



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS DE LA SENSIBILIDAD A LA TEMPERATURA
DE UN RESONADOR DE RADIO FRECUENCIA

Autor: Daniil Panasik

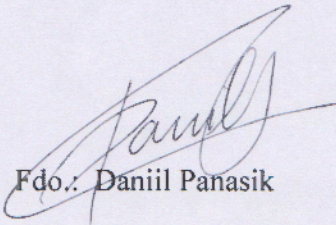
Director: Javier Matanza Domingo

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
**ANÁLISIS DE LA SENSIBILIDAD A LA TEMPERATURA DE UN RESONADOR
DE RADIO FRECUENCIA**

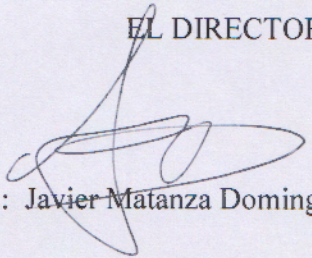
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2018/19 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.


Fdo.: Daniil Panasik

Fecha: 11/06/2019

Autorizada la entrega del proyecto
EL DIRECTOR DEL PROYECTO


Fdo.: Javier Matanza Domingo

Fecha: 11/06/2019

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Daniil Panasik

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra:

Análisis de la sensibilidad a la temperatura de un resonador de radio frecuencia
que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor CEDE a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar "marcas de agua" o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que

- d) pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- e) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

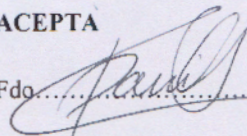
6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 11 de junio de 2019

ACEPTA

Fdo. 

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS DE LA SENSIBILIDAD A LA TEMPERATURA
DE UN RESONADOR DE RADIO FRECUENCIA

Autor: Daniil Panasik

Director: Javier Matanza Domingo

Madrid

Agradecimientos

A mi familia, a mi madre.

ANÁLISIS DE LA SENSIBILIDAD A LA TEMPERATURA DE UN RESONADOR DE RADIO FRECUENCIA

Autor: Daniil Panasik

Director: Javier Matanza Domingo

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Con el fin de poder medir temperatura en función de la frecuencia, se ha estudiado cómo varía la respuesta en frecuencia de un circuito resonador “*Split-ring*” (SRR) el cual contiene un termistor, buscando obtener variaciones en la frecuencia de resonancia o en la forma de la respuesta en frecuencia en sí. Se ha observado que la respuesta en frecuencia varía en función del valor nominal del termistor utilizado.

Palabras clave: respuesta en frecuencia, resonador, sensor temperatura

1. Introducción

La medida de temperatura se ha hecho imprescindible en todos los ámbitos, desde objetivos más básicos como la medida y control de la temperatura ambiente hasta la necesidad de identificar oscilaciones térmicas en elementos electrónicos para optimizar su funcionamiento.

El objetivo del proyecto es el análisis de la sensibilidad a la temperatura de un resonador de radio frecuencia (RF). La idea fundamental está basada en la excitación y posterior análisis de un circuito de radio frecuencia pasivo que está compuesto, entre otros componentes, de un termistor. Se quiere comprobar si el equivalente circuital del termistor cambia según la temperatura, con lo que el sensor, en el que se encuentra integrado el propio termistor, cambiaría su frecuencia de resonancia.

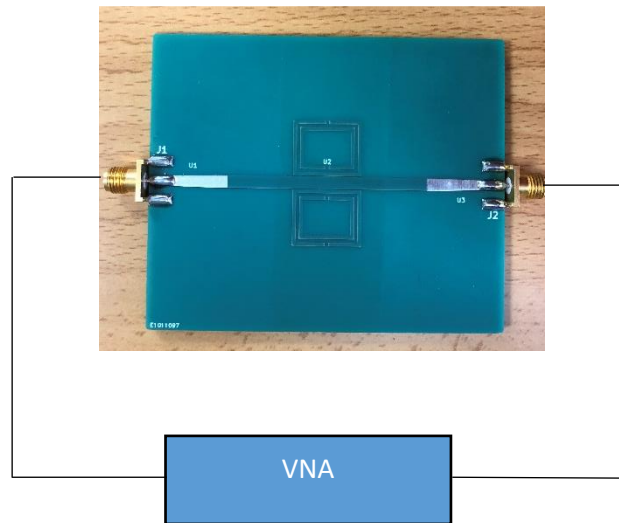
2. Definición del proyecto

El trabajo consiste en diferentes etapas. En la primera se determinarán las pérdidas del termistor en función de la temperatura y de la frecuencia dentro del rango de estudio, es decir, se caracterizarán los termistores. Las caracterizaciones se analizarán para ver qué termistores presentan mayores pérdidas y éstos serán utilizados en un software de simulación, CST Microwave Studio, con el objetivo de observar si, al incluir los distintos termistores a un resonador SRR ocurren variaciones en su respuesta en frecuencia que permitan hacer mediciones de temperatura.

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

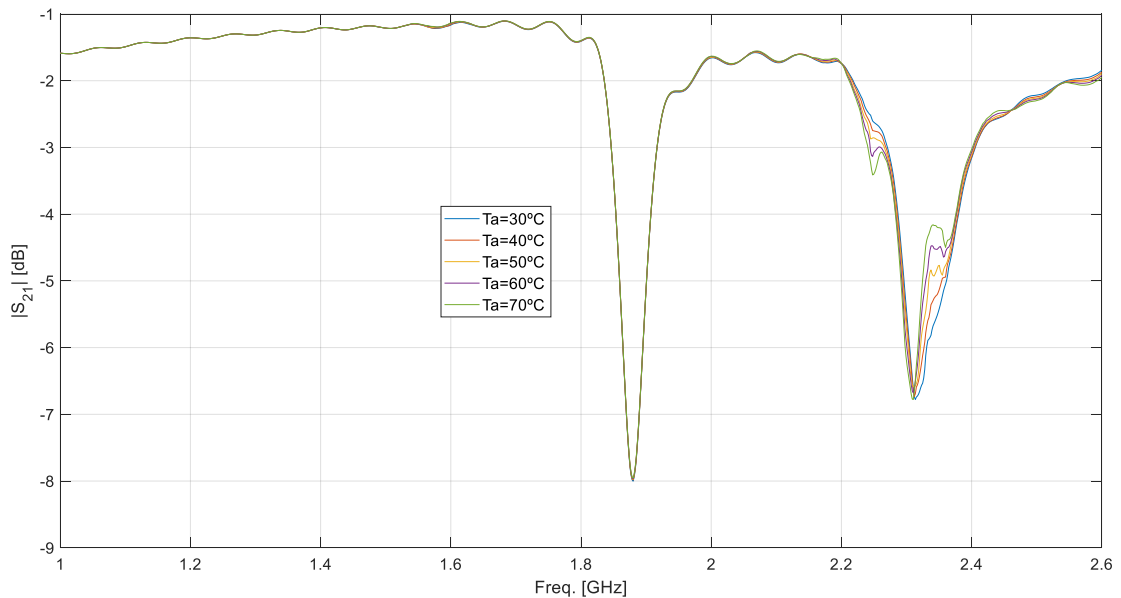
Un “*Split-Ring Resonator*” (SRR), [1], está formado por una línea de transmisión y de dos anillos abiertos a ambos lados de la línea, lo cual genera una frecuencia de resonancia.

El modelo final propuesto consiste es un SRR, el cual, en una abertura de uno de sus anillos internos, contiene un termistor, de modo que dicho anillo queda cortocircuitado. De esta manera, al ser el par de anillos distintos a cada lado de la línea, se generan dos frecuencias de resonancia distintas, siendo la generada por el anillo que contiene el termistor sensible a la temperatura. Esta sensibilidad depende de las características del termistor.



4. Resultados

El modelo final propuesto muestra que el ancho de banda de la resonancia generado por los termistores está directamente relacionado con las pérdidas que presenta el termistor por sí solo, es decir, un termistor con mayores pérdidas cortocircuitando un anillo interno del resonador generará una resonancia con mayor ancho de banda. Sin embargo, esto no garantiza que dicho ancho de banda sea sensible a la temperatura. La sensibilidad la otorga el valor nominal del termistor, a mayor valor óhmico, mayor es la reducción del ancho de banda al aumentar la temperatura.



5. Conclusiones

Se concluye que es posible medir variaciones de temperatura en el rango de 21-40 °C con el resonador del segundo enfoque con el termistor F360. Para ello sería necesario diseñar y calibrar un sistema el cual pueda detectar las variaciones en el ancho de banda de la resonancia.

6. Referencias

[1] G. Galindo-Romera, F. Javier Herraiz-Martínez, M. Gil, J. J. Martínez-Martínez and D. Segovia-Vargas, "Submersible Printed Split-Ring Resonator-Based Sensor for Thin-Film Detection and Permittivity Characterization," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 10, pp. 3587-3596, May15, 2016.
doi: 10.1109/JSEN.2016.2538086

TEMPERATURE SENSITIVITY ANALYSIS OF A RADIO FREQUENCY RESONATOR

Author: Daniil Panasik

Supervisor: Javier Matanza Domingo

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

In order to determine if temperature can be measured as a function of frequency, it has been researched how does Split Ring (SRR) resonator's frequency answer varies when it contains a thermistor. The goal was to obtain changes in the frequency of resonance or in the shape of the frequency answer. It has been observed that frequency answer varies depending on the ohmic value of the thermistor.

Keywords: frequency response, resonator, temperature sensor

1. Introduction

The measurement of temperature has become essential in all areas, starting in more basic objectives such as the measurement and control of the ambient temperature to the need to identify thermal oscillations in electronic elements to optimize their operation.

The objective of the project is the analysis of the temperature sensitivity of a radio frequency (RF) resonator. The fundamental idea is based on the excitation and subsequent analysis of a passive radio frequency circuit that is composed of a thermistor. The goal is to check if the equivalent circuit of the thermistor changes according to the temperature, so that the sensor, in which the thermistor itself is integrated, would change its resonance frequency.

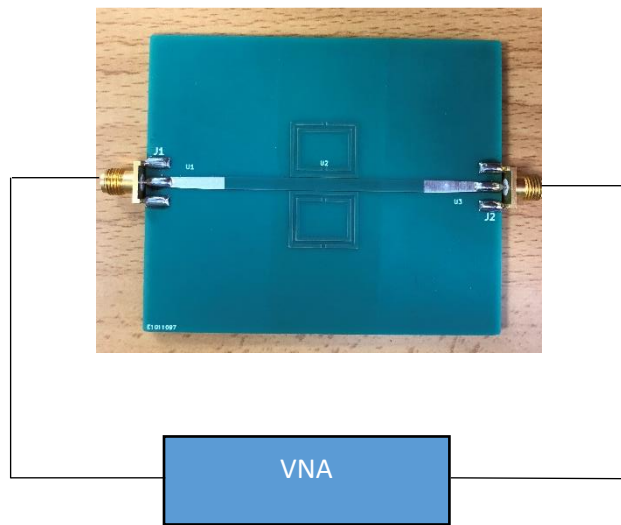
2. Project's scope

This work is made of different phases. In the first phase the characterization of the thermistors will be done in order to obtain their losses as a function of frequency and temperature. The characterizations that show higher losses will be used in a simulation software, CST Microwave Studio, to determine whether the frequency answer of an SRR resonator that contains a thermistor can be used to measure temperature.

3. System description

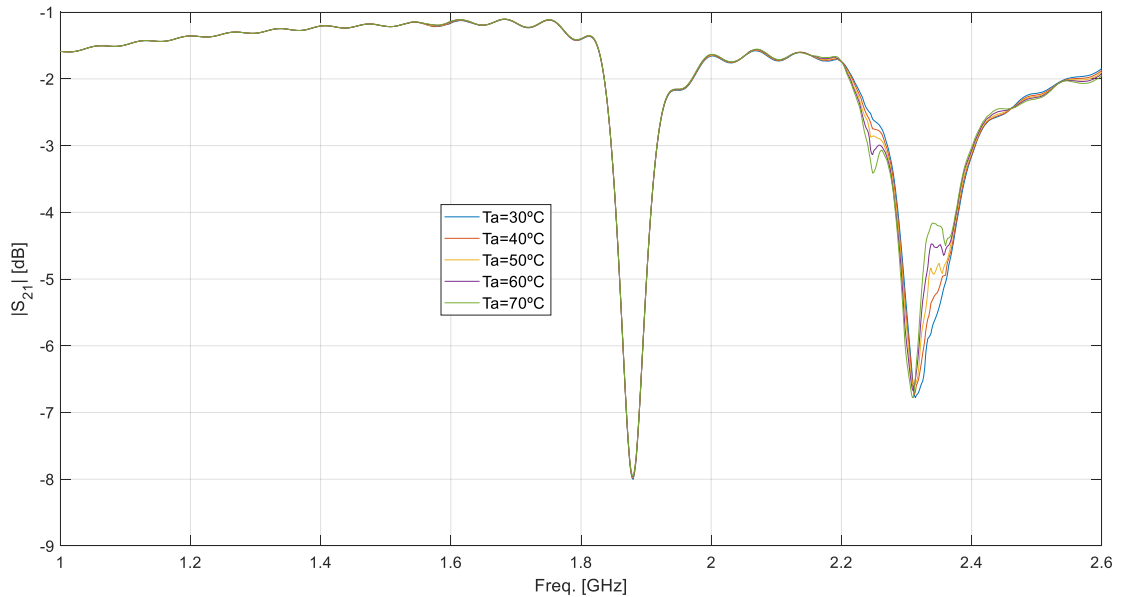
A "Split-Ring Resonator" (SRR), [1], is formed by a transmission line and two opened rings on both sides of the line, which generate a resonance frequency.

The final model proposed consists of an SRR, which, in the opening of one of its internal rings, contains a thermistor, so the ring is short-circuited. As the pair of rings are different on each side of the line, two different resonance frequencies will be generated. The one generated by the ring containing the thermistor will be sensitive to temperature changes. This sensitivity depends on the characteristics of the thermistor.



4. Results

The final model proposed shows that the resonance bandwidth that is generated with the thermistors is directly related to the losses that the thermistor presents itself. This means that a thermistor, with higher losses, short-circuiting an internal ring of the resonator will generate a greater bandwidth resonance. However, this does not guarantee that the bandwidth will be sensitive to temperature changes. The sensitivity depends on the nominal value of the thermistor. A higher ohmic value makes the resonance bandwidth more sensitive than a lower one. These bandwidths tends to decrease as the temperature increases.



5. Conclusion

The conclusion is that it is possible to measure the temperature variations in the range of 21-40 degrees using the resonator presented in the second approach with the thermistor F360. For this it would be necessary to adjust and calibrate a system so that variations in the width of the resonance band can be detected.

6. References

[1] G. Galindo-Romera, F. Javier Herraiz-Martínez, M. Gil, J. J. Martínez-Martínez and D. Segovia-Vargas, "Submersible Printed Split-Ring Resonator-Based Sensor for Thin-Film Detection and Permittivity Characterization," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 10, pp. 3587-3596, May15, 2016.
doi: 10.1109/JSEN.2016.2538086

Índice de la memoria

Contenido

<i>Índice de ilustraciones</i>	19
<i>Índice de tablas</i>	23
1. INTRODUCCIÓN	25
1.1. Estado del arte.....	26
1.2. Motivación.....	28
1.3. Objetivos.....	28
1.4. Metodología y plan de trabajo	29
1.5. Recursos a emplear	32
2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS	33
3. FASE DE CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS	34
3.1. Caracterización en el rango de 21-30°C	35
3.1.1. Termistor F360 (100K Ω)	35
3.1.2. Termistor F560 (47K Ω)	36
3.1.3. Termistor V2103 (10K Ω).....	37
3.1.4. Termistor V2332 (33K Ω).....	39
3.1.5. Termistor V2223 (22K Ω).....	41
3.2. Caracterización en el rango de 30-70°C	42
3.2.1. Termistor F360 (100K Ω)	42
3.2.2. Termistor F560 (47K Ω)	43
3.2.3. Termistor V2103 (10K Ω).....	43
4. FASE DE SIMULACIÓN.....	47
4.1. Integración del termistor en CST Microwave Studio	48
4.1.1. Línea de transmisión.....	48
4.1.2. Línea de transmisión con un termistor	51
4.1.2.1. Termistor F360.....	54
4.1.2.2. Termistor F560.....	55
4.1.2.3. Termistor V2103	57
4.1.2.4. Conclusiones	59
4.2. Simulación de un resonador SRR	60
4.2.1. Medio resonador SRR	60
4.2.2. Un resonador SRR completo	63
4.2.3. Abertura en un anillo del resonador SRRR	65

4.3.	Integración de los termistores en el resonador.....	70
4.3.1.	Termistor F360 (100K Ω)	70
4.3.1.1.	Análisis para el rango de temperaturas de 21-30°C	70
4.3.1.1.	Análisis para el rango de temperaturas de 30-70°C	71
4.3.2.	Termistor F560 (47K Ω)	72
4.3.2.1.	Análisis para el rango de temperaturas de 21-30°C	72
4.3.2.2.	Análisis para el rango de temperaturas de 30-70°C	73
4.3.3.	Termistor V2103 (10K Ω).....	74
4.3.3.1.	Análisis para el rango de temperaturas de 21-30°C	74
4.3.3.2.	Análisis para el rango de temperaturas de 30-70°C	75
4.3.4.	Conclusiones	76
4.4.	Segundo enfoque.....	76
4.4.1.	Termistor F360 (100K Ω)	81
4.4.1.1.	Análisis para el rango de temperaturas de 21-30°C	81
4.4.1.1.	Análisis para el rango de temperaturas de 30-70°C	83
4.4.2.	Termistor F560 (47K Ω)	85
4.4.2.1.	Análisis para el rango de temperaturas de 21-30°C	85
4.4.2.2.	Análisis para el rango de temperaturas de 30-70°C	87
4.4.3.	Termistor V2103 (10K Ω).....	88
4.4.3.1.	Análisis para el rango de temperaturas de 21-30°C	88
4.4.3.2.	Análisis para el rango de temperaturas de 30-70°C	90
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	92
6.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	94
7.	REFERENCIAS	95

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Representación del parámetro S_{21} del termistor B57250V2473F560 (47 K Ω) a 21 grados.....	29
Ilustración 2: Representación del parámetro S_{21} del termistor B57221V2103J060 (10 K Ω) a 21 grados.....	30
Ilustración 3. Placa con termistor para caracterización	34
Ilustración 4. Kit de calibración SOLT	34
Ilustración 5. Diagrama de conexión para la caracterización.....	35
Ilustración 6. Módulo de los parámetros S_{21} para el termistor F360 en el rango de 21-30°C.....	36
Ilustración 7. Módulo de los parámetros S_{21} para el termistor F560 en el rango de 21-30°C	36
Ilustración 8. Zoom al rango de frecuencias 1.96-2.12GHz de la Ilustración 7.....	37
Ilustración 9. Módulo de los parámetros S_{21} para el termistor V2103 en el rango de 21-30°C.....	38
Ilustración 10. Zoom al rango de frecuencias 1.6-2.4GHz de la Ilustración 9.....	38
Ilustración 11. Zoom al rango de frecuencias 2.4-2.6GHz de la Ilustración 9.....	39
Ilustración 12. Módulo de los parámetros S_{21} para el termistor V2332 en el rango de 21-30°C.....	40
Ilustración 13. Zoom al rango de frecuencias 1.5-1.8GHz de la Ilustración 12.....	40
Ilustración 14. Módulo de los parámetros S_{21} para el termistor V2223 en el rango de 21-30°C.....	41
Ilustración 15. Módulo de los parámetros S_{21} para el termistor F360 en el rango de 30-70°C.....	42
Ilustración 16. Módulo de los parámetros S_{21} para el termistor F560 en el rango de 30-70°C.....	43
Ilustración 17. Módulo de los parámetros S_{21} para el termistor V2103 en el rango de 30-70°C.....	44
Ilustración 18. Zoom al rango de frecuencias 1-1.5GHz de la Ilustración 17.....	44
Ilustración 19. Zoom al rango de frecuencias 1.5-2.3GHz de la Ilustración 17.....	45
Ilustración 20. Zoom al rango de frecuencias 2.3-2.6GHz de la Ilustración 17.....	45
Ilustración 21. Foto resonador SRR	47
Ilustración 22. Línea de transmisión, vista de perspectiva.....	48

Ilustración 23. Línea de transmisión, vista de planta.	49
Ilustración 24. Línea de transmisión, vista de alzado sin puerto de guía ondas.....	50
Ilustración 25. Línea de transmisión, vista de alzado con puerto de guía ondas.....	50
Ilustración 26. Línea de transmisión, vista de perfil.	50
Ilustración 27. Parámetros S_{21} de la línea de transmisión	51
Ilustración 28. Línea de transmisión con termistor, vista de perspectiva.....	52
Ilustración 29. Línea de transmisión con abertura, vista de planta	53
Ilustración 30. Módulo de los parámetros S_{21} para la línea de transmisión con el termistor F360 a 21°C.....	54
Ilustración 31. Caracterización de la línea de transmisión con el termistor F360, del termistor F360 y la diferencia de sus S_{21} a 21°C	55
Ilustración 32. Módulo de los parámetros S_{21} para la línea de transmisión con el termistor F560 a 21°C.....	56
Ilustración 33. Caracterización de la línea de transmisión con el termistor F560, del termistor F560 y la diferencia de sus S_{21} a 21°C	57
Ilustración 34. Módulo de los parámetros S_{21} para la línea de transmisión con el termistor V2103 a 21°C.....	57
Ilustración 35. Caracterización de la línea de transmisión con el termistor V2103, del termistor V2103 y la diferencia de sus S_{21} a 21°C	58
Ilustración 36. Medio resonador SRR, vista de perspectiva.....	60
Ilustración 37. Medio resonador SRR, vista de planta	61
Ilustración 38. Medio resonador SRR, vista de alzado.....	62
Ilustración 39. Parámetros S_{21} de medio resonador SRR.....	62
Ilustración 40. Resonador SRR, vista de perspectiva.....	63
Ilustración 41. Resonador SRR completo, vista de planta	64
Ilustración 42. Resonador SRR completo, vista de alzado.....	64
Ilustración 43. Módulo del parámetro S_{21} del resonador SRR	65
Ilustración 44. Resonador SRR con abertura en un anillo interno, vista de perspectiva.....	66
Ilustración 45. Resonador SRR con una abertura un el anillo interno, vista de planta ..	66
Ilustración 46. Módulo del parámetro S_{21} del resonador SRR con una abertura en un anillo interno.....	68

Ilustración 47. Módulo del parámetro S_{21} del resonador SRR con una abertura en un anillo interno después de redimensionar el resonador	69
Ilustración 48. Módulo de los parámetros S_{21} para el resonador con el termistor F360 en la abertura. Rango de 21-30°C.....	70
Ilustración 49. Módulo de los parámetros S_{21} para el resonador con el termistor F360 en la abertura. Rango de 30-70°C.....	71
Ilustración 50. Módulo de los parámetros S_{21} para el resonador con el termistor F560 en la abertura. Rango de 21-30°C.....	72
Ilustración 51. Módulo de los parámetros S_{21} para el resonador con el termistor F560 en la abertura. Rango de 30-70°C.....	73
Ilustración 52. Módulo de los parámetros S_{21} para el resonador con el termistor V2103 en la abertura. Rango de 21-30°C.....	74
Ilustración 53. Módulo de los parámetros S_{21} para el resonador con el termistor V2103 en la abertura. Rango de 30-70°C.....	75
Ilustración 54. Resonador SRR con puerto de guía ondas para cerrar un anillo interno, vista de perspectiva.....	77
Ilustración 55. Resonador SRR con puerto de guía ondas para cerrar un anillo interno, vista de alzado	77
Ilustración 56. Módulo de los parámetros S_{21} para el resonador SRR con puertos de guía ondas para cerrar un anillo interno	79
Ilustración 57. Módulo de los parámetros S_{21} del resonador SRR con puertos de guía ondas para cerrar un anillo interno, después de redimensionar el resonador.	80
Ilustración 58. Módulo de los parámetros S_{21} para el resonador SRR con el termistor F360 cerrando un anillo interno. Rango de 21-30°C	81
Ilustración 59. Zoom al rango de frecuencias 2.2-2.5GHz de la Ilustración 58.....	82
Ilustración 60. Módulo de los parámetros S_{21} para el resonador SRR con el termistor F360 cerrando un anillo interno. Rango de 30-70°C	83
Ilustración 61. Zoom al rango de frecuencias 2.2-2.5GHz de la Ilustración 60.....	84
Ilustración 62. Módulo de los parámetros S_{21} para el resonador SRR con el termistor F560 cerrando un anillo interno. Rango de 21-30°C	85
Ilustración 63. Zoom al rango de frecuencias 2.2-2.5GHz de la Ilustración 62.....	86

Ilustración 64. Módulo de los parámetros S_{21} para el resonador SRR con el termistor F560 cerrando un anillo interno. Rango de 30-70°C	87
Ilustración 65. Zoom al rango de frecuencias 2.2-2.5GHz de la Ilustración 64.....	88
Ilustración 66. Módulo de los parámetros S_{21} para el resonador SRR con el termistor V2103 cerrando un anillo interno. Rango de 21-30°C	89
Ilustración 67. Zoom al rango de frecuencias 2.2-2.5GHz de la Ilustración 66.....	89
Ilustración 68. Módulo de los parámetros S_{21} para el resonador SRR con el termistor V2103 cerrando un anillo interno. Rango de 30-70°C	90
Ilustración 69. Zoom al rango de frecuencias 2.2-2.5GHz de la Ilustración 68.....	91

Índice de tablas

Tabla 1: Cronograma del proyecto	31
Tabla 2: Termistores a analizar	32
Tabla 3. Especificaciones Línea de Transmisión	49
Tabla 4. Especificaciones Línea de transmisión con abertura.....	52
Tabla 5. Especificaciones de medio resonador SRR	61
Tabla 6. Caracterización de la respuesta en frecuencia de medio resonador SRR	62
Tabla 7. Caracterización de la respuesta en frecuencia del resonador SRR.....	65
Tabla 8. Especificaciones del resonador SRR completo con abertura en un anillo interno	67
Tabla 9. Caracterización de la respuesta en frecuencia del resonador SRR con abertura en un anillo interno	68
Tabla 10. Especificaciones para disminuir la frecuencia de resonancia del resonador SRR con una abertura en un anillo interno base	68
Tabla 11. Caracterización de la respuesta en frecuencia del resonador SRR con abertura en un anillo interno después de redimensionar el resonador	69
Tabla 12. Caracterización de las frecuencias y ancho de banda de 3 dB para el resonador SRR con el termistor F360 en la abertura del anillo interno para el rango de temperaturas 21-30°C.....	71
Tabla 13. Caracterización de las frecuencias y ancho de banda de 3 dB para el resonador SRR con el termistor F360 en la abertura del anillo interno para el rango de temperaturas 30-70°C.....	72
Tabla 14. Caracterización de las frecuencias y ancho de banda de 3 dB para el resonador SRR con el termistor V2103 en la abertura del anillo interno para el rango de temperaturas 21-30°C.....	73
Tabla 15. Caracterización de las frecuencias y ancho de banda de 3 dB para el resonador SRR con el termistor F560 en la abertura del anillo interno para el rango de temperaturas 30-70°C.....	74
Tabla 16. Caracterización de las frecuencias y ancho de banda de 3 dB para el resonador SRR con el termistor F560 en la abertura del anillo interno para el rango de temperaturas 21-30°C.....	75

Tabla 17. Caracterización de las frecuencias y ancho de banda de 3 dB para el resonador SRR con el termistor V2103 en la abertura del anillo interno para el rango de temperaturas 30-70°C.....	76
Tabla 18. Especificaciones del resonador SRR con puertos de guía ondas para cerrar un anillo interno.....	78
Tabla 19. Caracterización de la respuesta en frecuencia del resonador SRR con puertos de guía ondas para cerrar un anillo interno.....	79
Tabla 20. Especificaciones para disminuir la frecuencia de resonancia del resonador SRR puertos de guía ondas para cerrar un anillo interno.....	80
Tabla 21. Caracterización de la respuesta en frecuencia del resonador SRR con puertos de guía ondas para cerrar un anillo interno, después de redimensionar el resonador.....	80
Tabla 22. Caracterización de las frecuencias y ancho de banda de 3 dB para el resonador SRR con el termistor F560 en la abertura del anillo interno para el rango de temperaturas 21-30°C.....	82
Tabla 23. Caracterización de las frecuencias y ancho de banda de 3 dB para el resonador SRR con el termistor F560 en la abertura del anillo interno para el rango de temperaturas 30-70°C.....	84
Tabla 24. Caracterización de las frecuencias y ancho de banda de 3 dB para el resonador SRR con el termistor F560 en la abertura del anillo interno para el rango de temperaturas 21-30°C.....	86
Tabla 25. Caracterización de las frecuencias y ancho de banda de 3 dB para el resonador SRR con el termistor F560 en la abertura del anillo interno para el rango de temperaturas 30-70°C.....	88
Tabla 26. Caracterización de las frecuencias y ancho de banda de 3 dB para el resonador SRR con el termistor F560 en la abertura del anillo interno para el rango de temperaturas 21-30°C.....	90
Tabla 27. Caracterización de las frecuencias y ancho de banda de 3 dB para el resonador SRR con el termistor V2103 en la abertura del anillo interno para el rango de temperaturas 30-70°C.....	91

1. INTRODUCCIÓN

La medida de temperatura se ha hecho imprescindible en todos los ámbitos, desde objetivos más básicos como la medida y control de la temperatura ambiente, pasando por la detección de variaciones en amplios rangos de temperatura en el sector industrial, por la monitorización de pequeños cambios decimales en la temperatura de un paciente, incluso en algunos procesos de fabricación, hasta la necesidad de identificar oscilaciones térmicas en elementos electrónicos para optimizar su funcionamiento.

El objetivo del proyecto es desarrollar un equipo de detección de temperatura mediante un sistema de radio frecuencia (RF). La idea fundamental está basada en la excitación y posterior análisis de un circuito de radio frecuencia pasivo que está compuesto, entre otros componentes, de un termistor. El equivalente circuital del termistor cambiará según la temperatura, y esto hará que el sensor, en el que se encuentra integrado el propio termistor, cambie su frecuencia de resonancia.

Se busca realizar medidas de temperatura con un sensor pasivo lo cual permite que no necesite alimentación continua sino únicamente cuando se desee hacer la medida. La precisión y el margen de temperaturas de la medida variará en función del termistor escogidas y de su comportamiento y sensibilidad a diferentes temperaturas. De este modo se podría emplear dicho sensor en el sector industrial para márgenes de temperaturas amplios donde la precisión decimal puede no ser tan relevante, o incluso en el ámbito de la medicina, empleándolo para medir la temperatura de un paciente si se consigue tal sensibilidad a pequeñas variaciones. Para ambos casos sería una gran aportación el hecho de no tener que alimentar el sensor constantemente y que la medida se hiciese de forma sencilla y rápida.

