

ANILLO RESONANTE SEPARADO: MEDICIÓN DE LA RAZÓN SALIDA A ENTRADA USANDO RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE EN LA BANDA UHF

SPLIT-RING RESONATOR: MEASUREMENT OF THE OUTPUT-TO-INPUT RATIO USING SOFTWARE-DEFINED RADIO AT UHF FREQUENCIES

Jorge Simón Rodríguez

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
jorge.sr@uaslp.mx

Aarón Tonatiuh González Escorcía

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
a331639@alumnos.uaslp.mx

Ana Cristina Dávila Puente

Universidad Autónoma de Zacatecas, México
anacrisdp@uaz.edu.mx

Rafael Aguilar González

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
rafael.aguilar@uaslp.mx

José Luis Álvarez Flores

Universidad de Colima, México
alvarez.jose@ucol.mx

Marco Aurelio Cárdenas Juárez

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
marco.cardenas@uaslp.mx

Recepción: 13/noviembre/2024

Aceptación: 7/marzo/2025

Resumen

Las mediciones de parámetros en radiofrecuencia son importantes en electrónica y telecomunicaciones ya que permiten la correcta caracterización de los dispositivos implicados en este tipo de sistemas. Este trabajo presenta la medición de la razón salida a entrada de potencia de un anillo resonante separado en circuito impreso diseñado y fabricado para operar en la banda UHF. Se llevaron a cabo mediciones considerando tres montajes experimentales, entre los que se incluyó la utilización

de radios definidos por software. Medir la razón salida a entrada de un dispositivo en radiofrecuencia mediante instrumentos versátiles permite aprovechar la infraestructura educativa con la que se cuenta en universidades públicas que ofrecen programas educativos de licenciatura en electrónica y telecomunicaciones. Así mismo, el uso de radios definidos por software permite modificar la frecuencia de operación y otras características del sistema de medición.

Palabras Clave: Anillo resonante separado, Radio definido por software, Razón salida a entrada, UHF.

Abstract

Measurements of radiofrequency parameters are important in electronics and telecommunications since they allow the correct characterization of devices involved in this type of systems. This work focuses on the measurement of the output-to-input power ratio of a printed split-ring resonator designed and manufactured to operate at UHF frequencies. Measurements were carried out considering three experimental setups, including the use of software-defined radios. Measuring the output-to-input ratio of a radiofrequency device using versatile instruments allows to take advantage of educational infrastructure which is available in public universities that offer undergraduate educational programs in electronics and telecommunications. Likewise, the use of software-defined radios allows to modify the operating frequency and other characteristics of the measurement system.

Keywords: *Output-to-input ratio, Split-ring resonator, Software-defined radio, UHF.*

1. Introducción

La banda de frecuencias UHF (Ultra High Frequency) juega un rol crucial en las telecomunicaciones modernas [Tomasi, 2003]. Su relativamente amplio rango de frecuencias, que va desde los 300 MHz hasta los 3 GHz, permite una mayor capacidad de transmisión de datos y una menor latencia en comparación con bandas más bajas como lo es VHF (Very High Frequency) que va de 30 a 300 MHz. Esto la convierte en una opción idónea para aplicaciones como la televisión digital terrestre, los sistemas de radiocomunicación móvil (incluyendo 4G y 5G), los

sistemas de radar y los enlaces de microondas de alta velocidad [Metekovits, 2022]. La banda UHF también se utiliza en dispositivos de corto alcance como teléfonos inalámbricos y controles remotos, debido a su capacidad aceptable para penetrar obstáculos y proporcionar una cobertura relativamente amplia [Rappaport, 2002]. Por lo anterior, la banda UHF es esencial para el funcionamiento de una gran variedad de tecnologías de comunicación alámbrica e inalámbrica utilizadas hoy en día.

