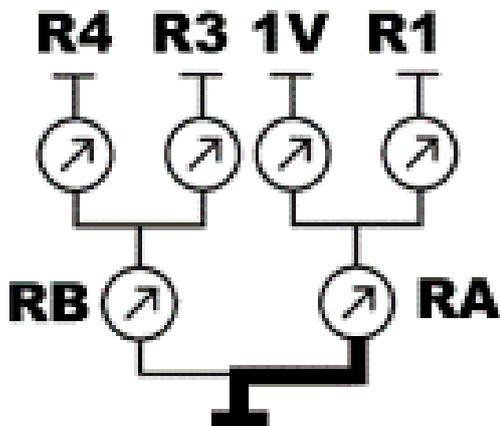


Figura C-63. Esquemática medida RA12.

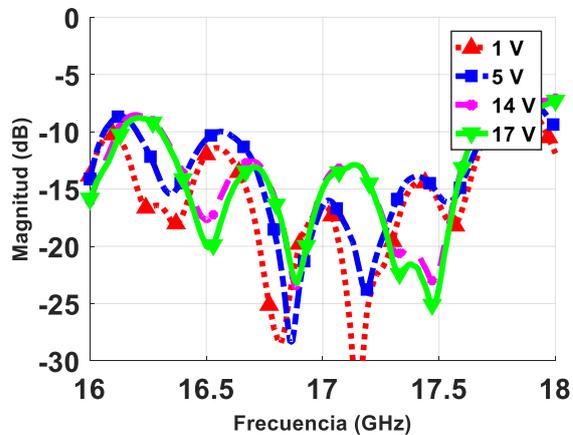


Figura C-64.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama A, rama 2 1 V.

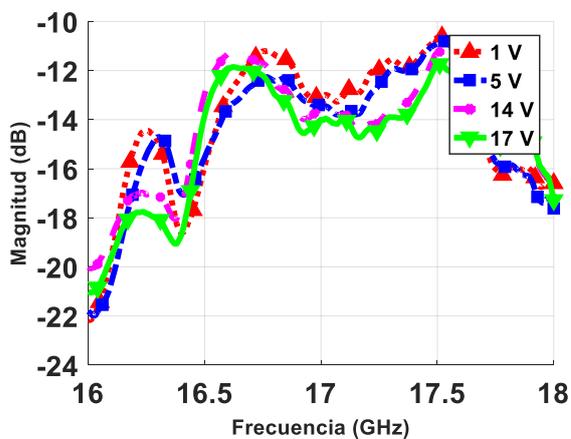


Figura C-65.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama A, rama 2 1 V.

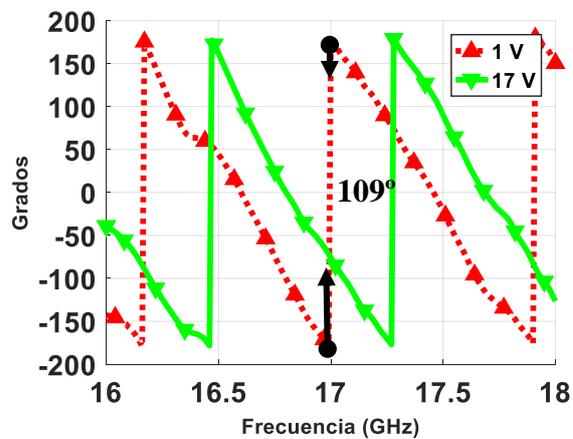


Figura C-66.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama A, rama 121 V.

1.5.5. Rama 2 8 V.

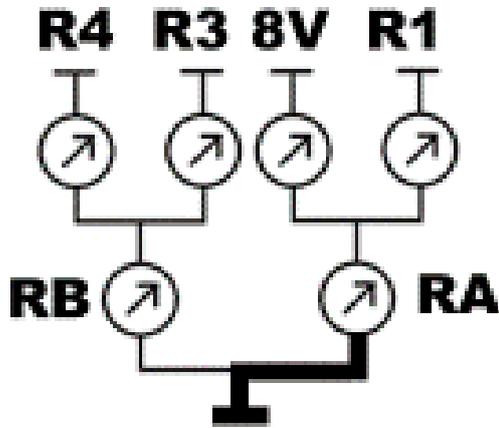


Figura C-67. Esquemática medida RA28.