Este documento tiene la siguiente organización: en el Capítulo 2 se presenta la definición de tecnologías a utilizar, en el Capítulo 3 se expone la fase de caracterización de los termistores en función de la temperatura y la frecuencia, y su análisis; el Capítulo 4 muestra la fase de simulación del resonador RF con termistores, en él se detallan los pasos de cómo realizar el resonador y se analizan las respuestas en frecuencia de los distintos modelos propuestos. En el Capítulo 5 se presenta un análisis de resultados donde se recoge lo más destacado, en el Capítulo 6 se muestran las conclusiones y posibles trabajos futuros. Por último, el Capítulo 7 contiene las referencias.

1.1. Estado del arte

Distintos sensores se han propuesto con diversos fines para medir la temperatura. Desde [1], donde, sabiendo que las variaciones de temperatura afectan al rendimiento y fiabilidad de circuitos integrados de RF, se elabora un regulador térmico el cual mediante un sensor térmico analógico integrado obtiene la temperatura. Ésta es convertida al espectro de la frecuencia y posteriormente a tensión. Dicha tensión es utilizada para compensar los errores dependientes de temperatura en los circuitos que trabajan a altas frecuencias. Siguiendo esta línea de optimización, [2] propone un sensor cuya salida sea proporcional a variaciones térmicas en dispositivos electrónicos. Este sensor está basado en el hecho que hay variaciones de los semiconductores con la temperatura. Mediante la medida del voltaje límite de transistores MOSFET el chip obtiene la temperatura. Finalmente, dicho valor límite se introduce a un oscilador controlado por tensión para convertirlo en un tono directamente proporcional a la temperatura. Similar a [2] son [3] y [4]. En [3], la medida de las variaciones de temperatura generadas por circuitos RF se realiza mediante un MOSFET, el cual está conectado a un filtro paso banda que amplifica las bajas frecuencias de dicha señal de temperatura. [4] convierte la temperatura a frecuencia mediante circuitos MOSFET también para sensores de temperatura inteligentes LSI.

Otras técnicas para la medida de temperatura del entorno podrían ser las planteadas por [5]. [5] propone un sensor que consiste en un integrador bidireccional de corriente dirigido un comparador de voltajes sensible a la temperatura (VWC) donde el resultado, la salida, sería un tono de una frecuencia determinada. Un proyecto similar, en cuanto a la idea de cómo obtener la medida de la temperatura, al que se va a desarrollar sería [6], donde se emplean técnicas pasivas de retrodispersión para leer el valor medido de forma inalámbrica. El sensor codifica y transmite el valor de la temperatura ambiente en la componente espectral. Más concretamente, la frecuencia de resonancia del resonador dieléctrico (DR) que proponen viene determinada por la temperatura.

Un sensor de temperatura que integre circuitos de RF como base para obtener la medida sería [7]. Se trata de un sensor de temperatura pasivo e inalámbrico el cual consta de un sensor central el cual integra un circuito RF, se encarga de hacer el procesado digital y de acoplar el sensor de temperatura externo. Para alimentar el sensor de temperatura y para comunicar de forma pasiva la información se emplea un circuito RF.

Un diseño original para encontrar la frecuencia central y la banda de 3dB de un amplificador de potencia de 60GHz sería el propuesto en [8], que lo consigue mediante pequeñas variaciones de temperatura.

Un diseño más complejo al planteado en este trabajo sería [9], que presenta un sensor de temperatura pasivo que trabaja a altas temperaturas. Para que el sensor soporte altas temperaturas éste es introducido

en un material que las resiste. Basado en circuitos resonantes LC con inductancia fija y capacidad variable con la temperatura, consigue detectar cambios térmicos con variaciones de frecuencia.

Importante destacar que, salvo mención contraria, la mayoría de los sensores de temperatura presentados requieren una alimentación constante. En el proyecto que se va a realizar se diseñará un sensor que no requiere alimentación alguna lo que reduce su coste y amplía su versatilidad.

1.2. Motivación

La elaboración de un sensor de temperatura pasivo que requiera un simple análisis de la respuesta en frecuencia del circuito de RF para obtener el valor de la medida implica sencillez y facilidad a la hora de medir y leer el valor. Dicha sencillez radica en que la caracterización del circuito RF dependerá de un conjunto de termistores lo cual contrasta con los proyectos presentados anteriormente. La facilidad en la lectura del valor se basa en la necesidad de un interfaz inteligente calibrado que, conociendo la respuesta en frecuencia del circuito para cada temperatura, sepa determinar correctamente la medida haciendo un barrido en el espectro de las frecuencias. A su vez, las posibilidades mejorar el proyecto con distintos materiales sensibles a la temperatura, sobre los que montar el sensor, y de realizarlo a una escala más pequeña le otorgan la característica de proyecto en evolución constante.

1.3. Objetivos

El objetivo del proyecto es la caracterización en función de la temperatura y la frecuencia de los distintos termistores. Éstos serán analizados y los más idóneos serán empleados para la simulación por software del sensor RF para determinar si existen variaciones en la respuesta en frecuencia del mismo al variar la temperatura.

1.4. Metodología y plan de trabajo

El proyecto consta de un número determinado de etapas: fase de caracterización de los distintos termistores en función de la temperatura y la frecuencia, fase de análisis y selección del termistor más favorable, fase de simulación con software informático del sensor RF, fase de análisis de la variabilidad del sensor con distintos termistores del/de los modelo/s escogido/s para la fase de simulación y una última fase en la que se dedicará tiempo para redactar la memoria final a la vez que se realizan las otras fases.

La primera fase requiere soldar los termistores a las distintas placas PCB para poder ver cuáles son sus pérdidas en función de la temperatura y la frecuencia. Para poder hacer dicha caracterización se utilizará un analizador vectorial de redes (VNA). Para obtener las correctas mediciones se calibra el VNA con un kit calibración SOLT (Short, Open, Load, Through) [10] desarrollado por la escuela para este proyecto en cuestión.

Para la fase de análisis la herramienta de apoyo será Matlab donde se representará el comportamiento de los termistores en función de la temperatura y la frecuencia. Se determinará del comportamiento de los termistores cuáles tienen una mayor variación de potencia. Se obtendrán representaciones como Ilustración 1 e Ilustración 2.

Por ejemplo, la Ilustración 1 representa el parámetro S_{21} , que, al tratarse de una resistencia, equivale a la potencia que disipa. En este caso es un Termistor 0402, cuyo código de fabricante es B57250V2473F560, evaluado para 21 grados. Dicho termistor tiene una resistencia nominal de 47 K Ω .

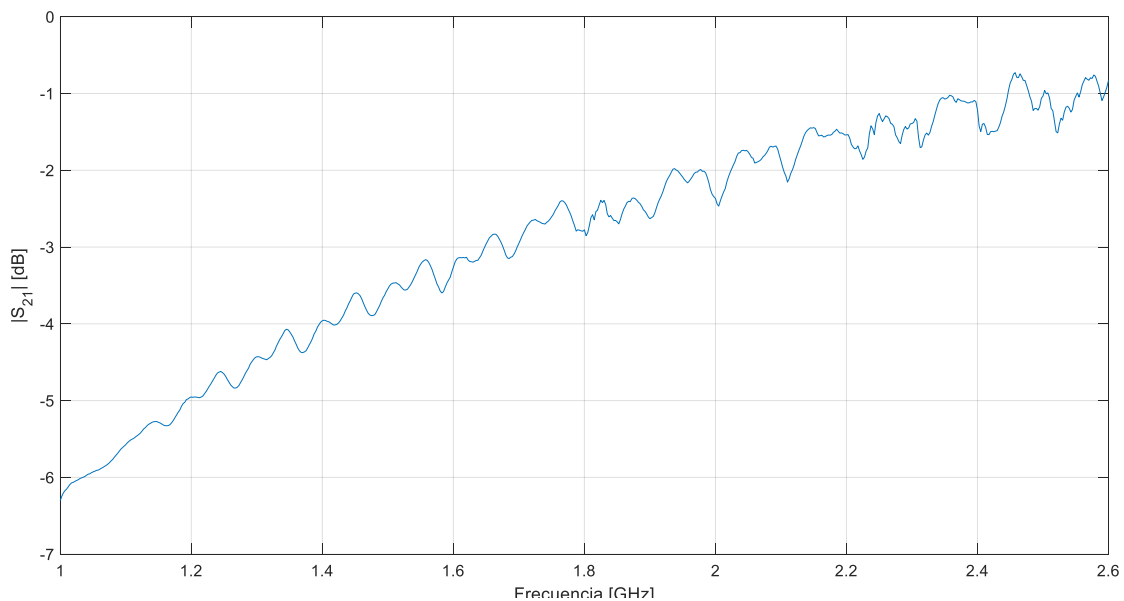


Ilustración 1: Representación del parámetro S_{21} del termistor B57250V2473F560 (47 K Ω) a 21 grados

Ilustración 2 representa el parámetro S_{21} de otro termistor de la familia Termistor 0402. El código del fabricante es B57221V2103J060, evaluado para 21 grados. Dicho termistor tiene una resistencia nominal de 10 K Ω .

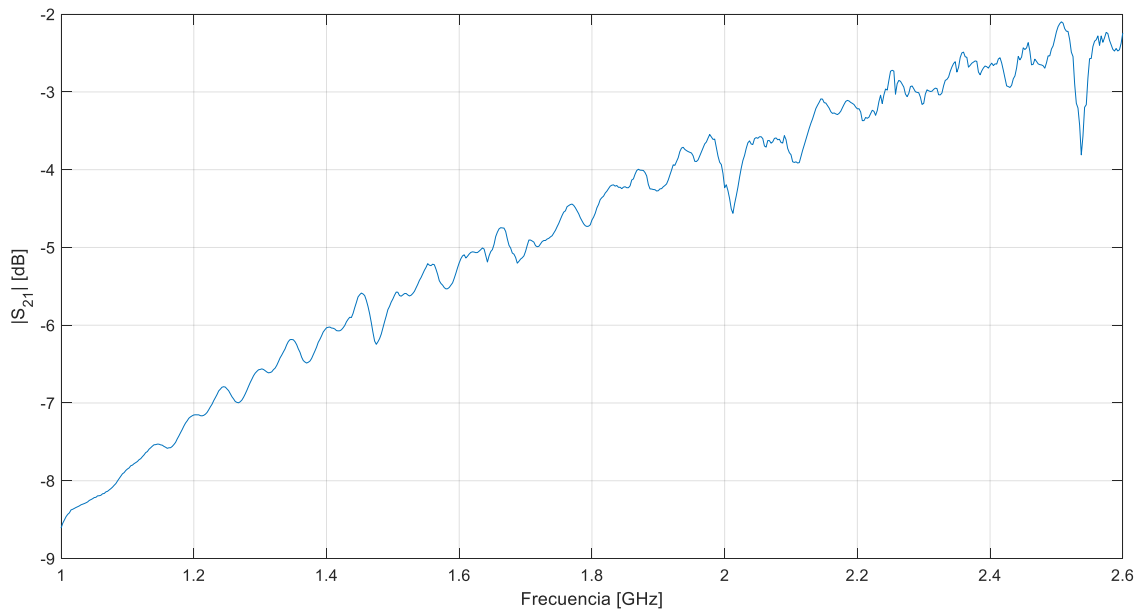


Ilustración 2: Representación del parámetro S_{21} del termistor B57221V2103J060 (10 K Ω) a 21 grados

La diferencia fundamental entre Ilustración 1 e Ilustración 2 radica en la potencia disipada, como se puede apreciar en los valores de los ejes verticales.

Para la siguiente fase, se empleará un software informático, CST Microwave Studio, para hacer la simulación del circuito RF, formado por el elemento resonador y el termistor. En dicha etapa se determinará empíricamente la posición más favorable para colocar el termistor para dotar de mayor sensibilidad a la temperatura al circuito.

Finalmente se hará un estudio de variabilidad que consistirá en rehacer las simulaciones utilizando otras unidades de los termistores empleados en la fase previa.

La Tabla 1 presenta el cronograma del proyecto.

Fases/meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Caracterización de termistores						
Análisis						
Simulación informática del sensor RF						
Redacción de memoria						

Tabla 1: Cronograma del proyecto

1.5. Recursos a emplear

-Resistencias a analizar las correspondientes a la Tabla 2.

Componente	Codigo fabricante	Resistencia
Termistor 0402	B57221V2332J060	33K Ω
Termistor 0402	B57221V2103J060	10K Ω
Termistor 0402	B57261V2223J060	22K Ω
Termistor 0402	B57250V2473F560	47K Ω
Termistor 0402	B57250V2104F360	100K Ω

Tabla 2: Termistores a analizar

- Anritsu MS46122B, 8GHz Vector Network Analyzer será el VNA utilizado para caracterizar los termistores.

-Placas PCB, elaboradas por la escuela, donde soldar los termistores para poder conectarlas a un VNA para poder hacer la caracterización.

-Kit de calibración SOLT, elaborado por la escuela, para calibrar el VNA.

-Horno ESPEC Temperature Chamber SU-220 para someter a distintas temperaturas los termistores.

-Termómetro digital.

-Matlab como software para la representación de las caracterizaciones para poder hacer el análisis.

-Software informático CST Microwave Studio para la simulación del sensor RF con el fin de determinar la mejor posición para el termistor dentro del circuito resonante.

2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

En este trabajo se va a utilizar un “*Split-ring Resonator*” (SRR) rectangular, como el mostrado en la Ilustración 21. La estructura contiene una línea de transmisión y, a ambos lados de la misma, dos anillos rectangulares con una pequeña abertura en lados opuestos para cada anillo. Aplicando un campo magnético perpendicular a los anillos se inducen corrientes en los mismos. Esta corriente recorre ambos anillos debido a la capacidad creada entre ambos, pudiendo obtenerse un equivalente circuital de un resonador. El diseño y funcionamiento del resonador se apoya en el trabajo realizado en [11].

3. FASE DE CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS

En esta primera fase se va a caracterizar los termistores disponibles, Tabla 2., es decir, obtener su respuesta en frecuencia en función de la temperatura.

Primero se procede a soldar los termistores a las placas PCB. El diseño de dichas placas está realizado de tal forma que la caracterización incluya las pérdidas debidas a los conectores y a las líneas de transmisión que van hasta el termistor. La Ilustración 3 muestra la placa con el termistor.

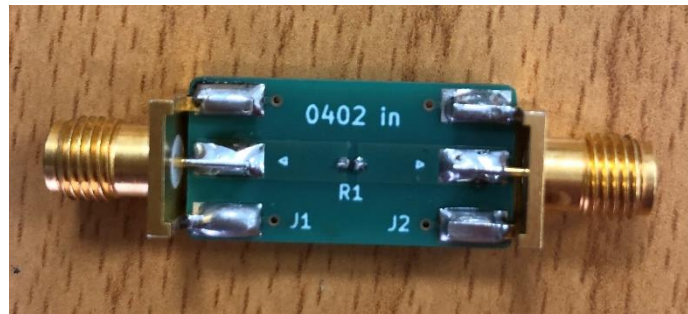


Ilustración 3. Placa con termistor para caracterización

Para iniciar las mediciones con el VNA primero hay que hacer una calibración. Dicha calibración se hace un con kit SOLT diseñado por la escuela [10], que consiste en que el VNA sepa reconocer una resistencia de 0Ω (Short), una resistencia infinita (Open), una carga de 50Ω (Load) y una conexión entre sus dos puertos para simular transmisión (Through). La Ilustración 4 muestra el kit de calibración en cuestión.

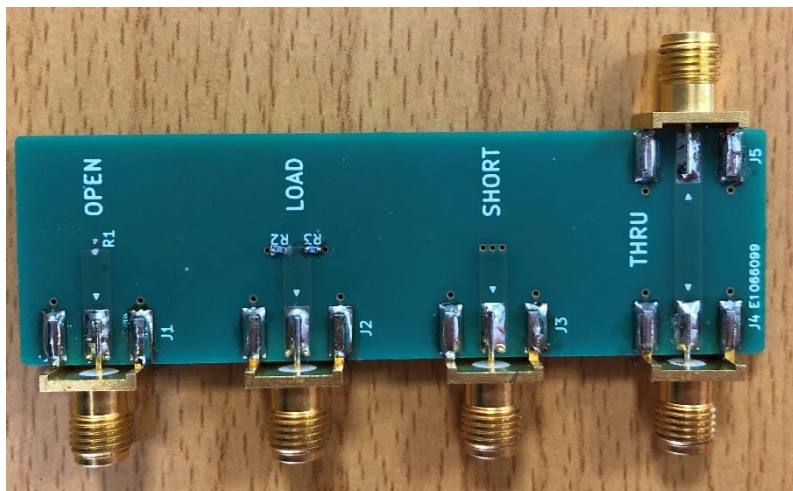


Ilustración 4. Kit de calibración SOLT

Una vez realizada la calibración se procederá a la caracterización utilizando el Horno *ESPEC Temperature Chamber SU-220* para someter los termistores a las distintas temperaturas de estudio. Las temperaturas a las cuales se va a analizar el comportamiento de los termistores será el rango de $21-30^{\circ}\text{C}$, con diferencias de 1°C entre las mediciones, y el rango de $30-70^{\circ}\text{C}$, con diferencias de 10°C entre las mediciones. El rango de $21-30^{\circ}\text{C}$ se ha planteado para analizar más en detalle las posibles variaciones que puede haber en el comportamiento de los termistores a temperatura ambiente.

La Ilustración 5 representa el diagrama de conexión que se empleará para la caracterización. El VNA se conectará a la placa con el termistor soldado la cual estará dentro del horno.

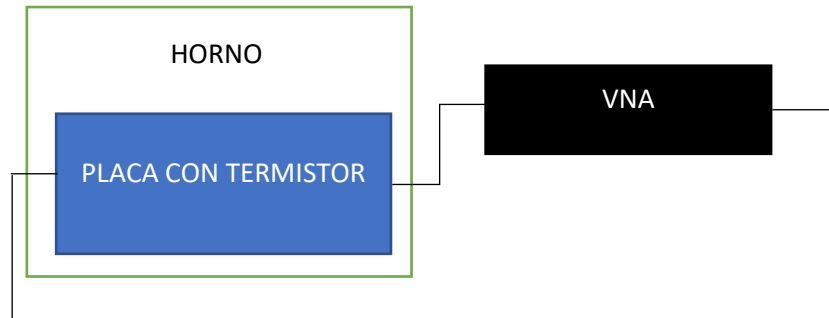


Ilustración 5. Diagrama de conexión para la caracterización

Los datos obtenidos del VNA serán archivos con una estructura “s2p”, es decir, contendrán los Parámetros S correspondientes a mediciones hechas con dos puertos en función de la frecuencia. Las mediciones con dos puertos consisten en medidas de reflexión en un puerto, es decir, medir la relación entre potencia transmitida por un puerto y recibida por el mismo: S_{11} o S_{22} ; y medidas en transmisión, que consiste en medir la potencia transmitida por un puerto y recibida por otro: S_{12} o S_{21} . En este caso, dado que se trata de un componente resistivo, las mediciones S_{22} serán iguales a las mediciones S_{11} , y lo mismo ocurrirá con mediciones en transmisión. De hecho, el S_{21} serán las pérdidas de dicha resistencia, que es al final lo que se está buscando y lo que se analizará.

El rango de frecuencias para los que se va a caracterizar los termistores es desde 1GHz hasta los 2.6GHz. Lo que se espera observar son variaciones en las pérdidas (S_{21}) en función de la temperatura y de la frecuencia.

3.1. Caracterización en el rango de 21-30°C

3.1.1. Termistor F360 (100K Ω)

El primer termistor que se va a analizar será el Termistor 0402, cuyo código de fabricante es B57250V2104F360, y con valor nominal de 100K Ω . Se referirá como F360 a este termistor de aquí en adelante.

La representación del módulo de los parámetros S_{21} para el termistor F360 en el rango de temperaturas 21-30°C se aprecia en la Ilustración 6. Se puede observar variaciones claras en la potencia disipada en función de la frecuencia, pero poca diferencia cuando aumenta la temperatura, salvo la medición para 30°C (representado con una línea amarilla) que se debe de tratar de un caso aislado. Las variaciones en frecuencia muestran que hay más pérdidas cuanto más baja es la frecuencia, del orden de 10dB a 1GHz, que cuando la frecuencia es mayor, 3dB a 2,6GHz.

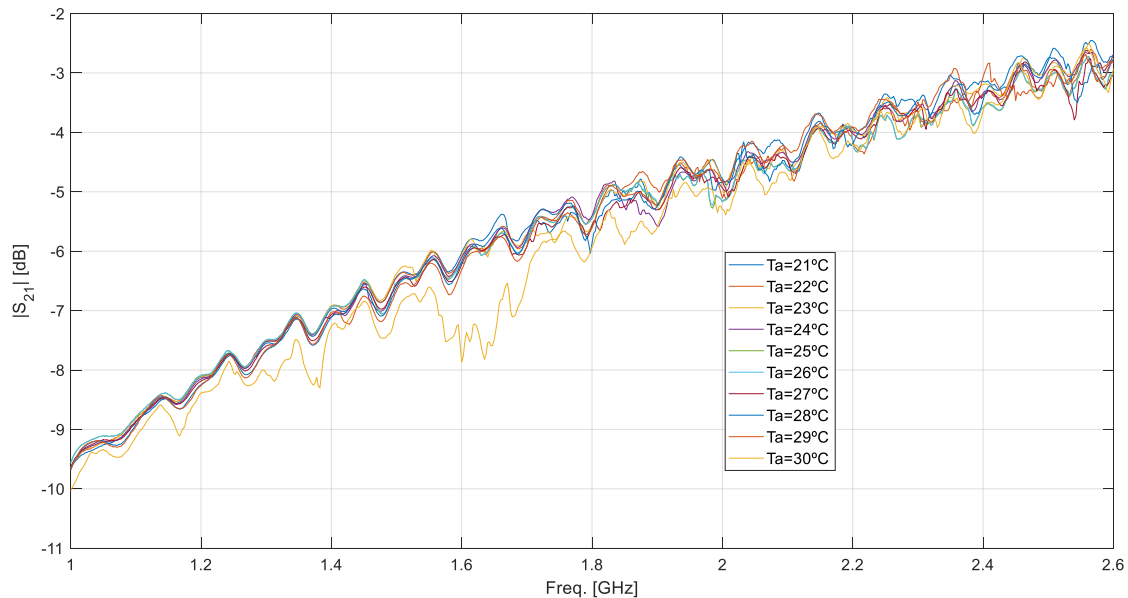


Ilustración 6. Módulo de los parámetros S_{21} para el termistor F360 en el rango de 21-30°C.

3.1.2. Termistor F560 (47K Ω)

El siguiente termistor que se va a analizar es el Termistor 0402, cuyo código de fabricante es B57250V2473F560, y con valor nominal de 47K Ω . Se referirá como F560 a este termistor de aquí en adelante.

La representación del módulo de los parámetros S_{21} para el termistor F560 en el rango de temperaturas 21-30°C se aprecia en la Ilustración 7. Aquí se pueden extraer las mismas conclusiones respecto a las variaciones de frecuencia que en la Ilustración 6.

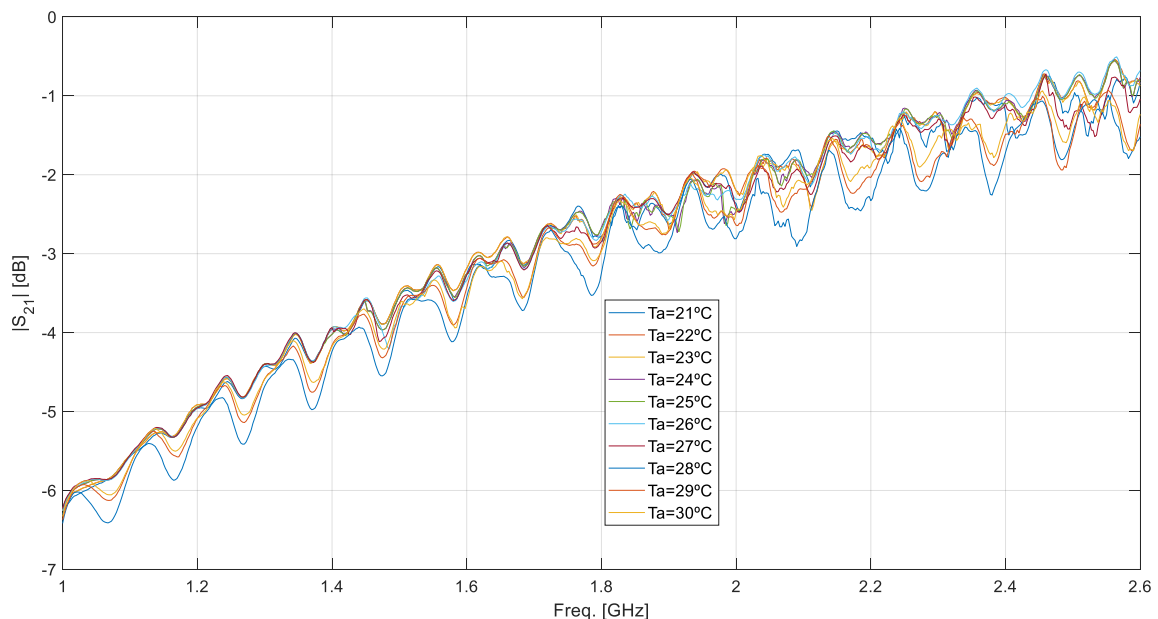


Ilustración 7. Módulo de los parámetros S_{21} para el termistor F560 en el rango de 21-30°C

Respecto a las variaciones en función de la temperatura no se puede concluir con certeza si a mayor temperatura hay más o menos pérdidas y por eso se ilustra más de cerca la Ilustración 7 en la Ilustración 8, ampliando la imagen para el rango de frecuencias 1.96-2.12GHz. Ahí se observa que algunos de los comportamientos parecen indicar que hay más pérdidas cuanto mayor es la temperatura, véase las curvas amarilla, azul y roja pintadas más abajo, pero a la vez se ve que la curva que presenta mayores pérdidas, la azul, corresponde a 28°C y no a 30°C, la amarilla, por lo que no se puede concluir ningún comportamiento lógico de los termistores con respecto a la temperatura.

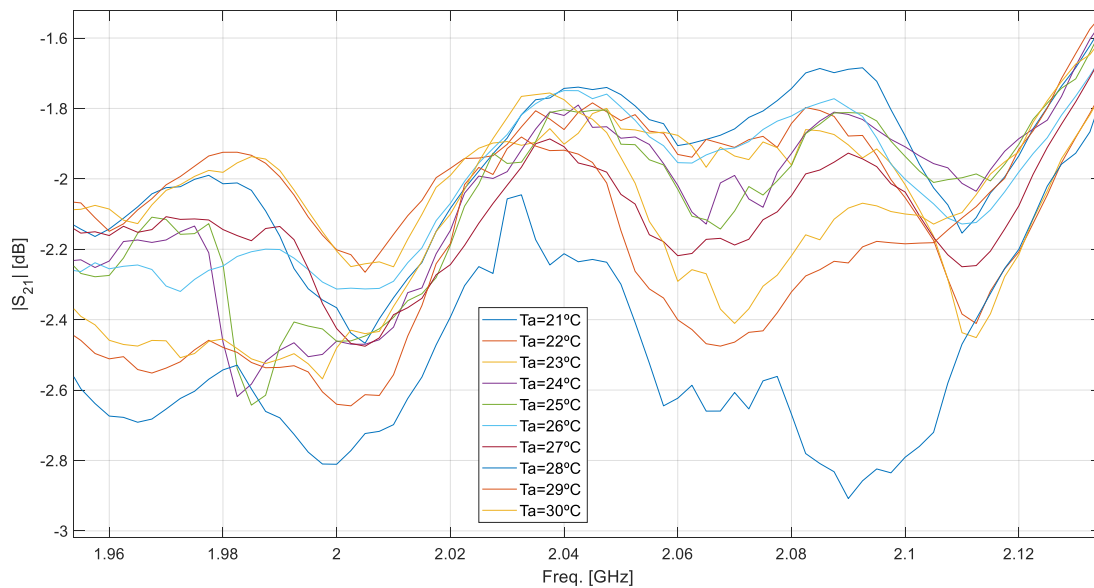


Ilustración 8. Zoom al rango de frecuencias 1.96-2.12GHz de la Ilustración 7

3.1.3. Termistor V2103 (10K Ω)

En cuanto al termistor Termistor 0402, con código de fabricante es B57221V2103J060, y con valor nominal de 10K Ω , y al cual se referirá como F360 de aquí en adelante, en la Ilustración 9 se puede observar el módulo de los parámetros S_{21} . Se puede apreciar que las variaciones del S_{21} respecto a la frecuencia tienen el mismo comportamiento que los termistores F360 y F560, es decir, a mayor frecuencia menos pérdidas, comenzando cerca de 9dB a 1GHz y llegando a 2-3dB a los 2.6GHz.

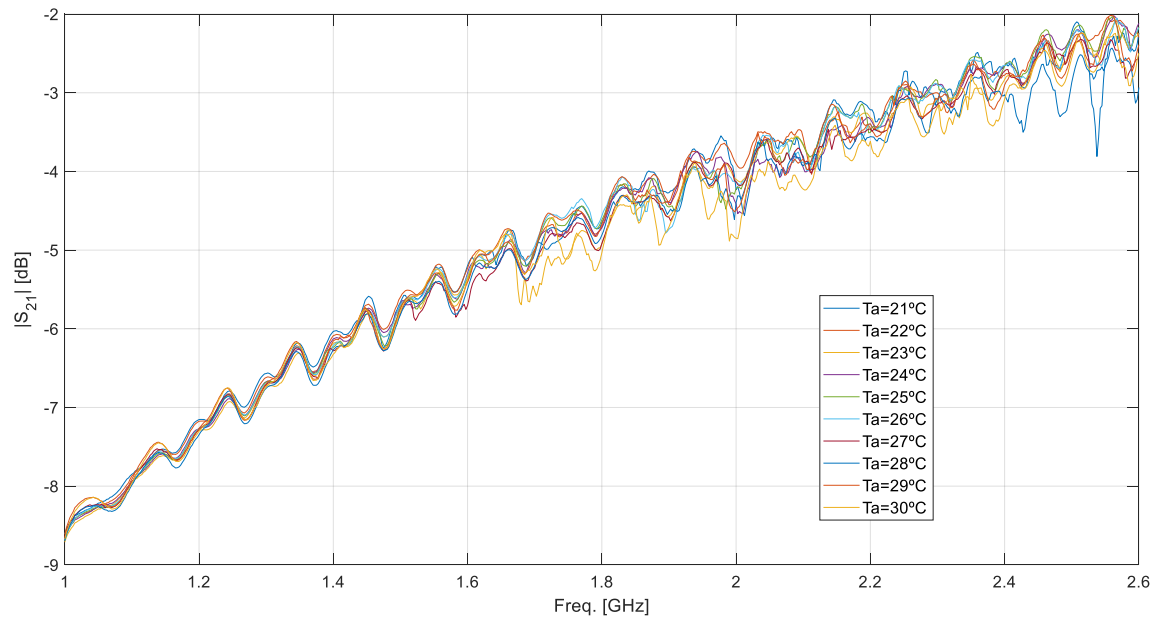


Ilustración 9. Módulo de los parámetros S_{21} para el termistor V2103 en el rango de 21-30°C

También se aprecian en la Ilustración 9 dos comportamientos anómalos, uno reflejado en la Ilustración 10 donde se amplía el rango de frecuencias 1.6-2.4GHz, y el otro en la Ilustración 11, donde se ve el rango de frecuencias de 2.4-2.6GHz.