La razón S , también conocida como ganancia, en un sistema, red o dispositivo de radiofrecuencia o microondas representa la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada. El parámetro S es fundamental en el diseño y análisis de los subsistemas en la electrónica y las telecomunicaciones, ya que determina la amplificación o atenuación, así como los cambios de fase que experimenta una señal al atravesar un componente o circuito. Dicho parámetro influye directamente en aspectos como la calidad de la señal, la sensibilidad de un receptor, la potencia de un transmisor y la eficiencia energética de un sistema, por citar algunos ejemplos [Cheng, 2020]. Un adecuado diseño del parámetro S en cada etapa de un sistema de comunicaciones permite optimizar el rendimiento general, minimizando aspectos como el ruido o interferencias y asegurando una transmisión confiable de la información desde su origen a su destino.

Los anillos resonantes separados impresos o *microstrip* (SRR, por sus siglas en inglés) encuentran una amplia gama de aplicaciones en la electrónica moderna, especialmente en el campo de las comunicaciones inalámbricas. Su capacidad para filtrar y seleccionar frecuencias específicas los convierte en elementos clave en el diseño de filtros de banda estrecha, multiplexores, acopladores direccionales y como biosensores [Reinecke, 2018]. Además, se utilizan como resonadores en osciladores, lo que permite generar señales de alta frecuencia con gran estabilidad. En la actualidad, los SRR se emplean en dispositivos móviles, redes inalámbricas, sistemas de radar y equipos de medición, contribuyendo a mejorar la eficiencia, la miniaturización y el rendimiento de estos sistemas. Por ejemplo en los teléfonos móviles se utilizan en la implementación de filtros de banda estrecha, para la reducción de interferencias y para contribuir a la miniaturización de los equipos,

permitiendo una mayor densidad de componentes y diseños más delgados. En el caso de los sistemas de radar, contribuyen a la mejora de su resolución o para diseñar antenas con bajos niveles de lóbulos laterales, reduciendo la posibilidad de detección de falsas alarmas causadas por reflexiones en objetos cercanos [Pekcokguler, 2017].

Los radios definidos por software (SDR, por sus siglas en inglés) representan una revolución en el campo de las comunicaciones inalámbricas [Donat, 2021]. A diferencia de como se implementaron desde sus inicios los radios convencionales, donde las funciones están fijadas en hardware, es decir son radios de propósito específico, los SDR utilizan software para realizar gran parte del procesamiento de la señal. Esta flexibilidad permite reconfigurar la radio en tiempo real para adaptarse a diferentes estándares de comunicación, bandas de frecuencia y protocolos. Gracias a los SDR, es posible desarrollar sistemas de comunicación más versátiles, eficientes y personalizables, lo que ha abierto nuevas posibilidades en áreas como la radioafición, la investigación académica y el desarrollo de redes de comunicación de próxima generación [Tuttlebee, 2002].

En el presente trabajo se muestra la obtención del parámetro S para un SRR cuadrado de cobre y de dos puertos fabricado sobre un sustrato FR-4 en la banda de UHF y acoplado a una línea de transmisión recta del mismo tipo. Se compara el parámetro S en función de la frecuencia obtenidas con distintos instrumentos de generación y análisis de señales tanto convencionales como SDR. Medir la razón salida a entrada de un dispositivo en radiofrecuencia mediante instrumentos versátiles permite aprovechar la infraestructura educativa con la que se cuenta en universidades públicas que ofrecen programas educativos de licenciatura en electrónica y telecomunicaciones. Así mismo, el uso de radios definidos por software permite modificar la frecuencia de operación y otras características del sistema de medición.