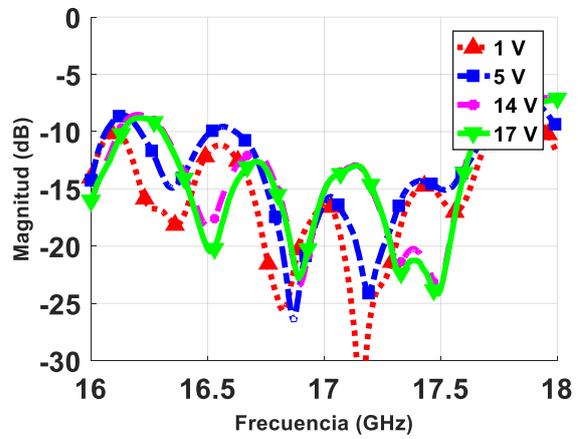


Figura C-68.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama A, rama 2 8 V.

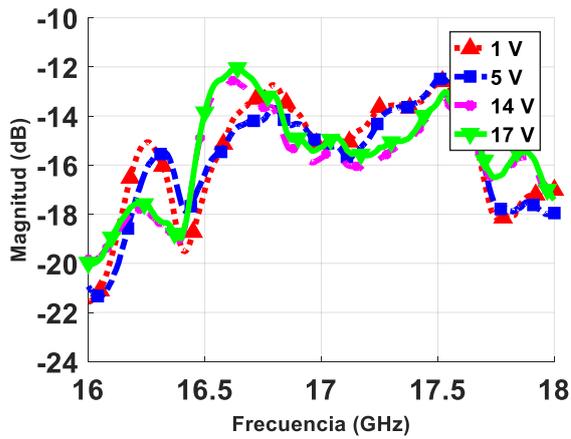


Figura C-69.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama A, rama 2 8 V.

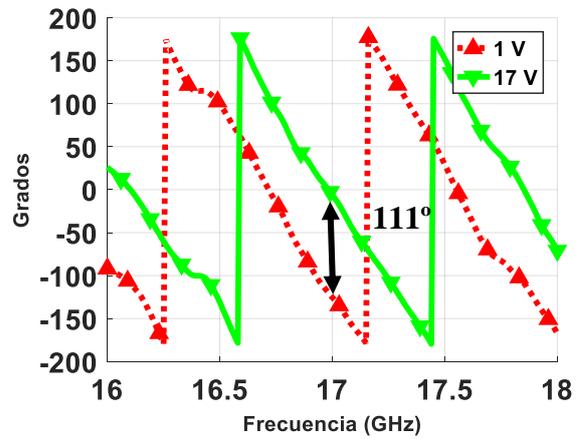


Figura C-70.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama A, rama 2 8 V.

1.5.6. Rama 2 17 V.

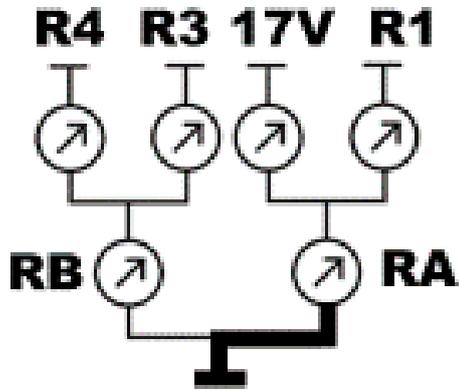


Figura C-71. Esquemática medida RA217.