En cuanto a la Ilustración 10, se aprecia una curva que tiende a presentar mayores pérdidas que el resto para ese rango de frecuencias, la curva amarilla, que representa la caracterización a 30°C, lo que parece indicar que para ese rango a mayor temperatura mayores pérdidas.

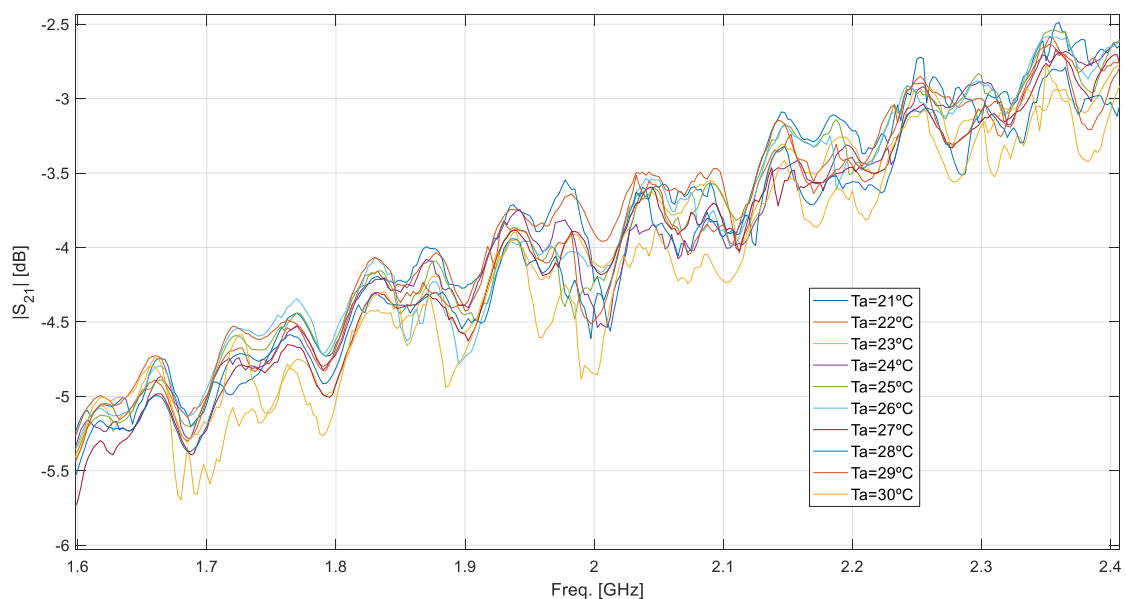


Ilustración 10. Zoom al rango de frecuencias 1.6-2.4GHz de la Ilustración 9

En cuanto a la Ilustración 11, se puede ver que para ese rango es otra curva la que presenta mayores pérdidas, la curva azul correspondiente a 28°C, una curva distinta a la vista en la Ilustración 10, por lo que no se aprecia un comportamiento lógico del termistor V2103 en función de la temperatura para todo el rango de frecuencias estudiado.

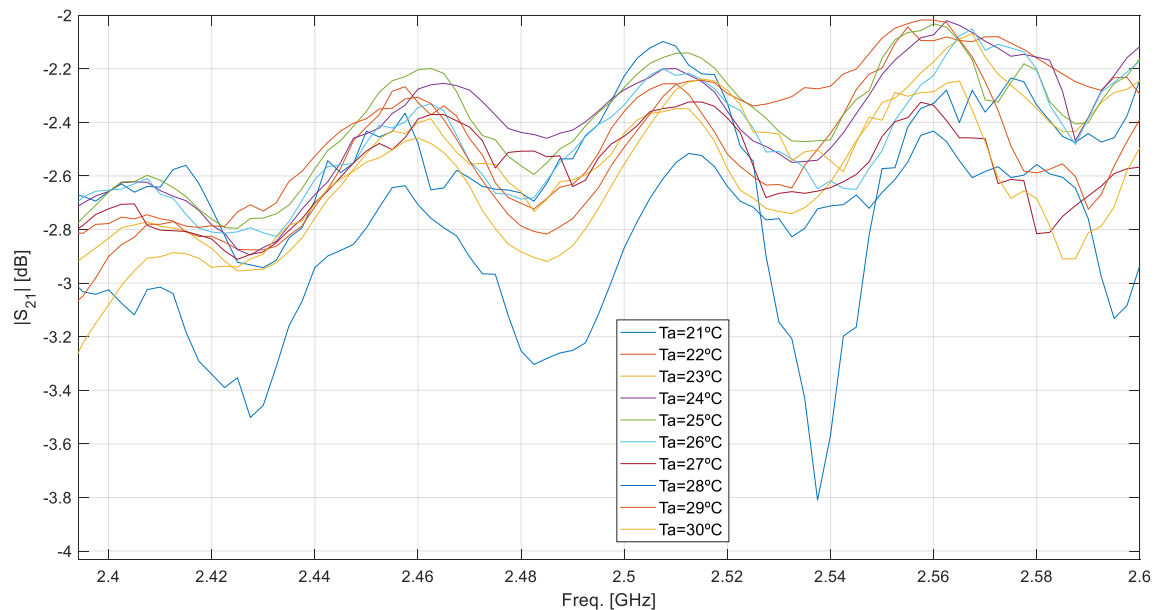


Ilustración 11. Zoom al rango de frecuencias 2.4-2.6GHz de la Ilustración 9

3.1.4. Termistor V2332 (33K Ω)

La representación del módulo de los parámetros S_{21} para el Termistor 0402 con código de fabricante B57221V2332J060, V2332 de aquí en adelante, en el rango de temperaturas 21-30°C se aprecia en la Ilustración 12. El comportamiento en función de la frecuencia es igual a los anteriores, a mayor frecuencia menores pérdidas, pero no parece haber un orden claro si considerar variaciones en la temperatura. Únicamente se observa una región de mayores pérdidas para el rango de frecuencias 1.5-1.8GHz. Esto se amplía en la Ilustración 13. Las pérdidas son del orden de 7dB a 1GHz y 1-2dB a 2,6GHz.

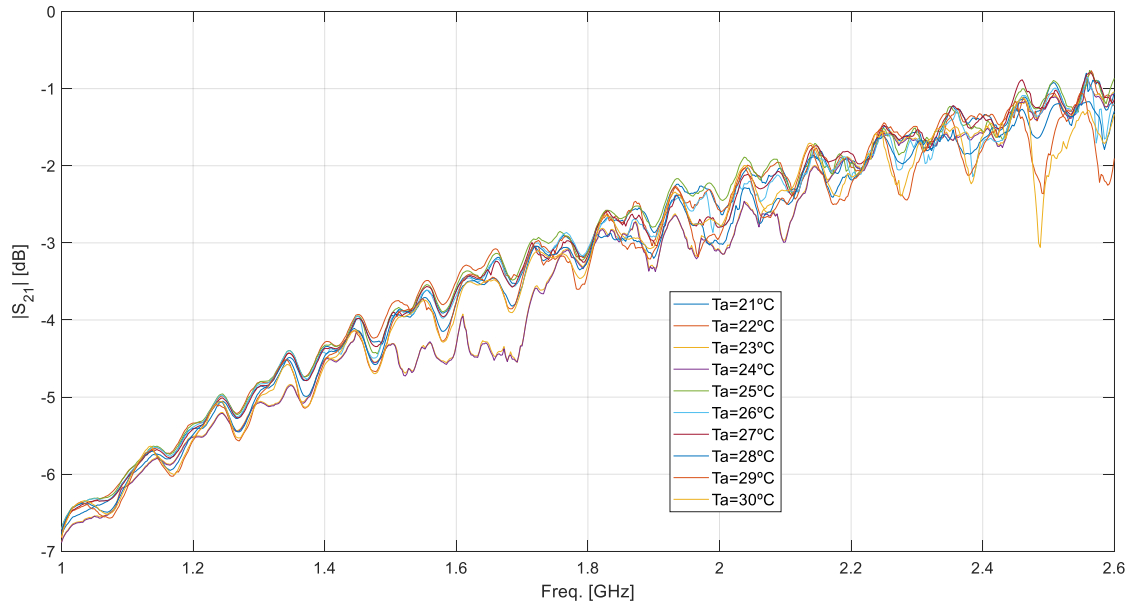


Ilustración 12. Módulo de los parámetros S_{21} para el termistor V2332 en el rango de 21-30°C

En la Ilustración 13 se aprecian dos curvas, la morada y la amarilla, que presentan mayores pérdidas que el resto de curvas para ese rango en concreto. En caso de que dichas curvas representasen temperaturas contiguas podría indicar una cierta relación entre temperaturas, pero estas curvas representan 27°C, la morada, y 30°C, la amarilla, por lo que no se puede concluir nada.

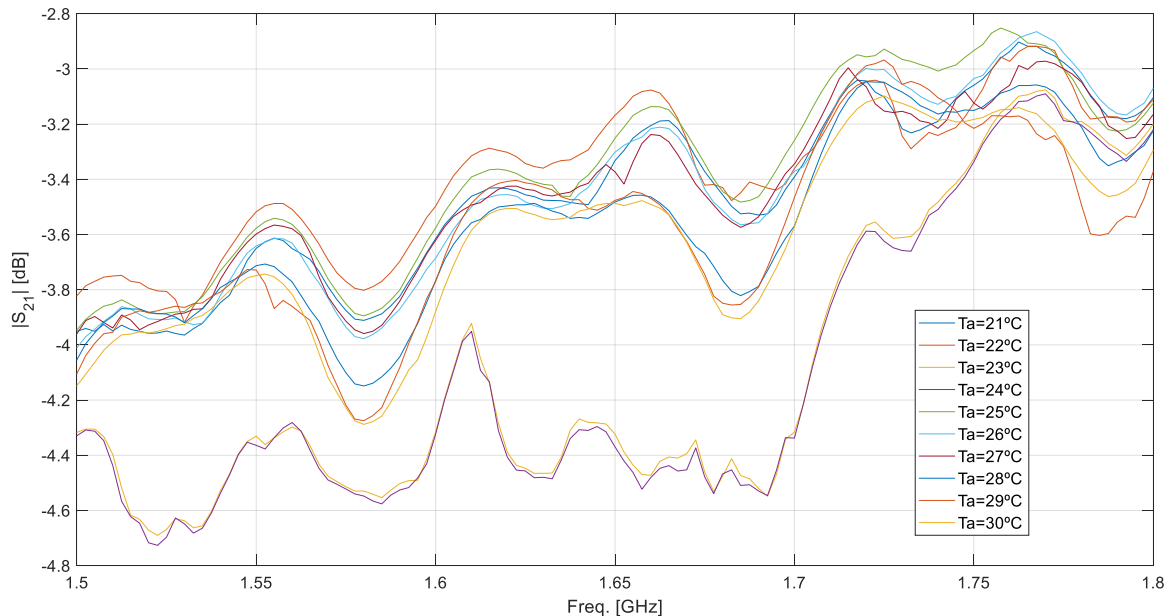


Ilustración 13. Zoom al rango de frecuencias 1.5-1.8GHz de la Ilustración 12

3.1.5. Termistor V2223 (22K Ω)

En cuanto al termistor Termistor 0402, con código de fabricante es B57261V2223J060, V2223 de aquí en adelante, y con valor nominal de 22K Ω en la Ilustración 14 se puede observar el módulo de los parámetros S_{21} . Se aprecia claramente que no hay variaciones del S_{21} respecto a la frecuencia dado que se queda en torno a los 0dB, 1 watio, para todo el margen de frecuencias.

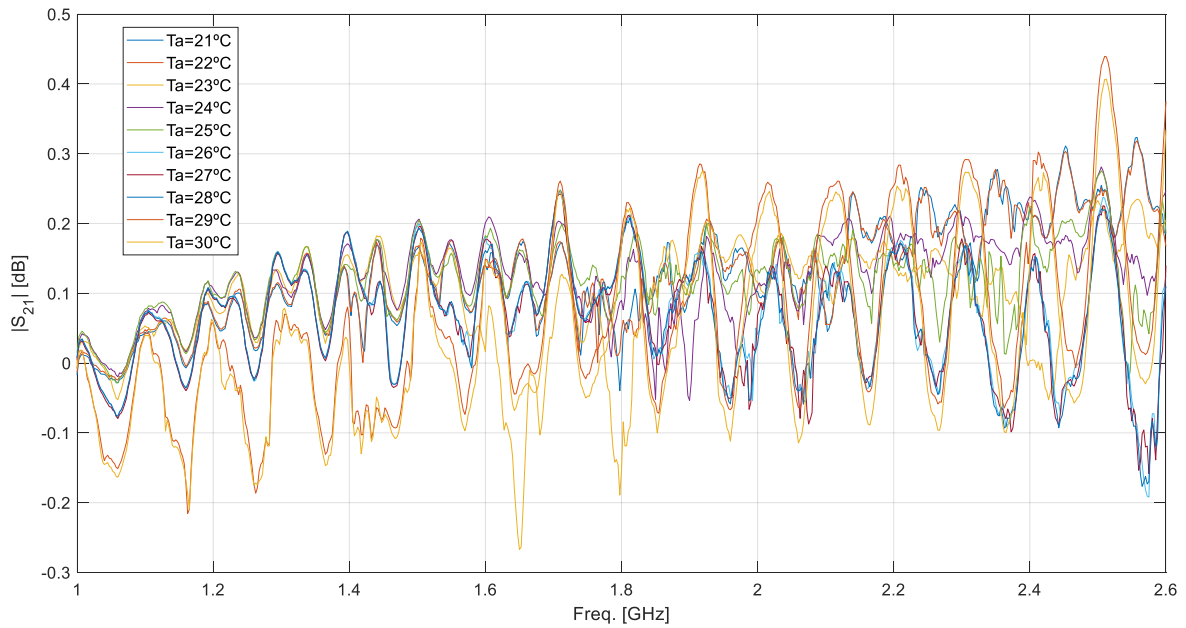


Ilustración 14. Módulo de los parámetros S_{21} para el termistor V2223 en el rango de 21-30°C

3.2. Caracterización en el rango de 30-70°C

Para la caracterización en el rango de 30-70°C se han elegido los siguientes termistores:

- F360. Representa al termistor con mayor valor nominal, 100K Ω , y mayor rango de variaciones en el S_{21} , de 10dB a 1GHz a 3dB a 2.6GHz.
- F560 puesto que tiene un valor nominal aproximadamente de la mitad de F360, 47K Ω , y también presenta un amplio rango de variaciones del S_{21} .
- V2103 porque representa al termistor con el valor nominal más pequeño, 10K Ω , y será interesante comprobar si el valor resistivo influye a la hora de incorporarlo al resonador.

El termistor V2223 se ha descartado porque no presenta variaciones a lo largo del espectro de frecuencias, y el termistor V2332 porque tiene un valor nominal, 33K Ω , semejante a de F560 y se prefiere coger un margen más amplio.

3.2.1. Termistor F360 (100K Ω)

En la Ilustración 15 se muestra el módulo de los parámetros S_{21} para el termistor F360 en el rango de 30-70°C. Para el rango de temperaturas estudiado previamente no se observó ninguna relación entre las variaciones de temperatura y el módulo del S_{21} . Sin embargo, para este rango de temperaturas se ve de forma muy concisa que las curvas que representan temperaturas mayores tienen mayores pérdidas. Probablemente el hecho por el que no se viesen estos resultados durante el estudio anterior sea que las variaciones de temperatura eran muy pequeñas, de 1°C, y los resultados se terminaban entremezclando unos con otros, porque se observa como una curva sigue el comportamiento de otra y las diferencias entre las mismas son de décimas de dB.

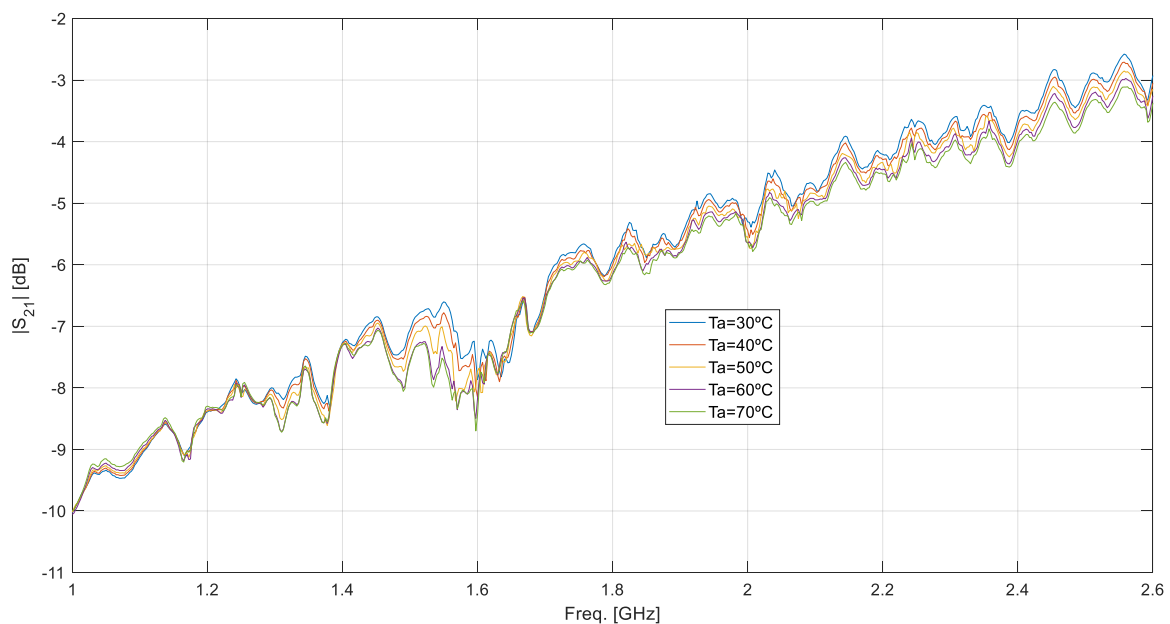


Ilustración 15. Módulo de los parámetros S_{21} para el termistor F360 en el rango de 30-70°C

3.2.2. Termistor F560 (47K Ω)

En la Ilustración 16, donde se muestra el módulo de los parámetros S_{21} para el termistor F560 en el rango de 30-70°C, también se aprecia lo comentado para la Ilustración 15, a mayor temperatura, mayores son las pérdidas. También se aprecia, en el rango 1.2-1.4GHz, un solapamiento de las 4 curvas representadas, pero sin llegar a intersectarse, síntoma de que no todas las frecuencias varían por igual con la temperatura.

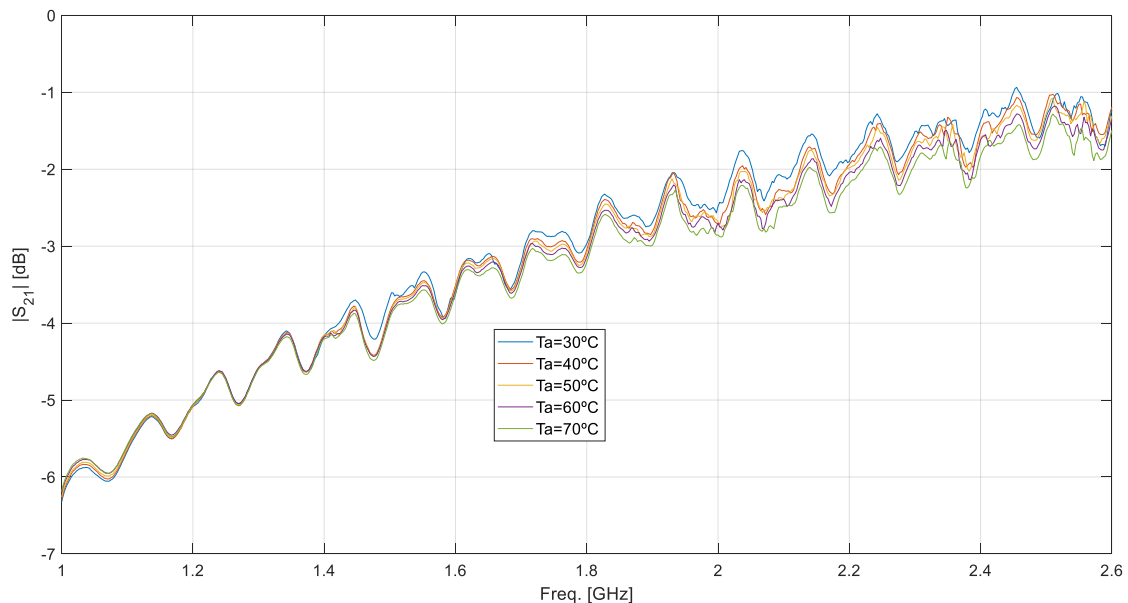


Ilustración 16. Módulo de los parámetros S_{21} para el termistor F560 en el rango de 30-70°C

3.2.3. Termistor V2103 (10K Ω)

En la Ilustración 17 se muestra el módulo de los parámetros S_{21} para el termistor V2103 en el rango de 30-70°C. A diferencia de lo que ocurriría para los termistores F360 y F560 analizados para este rango de temperaturas, en esta ilustración no se observa una temperatura que destaque sobre el resto por tener más o menos pérdidas en todo el margen de frecuencias, sino que se divide en tres etapas, las ilustradas en Ilustración 18, Ilustración 19 e Ilustración 20.

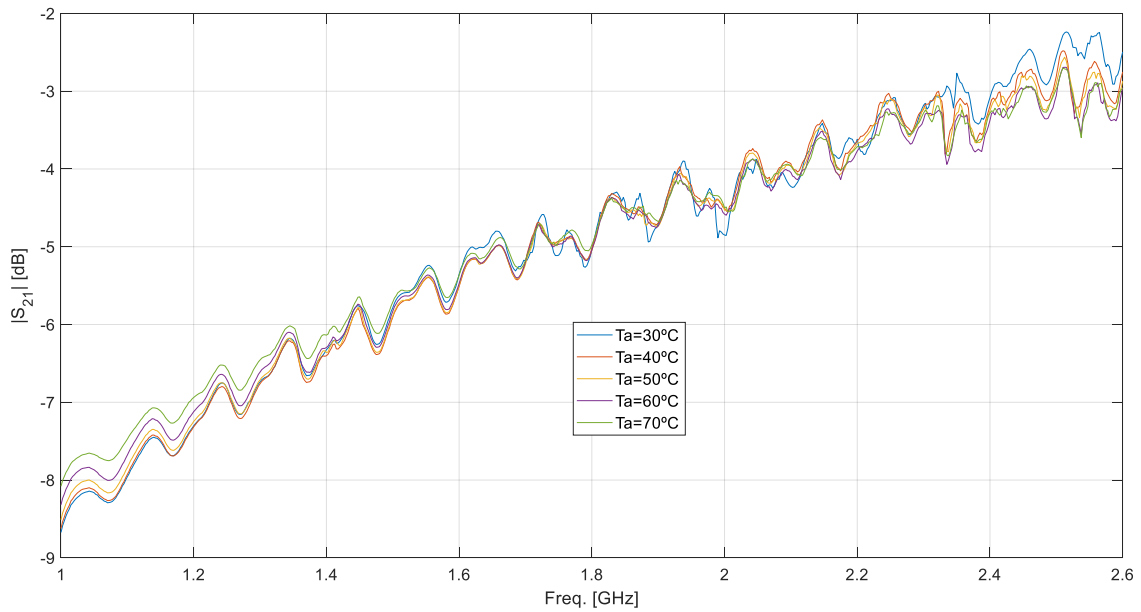


Ilustración 17. Módulo de los parámetros S_{21} para el termistor V2103 en el rango de 30-70°C

En la Ilustración 18, que abarca el margen de frecuencias de 1-1.5GHz, se ve un orden invertido de las temperaturas si compararlo con los casos de F560, Ilustración 16, y F360, Ilustración 15. La curva que presenta más pérdidas es la correspondiente a 30°C y la que menos es la correspondiente a 70°C, es decir, mayor temperatura, menos pérdidas.

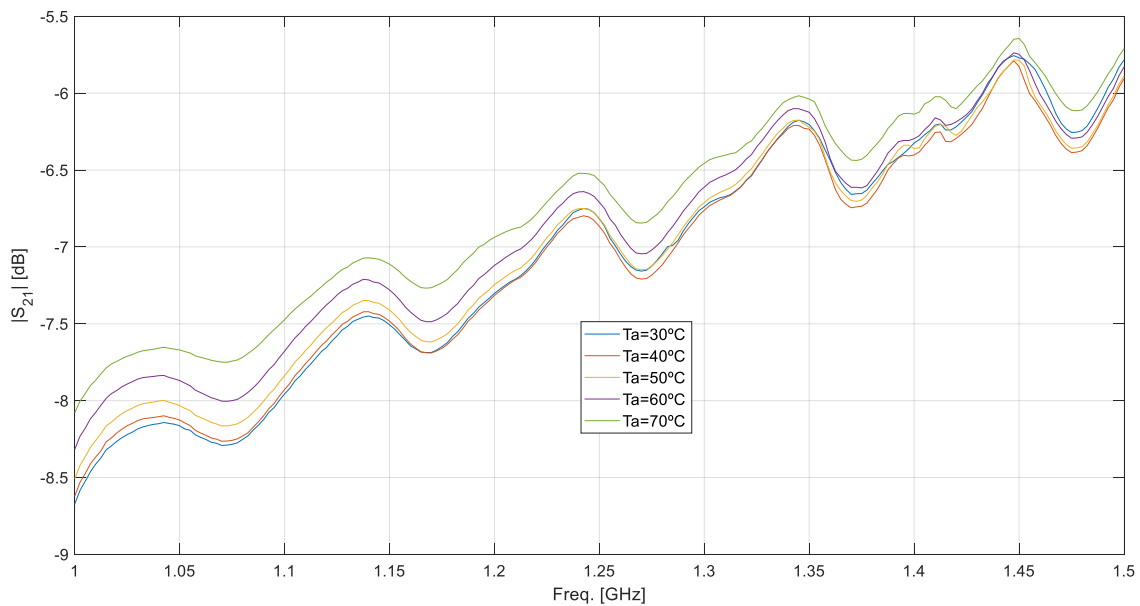


Ilustración 18. Zoom al rango de frecuencias 1-1.5GHz de la Ilustración 17

En la Ilustración 19, cuyo margen de frecuencias es 1.5-2.3GHz, se entrelazan constantemente las curvas sin un orden claro. Una etapa de transición hasta la Ilustración 20.

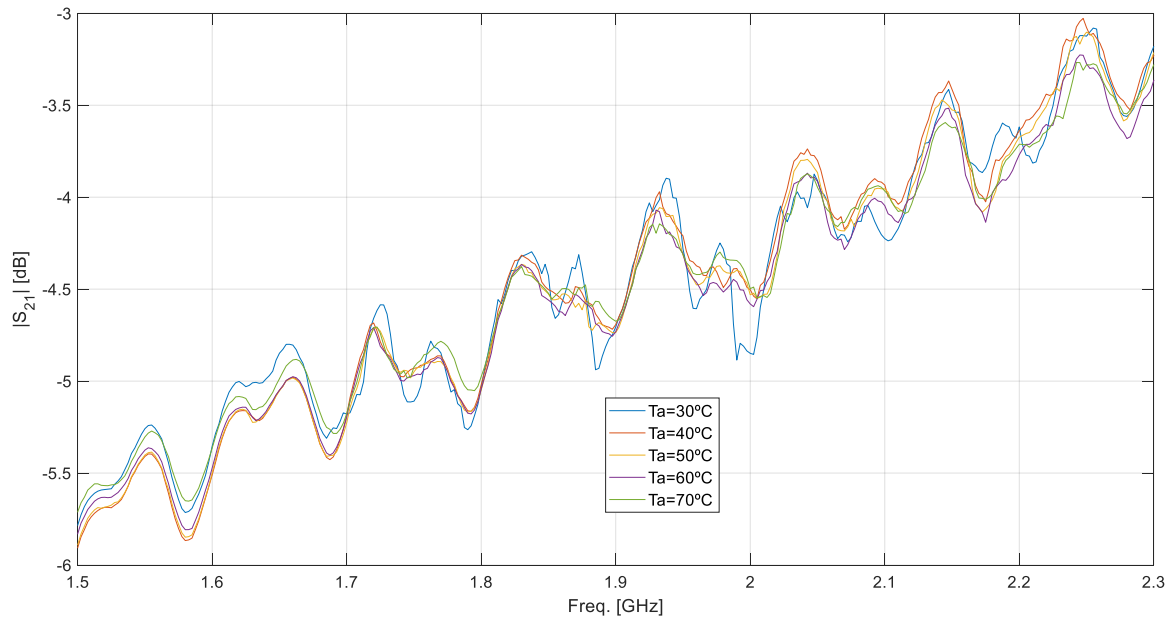


Ilustración 19. Zoom al rango de frecuencias 1.5-2.3GHz de la Ilustración 17

En Ilustración 20, que abarca el margen de frecuencias de 2.3-2.6GHz, se ve el mismo orden de las temperaturas que en los casos de F560, Ilustración 16, y F360, Ilustración 15, más pérdidas cuanto mayor es la temperatura.

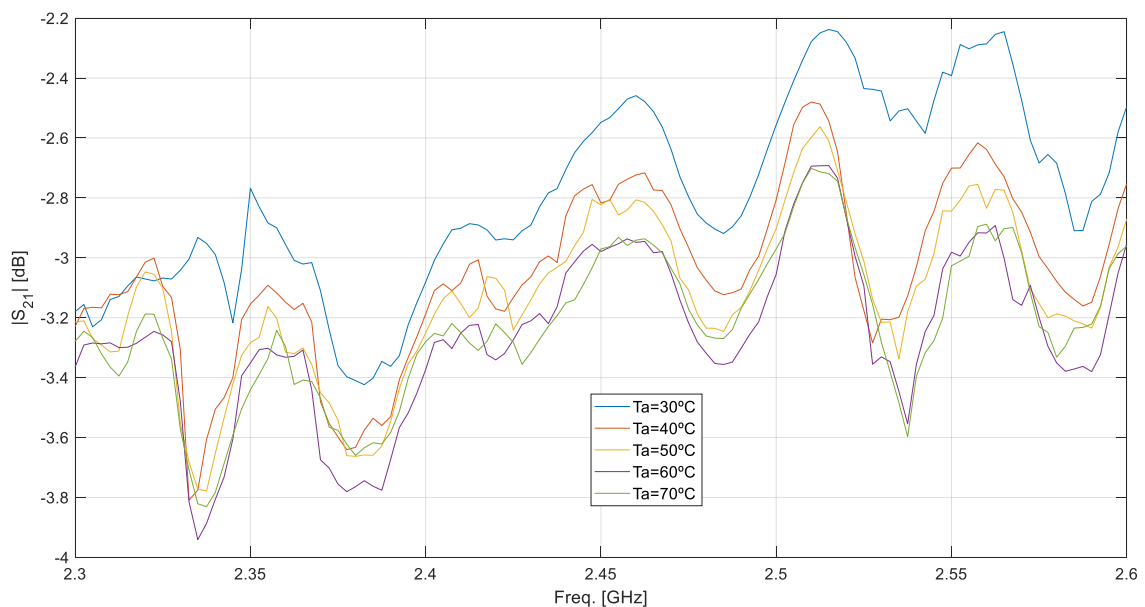


Ilustración 20. Zoom al rango de frecuencias 2.3-2.6GHz de la Ilustración 17

Estas tres etapas, donde al principio menores temperaturas presentaban mayores pérdidas, seguido de una etapa de transición, de intersección de todas las curvas de temperatura, y finalizado por una donde se invertía la primera etapa y se volvía al comportamiento de los otros dos termistores analizados, puede deberse al bajo valor nominal del termistor, $10\text{K } \Omega$. Si se analiza la Ilustración 15, donde se representa F360, de $100\text{K } \Omega$, se ve que hay frecuencias en las que las curvas de temperatura se acercan más unas a otras, llegando a intersecarse, pero muy puntualmente, pudiendo considerarlos casos aislados. Si se observa la Ilustración 16, donde se representa F560, de $47\text{K } \Omega$, se ha comentado que hay una región amplia, entre 1.2-1.4GHz, de 200MHz, donde las curvas prácticamente se solapan.