2. Métodos

La caracterización del SRR consistió en la obtención de su respuesta en frecuencia con respecto al parámetro S_{21} , esto mediante la alimentación en un

puerto con señales de radiofrecuencia en banda UHF considerando un barrido de frecuencia 500 a 560 MHz y la medición de la intensidad en el puerto de salida. Este barrido fue considerado debido a que en estudios previos se ha demostrado que el referido SRR tiene su frecuencia de resonancia en ese rango de frecuencias [Reineke, 2018]. En la Ecuación 1 se observa el cálculo de S [Cheng, 2020].

$$S_{21} = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \quad (1)$$

Donde:

P_{salida} : Potencia de salida en watts en el puerto 2

$P_{entrada}$: Potencia de entrada en watts en el puerto 1

S_{21} : Razón salida a entrada sin unidades

El parámetro S_{21} es parte de la matriz $[S]$ de parámetros de dispersión de una red de radiofrecuencia de 2 puertos como lo es el anillo resonante separado. La expresión matricial que describe el comportamiento tanto a la entrada como a la salida de la red en términos ondas incidentes y reflejadas, Ecuaciones 2 y 3.

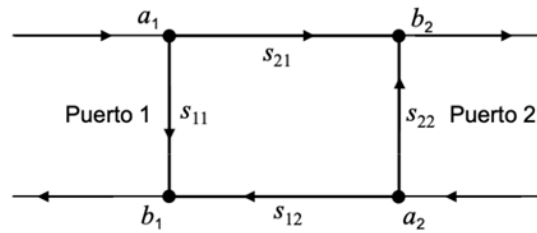
$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde:

- S_{11} y S_{22} representan parámetros de reflexión hacia el mismo puerto en el puerto 1 y el puerto 2 respectivamente
- S_{12} y S_{21} representan parámetros de transmisión del puerto 1 al 2 y del 2 al 1 respectivamente
- a_1 y a_2 representan ondas incidentes en el puerto 1 y el puerto 2 respectivamente
- b_1 y b_2 representan ondas reflejadas en el puerto 1 y el puerto 2 respectivamente

La Figura 1 muestra el diagrama de la red de 2 puertos con sus correspondientes parámetros de dispersión y ondas incidentes y reflejadas.

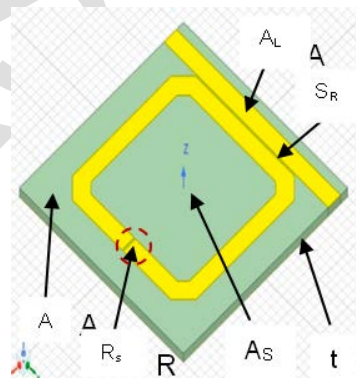


Fuente: elaboración propia

Figura 1 Diagrama de una red de 2 puertos.

Anillo resonante separado

El diseño del SRR se basa en una geometría de anillo resonante único, la cual es de tipo *microstrip* de cobre sobre un sustrato dieléctrico FR-4 [Dehning, 2023] y acoplada a una línea de transmisión *microstrip* recta que se encuentra separada del anillo. El circuito impreso del anillo resonante separado cuenta con un plano de tierra al cual se conectarán las tierras de los conectores que fungen como puertos de entrada y salida en los extremos de la línea de transmisión. Los conductores centrales de los conectores coaxiales serán a su vez conectados a los extremos de la línea de transmisión. La Figura 2 muestra la geometría del anillo resonante propuesto para ser caracterizado, el cual cuenta con una frecuencia de resonancia alrededor de los 530 MHz, mientras que la Tabla 1 muestra sus dimensiones.



Fuente: elaboración propia

Figura 2 Geometría del anillo SRR considerado en este trabajo.

El SRR es un circuito resonante serie y como tal tiene una impedancia dada por la Ecuación 4. El cual al estar en resonancia $X_{Lr} = X_{Cr}$, por lo que la frecuencia de resonancia está definida por la Ecuación 5. Misma que se deduce considerando el

circuito equivalente con elementos concentrados (*lumped*) del SRR mostrado en la Figura 2, el cual puede ser observado en la Figura 3. C_r , R_r y L_r son los parámetros concentrados asociados al anillo resonante mismo que se encuentra acoplado a una línea de transmisión microstrip con inductancia L y M que representa el acoplamiento mutuo.