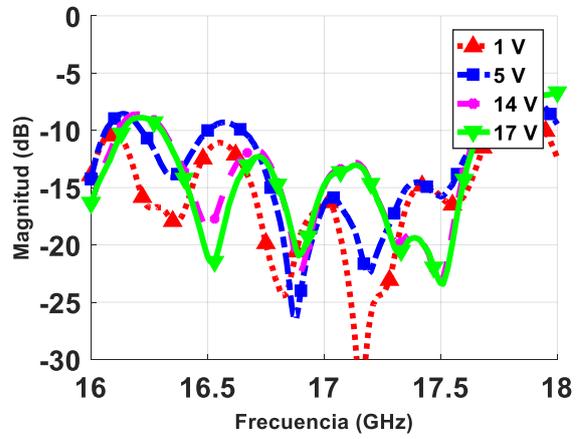


Figura C-72.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama A, rama 2 17 V.

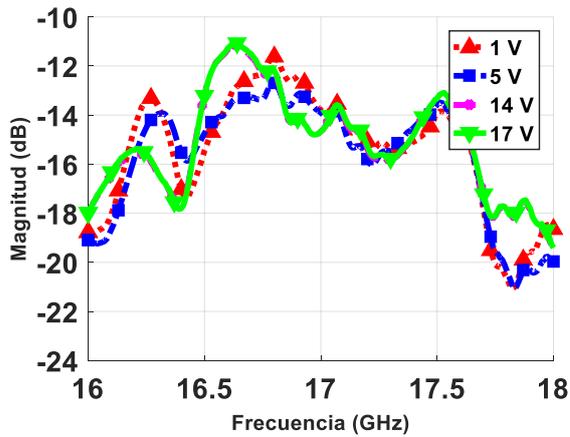


Figura C-73.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama A, rama 1 17 V.

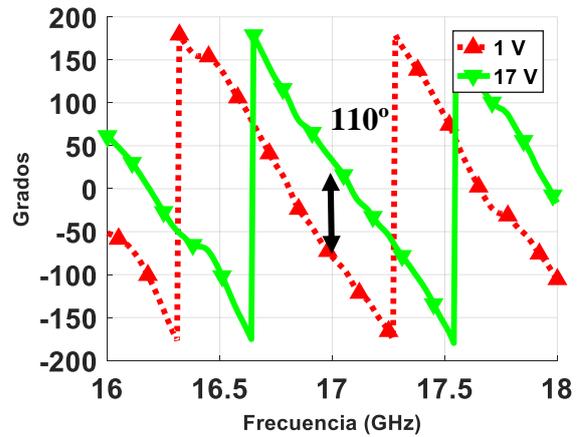


Figura C-74.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama A, rama 1 17 V.

## 1.6. Medidas rama B.

### 1.6.1. Rama 3 1 V.

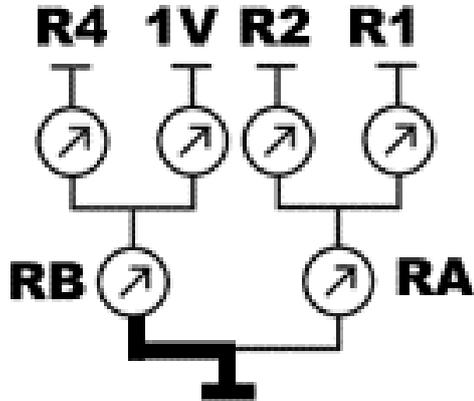


Figura C-75. Esquemática medida RB31.

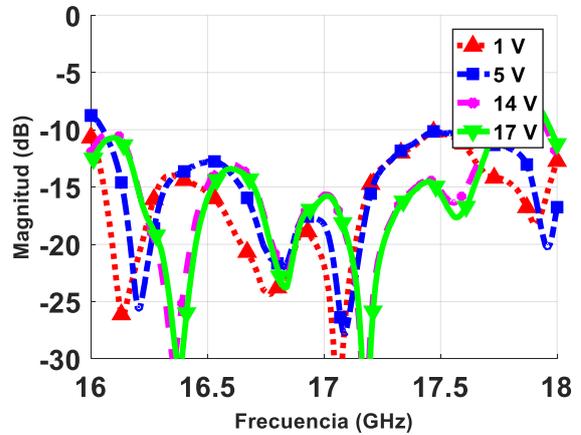


Figura C-76.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama B, rama 3 1 V.