Estos comportamientos descritos parecen indicar que si se reduce el valor nominal de la resistencia las pérdidas dejan de depender de la temperatura para ciertos rangos de frecuencias o, visto de otra manera, a mayor valor nominal más claramente queda definido que mayores temperaturas presentan mayores pérdidas.

4. FASE DE SIMULACIÓN

Una vez conocido el comportamiento de los termistores en función de la temperatura y de la frecuencia, es turno de simular cómo reacciona un resonador que los contiene por medio de un software, CST Microwave Studio en este caso.

El objetivo final es tener un resonador “*Split-ring*” (SRR), como en la Ilustración 21 y el empleado en [11], formado por una línea de transmisión y dos SRR a sus laterales. Se va a intentar trabajar con un resonador cuya frecuencia de resonancia se encuentre en el margen de 2.45 GHz.

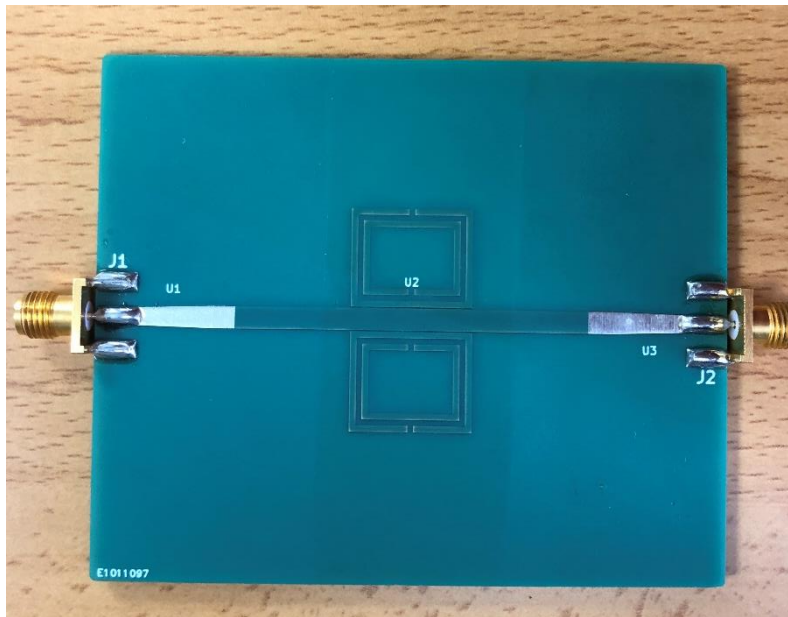


Ilustración 21. Foto resonador SRR

Partiendo de un resonador el cual contenga un termistor de los caracterizados previamente, el principal fenómeno que se quiere estudiar es ver si su frecuencia de resonancia o su respuesta en frecuencia es sensible a las variaciones de temperatura que aporta el termistor al circuito.

La fase de simulación consistirá en varias etapas:

1. Integrar en una línea de transmisión simple, idéntica a la que contiene el resonador, un termistor y ver si los parámetros $S_{i,j}$ son consecuentes con lo esperado
2. Simular un resonador
3. Empíricamente integrar un termistor en distintas zonas del resonador para ver si varía su respuesta.

4.1. Integración del termistor en CST Microwave Studio

Lo primero que se va a realizar es integrar el termistor en el software de simulación, CST Microwave Studio. Se va a partir de la línea de transmisión del resonador SRR, sobre la cual se van a situar las distintas caracterizaciones de los termistores para ver cómo CST las interpreta, si hay variaciones entre las mediciones hechas y los resultados que devuelve CST.

El resultado ideal de la simulación con los termistores situados en la línea de transmisión sería obtener los mismos parámetros S_{21} que se obtuvieron durante la caracterización debido que al tratarse de una línea de transmisión, si suponerla ideal, no habría pérdidas por lo que la potencia recibida por el puerto 2, si se inyecta potencia por el puerto 1, sería la misma. Si a esta línea de transmisión ideal se le añade una de las caracterizaciones de los termistores, la potencia recibida por el puerto 2, si se inyecta potencia por el puerto 1, sería la potencia inyectada por el puerto 1 menos las pérdidas debidas al termistor.

$$\text{Potencia puerto 2} = \text{Potencia inyectada puerto 1} - \text{Pérdidas termistor}$$

(1). Ecuación de las pérdidas en una línea de transmisión con un termistor

4.1.1. Línea de transmisión

Para comenzar, se diseñará una placa con línea de transmisión entre dos puertos, como la ilustrada en Ilustración 22. La placa está formada por:

- Dos puertos, en rojo. Éstos están sobredimensionados en comparación con la realidad para que la simulación sea lo más realista posible electromagnéticamente.
- Línea de transmisión, en amarillo, de cobre.
- Base de la placa, material azul claro.
- Plano de masa en la parte posterior de la placa que abarca su totalidad.

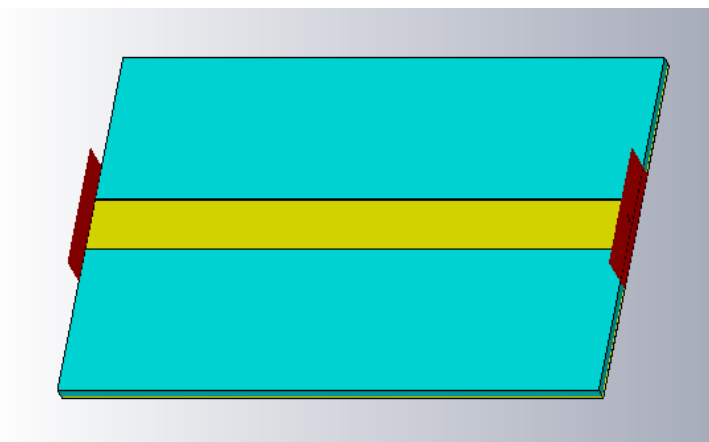


Ilustración 22. Línea de transmisión, vista de perspectiva

Las especificaciones de la Ilustración 22 se encuentran en la Tabla 3. Con dichas especificaciones se consigue tener una línea de transmisión de 53.72Ω para el rango de trabajo, es decir, prácticamente adaptada a 50Ω , por lo que no debería presentar casi reflexión.

La Ilustración 23, Ilustración 24, Ilustración 25, Ilustración 26, muestran las vistas de planta, alzado sin y con puerto de guía ondas y la vista de perfil de la línea de transmisión, respectivamente.

Parte de la placa	Especificación	Valor representativo	Descripción
Base	Anchura: W_x	40 mm	ϵ (del material) = 1.55 μ (del material) = 1 Tangente del ángulo de pérdidas = 0.0162
	Altura: W_y	60 mm	
	Espesor: h	1.55 mm	
Línea de transmisión	Anchura: W_s	5.9 mm	Material: cobre
	Altura: W_y	60 mm	
	Espesor: t	0.035 mm	
Plano de masa	Anchura: W_x	40 mm	Material: cobre
	Altura: W_y	60 mm	
	Espesor: t	0.035 mm	
Puertos de guía onda	Anchura: P_a	$2 * (\frac{W_s}{2} + 4)$ mm	
	Altura: P_h	$(h + t + 4)$ mm	

Tabla 3. Especificaciones Línea de Transmisión

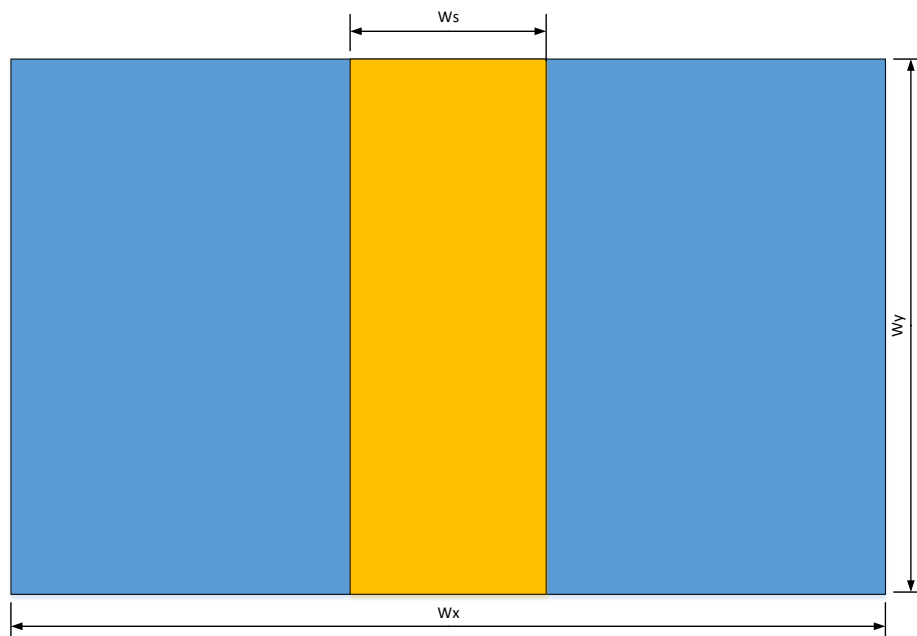


Ilustración 23. Línea de transmisión, vista de planta.

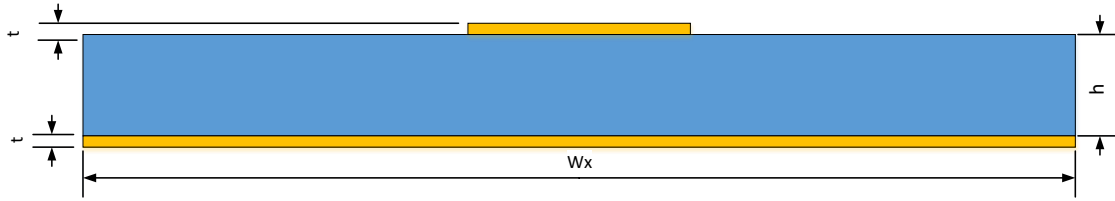


Ilustración 24. Línea de transmisión, vista de alzado sin puerto de guía ondas

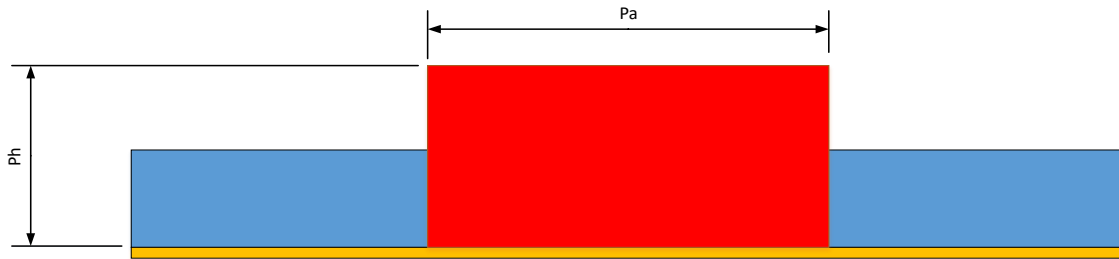


Ilustración 25. Línea de transmisión, vista de alzado con puerto de guía ondas

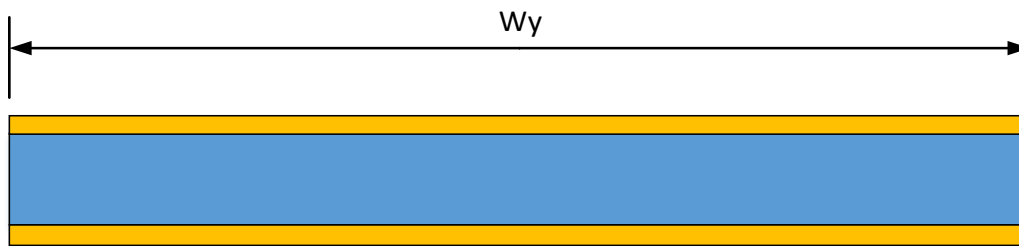


Ilustración 26. Línea de transmisión, vista de perfil.

En la Ilustración 27 se puede ver los parámetros S_{21} de la línea de transmisión en el rango de frecuencias 1-2.6GHz. Para todo el espectro frecuencial las pérdidas son menores a 0.9dB, lo que cuadra con lo comentado previamente sobre que la línea está prácticamente adaptada.

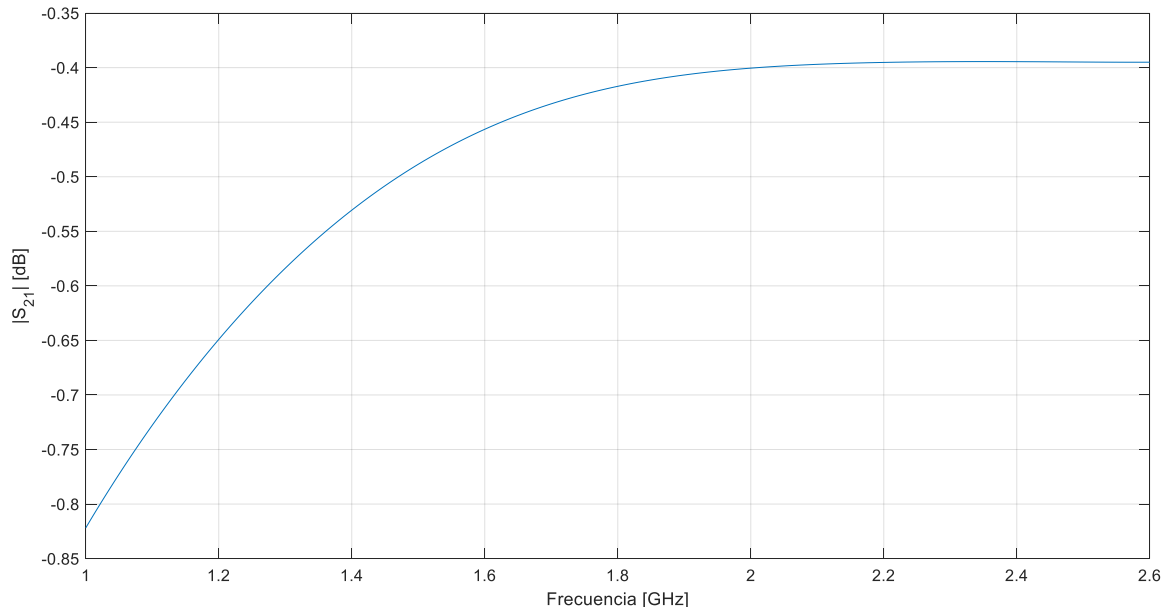


Ilustración 27. Parámetros S_{21} de la línea de transmisión

4.1.2. Línea de transmisión con un termistor

Una vez comprobado que la línea de transmisión no presenta casi pérdidas, lo siguiente es insertar un termistor en algún punto de la línea. La forma de hacerlo en el software que se está utilizando es cortando la línea, abriendo una apertura en ella del tamaño aproximado del termistor y creando otros dos puertos de guía onda para los extremos internos de la línea. Las especificaciones se encuentran en la Tabla 4.

La línea se ha cortado por el medio para conseguir simetría y puesto que en las placas con las que se han caracterizado también estaban situados en el medio, véase en la Ilustración 3. Tras cortar la línea se definen dos puertos de guía ondas en dicha abertura de la misma manera que se definieron en la Ilustración 25. La Ilustración 28 muestra el resultado deseado, mientras que la Ilustración 29 muestra una vista de planta de dicha placa.

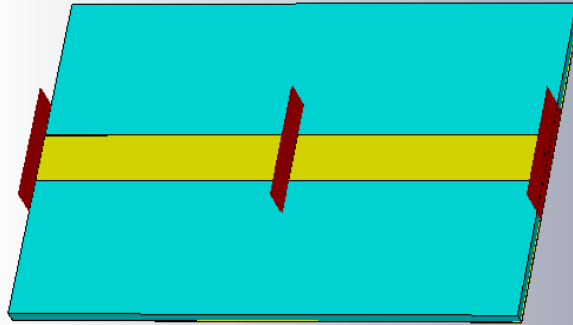


Ilustración 28. Línea de transmisión con termistor, vista de perspectiva

Parte de la placa	Especificación	Valor representativo	Descripción
Base	Anchura: W_x	40 mm	ϵ (del material) = 1.55 μ (del material) = 1 Tangente del ángulo de pérdidas = 0.0162
	Altura: W_y	60 mm	
	Espesor: h	1.55 mm	
Línea de transmisión	Anchura: W_s	5.9 mm	Material: cobre
	Altura: W_y	60 mm	
	Espesor: t	0.035 mm	
Plano de masa	Anchura: W_x	40 mm	Material: cobre
	Altura: W_y	60 mm	
	Espesor: t	0.035 mm	
Puertos de guía onda	Anchura: P_a	$2 * (\frac{W_s}{2} + 4)$ mm	
	Altura: P_h	$(h + t + 4)$ mm	
Abertura	Ancho: g	0.2 mm	

Tabla 4. Especificaciones Línea de transmisión con abertura

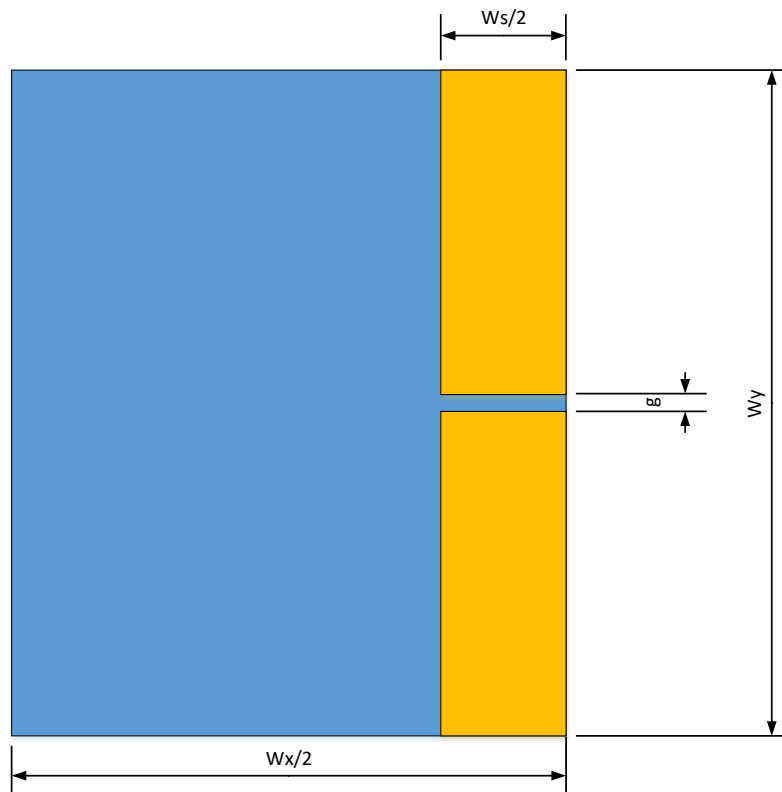


Ilustración 29. Línea de transmisión con abertura, vista de planta

El siguiente es añadir los elementos TOUCHSTONE, es decir, las caracterizaciones de los termistores, y realizar simulaciones conectando los puertos del elemento TOUCHSTONE a los puertos internos creados previamente para obtener los parámetros S_{21} . Las condiciones de contorno para la simulación son “*add (open space)*”.

Se va a probar el comportamiento del termistor integrado en la línea de transmisión para una temperatura únicamente.

4.1.2.1. Termistor F360

En la Ilustración 30 se observan los parámetros S_{21} para la línea de transmisión con el termistor F360 a 21 grados. A simple vista se aprecia que las pérdidas a 1GHz son mayores que antes, aproximadamente 18dB cuando el termistor en sí tenía unas pérdidas aproximadamente de 9dB.

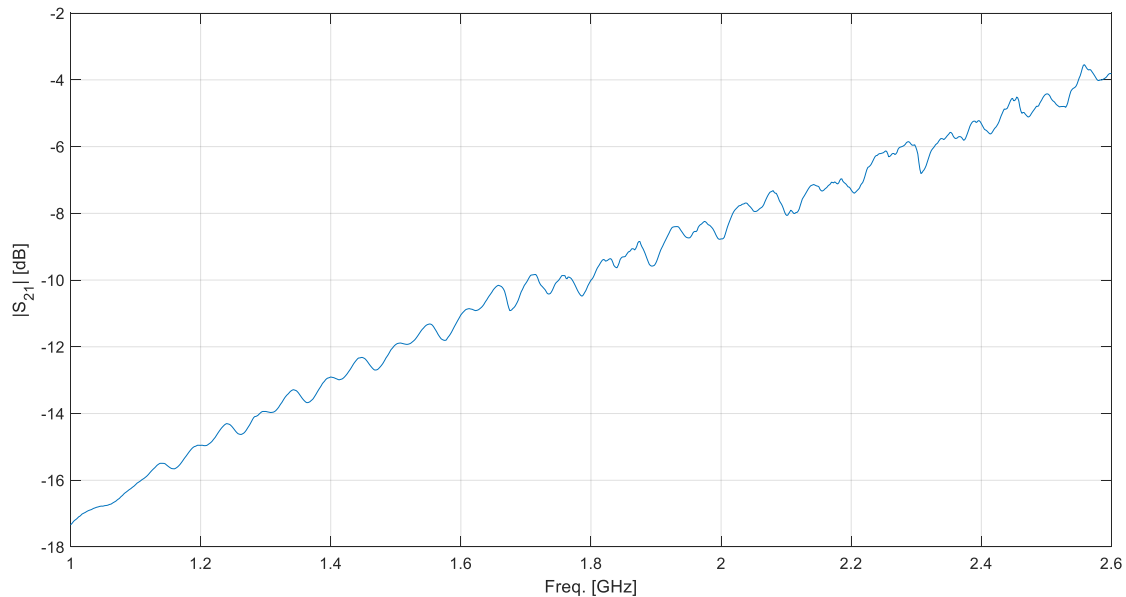


Ilustración 30. Módulo de los parámetros S_{21} para la línea de transmisión con el termistor F360 a 21°C.

Para analizar las diferencias entre los parámetros S_{21} de la línea de transmisión con el termistor F360 a 21 grados con respecto al S_{21} del termistor F360 a 21 grados se empleará la Ilustración 31, que presenta la diferencia de ambos módulos. Ahí se puede observar que la curva azul, la que representa la diferencia entre las pérdidas de la línea con el termistor y las pérdidas del termistor en sí, a pesar de las ligeras oscilaciones, es casi lineal. Esto indica que al estar implementado en la línea de transmisión aparecen más pérdidas y la relación de esas pérdidas con las pérdidas del termistor es aproximadamente lineal, con una pendiente aproximada de:

$$\frac{(10 + 2.5) \text{ [dB]}}{(2.6 - 1) \text{ [Ghz]}} = \frac{12.5 \text{ [dB]}}{1.6 \text{ [Ghz]}}$$

(2). Pendiente del módulo de la diferencia de parámetros S_{21} del termistor F360 a 21 grados y la línea de transmisión con dicho termistor a la misma temperatura

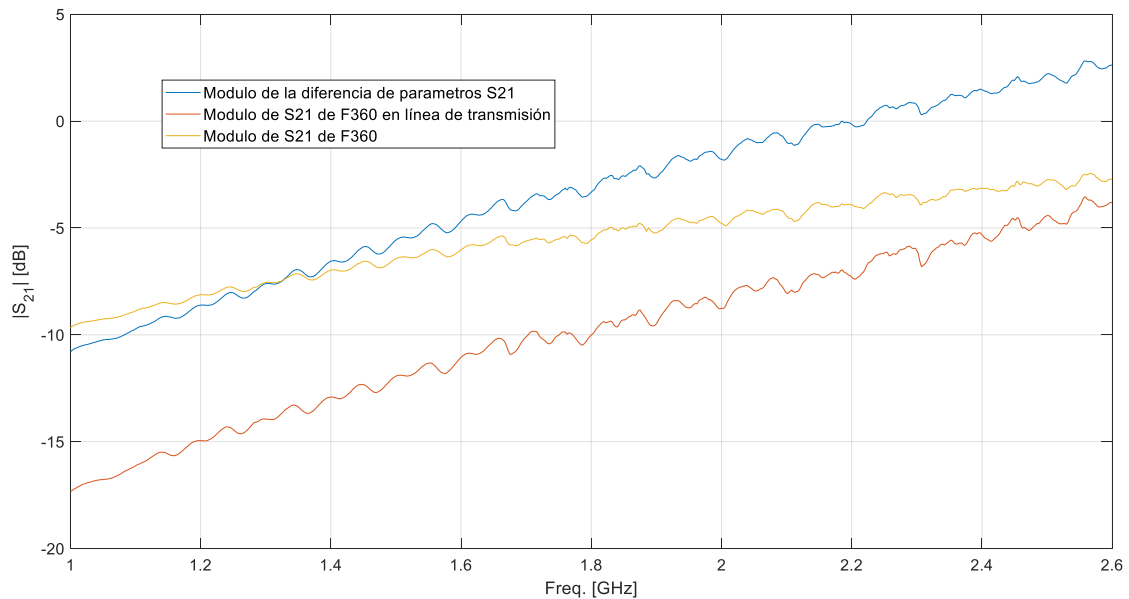


Ilustración 31. Caracterización de la línea de transmisión con el termistor F360, del termistor F360 y la diferencia de sus S_{21} a 21°C

4.1.2.2. Termistor F560

En la Ilustración 32 se observan los parámetros S_{21} para la línea de transmisión con el termistor F560 a 21 grados. Al igual que ocurría con el termistor F360 al introducirlo en la línea de transmisión, las pérdidas a frecuencias bajas son mayores si compararlas con las pérdidas obtenidas al caracterizar el termistor. A 1GHz aproximadamente 12dB cuando el termistor en sí tenía unas pérdidas aproximadamente de 6dB. Sin embargo, la simulación presenta errores porque a partir de 2.2GHz presenta “ganancia”, dB mayores que 0, lo cual no es posible al tratarse de un elemento resistivo.

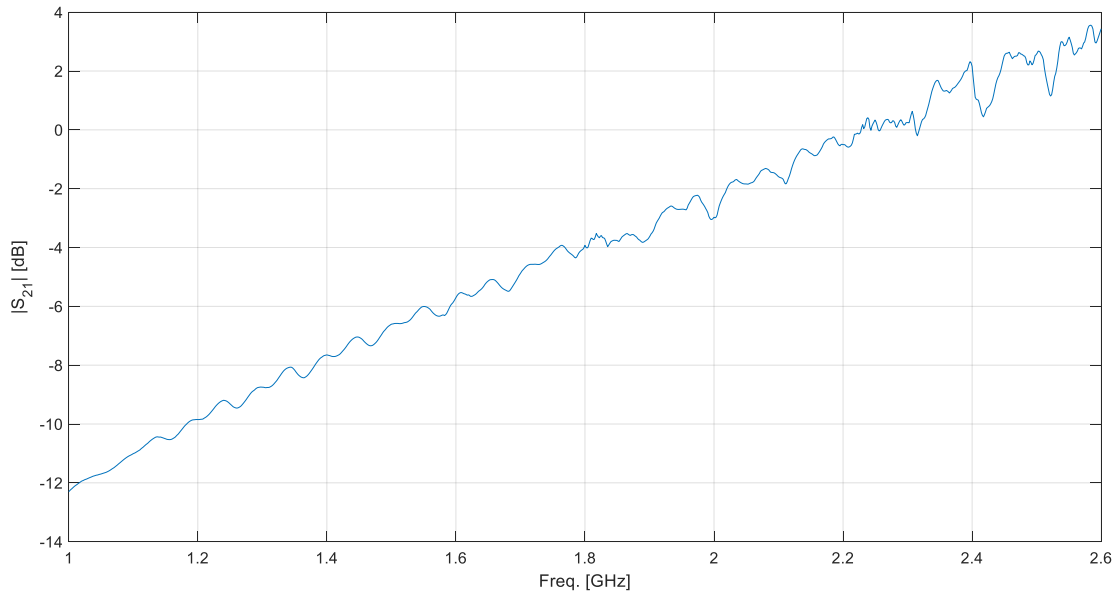


Ilustración 32. Módulo de los parámetros S_{21} para la línea de transmisión con el termistor F560 a 21°C.

Para analizar las diferencias entre los parámetros S_{21} de la línea de transmisión con el termistor F560 a 21 grados con respecto al S_{21} del termistor F560 a 21 grados se empleará la Ilustración 33, que presenta la diferencia de ambos módulos. Ahí se puede observar que la curva azul, la que representa la diferencia entre las pérdidas de la línea con el termistor y las pérdidas del termistor en sí, a pesar de las ligeras oscilaciones, es casi lineal. Esto indica que al estar implementado en la línea de transmisión aparecen más pérdidas y la relación de esas pérdidas con las pérdidas del termistor es aproximadamente lineal, con una pendiente aproximada de:

$$\frac{(9 + 7) \text{ [dB]}}{(2.6 - 1) \text{ [Ghz]}} = \frac{16 \text{ [dB]}}{1.6 \text{ [Ghz]}}$$

(3). Pendiente del módulo de la diferencia de parámetros S_{21} del termistor F560 a 21 grados y la línea de transmisión con dicho termistor a la misma temperatura

Dicha pendiente, de 16 dB por 1.6GHz, es mayor que para el termistor F360, ecuación (2).