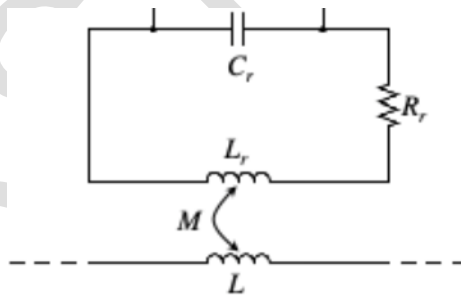
Tabla 1 Dimensiones consideradas para la fabricación del SRR.

Parámetro	Dimensión [mm]
Grosor del sustrato [t]	1.6
Área del sustrato [A]	60 x 60
Área de la línea de transmisión [A_L]	4.5 x 60
Área al exterior del SRR [A_S]	45 x 45
Ranura del anillo [R_S]	0.45
Separación anillo-línea de transmisión [S_R]	0.45

Fuente: elaboración propia

$$Z = jX_{L_r} + jX_{C_r} = j2\pi f L_r + \frac{1}{j2\pi f C_r} \quad (4)$$

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad (5)$$

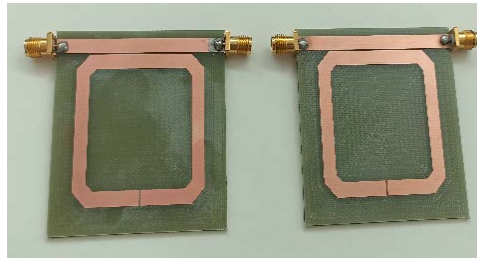


Fuente: elaboración propia

Figura 3 Circuito equivalente del SRR con elementos concentrados (*lumped*).

En lo que respecta a la fabricación del SRR, cabe mencionar que se llevó a cabo sobre un sustrato FR-4 doble cara con un grosor de 1.6 mm y con un área de 60 mm x 60 mm. El revestimiento de cobre por ambas caras fue de 1/2 oz y con un espesor de 18 μm . Tanto al puerto 1 como al puerto 2 del SRR se le soldaron conectores coaxiales jack hembra de latón y chapados en oro con una impedancia de 50 Ω . La fabricación de la placa del circuito impreso fue realizada en una máquina

LPKF ProtoMat S64 ® [LPKF, 2024], la cual es un plotter fresador multifacético de alta gama especialmente diseñado para las necesidades en proyectos de radiofrecuencia y de microondas. En la Figura 4 se pueden observar dos replicas del SRR fabricado en sus vistas superiores. La cara de abajo es un plano de tierra totalmente de cobre.

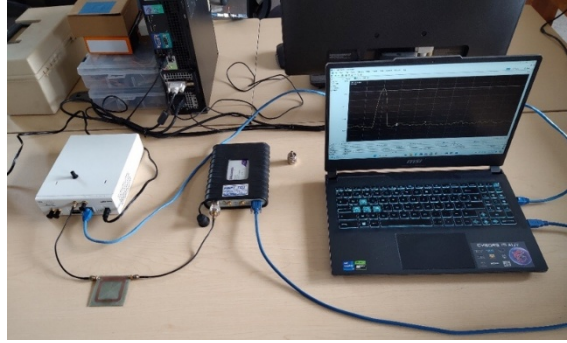


Fuente: elaboración propia

Figura 4 SRR fabricados mediante la LPKF ProtoMat S64 ®.