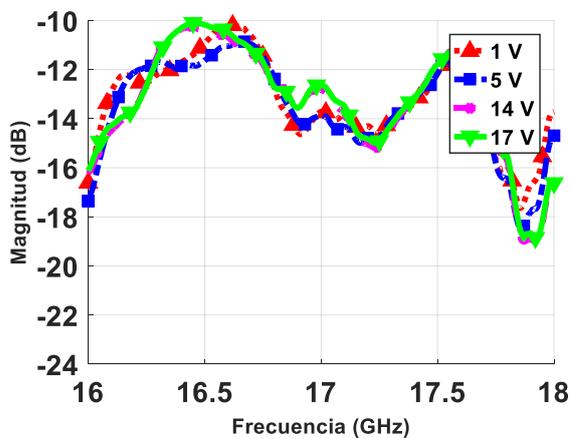


Figura C-77.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama B, rama 3 1 V.

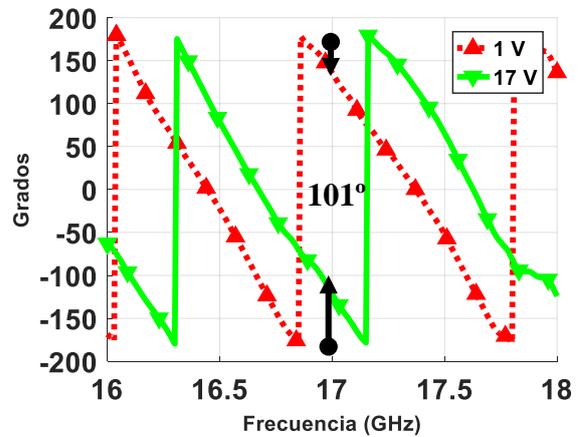


Figura C-78.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama B, rama 3 1 V.

### 1.6.2 Rama 3 8 V.

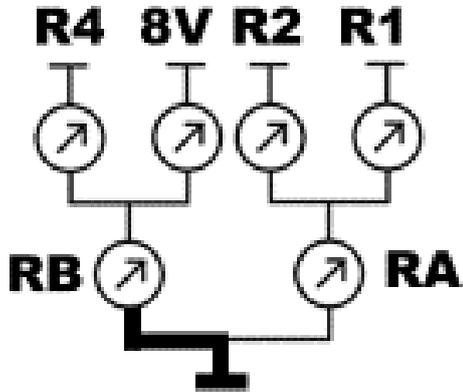


Figura C-79. Esquemática medida RB38.

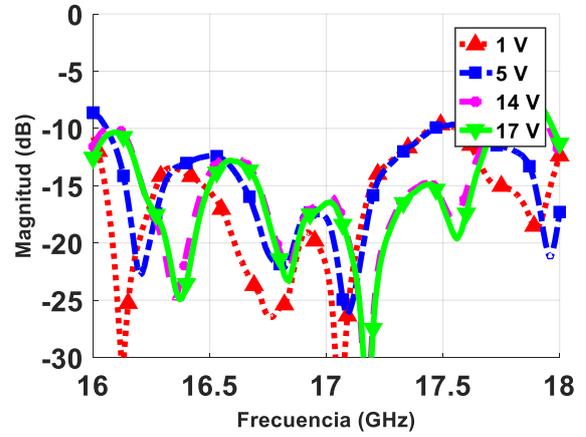


Figura C-80.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama B, rama 3 8 V.

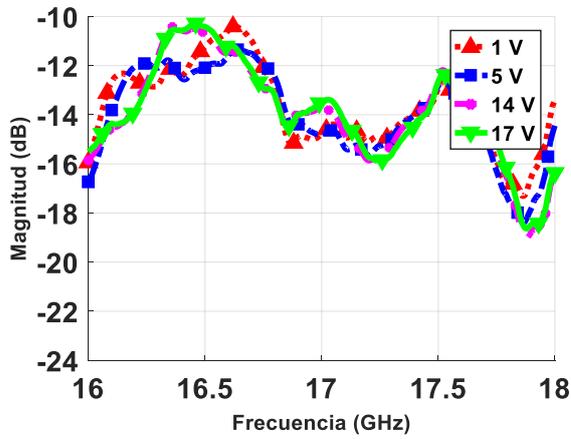


Figura C-81.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama B, rama 3 8 V.