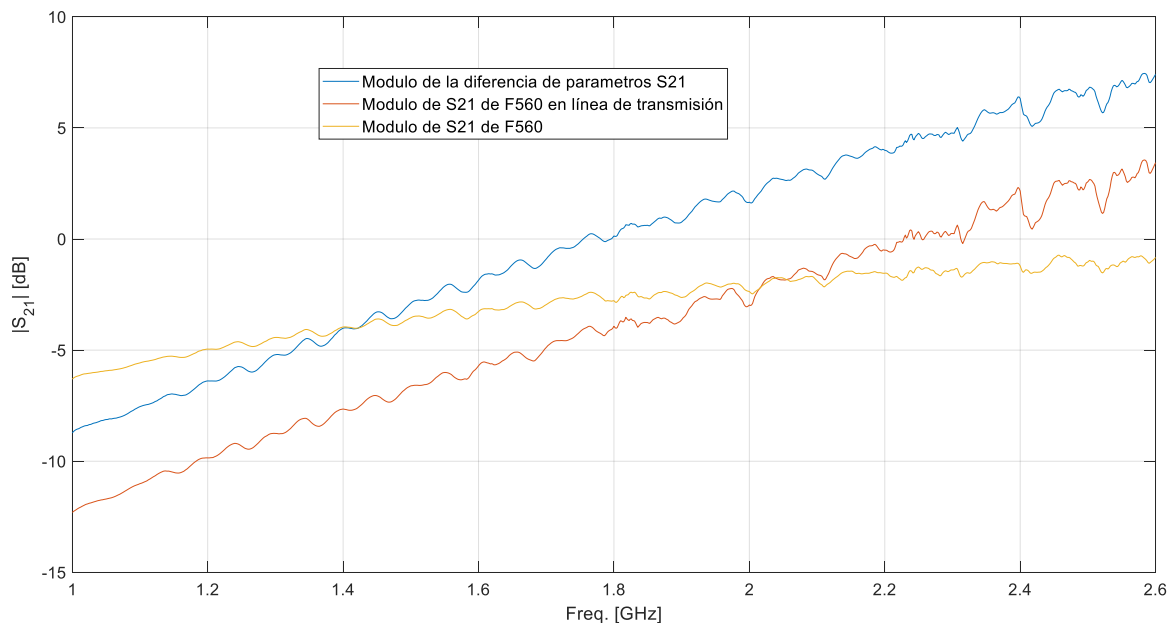


Ilustración 33. Caracterización de la línea de transmisión con el termistor F560, del termistor F560 y la diferencia de sus S_{21} a 21°C

4.1.2.3. Termistor V2103

En la Ilustración 34 se observan los parámetros S_{21} para la línea de transmisión con el termistor V2103 a 21 grados. Al igual que ocurría con el termistor V2103 al introducirlo en la línea de transmisión, las pérdidas a frecuencias bajas son mayores si compararlas con las pérdidas obtenidas al caracterizar el termistor. A 1GHz aproximadamente 16dB cuando el termistor en sí tenía unas pérdidas aproximadamente de 8dB.

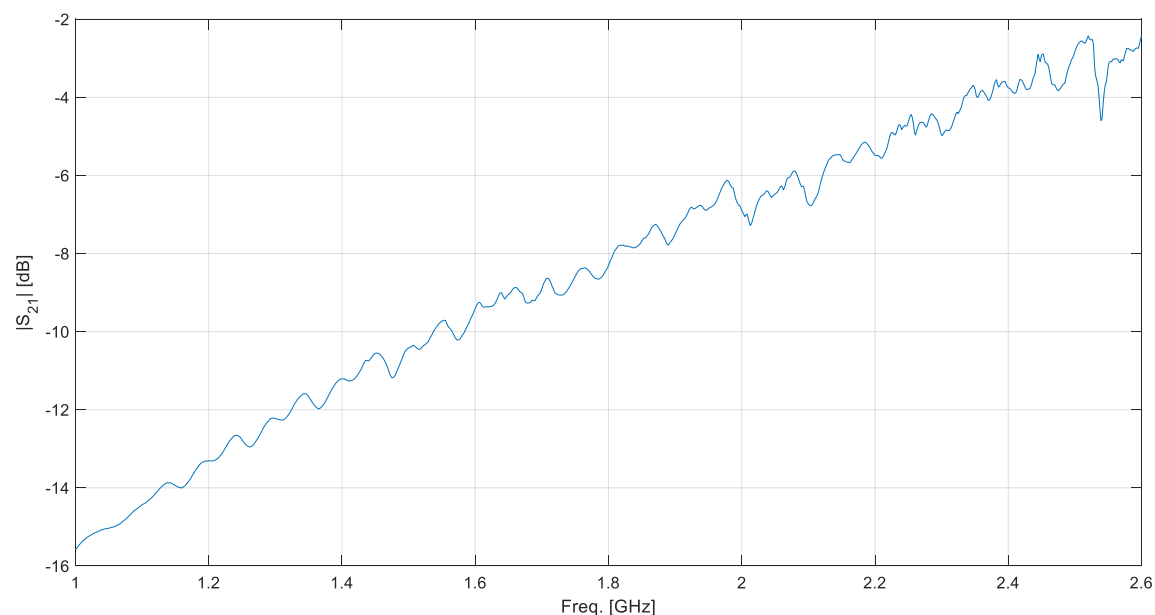


Ilustración 34. Módulo de los parámetros S_{21} para la línea de transmisión con el termistor V2103 a 21°C.

Para analizar las diferencias entre los parámetros S_{21} de la línea de transmisión con el termistor V2103 a 21 grados con respecto al S_{21} del termistor V2103 a 21 grados hay que fijarse en la Ilustración 35, que presenta la diferencia de ambos módulos. Ahí se puede observar que la curva azul, la que representa la diferencia entre las pérdidas de la línea con el termistor y las pérdidas del termistor en sí, a pesar de las ligeras oscilaciones, es casi lineal, con una pendiente aproximada de:

$$\frac{(10 + 4) [dB]}{(2.6 - 1) [Ghz]} = \frac{14 [dB]}{1.6 [Ghz]}$$

(4). Pendiente del módulo de la diferencia de parámetros S_{21} del termistor V2103 a 21 grados y la línea de transmisión con dicho termistor a la misma temperatura

Dicha pendiente, de 14 dB por 1.6GHz, también es mayor a la obtenida en la ecuación (2), pero menor a la obtenida en (3).

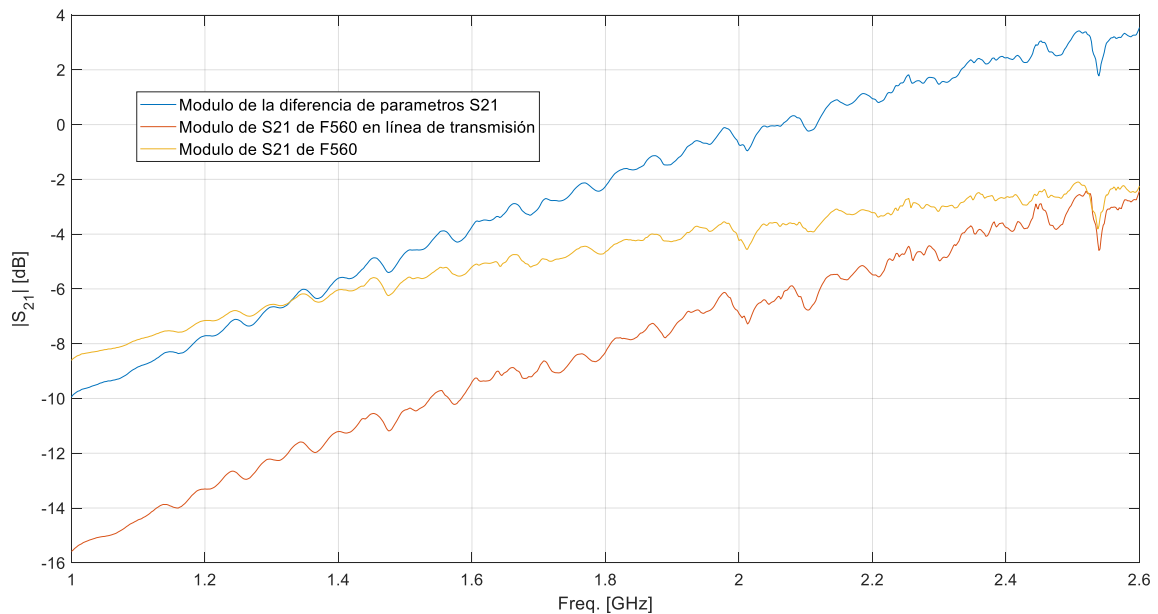


Ilustración 35. Caracterización de la línea de transmisión con el termistor V2103, del termistor V2103 y la diferencia de sus S_{21} a 21°C

4.1.2.4. Conclusiones

Sin embargo, aunque las pérdidas a bajas frecuencias aumenten, se sigue conservando el orden de los termistores en función de cuál tiene más pérdidas (todo analizado a 21°C):

- F360. Durante la caracterización del termistor, a 1GHz presentaba pérdidas de 9dB, pero a la hora de introducirlo a la línea de transmisión aumenta a 18dB, el doble. Para 2.6GHz, las pérdidas del termistor eran de 3dB, pero con la línea de transmisión pasan a ser 4dB.
- V2103. Durante la caracterización del termistor, a 1GHz presentaba pérdidas de 8dB, pero a la hora de introducirlo a la línea de transmisión aumenta a 16dB, el doble. Para 2.6GHz, las pérdidas tanto para el termistor como para la línea de transmisión son de 3dB.
- F560. Durante la caracterización del termistor, a 1GHz presentaba pérdidas de 6dB, pero a la hora de introducirlo a la línea de transmisión aumenta a 12, el doble. El único caso aislado donde el termistor presentaba 1dB de pérdidas para 2.6GHz, pero con la línea de transmisión se obtiene “ganancia” de 4dB, pero como se ha comentado, esto es un error de simulación ya que un termistor no puede presentar ganancia.

También es curioso observa que se mantiene el orden de los termistores si analizar las pendientes de las diferencias entre caracterizaciones “termistor-línea de transmisión con termistor” calculadas previamente. El termistor F560, el cual presenta menos pérdidas, es aquel que tiene una pendiente mayor, ecuación (3). El termistor V2103, el segundo con más pérdidas tiene una pendiente ligeramente inferior a la anterior, ecuación (4). Y el termistor con mayores pérdidas, F360, tiene una pendiente menor a las demás, ecuación (2).

Se puede concluir que mayores pérdidas del termistor implican que a la hora de implementarlo en el programa de simulación las diferencias serán menores a un termistor con menores pérdidas.

Por último, comentar que la línea de transmisión con los termistores presenta mayores pérdidas a las frecuencias bajas dentro del rango de estudio y a las frecuencias altas se acaban equiparando, a excepción del termistor F560.

4.2. Simulación de un resonador SRR

Partiendo del circuito con la línea de transmisión sin la abertura se añadirán los elementos resonadores como en [11]. Para obtener la frecuencia de resonancia dentro del margen de estudio se realizará una redimensión en frecuencia de las dimensiones de los anillos resonadores.

El resonador se va a caracterizar analizando:

- La frecuencia de resonancia, refiriéndose como frecuencia de resonancia para la cual el resonador presenta mayores pérdidas.
- El ancho de banda cuando la reflexión tiene 3dB por encima del mínimo

4.2.1. Medio resonador SRR

El diseño final del resonador SRRR consiste en dos anillos resonadores a ambos lados de las líneas de transmisión, pero primero se va a comprobar si con dos anillos a un lado de la línea es suficiente, es decir, “medio” resonador SRR, como en la Ilustración 36. Las especificaciones se muestran en la Tabla 5.

En la Ilustración 37 e Ilustración 38 se muestra la vista de planta y alzado de “medio” resonador SRR, respectivamente.

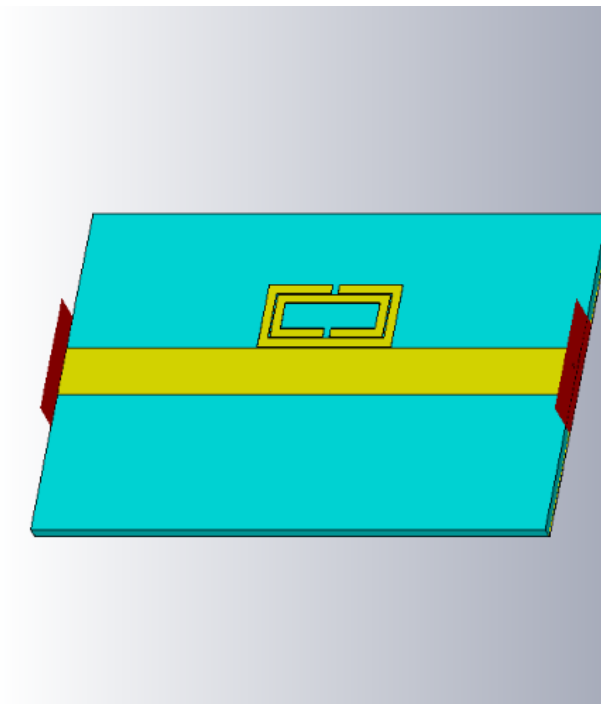


Ilustración 36. Medio resonador SRR, vista de perspectiva

Parte de la placa	Especificación	Valor representativo	Descripción
Base	Anchura: W_x	40 mm	ϵ (del material) = 1.55 μ (del material) = 1 Tangente del ángulo de pérdidas = 0.0162
	Altura: W_y	60 mm	
	Espesor: h	1.55 mm	
Línea de transmisión	Anchura: W_s	5.9 mm	Material: cobre
	Altura: W_y	60 mm	
	Espesor: t	0.035 mm	
Plano de masa	Anchura: W_x	40 mm	Material: cobre
	Altura: W_y	60 mm	
	Espesor: t	0.035 mm	
Puertos de guía onda	Anchura: P_a	$2 * (\frac{W_s}{2} + 4)$ mm	
	Altura: P_h	$(h + t + 4)$ mm	
Resonador	Anchura de la línea del resonador: c	0.8·1.3 mm	Material: cobre
	Espesor de la línea: t	0.035 mm	
	Separación: d	0.2 mm	
	Abertura en cada anillo: g	0.8 mm	
	Anchura del anillo grande: w	6·1.3 mm	
	Longitud del anillo grande: l	12·1.3 mm	

Tabla 5. Especificaciones de medio resonador SRR

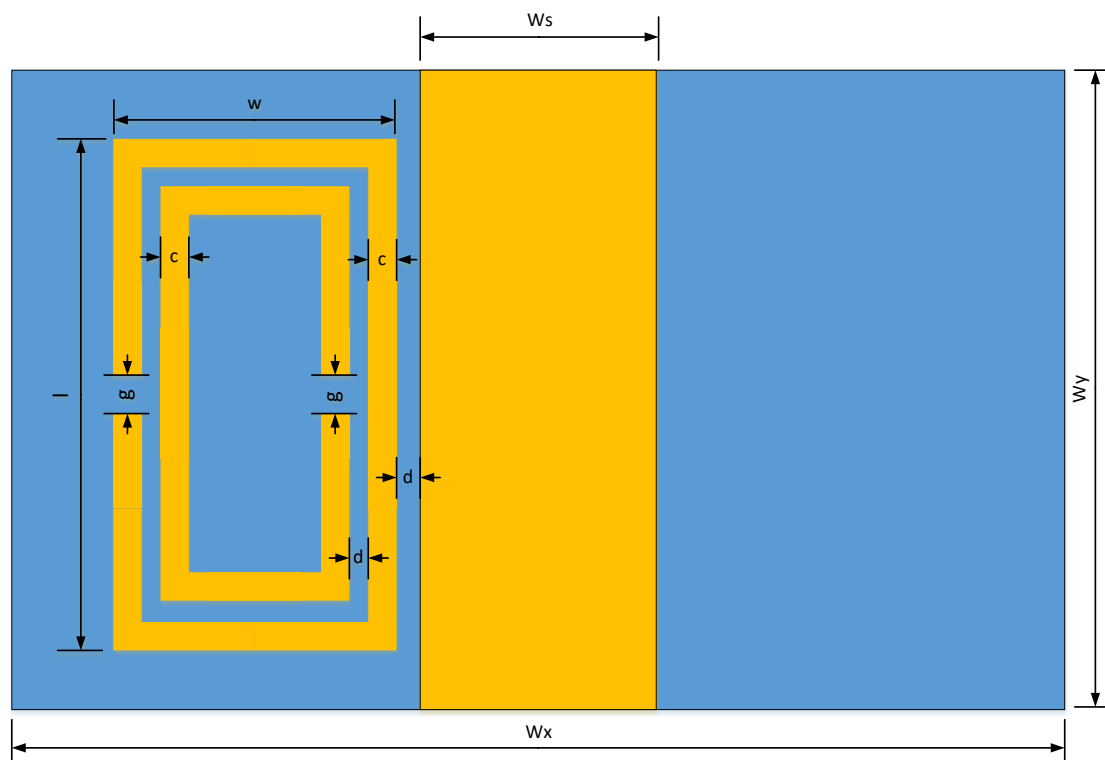


Ilustración 37. Medio resonador SRR, vista de planta

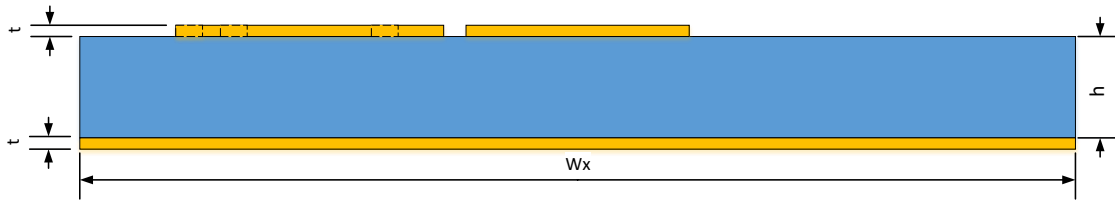


Ilustración 38. Medio resonador SRR, vista de alzado

En la Ilustración 39 se puede ver los parámetros S_{21} del medio resonador SRR, donde se aprecia una frecuencia de resonancia claramente definida, mientras que para el resto de las frecuencias no presenta casi pérdidas, lo que indica que un par de anillos a un lado de la línea de transmisión son suficientes para generar resonancias. La Tabla 6 muestra la caracterización de su respuesta en frecuencia.

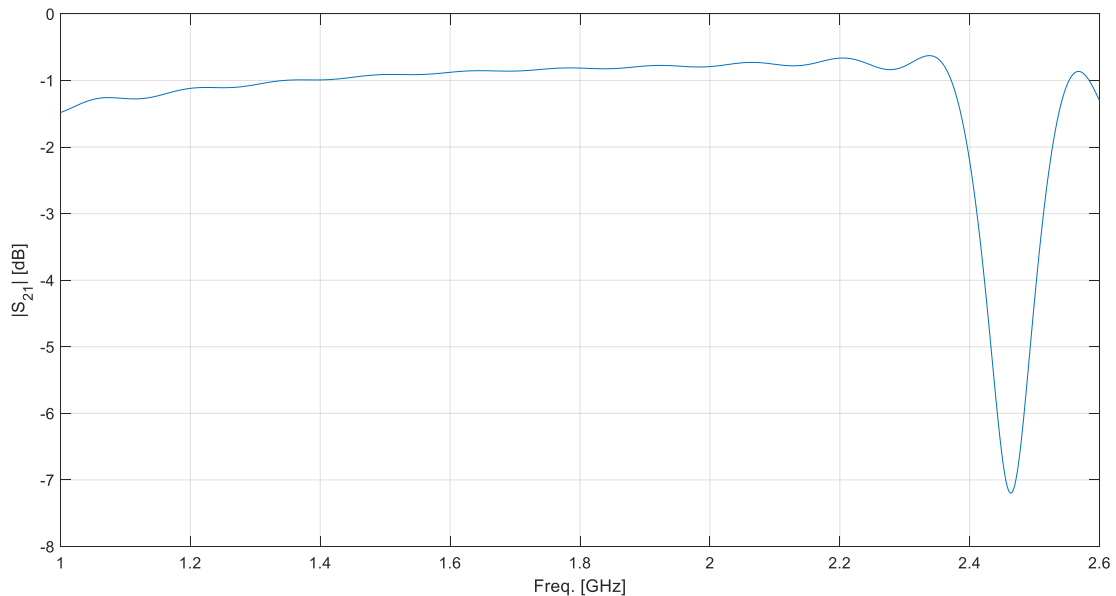


Ilustración 39. Parámetros S_{21} de medio resonador SRR.

Frecuencia de resonancia	Ancho de banda cuando la reflexión tiene 3dB por encima del mínimo
2.464 GHz	75.2 MHz

Tabla 6. Caracterización de la respuesta en frecuencia de medio resonador SRR

4.2.2. Un resonador SRR completo

Se ha comprobado que medio resonador SRR es suficiente para generar resonancia. A continuación, se analizará si hay variaciones respecto a éste en la respuesta en frecuencia de un resonador SRR completo.

Partiendo del medio resonador SRR, se hará otro anillo simétrico respecto al centro de la línea de transmisión, como en la Ilustración 40.

En la Ilustración 41 e Ilustración 42 se muestra la vista de planta y alzado del resonador SRR.

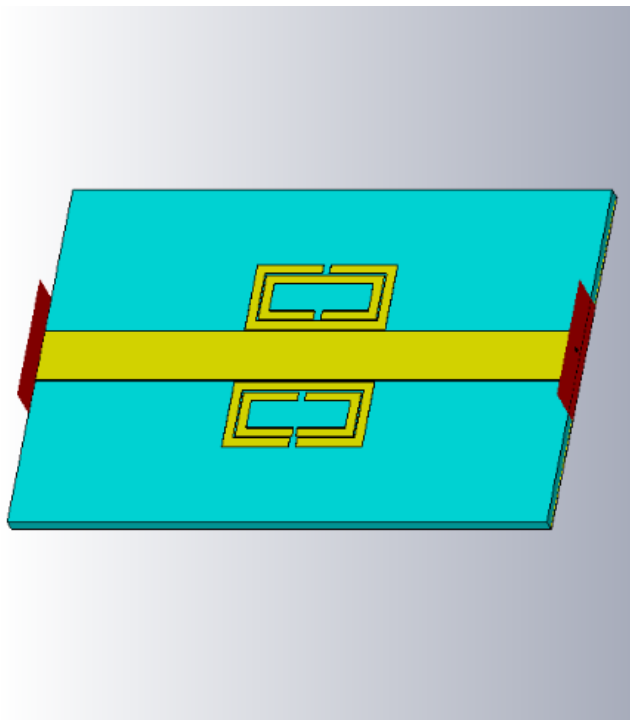


Ilustración 40. Resonador SRR, vista de perspectiva

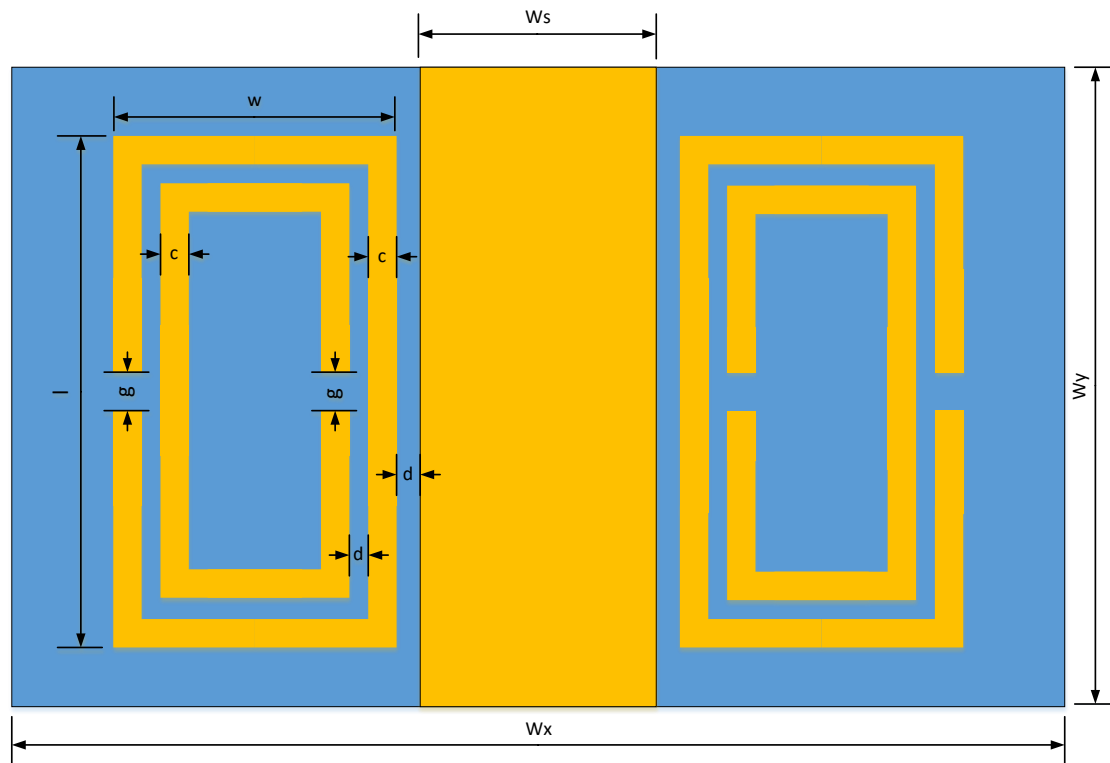


Ilustración 41. Resonador SRR completo, vista de planta

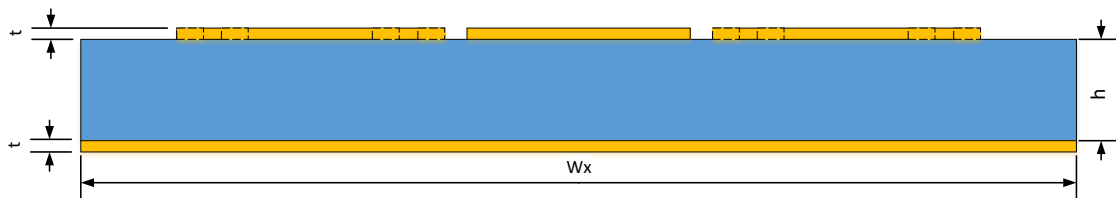


Ilustración 42. Resonador SRR completo, vista de alzado

En la Ilustración 43 se observa el módulo del parámetro S_{21} del resonador. Se puede apreciar que para un estrecho margen de frecuencias resuena, mientras que para el resto se comporta prácticamente sin pérdidas.

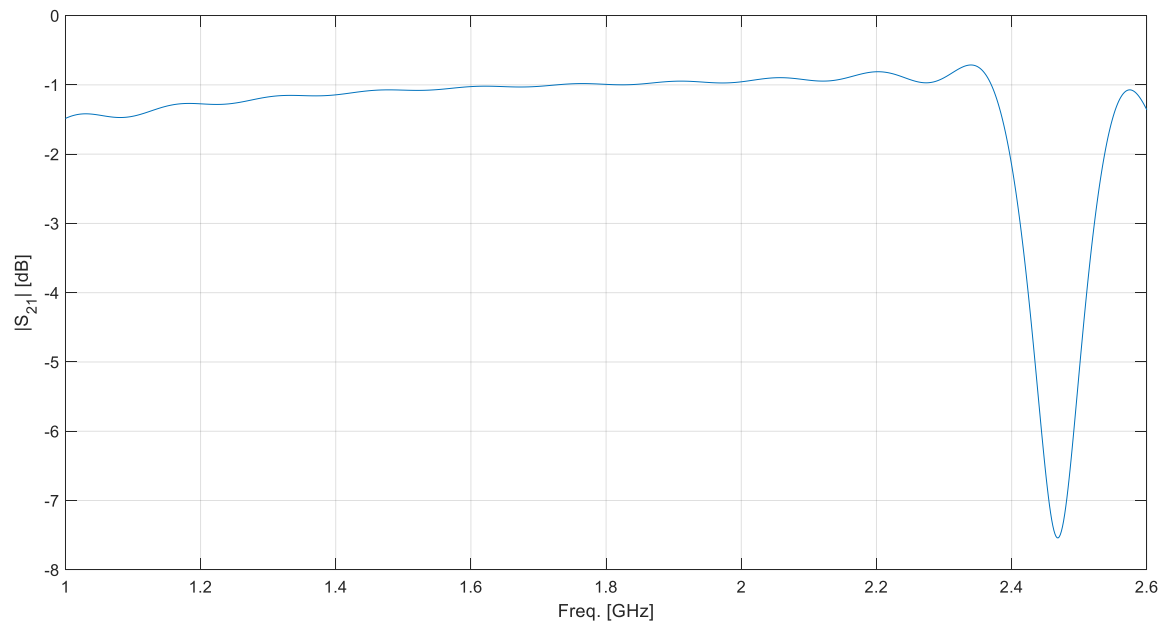


Ilustración 43. Módulo del parámetro S_{21} del resonador SRR

Frecuencia de resonancia	Ancho de banda cuando la reflexión tiene 3dB por encima del mínimo
2.4688 GHz	75.2 MHz

Tabla 7. Caracterización de la respuesta en frecuencia del resonador SRR

Comparando la respuesta en frecuencia de un resonador SRR completo con medio resonador SRR, Tabla 7 y Tabla 6, respectivamente, se puede concluir que son prácticamente iguales en la zona de resonancia.

4.2.3. Abertura en un anillo del resonador SRRR

Puesto que los anillos son lo que generan la resonancia, se ha pensado que, si en medio de uno de los anillos se introduce un termistor, que se trata de un elemento resistivo que varía su valor nominal en función de la temperatura, éste podría variar el equivalente circuital del resonador y con ello variando su frecuencia de resonancia o su respuesta en frecuencia.

En este trabajo se ha estudiado el comportamiento del resonador creado una abertura en el anillo interno de la parte derecha, como muestra la Ilustración 44. Las especificaciones del resonador SRR con una abertura en el anillo interno están indicadas en la Tabla 8. Tras crear la abertura se definen dos puertos de guía ondas en dicha abertura.

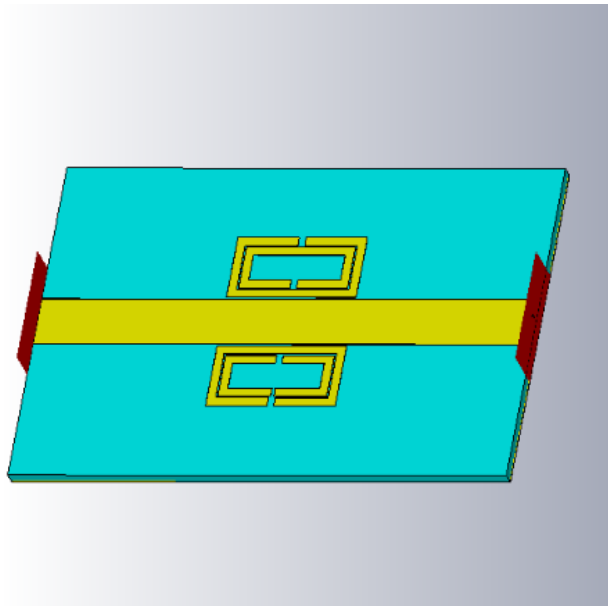


Ilustración 44. Resonador SRR con abertura en un anillo interno, vista de perspectiva.