Montaje experimental 1

En este experimento se consideró como fuente de radiofrecuencia un *USRP* (Universal Software Radio Peripheral) N200 de Ettus Research ® [N200, 2024] conectado al puerto de entrada del SRR mediante un cable coaxial *pigtail* de 50Ω , mientras que al puerto de salida se conectó también mediante otro cable coaxial *pigtail* de 50Ω y un adaptador coaxial SMA a tipo N a un analizador de espectro RSA306 de Tektronix ® [RSA306, 2024]. Todas las impedancias tanto en los puertos de entrada y salida del SRR como del N200 y el RSA306 son de 50Ω , esto para garantizar mínimas pérdidas por desajustes de impedancia y ondas estacionarias. El N200 energizado fue conectado mediante un cable ethernet *CAT6* a una computadora portátil donde se implementó la configuración mediante bloques en GNU Radio [Fernández, 2019]. El analizador de espectros RSA306 también fue conectado a la computadora portátil para efectuar las correspondientes mediciones usando el software de fábrica. Es importante resaltar que en el generador SDR implementado mediante el N200 se llevó a cabo un barrido de frecuencias con pasos de 1 MHz en el rango de $500 \text{ a } 560 \text{ MHz}$, esto con el fin de obtener S vs frecuencia del SRR. La Figura 5 muestra el montaje experimental 1 donde se observa el N200, el SRR, el RSA306 y la computadora portátil.

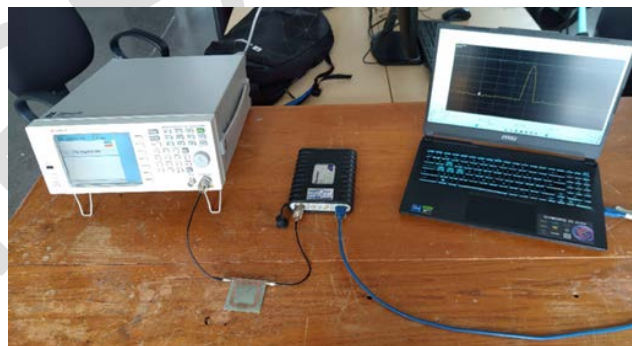


Fuente: elaboración propia

Figura 5 Montaje experimental 1 basado en N200 y RSA306.

Montaje experimental 2

Este montaje experimental fue muy similar al anterior, con la diferencia que en este caso la fuente en el puerto de entrada fue un generador de radiofrecuencia N9310A de Keysight Technologies ® [N9310A, 2024], el cual a tener puerto de salida tipo N de 50Ω , hizo necesaria la utilización de otro adaptador coaxial SMA a tipo N adicional. En este caso de 520 MHz a 540 MHz las lecturas se hicieron cada 250 KHz , siendo cada 1 MHz de 500 a 520 MHz y de 540 a 560 MHz . En la Figura 6 se puede observar el montaje experimental 2 que implica el uso de un N9310A y un RSA306.



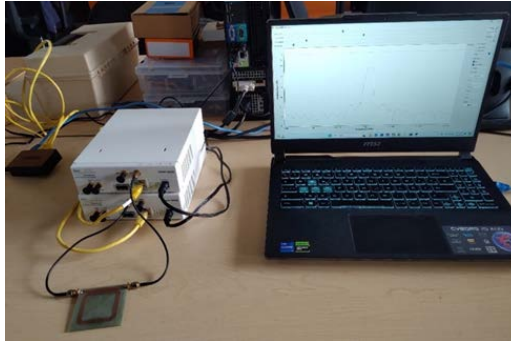
Fuente: elaboración propia

Figura 6 Montaje experimental 2 basado en N9310A y RSA306.

Montaje experimental 3

Este montaje de medición realizado consistió en medir la razón salida a entrada entre dos USRP N200, es decir totalmente SDR, implementándose uno como generador de radiofrecuencia a la entrada del SRR y el otro como receptor a la

salida. En este montaje 3 que implicó dos *USRP N200*, como en el montaje 2, también se efectuaron mediciones de 520 a 540 *MHz* con lecturas cada 250 *KHz*, mientras que de 500 a 520 *MHz* y de 540 a 560 *MHz* fueron cada 1 *MHz*. La Figura 7 muestra el montaje experimental basado en dos *USRP N200*. La conexión de cada *N200* fue a través de cable ethernet como en el montaje 1.



Fuente: elaboración propia

Figura 7 Montaje experimental 3 basado en dos *USRP N200*.