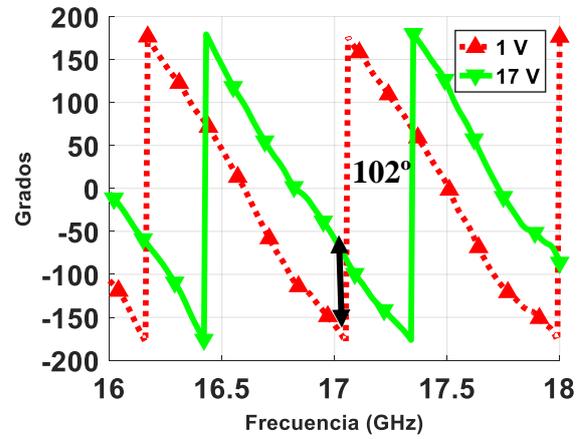


Figura C-82.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama B, rama 3 8 V.

### 1.6.3 Rama 3 17 V.

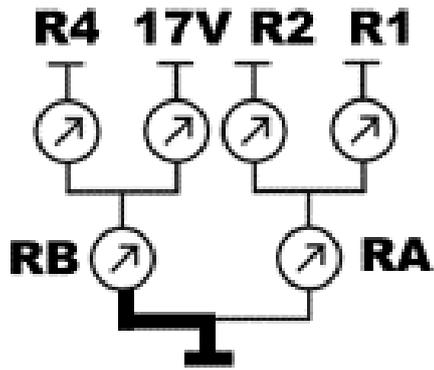


Figura C-83. Esquemática medida RB317.

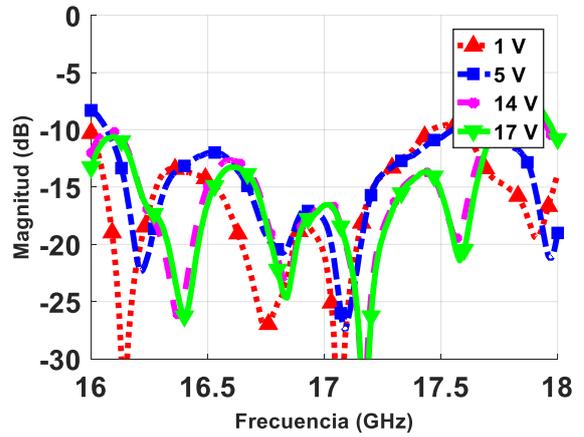


Figura C-84.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama B, rama 3 17 V.

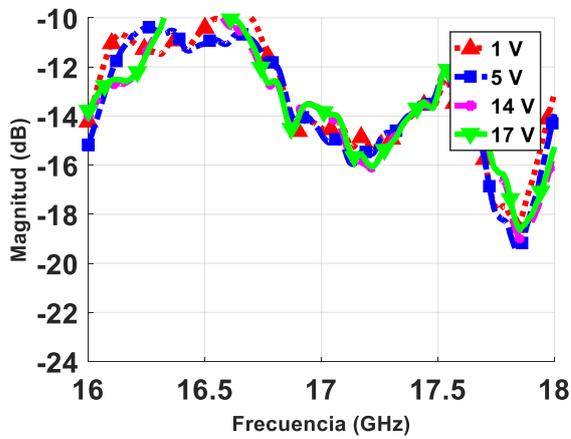


Figura C-85.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama B, rama 3 17 V.

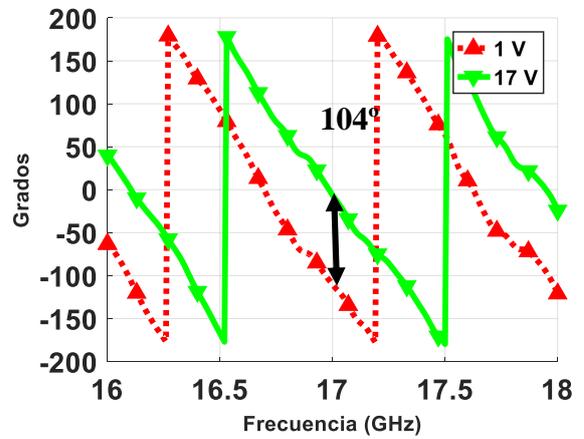


Figura C-86.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama B, rama 3 17 V.