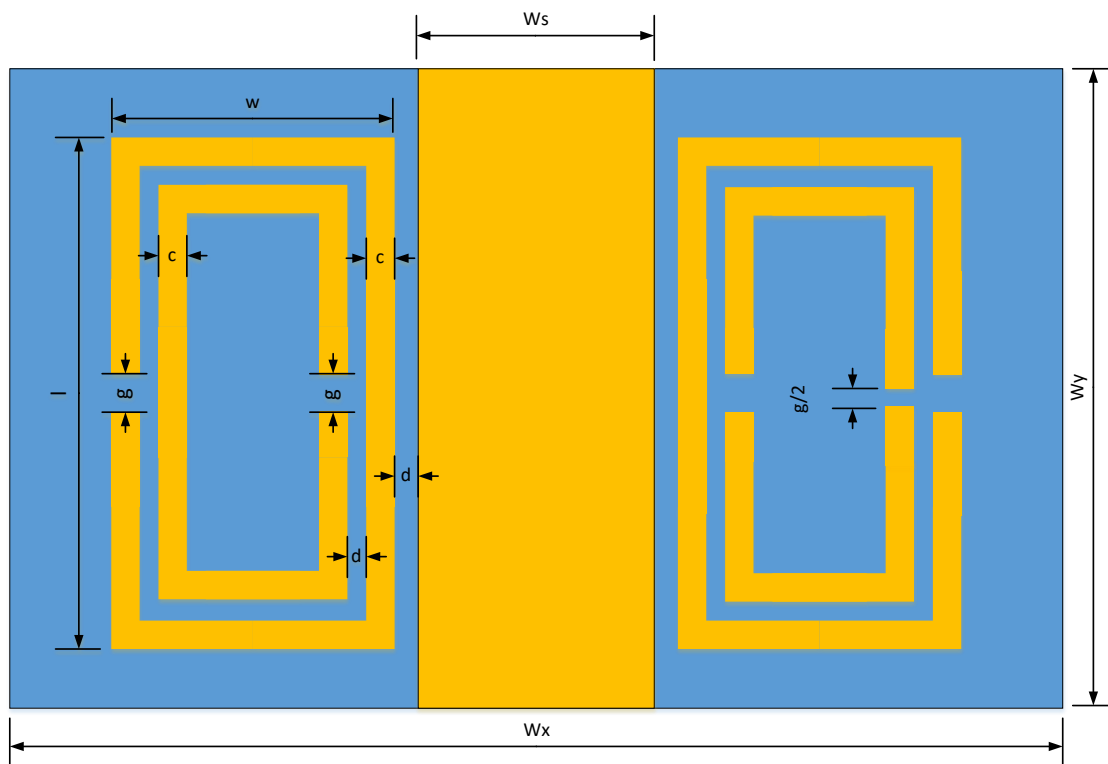


Ilustración 45. Resonador SRR con una abertura un el anillo interno, vista de planta

Parte de la placa	Especificación	Valor representativo	Descripción
Base	Anchura: W_x	40 mm	ϵ (del material) = 1.55 μ (del material) = 1 Tangente del ángulo de pérdidas = 0.0162
	Altura: W_y	60 mm	
	Espesor: h	1.55 mm	
Línea de transmisión	Anchura: W_s	5.9 mm	Material: cobre
	Altura: W_y	60 mm	
	Espesor: t	0.035 mm	
Plano de masa	Anchura: W_x	40 mm	Material: cobre
	Altura: W_y	60 mm	
	Espesor: t	0.035 mm	
Puertos de guía onda	Anchura: P_a	$2 * (\frac{W_s}{2} + 4)$ mm	
	Altura: P_h	$(h + t + 4)$ mm	
Resonador	Anchura de la línea del resonador: c	0.8·1.3 mm	Material: cobre
	Espesor de la línea: t	0.035 mm	
	Separación: d	0.2 mm	
	Abertura en cada anillo: g	0.8 mm	
	Anchura del anillo grande: w	6·1.3 mm	
	Longitud del anillo grande: l	12·1.3 mm	
Abertura	Anchura: $\frac{g}{2}$	0.4 mm	

Tabla 8. Especificaciones del resonador SRR completo con abertura en un anillo interno

En la Ilustración 46 se observa la respuesta en frecuencia del resonador con la abertura, manteniendo las dimensiones del resonador SRR completo que se tenía. La caracterización de este resonador está indicada en la Tabla 9. Comparándolo con la Ilustración 43, la cual muestra los parámetros S_{21} del resonador SRR completo, se aprecia que la frecuencia de resonancia se ha desplazado a unas frecuencias superiores. Haciendo una comparación numérica, la frecuencia de resonancia del resonador con la abertura es 2.6125 GHz, es decir, 150 MHz mayor que en el caso en el cual el resonador no la tenía, Tabla 7. El ancho de banda de 3dB sobre la frecuencia de resonancia es 67.5 MHz, por los 75.2 MHz del caso anterior, es decir, 7 MHz menos. Esto confirma que el resonador es más imperfecto si se realiza una abertura en él.

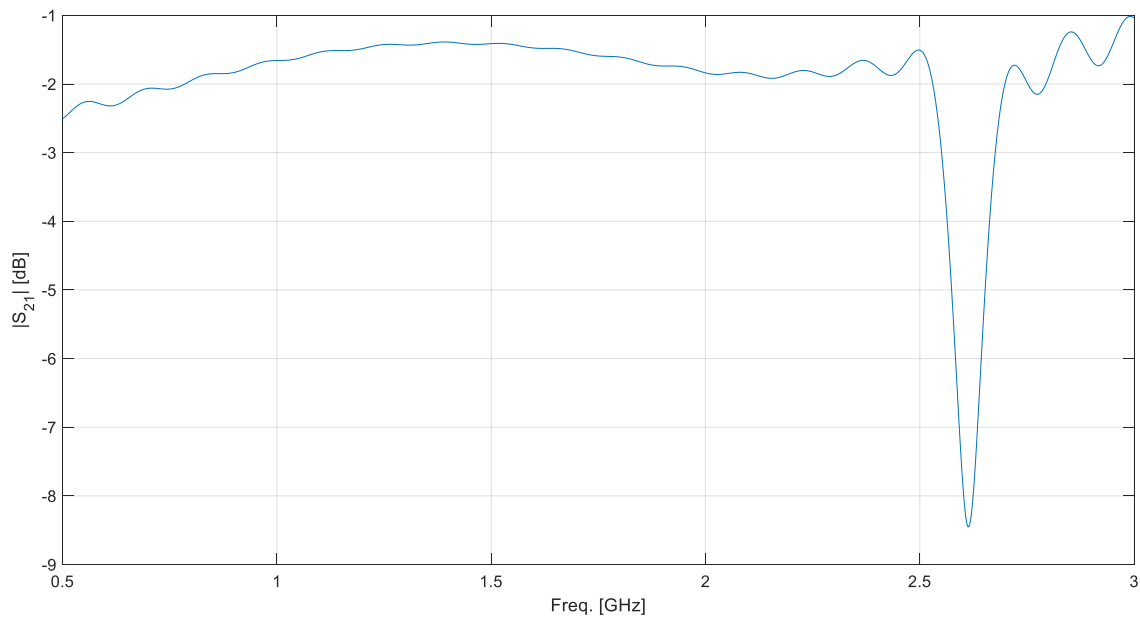


Ilustración 46. Módulo del parámetro S_{21} del resonador SRR con una abertura en un anillo interno

Frecuencia de resonancia	Ancho de banda cuando la reflexión tiene 3dB por encima del mínimo
2.6125 GHz	67.5 MHz

Tabla 9. Caracterización de la respuesta en frecuencia del resonador SRR con abertura en un anillo interno

Puesto que la frecuencia de resonancia obtenida es superior al rango de estudio y al margen de frecuencias libres comentado anteriormente, se va a redimensionar el tamaño del circuito resonador para disminuir la frecuencia de resonancia. La nueva dimensión de la línea de los anillos está representada en la Tabla 10. Los resultados se observan la Ilustración 47.

Parte de la placa	Especificación	Valor representativo
Resonador	Anchura de la línea del resonador: c	0.8 · 1.4 mm
	Anchura del anillo grande: w	6 · 1.4 mm
	Longitud del anillo grande: l	12 · 1.4 mm

Tabla 10. Especificaciones para disminuir la frecuencia de resonancia del resonador SRR con una abertura en un anillo interno base

En la Ilustración 47 se observa que la frecuencia de resonancia ha disminuido. La caracterización de dicha respuesta en frecuencia se encuentra en la Tabla 11. La frecuencia de resonancia es 2.42GHz y el ancho de banda de 3dB sobre la frecuencia de resonancia es 50MHz. Si comparar estos resultados con los obtenidos con el mismo resonador pero cuyo factor de escala era

ligeramente menor, Ilustración 46, la frecuencia de resonancia es 20 MHz menor y el ancho de banda de 3dB es 17.5 MHz menor también en este caso.

Con este escalado del resonador se ha obtenido una frecuencia de resonancia dentro del rango deseado.

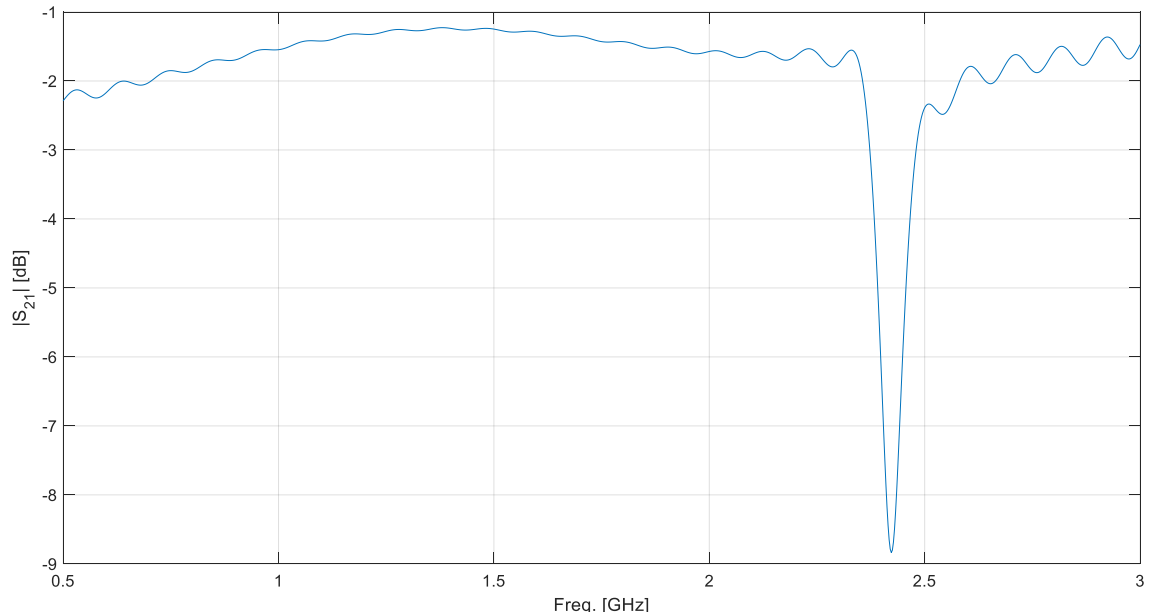


Ilustración 47. Módulo del parámetro S_{21} del resonador SRR con una abertura en un anillo interno después de redimensionar el resonador

Frecuencia de resonancia	Ancho de banda cuando la reflexión tiene 3dB por encima del mínimo
2.4225 GHz	50 MHz

Tabla 11. Caracterización de la respuesta en frecuencia del resonador SRR con abertura en un anillo interno después de redimensionar el resonador

4.3. Integración de los termistores en el resonador

En este punto se cerrará la abertura creada en el anillo interno derecho del resonador con los termistores analizados en todo rango de temperaturas, F360, F560 y V2103.

4.3.1. Termistor F360 (100K Ω)

4.3.1.1. Análisis para el rango de temperaturas de 21-30°C

En la Ilustración 48 se muestra el módulo de los parámetros S_{21} para el resonador con el termistor F360 en la abertura en el rango de 21-30°C. A simple vista no se pueden observar diferencias en la respuesta en frecuencia del resonador. Para comprobar si hay variaciones en el comportamiento, se obtiene la frecuencia de resonancia y el ancho de banda de 3dB que hay sobre la misma. Viene recogido en la Tabla 12.

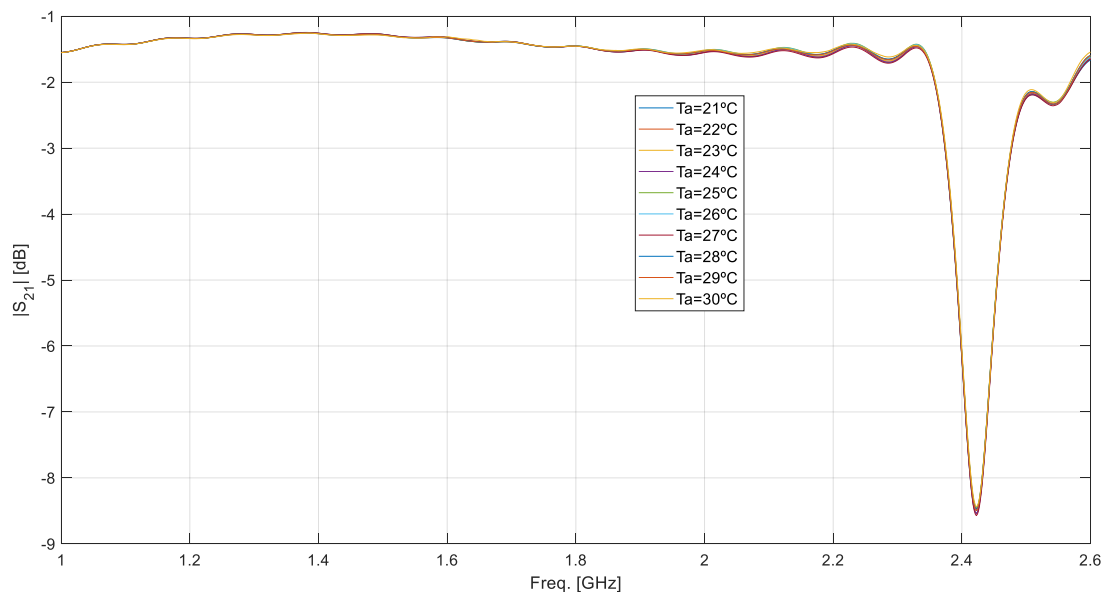


Ilustración 48. Módulo de los parámetros S_{21} para el resonador con el termistor F360 en la abertura. Rango de 21-30°C

Temperatura (°C)	Frecuencia de resonancia (GHz)	Ancho de banda de 3 dB (MHz)
21	2.4224	52.8
22	2.4224	52.8
23	2.4224	52.8
24	2.4224	52.8
25	2.4224	52.8
26	2.4224	52.8
27	2.4224	52.8
28	2.4224	52.8
29	2.4224	52.8
30	2.4224	52.8

Tabla 12. Caracterización de las frecuencias y ancho de banda de 3 dB para el resonador SRR con el termistor F360 en la abertura del anillo interno para el rango de temperaturas 21-30°C

De la Tabla 12 se puede concluir que no hay variación alguna ni en la frecuencia de resonancia ni en el ancho de banda de 3 dB para el rango de temperaturas 21-30°C.

4.3.1.1. Análisis para el rango de temperaturas de 30-70°C

En la Ilustración 49 se muestra el módulo de los parámetros S_{21} para el resonador con el termistor F360 en la abertura en el rango de 30-70°C. No se observan diferencias en la respuesta en frecuencia del resonador. La caracterización de la respuesta en frecuencia se muestra en la Tabla 13.

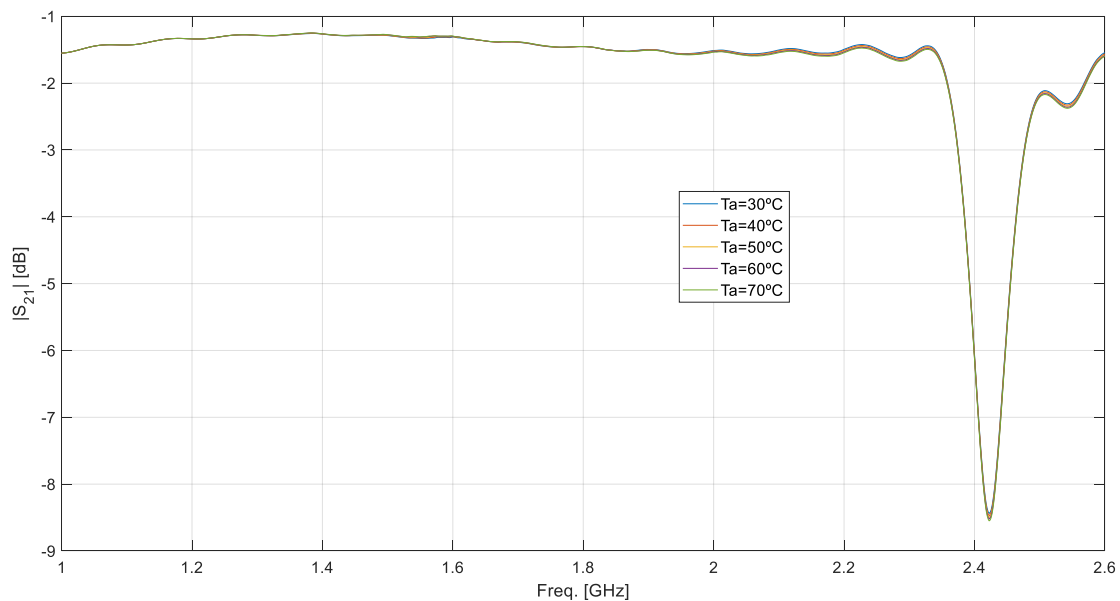


Ilustración 49. Módulo de los parámetros S_{21} para el resonador con el termistor F360 en la abertura. Rango de 30-70°C

Temperatura (°C)	Frecuencia de resonancia (GHz)	Ancho de banda de 3 dB (MHz)
30	2.4224	52.8
40	2.4224	52.8
50	2.4224	52.8
60	2.4224	52.8
70	2.4224	52.8

Tabla 13. Caracterización de las frecuencias y ancho de banda de 3 dB para el resonador SRR con el termistor F360 en la abertura del anillo interno para el rango de temperaturas 30-70°C

Se puede concluir observando la Tabla 13 que no hay cambios en la respuesta en frecuencia del resonador introduciéndole un termistor F360 en la abertura.

4.3.2. Termistor F560 (47K Ω)

4.3.2.1. Análisis para el rango de temperaturas de 21-30°C

En la Ilustración 50 se muestra el módulo de los parámetros S_{21} para el resonador con el termistor F560 en la abertura en el rango de 21-30°C. La caracterización de la respuesta en frecuencia está recogida en la Tabla 14.

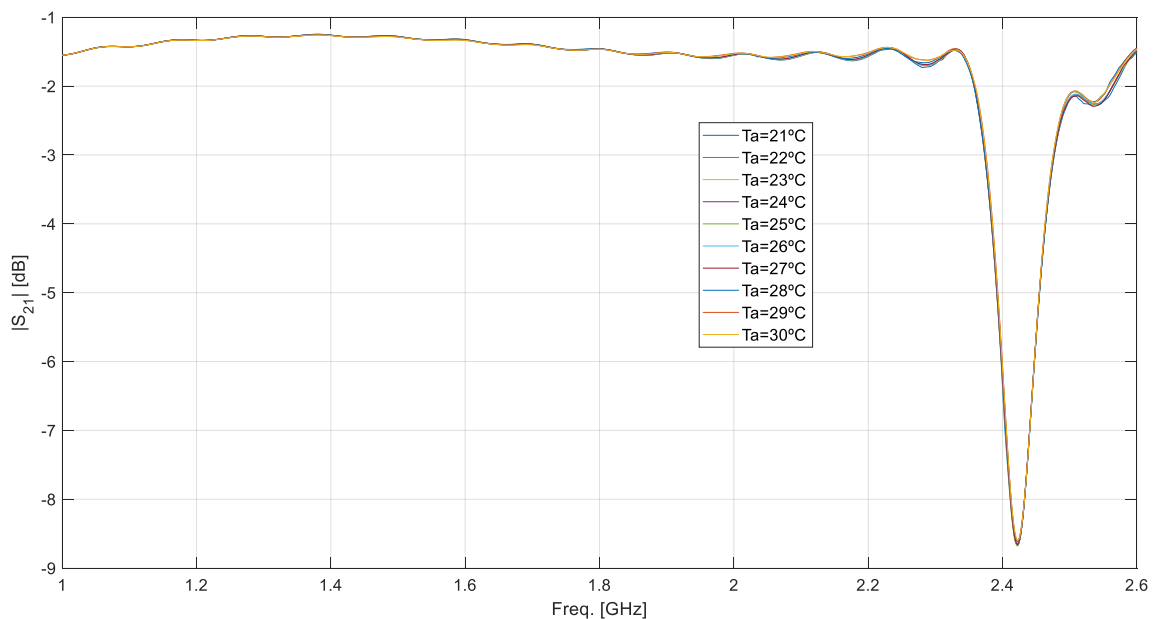


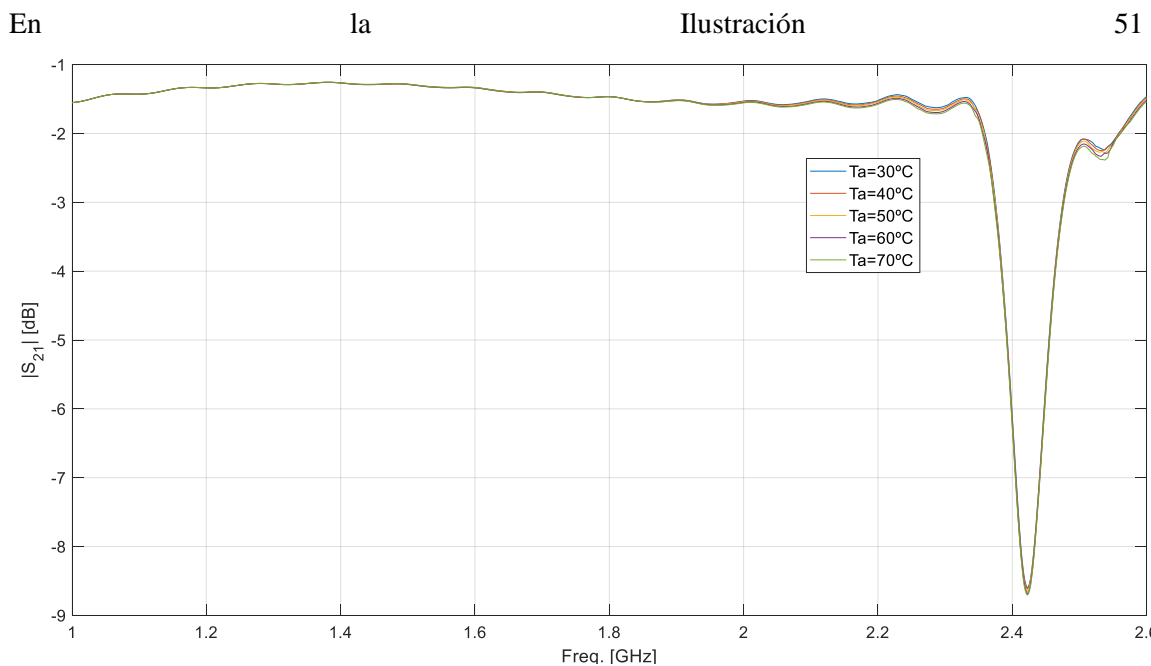
Ilustración 50. Módulo de los parámetros S_{21} para el resonador con el termistor F560 en la abertura. Rango de 21-30°C

Temperatura (°C)	Frecuencia de resonancia (GHz)	Ancho de banda de 3 dB (MHz)
21	2.4224	52.8
22	2.4224	52.8
23	2.4224	52.8
24	2.4224	52.8
25	2.4224	52.8
26	2.4224	52.8
27	2.4224	52.8
28	2.4224	52.8
29	2.4224	51.2
30	2.4224	51.2

Tabla 14. Caracterización de las frecuencias y ancho de banda de 3 dB para el resonador SRR con el termistor V2103 en la abertura del anillo interno para el rango de temperaturas 21-30°C

De la Tabla 14 podemos extraer que hay una ligera disminución en el ancho de banda de 3 dB para 29-30 °C. La frecuencia de resonancia no varía en función de la temperatura.

4.3.2.2. Análisis para el rango de temperaturas de 30-70°C



se muestra el módulo de los parámetros S_{21} para el resonador con el termistor F560 en la abertura en el rango de 30-70°C. La caracterización de la respuesta en frecuencia está detallada en la Tabla 15.

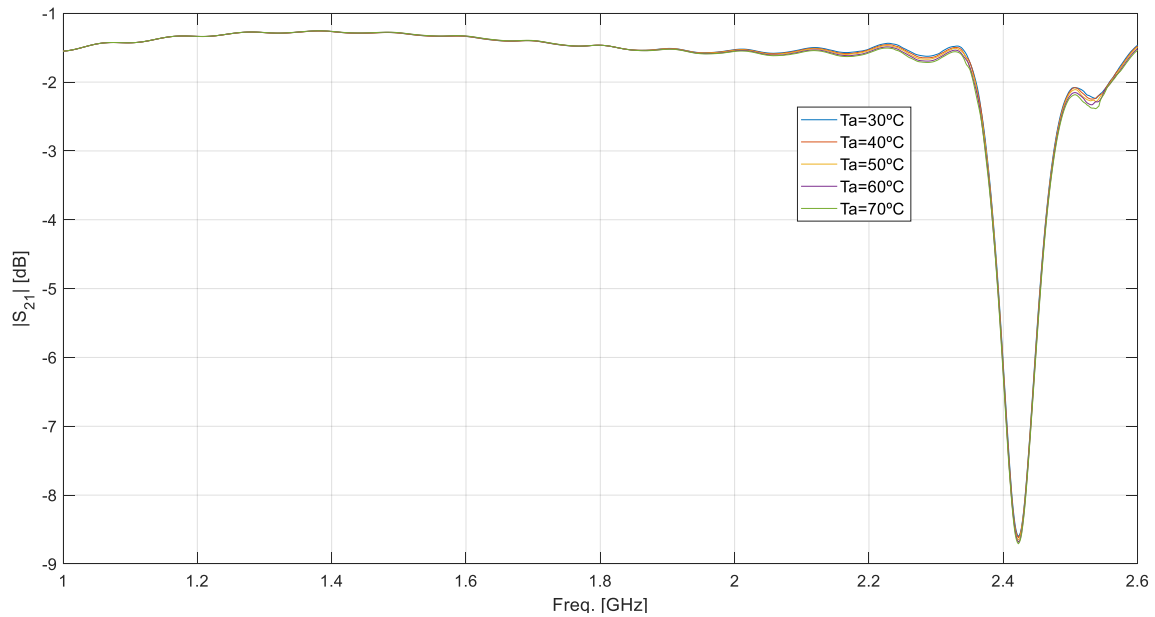


Ilustración 51. Módulo de los parámetros S_{21} para el resonador con el termistor F560 en la abertura. Rango de 30-70°C

Temperatura (°C)	Frecuencia de resonancia (GHz)	Ancho de banda de 3 dB (MHz)
30	2.4224	52.8
40	2.4224	52.8
50	2.4224	52.8
60	2.4224	52.8
70	2.4224	52.8

Tabla 15. Caracterización de las frecuencias y ancho de banda de 3 dB para el resonador SRR con el termistor F560 en la abertura del anillo interno para el rango de temperaturas 30-70°C

Se puede concluir observando la Tabla 15 que no hay cambios en la respuesta en frecuencia del resonador introduciéndole un termistor F560 en la abertura

4.3.3. Termistor V2103 (10K Ω)

4.3.3.1. Análisis para el rango de temperaturas de 21-30°C

En la Ilustración 52 se muestra el módulo de los parámetros S_{21} para el resonador con el termistor V2103 en la abertura en el rango de 21-30°C. La caracterización de la respuesta en frecuencia está detallada en la Tabla 16.

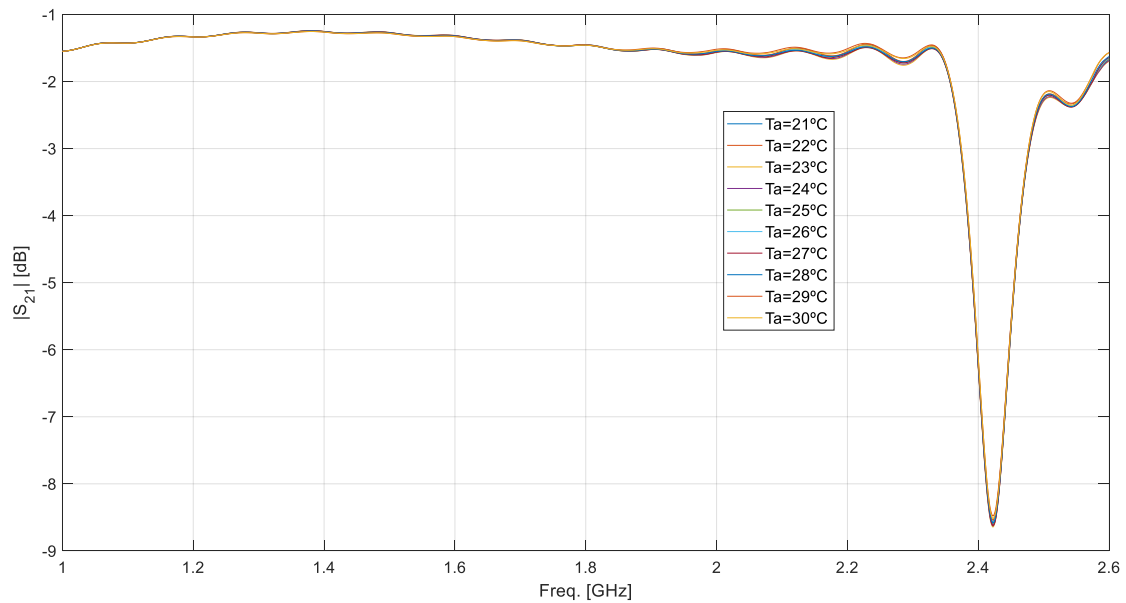


Ilustración 52. Módulo de los parámetros S_{21} para el resonador con el termistor V2103 en la abertura. Rango de 21-30°C

Temperatura (°C)	Frecuencia de resonancia (GHz)	Ancho de banda de 3 dB (MHz)
21	2.4224	52.8
22	2.4224	51.2
23	2.4224	51.2
24	2.4224	52.8
25	2.4224	52.8
26	2.4224	52.8
27	2.4224	52.8
28	2.4224	51.2
29	2.4224	51.2
30	2.4224	49.6

Tabla 16. Caracterización de las frecuencias y ancho de banda de 3 dB para el resonador SRR con el termistor F560 en la abertura del anillo interno para el rango de temperaturas 21-30°C

De la Tabla 16 podemos extraer que sí hay ligeras variaciones en el ancho de banda de 3 dB para ciertas temperaturas, pero no siguen ninguna lógica directa o inversamente proporcional a la temperatura.