Medición con NANOVNA

La medición con un analizador vectorial de redes de bajo costo *NANOVNA* fue llevada a cabo en el mismo rango de frecuencias de 500 a 560 *MHz* considerando una calibración *SOLT* con cargas (corto, abierto, 50 Ω y *through*) de bajo desempeño y 101 valores de frecuencia. La medición efectuada fue para el parámetro S_{21} en escala lineal.

3. Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos para las 3 caracterizaciones implicadas en el presente trabajo, las cuales fueron llevadas a cabo con el fin de encontrar S del *SRR* en términos de la frecuencia, misma que permite conocer su frecuencia de resonancia. A continuación se muestran los resultados de cada montaje en cuanto a medición de amplitudes de potencia se refiere. Cabe recordar que como ya se mencionó anteriormente, este estudio se centró el comportamiento de la amplitud de salida vs amplitud de entrada, no siendo estudiada la fase:

- **Montaje 1.** En lo respecta a esta medición se consideró en el puerto de entrada un amplitud de 0.1132 dBm , es decir 1.2 mW y llevando a cabo el correspondiente barrido de frecuencias mencionado anteriormente para encontrar S en los puertos del SRR, observándose un punto mínimo (resonancia) el cual ocurrió a 530 MHz con un valor de 0.3839 .
- **Montaje 2.** En la caracterización 2 la amplitud de entrada fue de 0.56 dBm , lo que equivale a 1.13 mW con el barrido de frecuencias mencionado anteriormente para evaluar S . El punto de resonancia se observó en 529.75 MHz con un valor 0.3647 .
- **Montaje 3.** Para la medición 3 la amplitud de entrada fue de -18.71 dBm , es decir 13.45 mW con un barrido de frecuencias detallado anteriormente con el fin de calcular S . El punto de resonancia se observó en 528.75 MHz con un valor 0.3556 .
- **NANOVNA.** Para la medición con NANOVNA se obtuvo un S_{21} en escala lineal de 0.75 a la frecuencia de resonancia la cual fue de 528.75 MHz .

Comparación de resultados

Como se mencionó en secciones anteriores en este trabajo se llevó a cabo la medición de la razón salida a entrada S de un SRR mediante el uso de generadores y analizadores de señales implementados con SDR, así mismo se incluyó en la comparación mediciones con instrumentos de laboratorio convencionales de alto desempeño. El objetivo principal es evaluar mediante SDR la razón entrada salida S de un dispositivo de radiofrecuencia como lo es un SRR sin recurrir a instrumentos costosos como los analizadores vectoriales de redes (VNA, por sus siglas en inglés) de alto desempeño que pueden costar al menos 20 veces más que un dispositivo SDR como un N200. Cabe mencionar que un VNA permite incluir el comportamiento de la fase en lo que respecta a S , en este caso solo se incluyó la magnitud, pudiendo incluirse la fase en trabajos a realizar a futuro. La Figura 6 muestra las gráficas de S obtenidas en los tres montajes experimentales implementados en el laboratorio, mientras que la Tabla 2 concentra los valores obtenidos de frecuencia de resonancia para cada experimento y sus correspondientes niveles de S . Así mismo en la Figura