### 1.6.4 Rama 4 1 V.

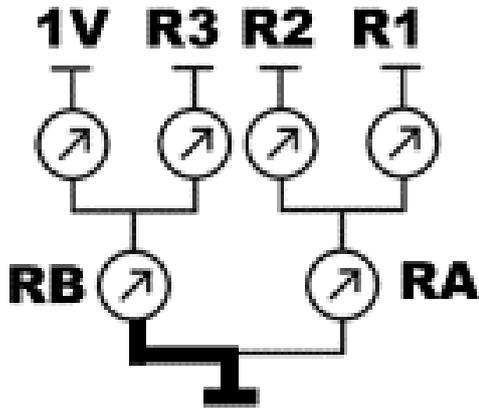


Figura C-87. Esquemática medida RB41.

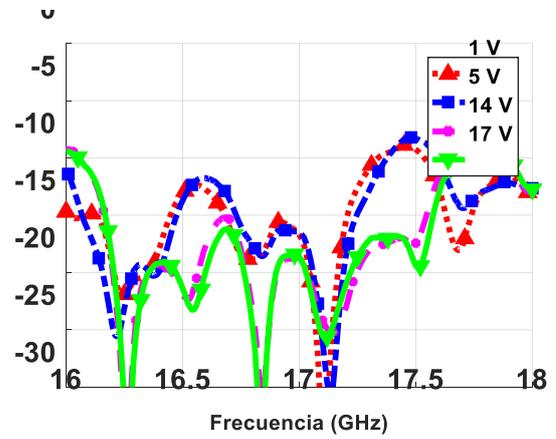


Figura C-88.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama B, rama 4 1 V.

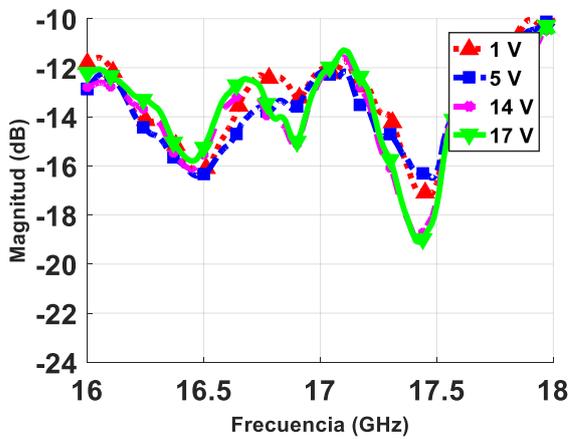


Figura C-89.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama B, rama 4 1 V.

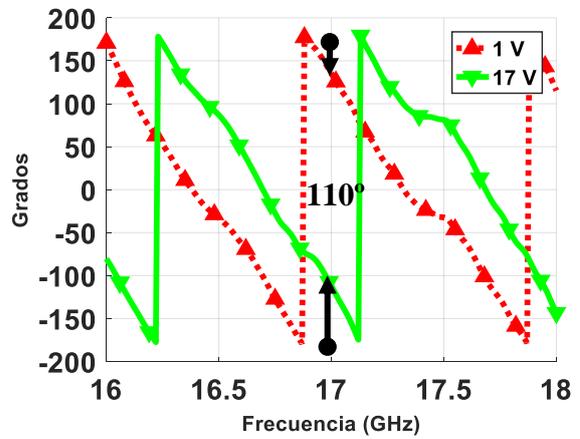


Figura C-90.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama B, rama 4 1 V.