4.3.3.2. Análisis para el rango de temperaturas de 30-70°C

En la Ilustración 53 se muestra el módulo de los parámetros S_{21} para el resonador con el termistor V2103 en la abertura en el rango de 30-70°C. La caracterización de la respuesta en frecuencia está detallada en la Tabla 17.

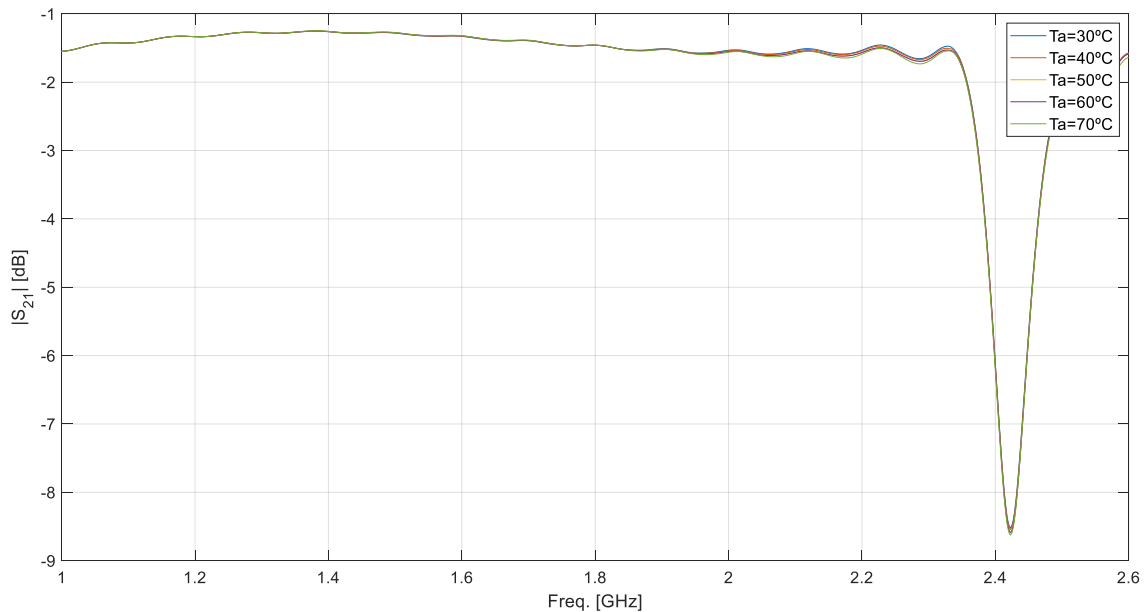


Ilustración 53. Módulo de los parámetros S_{21} para el resonador con el termistor V2103 en la abertura. Rango de 30-70°C

Temperatura (°C)	Frecuencia de resonancia (GHz)	Ancho de banda de 3 dB (MHz)
30	2.4224	52.8
40	2.4224	52.8
50	2.4224	52.8
60	2.4224	52.8
70	2.4224	52.8

Tabla 17. Caracterización de las frecuencias y ancho de banda de 3 dB para el resonador SRR con el termistor V2103 en la abertura del anillo interno para el rango de temperaturas 30-70°C

Se puede concluir observando la Tabla 17 que no hay cambios en la respuesta en frecuencia del resonador introduciéndole un termistor V2103 en la abertura

4.3.4. Conclusiones

Observando los comportamientos del resonador con tres termistores con distintos valores nominales, 10K Ω , 47K Ω y 100K Ω , colocados en una abertura de uno de los anillos internos queda probado que las características del resonador no varían, ni su frecuencia de resonancia ni su ancho de banda de 3 dB.

4.4. Segundo enfoque

Visto que no da resultados introducir un termistor en una abertura de uno de los anillos internos, se ha pensado qué ocurriría si uno de los anillos internos se cerrase por completo por medio de uno de los termistores.

En el programa de simulación, la forma de conseguir insertar los termistores en la abertura propia que tienen los anillos internos del resonador es definiendo dos puertos de guía ondas en dichas aberturas, de la misma manera que se hizo con el resto de los puertos definidos previamente. La Ilustración 54 e Ilustración 55 se muestra una vista de perspectiva y alzado del resonador, respectivamente. Las especificaciones están recogidas en la Tabla 18.

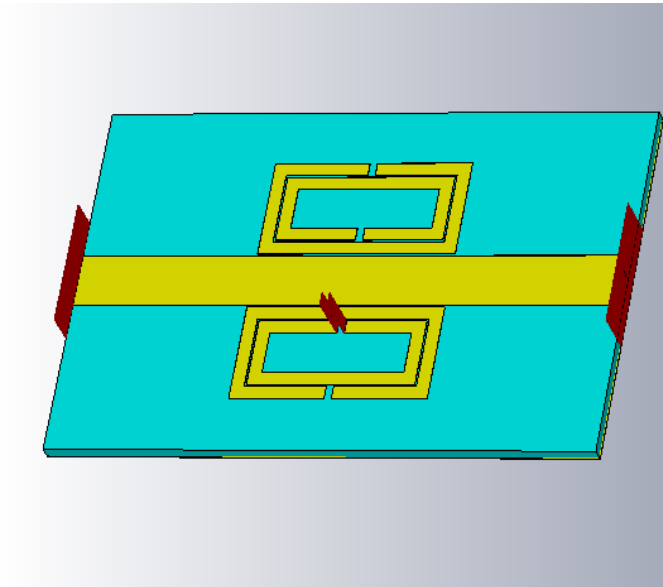


Ilustración 54. Resonador SRR con puerto de guía ondas para cerrar un anillo interno, vista de perspectiva

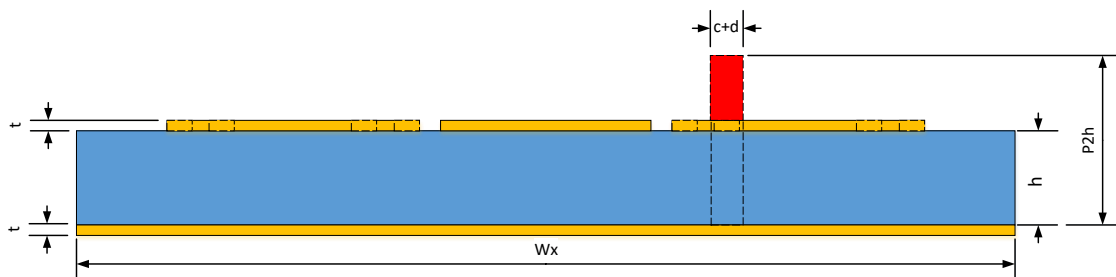


Ilustración 55. Resonador SRR con puerto de guía ondas para cerrar un anillo interno, vista de alzado

Parte de la placa	Especificación	Valor representativo	Descripción
Base	Anchura: W_x	40 mm	ϵ (del material) = 1.55 μ (del material) = 1 Tangente del ángulo de pérdidas = 0.0162
	Altura: W_y	60 mm	
	Espesor: h	1.55 mm	
Línea de transmisión	Anchura: W_s	5.9 mm	Material: cobre
	Altura: W_y	60 mm	
	Espesor: t	0.035 mm	
Plano de masa	Anchura: W_x	40 mm	Material: cobre
	Altura: W_y	60 mm	
	Espesor: t	0.035 mm	
Puertos de guía onda de la línea de transmisión	Anchura: P_a	$2 * (\frac{W_s}{2} + 4)$ mm	
	Altura: P_h	$(h + t + 4)$ mm	
Puertos de guía onda en el anillo interno del resonador	Altura: P_{h2}	$(h + t + 6)$ mm	
	Anchura: $c+d$	$0.8 \cdot 1.4 + 0.2$ mm	
Resonador	Anchura de la línea del resonador: c	$0.8 \cdot 1.4$ mm	Material: cobre
	Espesor de la línea: t	0.035 mm	
	Separación: d	0.2 mm	
	Abertura en cada anillo: g	0.8 mm	
	Anchura del anillo grande: w	$6 \cdot 1.4$ mm	
	Longitud del anillo grande: l	$12 \cdot 1.4$ mm	

Tabla 18. Especificaciones del resonador SRR con puertos de guía ondas para cerrar un anillo interno

La representación de los parámetros S_{21} del resonador en cuestión, cortocircuitando ambos puertos de guía ondas definidos en el anillo, se encuentra en la Ilustración 56. Se observa que aparece una segunda frecuencia de resonancia, pero esta se sale del rango de estudio. La segunda frecuencia de resonancia, a una frecuencia mayor que con la que se estaba trabajando, es debida al nuevo elemento resonador que se ha generado cortocircuitando el anillo interno, es decir, se ha modificado las características de uno de los elementos que causaban resonancia.

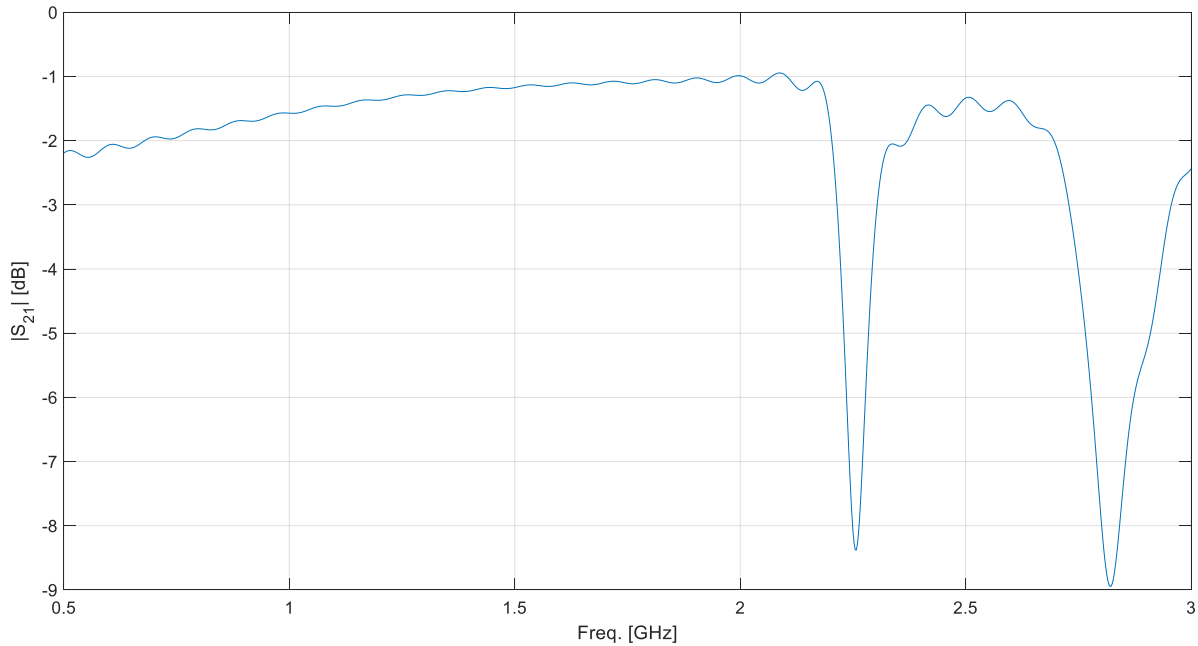


Ilustración 56. Módulo de los parámetros S_{21} para el resonador SRR con puertos de guía ondas para cerrar un anillo interno

La caracterización de la Ilustración 54 se encuentra en la Tabla 19. La frecuencia de resonancia más baja se debe estar generando con el par de anillos resonadores que no se han modificado ya que es muy cercana a los 2.4 GHz con los que se estaba trabajando. Comparando ambas resonancias, la debida a los anillos resonadores modificados abarca más ancho de banda, mírese el ancho de banda de 3 dB. Sin embargo, debido a que los resultados obtenidos se encuentran fuera del rango de frecuencias de estudio, se procede a redimensionar los elementos resonadores, haciéndolos más grandes, para disminuir la frecuencia de resonancia de 2.82 GHz. La Tabla 20 muestra los cambios a realizar.

Frecuencia de resonancia	Ancho de banda cuando la reflexión tiene 3dB por encima del mínimo
2.2575 GHz	47.5 MHz
2.82 GHz	92.5 MHz

Tabla 19. Caracterización de la respuesta en frecuencia del resonador SRR con puertos de guía ondas para cerrar un anillo interno

Parte de la placa	Especificación	Valor representativo
Resonador	Anchura de la línea del resonador: c	0.8 · 1.8 mm
	Anchura del anillo grande: w	6 · 1.8 mm
	Longitud del anillo grande: l	12 · 1.8 mm

Tabla 20. Especificaciones para disminuir la frecuencia de resonancia del resonador SRR puertos de guía ondas para cerrar un anillo interno

La representación de la respuesta en frecuencia del resonador SRR con puertos de guía ondas para cerrar un anillo interno, después de redimensionarlo, se encuentra en la Ilustración 57, y la caracterización en la Tabla 21. Después redimensionar el resonador, las frecuencias de resonancia se encuentran en el rango de estudio, pero dichos cambios también han provocado que se reduzca en ambas resonancias el ancho de banda de 3 dB sobre la frecuencia de resonancia. A partir de este punto este es el resonador como el que se va a seguir la simulación.

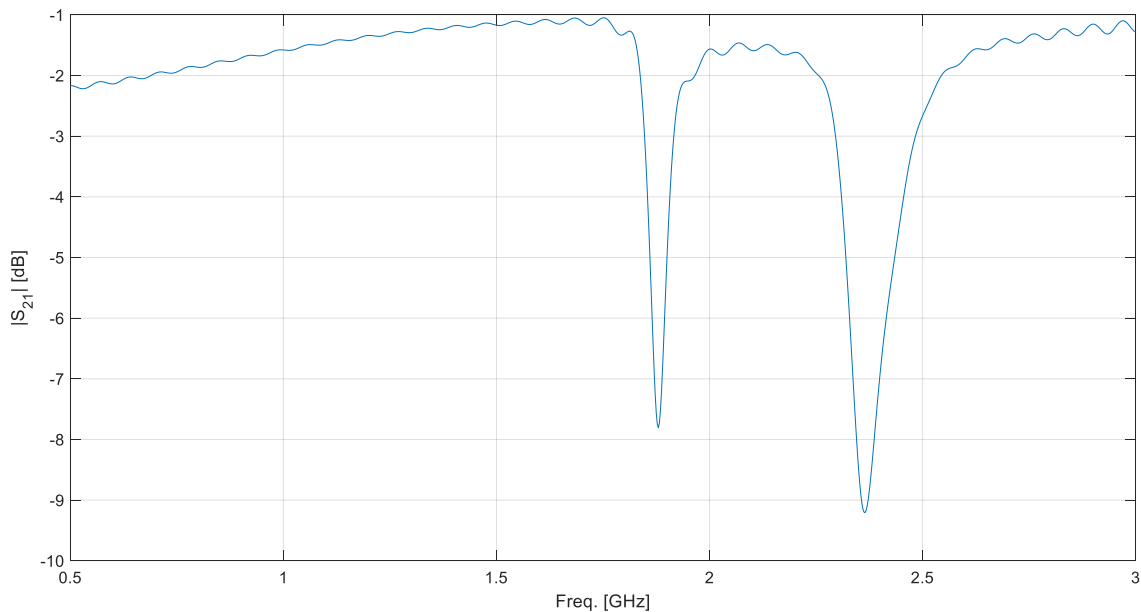


Ilustración 57. Módulo de los parámetros S_{21} del resonador SRR con puertos de guía ondas para cerrar un anillo interno, después de redimensionar el resonador.

Frecuencia de resonancia	Ancho de banda cuando la reflexión tiene 3dB por encima del mínimo
1.88 GHz	40 MHz
2.365 GHz	77.5 MHz

Tabla 21. Caracterización de la respuesta en frecuencia del resonador SRR con puertos de guía ondas para cerrar un anillo interno, después de redimensionar el resonador

4.4.1. Termistor F360 (100K Ω)

El primer termistor con el que se va a analizar cómo varía la respuesta en frecuencia del resonador si éste se utiliza para cerrar un anillo interno es el F360, de 100K Ω .

4.4.1.1. Análisis para el rango de temperaturas de 21-30°C

En la Ilustración 58 se muestra el módulo de los parámetros S_{21} con el termistor F360 cerrando un anillo interno. Se observa que la primera frecuencia de resonancia no presenta variaciones respecto a la temperatura, pero la segunda sí, por ello ésta es la que se va a caracterizar. Dicha caracterización se encuentra en la Tabla 22.

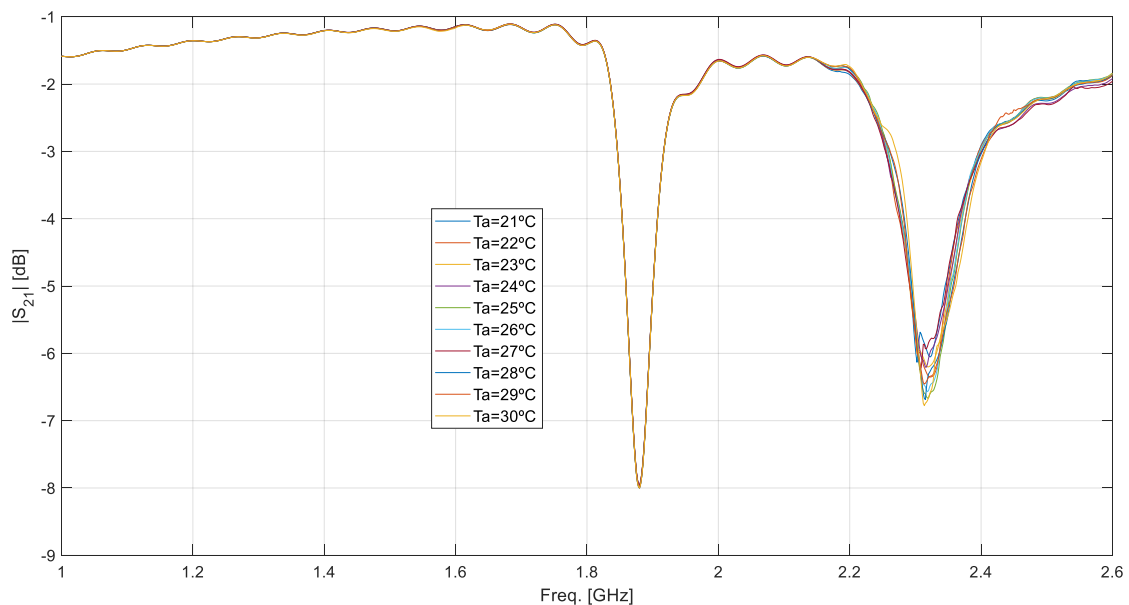


Ilustración 58. Módulo de los parámetros S_{21} para el resonador SRR con el termistor F360 cerrando un anillo interno. Rango de 21-30°C

La Ilustración 59 presenta la ampliación de la Ilustración 58 en la zona de la segunda resonancia. Lo que se puede apreciar es que hay comportamientos distintos para las distintas temperaturas.

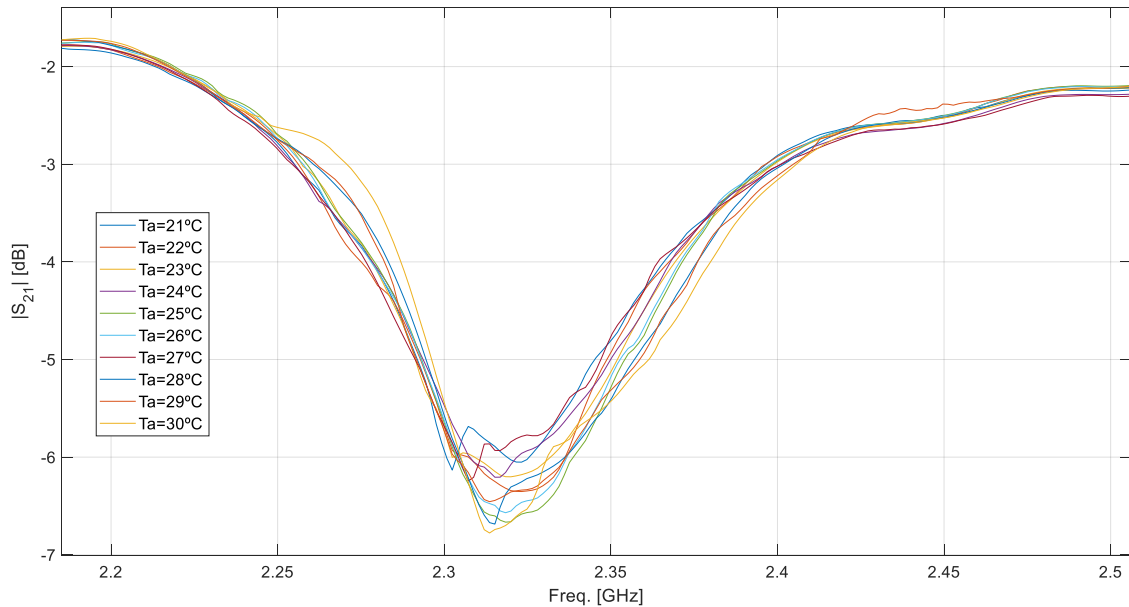


Ilustración 59. Zoom al rango de frecuencias 2.2-2.5GHz de la Ilustración 58

Temperatura (°C)	2ª frecuencia de resonancia (GHz)	2º ancho de banda de 3 dB (MHz)	1ª frecuencia de resonancia (GHz)
21	2.3024	131.2	1.88
22	2.3232	121.6	1.88
23	2.32	118.4	1.88
24	2.3152	121.6	1.88
25	2.3184	105.6	1.88
26	2.3184	105.6	1.88
27	2.3072	104	1.88
28	2.3152	102.4	1.88
29	2.3136	102.4	1.88
30	2.3136	99.92	1.88

Tabla 22. Caracterización de las frecuencias y ancho de banda de 3 dB para el resonador SRR con el termistor F560 en la abertura del anillo interno para el rango de temperaturas 21-30°C

En la Tabla 22 podemos observar una clara tendencia del segundo ancho de 3 dB a disminuir, mientras que la segunda frecuencia de resonancia parece aumentar ligeramente, al aumentar la temperatura. Sin embargo, la primera frecuencia de resonancia se mantiene constante para toda temperatura.

4.4.1.1. Análisis para el rango de temperaturas de 30-70°C

En la Ilustración 60 se muestra el módulo de los parámetros S_{21} con el termistor F360 cerrando un anillo interno. Al igual que en el análisis anterior se va a caracterizar la segunda frecuencia de resonancia. Dicha caracterización se encuentra en la Tabla 25.

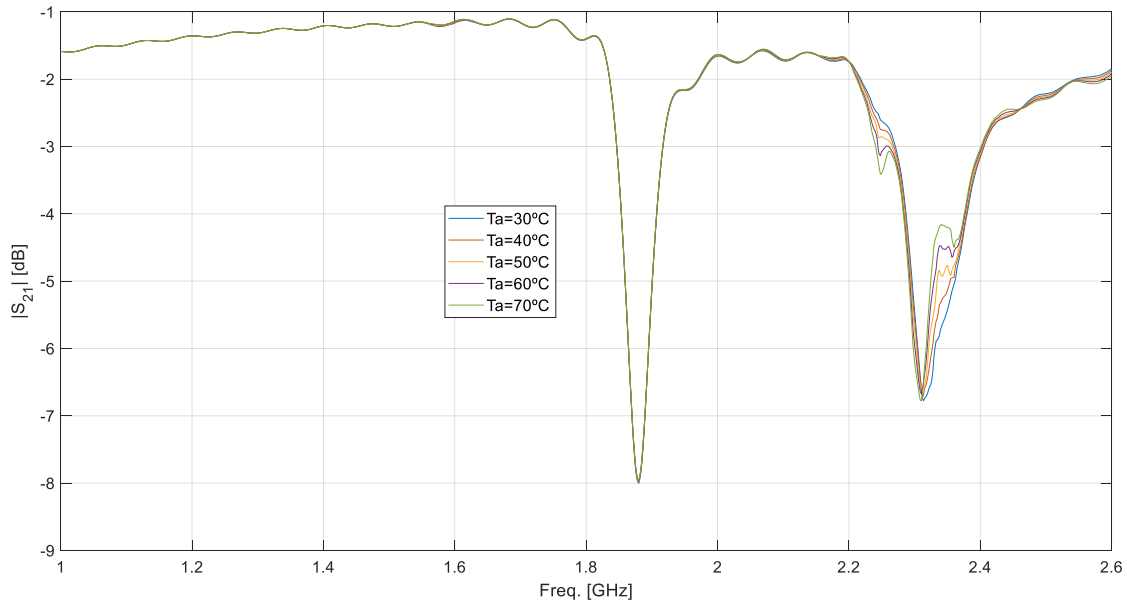


Ilustración 60. Módulo de los parámetros S_{21} para el resonador SRR con el termistor F360 cerrando un anillo interno. Rango de 30-70°C

Un comportamiento interesante de resaltar de la Ilustración 60, mostrado en la Ilustración 61, es como en la primera parte del valle generado por la resonancia, en el rango de 2.2-2.3 GHz, el resonador presenta mayores pérdidas a mayores temperaturas, mientras que en la segunda parte del valle, en el rango de 2.3-2.4 GHz, esto se invierte.

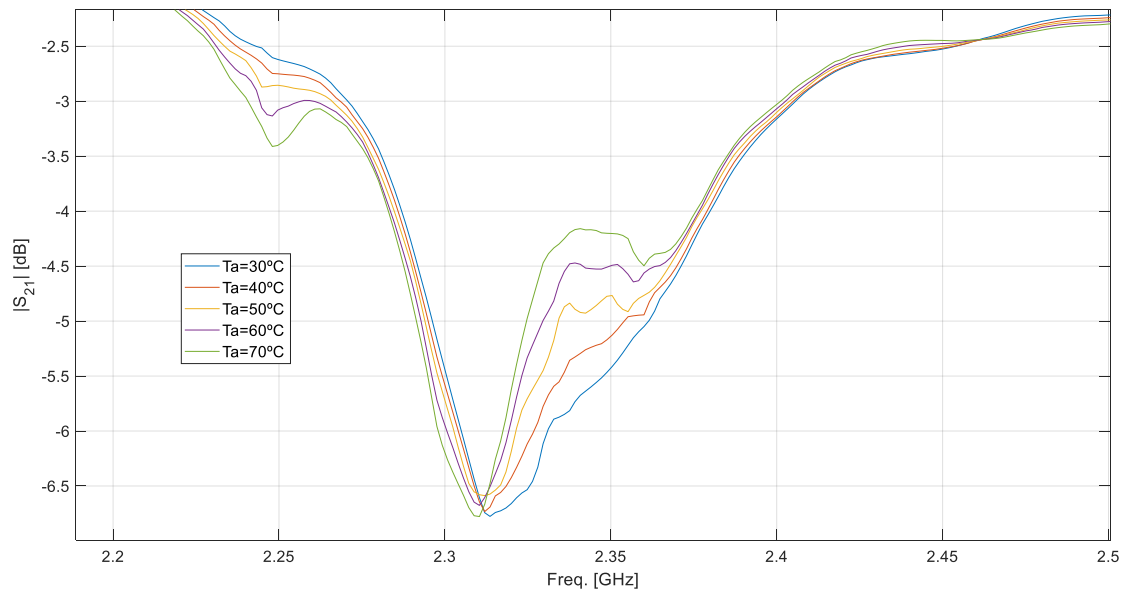


Ilustración 61. Zoom al rango de frecuencias 2.2-2.5GHz de la Ilustración 60

Temperatura (°C)	2ª frecuencia de resonancia (GHz)	2º ancho de banda de 3 dB (MHz)	1ª frecuencia de resonancia (GHz)
30	2.3136	99.2	1.88
40	2.3120	97.6	1.88
50	2.3120	97.6	1.88
60	2.3104	97.6	1.88
70	2.3104	97.6	1.88

Tabla 23. Caracterización de las frecuencias y ancho de banda de 3 dB para el resonador SRR con el termistor F560 en la abertura del anillo interno para el rango de temperaturas 30-70°C

En la Tabla 25 podemos observar que la tendencia del segundo ancho de 3dB a disminuir al aumentar la temperatura desaparece a partir de los 40°C y se queda constante en un valor, 97.6GHz, mientras que la segunda frecuencia de resonancia parece disminuir ligeramente., contrario al comportamiento para el primer rango de temperaturas. En cuanto a la primera frecuencia de resonancia, se mantiene constante para toda temperatura.

4.4.2. Termistor F560 (47K Ω)

El segundo termistor con el que se va a analizar cómo varía la respuesta en frecuencia del resonador si éste se utiliza para cerrar un anillo interno es el F560, de 47K Ω .

4.4.2.1. Análisis para el rango de temperaturas de 21-30°C

En la Ilustración 62 Ilustración 58 se muestra el módulo de los parámetros S_{21} con el termistor F560 cerrando un anillo interno. Al igual que ocurría con el termistor F360, la primera frecuencia de resonancia no presenta variaciones respecto a la temperatura. En cuanto a la segunda resonancia, claramente presenta menos variaciones que con el termistor F360. Su caracterización se encuentra en la Tabla 24.

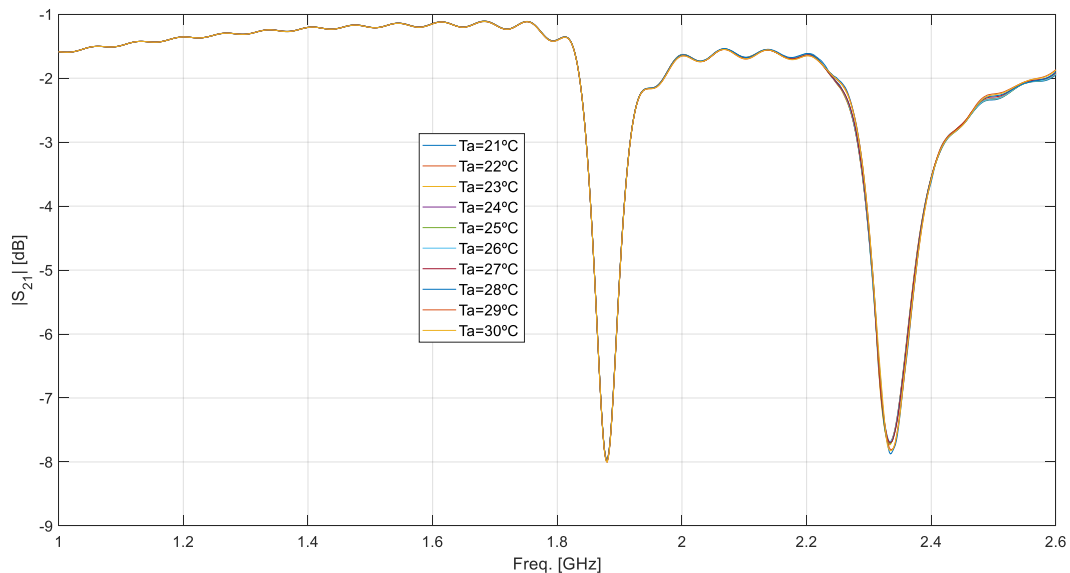


Ilustración 62. Módulo de los parámetros S_{21} para el resonador SRR con el termistor F560 cerrando un anillo interno. Rango de 21-30°C

La Ilustración 63 presenta la ampliación de la Ilustración 62 en la zona de la segunda resonancia. A diferencia del termistor F360, que para diferentes temperaturas se observaba cierta variación en el comportamiento de la resonancia, aquí parecen solapadas todas las curvas. Se analiza más en detalle en la Tabla 24.