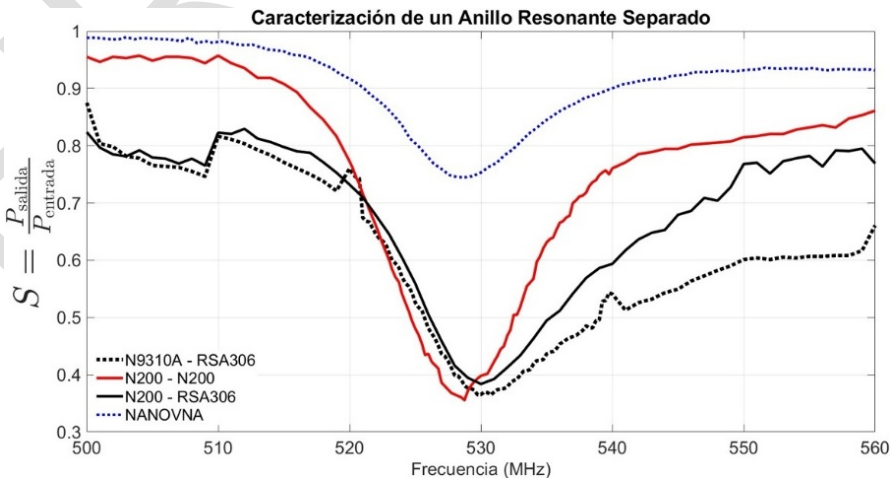
6 se incluye una medición de S_{21} en escala lineal realizada en analizador vectorial de bajo costo NAVOVNA (aproximadamente 120 dólares americanos), el cual por razones obvias es de bajo desempeño, esto con el fin de tener una comparación con un instrumento que aunque de bajo costo implicó el uso de una calibración SOLT ya que las caracterizaciones 1, 2 y 3 no lo contemplan. Se puede observar que cae a la misma frecuencia que la caracterización 3, aunque el valor de la relación entrada salida en formato lineal es de 0.75, lo cual es relativamente mucho mejor.

Tabla 2 Concentrado de frecuencias de resonancia y sus valores de S .

Montaje	Frecuencia de resonancia [MHz]	Valor de S
1	530	0.3839
2	529.75	0.3647
3	528.75	0.3556
nanovna	528.75	0.75

Fuente: elaboración propia

Se puede observar que las resonancias de los cuatro casos incluidos en la Figura 8 rondan los 530 MHz, dato que puede ser comparado con los resultados obtenidos en [Reinecke, 2018], donde para mediciones del anillo con instrumentos de alto desempeño se tiene una resonancia a 575 MHz, misma que coincide con la obtenida mediante simulaciones usando en método del elemento finito.



Fuente: elaboración propia

Figura 8 Comparación de S obtenidas con distintos instrumentos.

En las simulaciones mostradas en [Reinecke, 2018] a la frecuencia de resonancia se puede observar una alta intensidad de campo, especialmente en la ranura del anillo (split), lo que muestra resonancia. Hablando de diferencias se puede observar que el estudio hecho con instrumentos de bajo desempeño y para fines didácticos difiere 45 MHz de reportado en [Reinecke, 2018]. Los valores mínimos de S (Tabla 2) a la frecuencia de resonancia indican que a esa frecuencia el anillo no permite pasar las señales del puerto de entrada al puerto de salida a través de la línea de transmisión recta, pues a esa frecuencia se transfiere más energía al anillo.

4. Discusión

Analizando las gráficas de la Figura 8 y los datos de la Tabla 2, se puede observar que en los tres experimentos el mínimo de S ocurre prácticamente a la misma frecuencia (resonancia), lo que indica que los tres métodos son relativamente confiables en ese sentido, aunque algo que se muestra con notables diferencias, es el nivel que alcanza S , sobre todo después de 530 MHz, por ejemplo a 560 MHz, que es la frecuencia superior de la medición, los valores son de 0.7689, 0.6606 y 0.8609 para los experimentos 1, 2 y 3 respectivamente, siendo el experimento 3 (N200 con N200) el que muestra un comportamiento más acercado al característico de los SRR (antes y después de una resonancia el nivel de S es relativamente mucho más alto). Así mismo, se observa que en el experimento 3, la curva de S es la que sube después de la resonancia con mayor pendiente. La Figura 8 puede ser comparada con el parámetro S_{21} /dB (coeficiente de transmisión) reportado en [Reinecke, 2018] de 400 a 700 MHz, el cual tiene el mínimo de resonancia en 575 MHz, mientras que en este estudio se observó alrededor de los 530 MHz, dado que son distintas condiciones de medición y fabricación del SRR. Cabe mencionar que la medición reportada en [Reinecke, 2018] fue llevada a cabo en un VNA de alto desempeño, mientras que en este caso la mejor obtenida fue efectuada con instrumentos SDR de bajo desempeño N200 (experimento 3). En la gráfica S^{21} /dB (pág.102) de [Reinecke, 2018] se puede observar que el mínimo tiene un valor de -3.5 dB que equivale 0.4466 en escala lineal, mientras que en el experimento 3 fue