1.6.5 Rama 4 8 V.

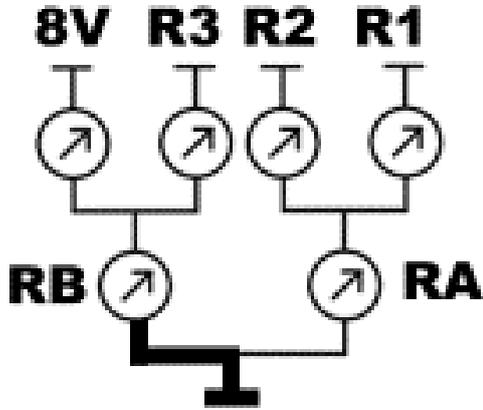


Figura C-91. Esquemática medida RB48.

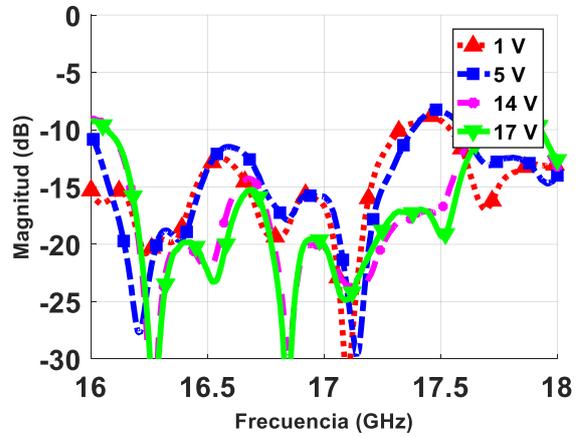


Figura C-92.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama B, rama 4 8 V.

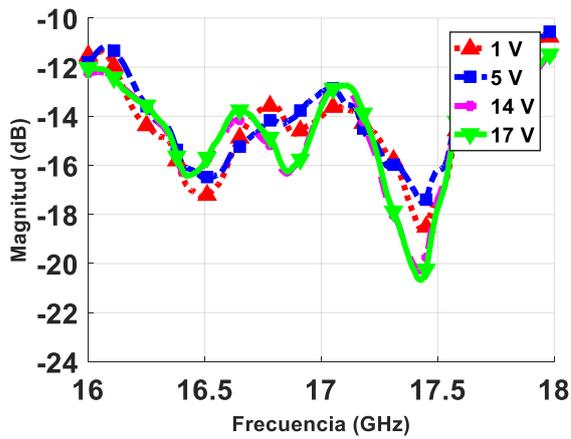


Figura C-93.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama B, rama 4 8 V.

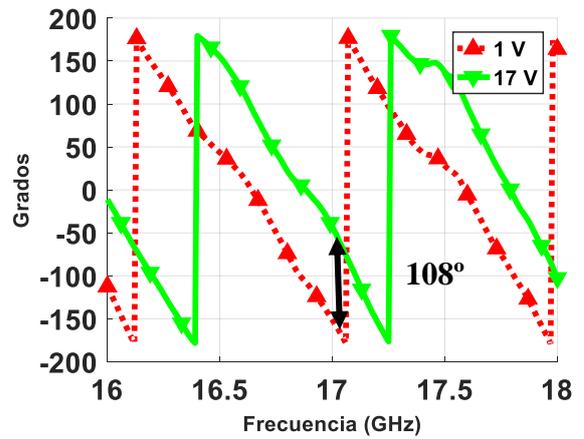


Figura C-94.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama B, rama 4 8 V.

1.6.6 Rama 4 17 V.

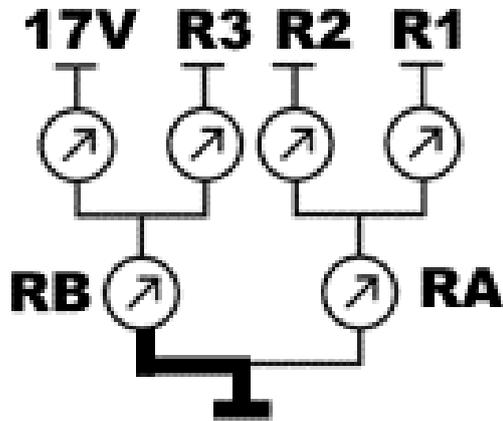


Figura C-95. Esquemática medida RB417.