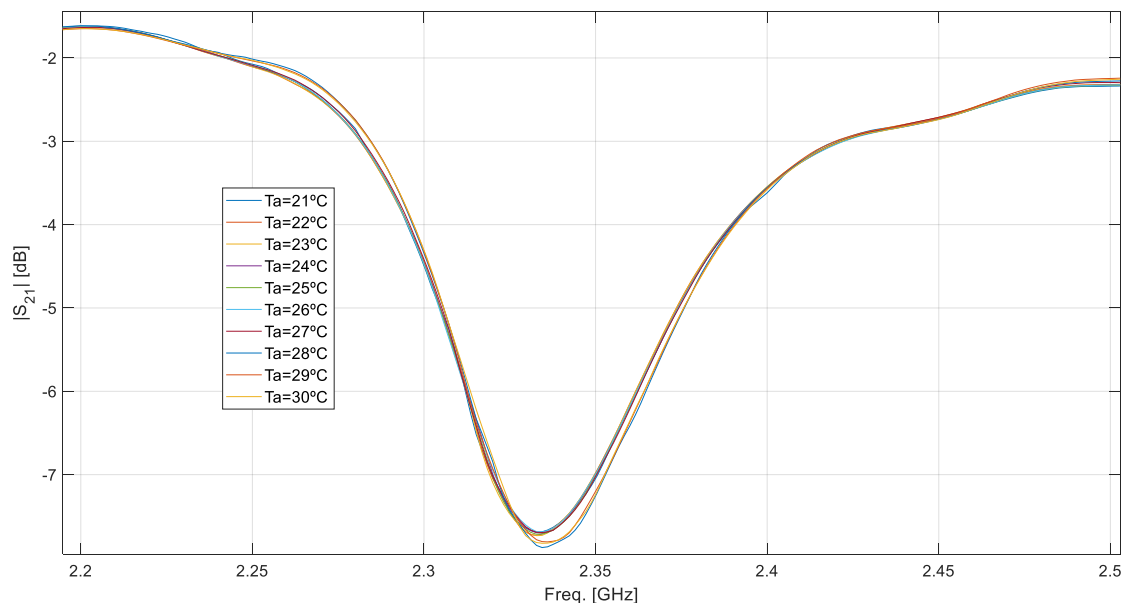


Ilustración 63. Zoom al rango de frecuencias 2.2-2.5GHz de la Ilustración 62

Temperatura (°C)	2ª frecuencia de resonancia (GHz)	2º ancho de banda de 3 dB (MHz)	1ª frecuencia de resonancia (GHz)
21	2.3328	75.2	1.88
22	2.3328	72	1.88
23	2.3328	72	1.88
24	2.3344	72	1.88
25	2.3328	75.2	1.88
26	2.3344	75.2	1.88
27	2.3344	73.6	1.88
28	2.3344	70.4	1.88
29	2.3360	72	1.88
30	2.3344	72	1.88

Tabla 24. Caracterización de las frecuencias y ancho de banda de 3 dB para el resonador SRR con el termistor F560 en la abertura del anillo interno para el rango de temperaturas 21-30°C

En la Tabla 24 no se observan claras tendencias ni del segundo ancho de 3 dB ni de la segunda frecuencia de resonancia al variar la temperatura, oscilan ligeramente en torno a un valor. De hecho, dichas pequeñas variaciones pueden tratarse de una imprecisión en la simulación ya sea por la simulación en sí o acarreadas a la hora de caracterizar el termistor. En cuanto a la primera frecuencia de resonancia, no varía.

4.4.2.2. Análisis para el rango de temperaturas de 30-70°C

En la Ilustración 64 se muestra el módulo de los parámetros S_{21} con el termistor F360 cerrando un anillo interno. Al igual que en el análisis anterior se va a caracterizar la segunda frecuencia de resonancia. Dicha caracterización se encuentra en la Tabla 25.

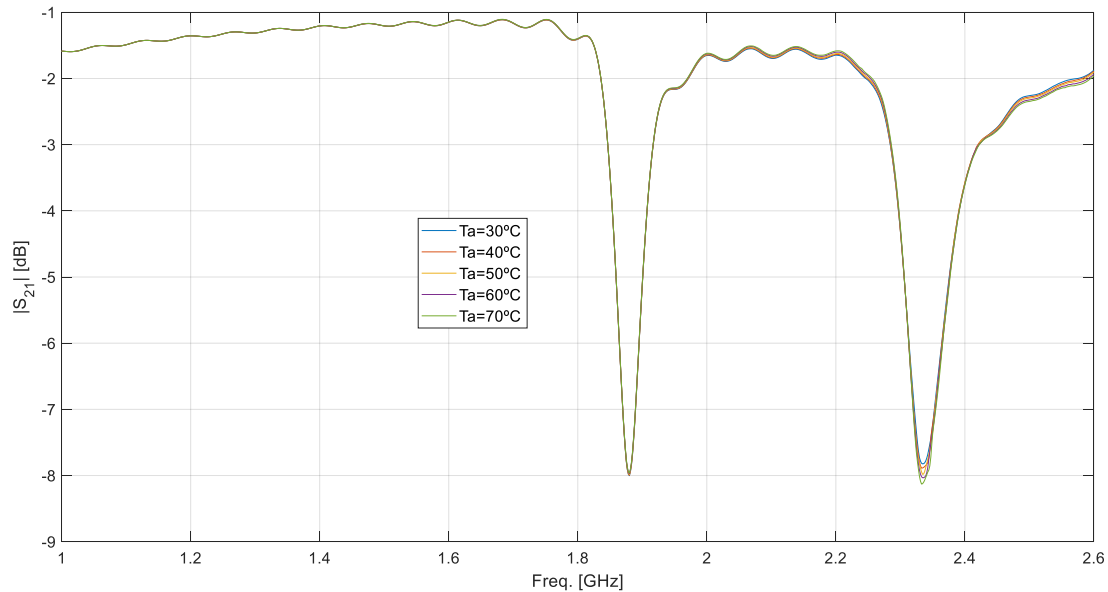


Ilustración 64. Módulo de los parámetros S_{21} para el resonador SRR con el termistor F560 cerrando un anillo interno. Rango de 30-70°C

La Ilustración 64 muestra la segunda frecuencia de resonancia de la Ilustración 65. La anchura del valle generado por la resonancia no parece variar, pero se observa que hay ligeramente más pérdidas en la frecuencia de resonancia para temperaturas que son más altas.

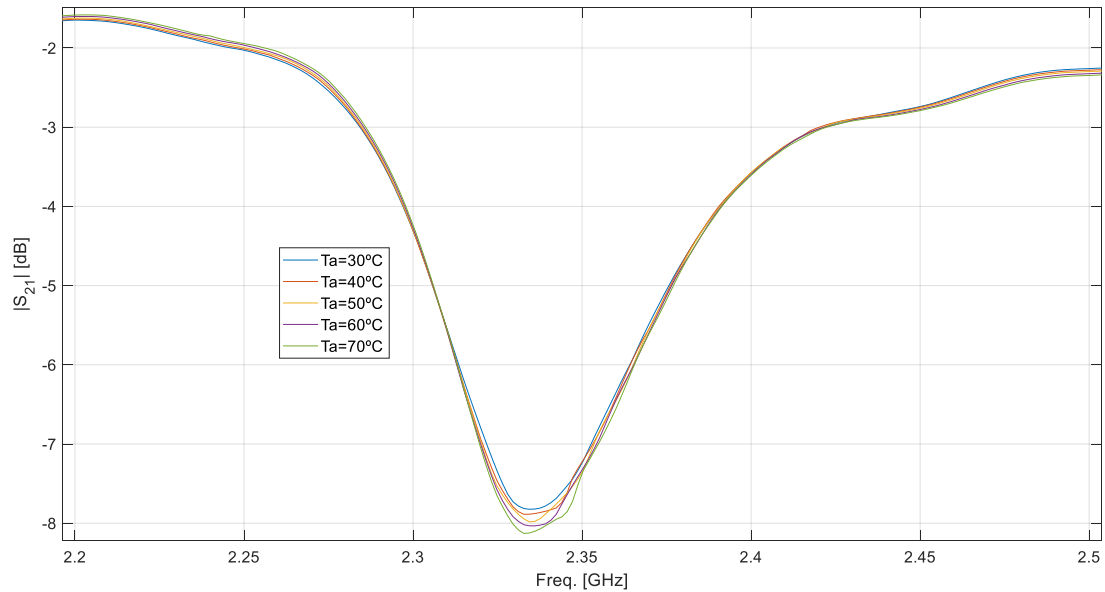


Ilustración 65. Zoom al rango de frecuencias 2.2-2.5GHz de la Ilustración 64

Temperatura (°C)	2ª frecuencia de resonancia (GHz)	2º ancho de banda de 3 dB (MHz)	1ª frecuencia de resonancia (GHz)
30	2.3344	72	1.88
40	2.3328	70.4	1.88
50	2.3344	68.8	1.88
60	2.3360	68.8	1.88
70	2.3328	67.2	1.88

Tabla 25. Caracterización de las frecuencias y ancho de banda de 3 dB para el resonador SRR con el termistor F560 en la abertura del anillo interno para el rango de temperaturas 30-70°C

En la Tabla 25 podemos observar que aparece una tendencia del segundo ancho de 3dB a disminuir al aumentar la temperatura, mientras que la segunda frecuencia de resonancia mantiene su ligera oscilación anterior.

4.4.3. Termistor V2103 (10K Ω)

El último termistor con el que se va a analizar cómo varía la respuesta en frecuencia del resonador si éste se utiliza para cerrar un anillo interno es el V2103, de 10K Ω .

4.4.3.1. Análisis para el rango de temperaturas de 21-30°C

En la Ilustración 66 se muestra el módulo de los parámetros S_{21} con el termistor V2103 cerrando un anillo interno. Al igual que ocurría con el resto de los casos, la primera frecuencia de resonancia no presenta variaciones respecto a la temperatura. En cuanto a la segunda resonancia, se parece en comportamiento, a simple vista, al termistor F560, es decir, parece presentar pocas variaciones. Su caracterización se encuentra en la Tabla 26.

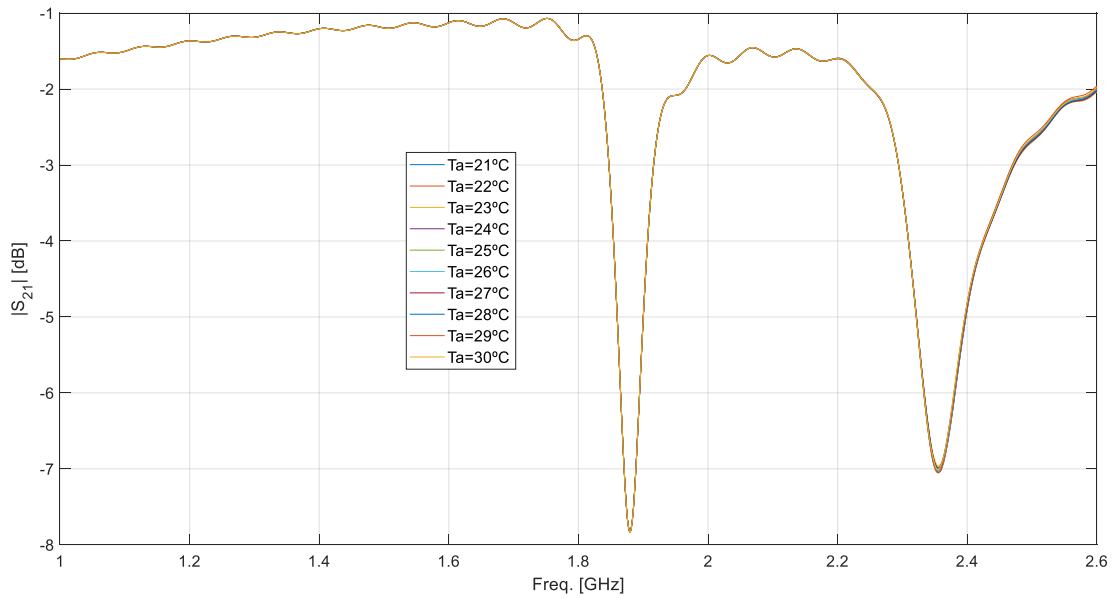


Ilustración 66. Módulo de los parámetros S_{21} para el resonador SRR con el termistor V2103 cerrando un anillo interno. Rango de 21-30°C

La Ilustración 67 presenta la ampliación de la Ilustración 66 en la zona de la segunda resonancia. Todas las representaciones parecen ser iguales por lo que no parece indicar variabilidad alguna respecto a la temperatura.

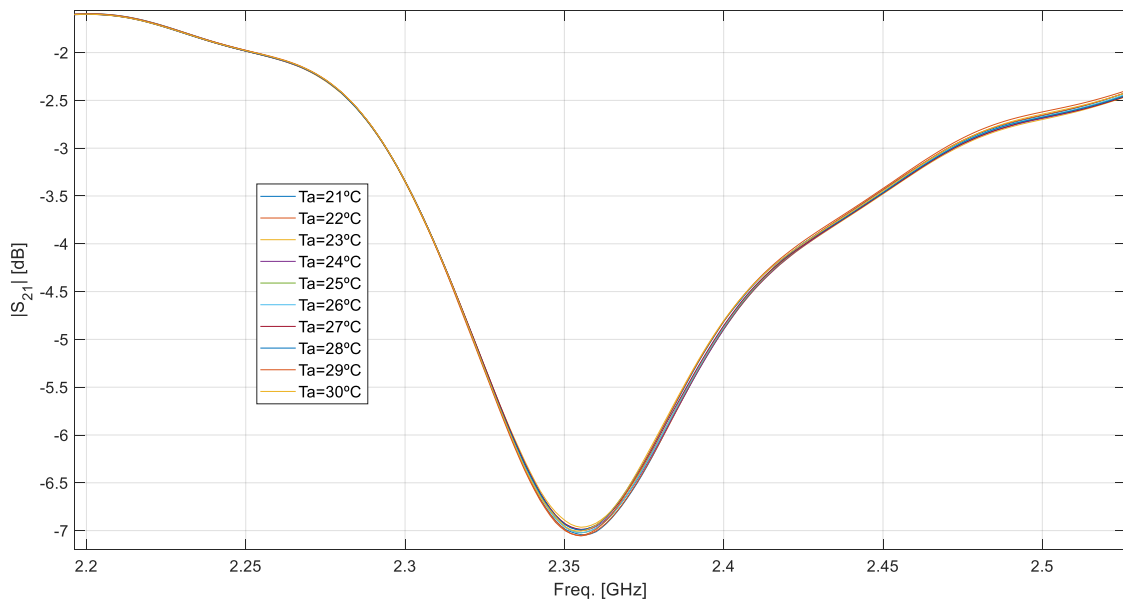


Ilustración 67. Zoom al rango de frecuencias 2.2-2.5GHz de la Ilustración 66

Temperatura (°C)	2ª frecuencia de resonancia (GHz)	2º ancho de banda de 3 dB (MHz)	1ª frecuencia de resonancia (GHz)
21	2.3568	112	1.88
22	2.3552	112	1.88
23	2.3552	112	1.88
24	2.3552	112	1.88
25	2. 3552	112	1.88
26	2. 3552	112	1.88
27	2. 3552	112	1.88
28	2. 3552	112	1.88
29	2. 3552	110.4	1.88
30	2. 3552	112	1.88

Tabla 26. Caracterización de las frecuencias y ancho de banda de 3 dB para el resonador SRR con el termistor F560 en la abertura del anillo interno para el rango de temperaturas 21-30°C

Con la Tabla 26 se puede concluir que el termistor V2103 no hace la respuesta en frecuencia del resonador en función de la temperatura, todos los parámetros analizados son iguales salvo alguna ligera variación para alguna temperatura puntual.

4.4.3.2. Análisis para el rango de temperaturas de 30-70°C

En la Ilustración 68 se muestra el módulo de los parámetros S_{21} con el termistor V2103 cerrando un anillo interno. Al igual que para el rango de temperaturas anterior, no parece haber variaciones respecto a la temperatura. La caracterización de la respuesta en frecuencia se encuentra en la Tabla 27.

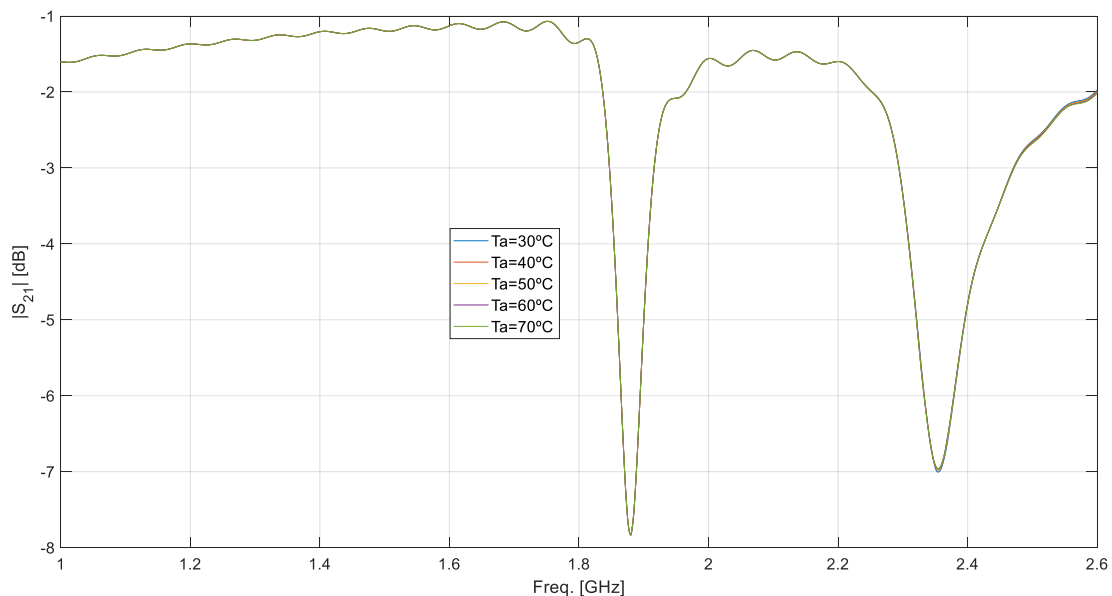


Ilustración 68. Módulo de los parámetros S_{21} para el resonador SRR con el termistor V2103 cerrando un anillo interno. Rango de 30-70°C

La Ilustración 69 muestra la segunda frecuencia de resonancia de la Ilustración 68. Se aprecia un valle, generado por la resonancia, más ancho que en el resto de los casos, pero que no varía respecto a la temperatura.

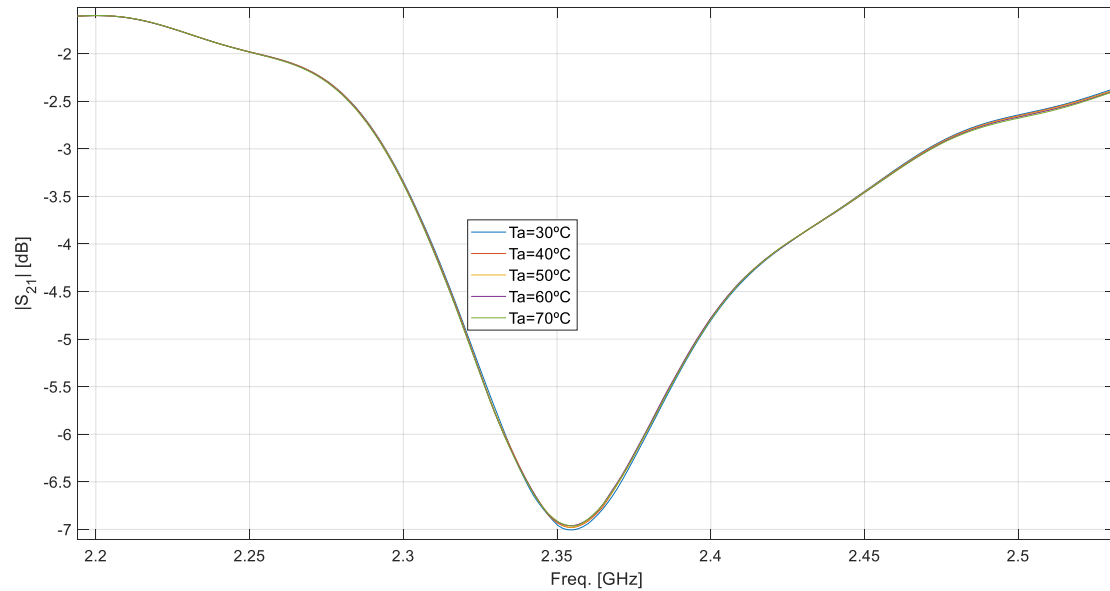


Ilustración 69. Zoom al rango de frecuencias 2.2-2.5GHz de la Ilustración 68

Temperatura (°C)	2ª frecuencia de resonancia (GHz)	2º ancho de banda de 3 dB (MHz)	1ª frecuencia de resonancia (GHz)
30	2.3552	112	1.88
40	2.3552	113.6	1.88
50	2.3552	113.6	1.88
60	2.3552	113.6	1.88
70	2.3552	113.6	1.88

Tabla 27. Caracterización de las frecuencias y ancho de banda de 3 dB para el resonador SRR con el termistor V2103 en la abertura del anillo interno para el rango de temperaturas 30-70°C

En la Tabla 27 confirma la inexistente tendencia con el termistor V2103, no hay variaciones ni para las frecuencias de resonancia ni para el ancho de banda de 3dB.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Durante el desarrollo del proyecto se han ido realizado caracterizaciones y distintas simulaciones. En esta sección se destacarán los resultados más relevantes.

Primero se realizó una caracterización de 5 termistores, V2103 de 10K Ω , V2223 de 22K Ω , V2332 de 33K Ω , F560 de 47K Ω y F360 de 100K Ω , de los cuáles el termistor V2223, porque no presentaba variaciones en función de la temperatura a lo largo del espectro de frecuencias, y el termistor V2332, porque, aunque sí las presentaba, tenía un valor nominal semejante a de F560, fueron descartados para el estudio. Las caracterizaciones siempre presentan las siguientes características:

- Las pérdidas disminuyen al aumentar la frecuencia
- Las pérdidas dependen del valor nominal y del modelo de termistor. En orden de más a menos pérdidas, el termistor F360, V2103 y F560.

Para el primer rango de temperaturas, 21-30 °C, no se aprecian tendencias lógicas de la respuesta en frecuencia al variar la temperatura para ninguno de los termistores.

En el segundo rango de temperaturas, 30-70 °C, se deduce que, a mayor valor nominal del termistor, queda definido más claramente que a mayores temperaturas hay más pérdidas:

- El termistor F360 sufre mayores pérdidas a mayores temperaturas en todo el margen de frecuencias, aunque las diferencias son de décimas de dB;
- Con el termistor F560 ocurre lo mismo que con F360, aunque no se aprecia tan claramente. Además, en el rango de frecuencias 1.2-1.4GHz todas las temperaturas medidas tienen mismas pérdidas.
- El termistor V2103 atraviesa tres diferentes etapas. En un margen de frecuencias presentan mayores pérdidas las temperaturas bajas. Este margen de frecuencias es seguido de otro donde no se puede determinar cuál sufre mayores pérdidas hasta que se llega a un margen final donde temperaturas mayores tienen mayores pérdidas.

En la siguiente fase se analizaba si el comportamiento de los termistores variaría al incluirlos en el software de simulación, en la línea de transmisión que el resonador SRR tiene. Se puede concluir que los termistores presentaban aproximadamente el doble de pérdidas, en dB, a frecuencias bajas, al incluirlos en el software, mientras que a frecuencias altas sufrían las mismas pérdidas que durante la caracterización.

El próximo paso consistía en analizar si un termistor colocado en medio de uno de los anillos internos que tiene resonador SRR variaría el equivalente circuital del resonador y con ello la respuesta en frecuencia. Este análisis mostró que la frecuencia de resonancia y el ancho de banda de 3dB sobre la frecuencia de resonancia eran insensibles al variar la temperatura.

Por último, se propuso un segundo enfoque de resonador, que consistía en cerrar un anillo interno del resonador con el termistor. Este nuevo enfoque de resonador SRR tenía dos frecuencias de resonancia, una generada por el par de anillos resonantes originales y la segunda generada al cortocircuitar uno de los anillos.

- Con el termistor F360 el ancho de banda de 3dB tiende a disminuir al aumentar la temperatura hasta llegar a un valor constante a los 40 °C. Durante el primer rango de temperaturas disminuye más que en el segundo, 30MHz entre 21-30 °C, frente a 2MHz entre 30-40 °C.
- Con el termistor F560 el ancho de banda disminuye ligeramente, 5MHz a lo largo de 40 °C.
- El termistor V2103 no presenta variación alguna en función de la temperatura.

Con el segundo enfoque se observa que con diferentes termistores se pueden generar resonancias con distintos anchos de banda. El termistor F360 genera un ancho de banda superior al resto, el cual decrece hasta alcanzar los 40 °C. El termistor V2103 genera un ancho de banda menor que el F360, pero superior al F560, aunque no varía con la temperatura. El ancho de banda generado por los termistores sigue el mismo orden que se presentó a la hora de ordenar los termistores caracterizados en función de las pérdidas. Mayores pérdidas han generado mayores anchos de banda.

Por último, termistores con valores nominales altos, F360, al introducirlos en el resonador del segundo enfoque, han mostrado que pueden variar el ancho de banda de la resonancia, mientras que valores nominales bajos no son capaces.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este proyecto se han caracterizado distintos termistores con diferentes valores nominales (10K Ω , 47K Ω , 100K Ω) con el objetivo de obtener sus pérdidas en función de la temperatura, para el rango de 21-30 °C (con diferencias de 1 °C) y para el rango de 30-70 °C (con diferencias de 10 °C), y la frecuencia en el rango de 1-2.6GHz. Estas caracterizaciones se han empleado para introducirlas al software de simulación CST Microwave para integrarlas de distintas maneras a un “*Split-Ring Resonator*”. Primero se introdujeron los termistores en medio de uno de los anillos internos, pero no se observaron cambios en la respuesta en frecuencia del resonador. Como consecuencia de no obtener resultados en el primer enfoque se propuso un segundo en el cual los termistores se integraban en la abertura que presenta uno de los anillos internos, de modo que el anillo quedaba cortocircuitado y se generaba con ello una segunda frecuencia de resonancia.

Los resultados del modelo final propuesto muestran que el ancho de banda de la resonancia generado por los termistores está directamente relacionado con las pérdidas que presenta el termistor por sí solo, es decir, un termistor con mayores pérdidas cortocircuitando un anillo interno del resonador generará una resonancia con mayor ancho de banda. Sin embargo, esto no garantiza que dicho ancho de banda sea sensible a la temperatura. La sensibilidad la otorga el valor nominal del termistor, a mayor valor óhmico, mayor es la reducción del ancho de banda al aumentar la temperatura.

En cuanto a resultados tangibles, el termistor F360, de 100K Ω , integrado en el segundo enfoque, en los primeros 9 °C, de 21 °C a 30 °C, el ancho de banda de la resonancia disminuye de 130MHz a 99Mhz, mientras que en los 10 °C siguientes disminuye 2MHz hasta los 97MHz. A partir de los 40 °C el valor del ancho de banda de la resonancia permanece invariable. Con el resto de los termistores no se presentan suficientes variaciones para ser utilizados en un sistema de medición de temperatura.

Un futuro trabajo consistiría en fabricar el resonador del segundo enfoque con el termistor F360 y diseñar y calibrar un sistema el cual pueda detectar las variaciones en el ancho de banda de la resonancia.

7. REFERENCIAS

- [1] J. S. Gaggatur and G. Banerjee, "Integrated temperature sensor for reconfigurable radio frequency synthesizer," *2015 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, Bangalore, 2015, pp. 1-6. doi: 10.1109/CONECCT.2015.7383924
- [2] W. Li and D. Zhou, "1.8V -0.18- μ m CMOS Temperature Sensor with Frequency Output," *2018 IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering (CCECE)*, Quebec City, QC, 2018, pp. 1-4. doi: 10.1109/CCECE.2018.8447866
- [3] F. Reverter, D. Gómez and J. Altet, "On-Chip MOSFET Temperature Sensor for Electrical Characterization of RF Circuits," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 9, pp. 3343-3344, Sept. 2013. doi: 10.1109/JSEN.2013.2273572
- [4] K. Ueno, T. Asai and Y. Amemiya, "Temperature-to-frequency converter consisting of subthreshold mosfet circuits for smart temperature-sensor LSIs," *TRANSDUCERS 2009 - 2009 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, Denver, CO, 2009, pp. 2433-2436. doi: 10.1109/SENSOR.2009.5285436
- [5] C. Azcona, B. Calvo, N. Medrano and S. Celma, "Low-Power Wide-Range Frequency-Output Temperature Sensor," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, no. 5, pp. 1339-1340, May 2014. doi: 10.1109/JSEN.2014.2303499
- [6] B. Kubina, M. Schüßler, C. Mandel, A. Mehmood and R. Jakoby, "Wireless high-temperature sensing with a chipless tag based on a dielectric resonator antenna," *SENSORS, 2013 IEEE*, Baltimore, MD, 2013, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICSENS.2013.6688181
- [7] S. Yu, P. Feng and N. Wu, "Passive and Semi-Passive Wireless Temperature and Humidity Sensors Based on EPC Generation-2 UHF Protocol," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 4, pp. 2403-2411, April 2015. doi: 10.1109/JSEN.2014.2375180
- [8] J. Altet *et al.*, "Temperature Sensors to Measure the Central Frequency and 3 dB Bandwidth in mmW Power Amplifiers," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 24, no. 4, pp. 272-274, April 2014. doi: 10.1109/LMWC.2013.2293668
- [9] C. Li, Q. Tan, W. Zhang, C. Xue and J. Xiong, "An Embedded Passive Resonant Sensor Using Frequency Diversity Technology for High-Temperature Wireless Measurement," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 1055-1060, Feb. 2015. doi: 10.1109/JSEN.2014.2360392
- [10] Qingyun Ju, Xinwei Li, Lei Ji, Liang Tang and Donghai Qiao, "Parameter extraction of the coaxial resonator based on the SOLT calibration method," *2016 IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, Beijing, 2016, pp. 186-188. doi: 10.1109/ICMMT.2016.7761718

- [11] G. Galindo-Romera, F. Javier Herraiz-Martínez, M. Gil, J. J. Martínez-Martínez and D. Segovia-Vargas, "Submersible Printed Split-Ring Resonator-Based Sensor for Thin-Film Detection and Permittivity Characterization," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 10, pp. 3587-3596, May 15, 2016.
doi: 10.1109/JSEN.2016.2538086