de 0.3556 (Tabla 2), lo que muestra que es relativamente muy similar a lo obtenido un VNA. Así mismo, se agrego una medición con un analizador vectorial de redes de bajo desempeño (NANOVNA) el cual mostró una resonancia a una frecuencia muy similar pero con un nivel de S_{21} superior, es decir de 0.75, lo cual es relativamente mucho mejor.

5. Conclusiones

Este estudio demostró que mediante dispositivos SDR e instrumentos de bajo costo se puede obtener la respuesta salida a entrada de una red de radiofrecuencia de dos puertos como lo es un SRR. Estos instrumentos son versátiles y de un costo relativamente mucho menor (120 dólares americanos) que el de un VNA de alto desempeño (25,000 dólares americanos), aunque se debe mencionar que un VNA de alto desempeño presenta muchas mayores ventajas. Finalmente, es una buena opción para laboratorios curriculares donde no se cuente con instrumentos de costosos de alto desempeño. En este estudio, el caso del experimento 3 que es efectuado con dos USRP N200, fue el que mejores resultados arrojó, así como el del NANONVA. Finalmente, cabe mencionar que medir la razón salida a entrada de un dispositivo en radiofrecuencia mediante instrumentos versátiles y de bajo costo permite aprovechar la infraestructura educativa con la que se cuenta en universidades públicas que ofrecen programas educativos de licenciatura en electrónica y telecomunicaciones. Así mismo, el uso de radios definidos por software permite modificar la frecuencia de operación y otras características del sistema de medición.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Cheng Z. *Communication Electronic Circuits*, China Science Publishing & Media Ltd, 2020.
- [2] Dehning K. Split-Ring Resonator Based Sensor for the Detection of Amino Acids in Liquids, *Sensors*, 23(2), 645, 2023.
- [3] Donat W. *Explore Software Defined Radio: Use SDR to Receive Satellite Images and Space Signals*, Pragmatic Programmers LLC, 2021.

- [4] Fernandez M. *Introducción a SDR con GNU Radio*, Marcombo, 2019.
- [5] LPKF, <https://www.lpkf.com/en/industries-technologies/research-in-house-pcb-prototyping/products/lpkf-protomat-s64>, 2024.
- [6] Matekovits L. *Printed Antennas for 5g Networks*, Springer, 2022.
- [7] NANOVNA, https://uelectronics.com/product/nanovna-h4-analizador-de-redes-vectorial-10khz-a-1-5ghz/?srsltid=AfmBOop6iGEHCTXB-x_98109uA4qit7bTfGpHFUvo1NslcWh1qSek6Dw, 2024.
- [8] N200, <https://www.ettus.com/all-products/un200-kit/>, 2024.
- [9] N9310A, <https://www.keysight.com/my/en/product/N9310A/n9310a-rf-signal-generator.html>, 2024.
- [10] Pekçokgüler N. A novel equivalent circuit model for split ring resonator with an application of low phase noise reference oscillator, preprint, *Integration the VLSI Journal*, 2017.
- [11] Rappaport T. *Wireless Communications: Principles and Practice*, Second Edition, Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series, 2002.
- [12] Reinecke T. Design and evaluation of split-ring resonators for aptamer-based biosensors. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 2018.
- [13] RSA306, <https://www.tek.com/en/datasheet/rsa306-usb-real-time-spectrum-analyzer-datasheet-0>, 2024.
- [14] Tomasi W. *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. Cuarta Edición, Pearson Education, 2003.
- [15] Tuttlebee W. *Software Defined Radio: Enabling Technologies*, Wiley, 2002.