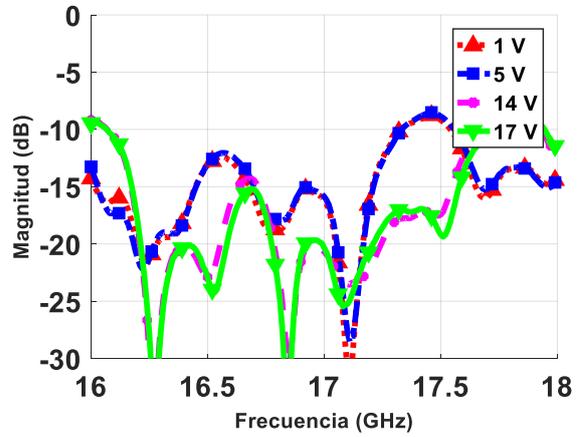


Figura C-96.  $S_{11}$  [Magnitud en dB] rama B, rama 4 17 V.

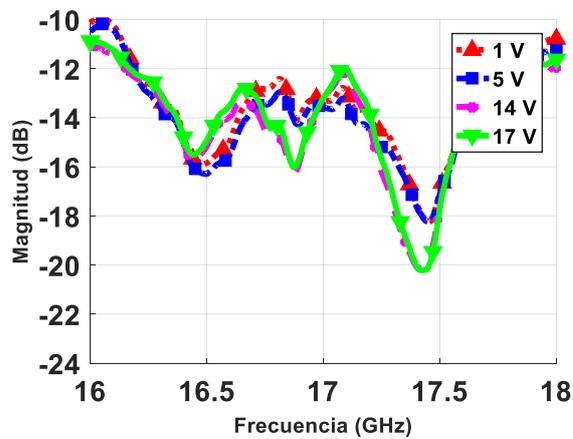


Figura C-97.  $S_{21}$  [Magnitud en dB] rama B, rama 4 17 V.

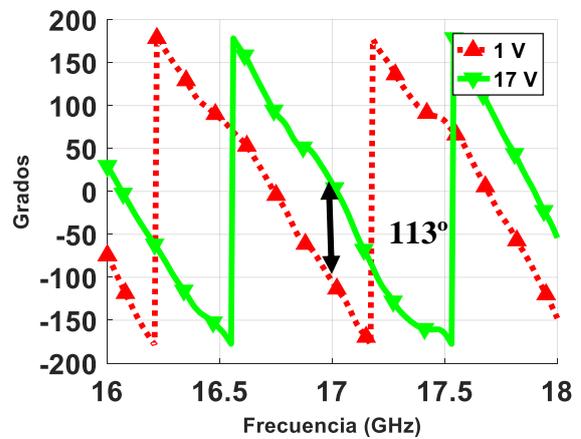


Figura C-98.  $S_{21}$  [Fase en grados] rama B, rama 4 17 V.



## **D Herramientas utilizadas**

### **1. CST (“*Computer Simulation Technology*”).**

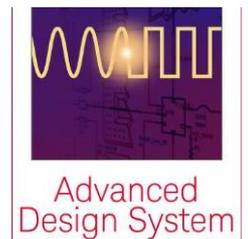
CST es un software que permite el diseño y simulación en 2D y 3D de antenas con sus respectivos campos electromagnéticos. Utilizado en este TFG para la sección del diseño.



**Figura D-1. Logotipo CST.**

### **2. ADS (“*Computer Simulation Technology*”).**

ADS es un software de automatización de diseño electrónico para aplicaciones de RF, microondas, electrónica de alta velocidad y electrónica de potencia.



**Figura D-2. Logotipo ADS.**

### **3. AutoCAD 2017.**

Autocad es un software de diseño de esquemáticos. Utilizado en este TFG para el diseño de los esquemáticos de los prototipos.



**Figura D-3.  
Logotipo AutoCAD**

### **4. MATLAB.**

Matlab es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio. Utilizado para el diseño teórico de este trabajo.



**Figura D-4. Logotipo  
MATLAB.**