

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ESTRUCTURAS DE SENSORES DE
MICROONDAS PLANARES PARA LA DETECCIÓN DE PRESENCIA DE
GLIFOSATO EN EL AGUA**

**Duver Ricardo Vargas Solano
José Luis Zamora Fernández**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ, D. C., 06 de noviembre de 2017**

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ESTRUCTURAS DE SENSORES DE
MICROONDAS PLANARES PARA LA DETECCIÓN DE PRESENCIA DE
GLIFOSATO EN EL AGUA**

**Duver Ricardo Vargas Solano
José Luis Zamora Fernández**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Electrónico y Telecomunicaciones**

**Docente Director:
Ingeniero Germán Andrés Álvarez**



**FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ, D. C., 06 de noviembre de 2017**



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Sin Obras Derivadas — No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

Nota de aceptación

Director de Investigación
Ing. German Andrés Álvarez

Asesor Metodológico
Ing. German Andrés Álvarez

Jurado

Bogotá D.C., noviembre de 2017

Dedico esta tesis a mis Padres y Hermana que me han apoyaron en las circunstancias más difíciles. A mi hijo Esteban José Zamora, por ser la luz que motiva y brinda la magia para continuar con la lucha.

Y a todos los que me han apoyado y ayudado en estos años de lucha.

José Luis Zamora F.

Dedico la culminación de este proyecto a mi familia, a ellos doy gracias por todo su apoyo incondicional en este proceso académico, por el fortalecimiento en los momentos más difíciles de esta etapa de crecimiento profesional. A mi novia por ser parte fundamental con su continuo respaldo en este ciclo, y en general a todas las personas que me han ayudado en estos años de esfuerzo y lucha.

Duver Ricardo Vargas S.

Agradezco al ingeniero Germán Andrés Álvarez, por la confianza, el ánimo, la paciencia y por la transmisión de su conocimiento en aras de culminar con éxito este trabajo.

A mis Padres y Hermana, por la paciencia, por las noches de amor y calor de hogar en las jornadas más difíciles y por su ayuda en todos los momentos de angustia y nieve.

A todos los que vuelven a recorrer un camino, por el valor y porque confío en que la constancia vence todos los obstáculos y como recompensa al esfuerzo la vida los debe ubicar de nuevo en las esferas de la felicidad y el éxito.

A Aida Ostos, al ingeniero Juan Carlos Sánchez y a mis compañeros de la Universidad Católica, por su amistad, comprensión, risas y ayuda incondicional.

José Luis Zamora F

Agradezco a Dios por esta gran oportunidad que puso en mi camino.

A mis padres y mi hermano que fueron la razón de seguir triunfando, la gran motivación de seguir adelante, por su apoyo absoluto y por cada palabra de aliento que me brindaron en toda oportunidad.

Al profesor Germán Andrés Álvarez, por la confianza depositada en las largas horas de dedicación en la transmisión de su conocimiento, gracias por la confianza brindada y el gran apoyo que ha sido durante este proceso.

A mi novia Lorena Cruz por todos los momentos de apoyo y la gran motivación que me dio en los momentos más difíciles de este proceso.

A mis compañeros de carrera que fueron la unidad para lograr llegar hasta al final, ya que más que unos simples compañeros nos convertimos en una unidad la cual gran parte de los que comenzamos estamos cerrando con este mismo proceso.

A mi compañero José Luis que se convirtió desde primer semestre en gran parte de la ayuda para la superación de cada reto académico que se fue encontrando, gracias por la ayuda incondicional.

Y en general a las personas que pusieron su granito de arena para que esta gran meta se pudiera cumplir.

Duver Ricardo Vargas Solano

TABLA DE CONTENIDO

1. TÍTULO.....	13
2. ALTERNATIVA.....	13
3. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.....	13
4. EJE TEMÁTICO.....	13
5. INTRODUCCION.....	14
6. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.....	16
7. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
8. MARCO CONCEPTUAL.....	20
9. MARCO TEÓRICO.....	23
10. ESTADO DEL ARTE.....	32
10.1 MEDIDAS DE PERMITIVIDAD BASADAS EN TECNOLOGÍA DE MICROCINTA.....	32
10.2 NUEVOS DISEÑOS DE FILTROS PLANARES EN TECNOLOGÍAS DE MICROCINTA Y FINLINE UTILIZANDO RESONADORES DE ANILLOS DIVIDIDOS.....	33
10.3 MEDIDOR DE LA PERMITIVIDAD DIELECTRICA COMPLEJA DE LÍQUIDOS EN EL RANGO DE AUDIOFRECUENCIA.....	34
10.4 MÉTODO DE PERTURBACIÓN.....	35
10.5 MEDICIONES DIELECTRICAS DE ALTA FRECUENCIA.....	35
10.6 RESONADOR DE CILINDRO DIVIDIDO.....	36
10.7 MÚLTIPLES LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.....	36
10.8 SONDA DE CAMPO CERCANO.....	37
11. OBJETIVOS.....	38
11.1 OBJETIVO GENERAL.....	38
11.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	38
12. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	39
12.1 ALCANCES.....	39
12.2 LIMITACIONES.....	39
13. METODOLOGIA.....	40
13.1 ESTUDIO DE FACTIBILIDAD.....	40

13.2	INVESTIGACIÓN DEL PROYECTO	40
13.3	EJECUCIÓN Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO.....	41
13.4	IMPLEMENTACIÓN DEL SENSOR SEGÚN SUS RESULTADOS ELÉCTRICOS.....	41
14.	CSRR Y SIMULACION EN ADS.....	42
14.1	CSRR (COMPLEMENTARY SPLIT-RING RESONATOR).....	42
14.2	DISEÑO SENSOR CSRR UTILIZANDO ADS.....	44
14.3	SIMULACIÓN SENSOR CSRR Y PARÁMETROS S	54
15.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	62
15.1	MÉTODO DE CALIBRACION SHORT-OPEN-LOAD-THROUGH (SOLT) 63	
15.2	CALIBRACIÓN VNA ROHDE&SCHARZ FSH8 SPECTRUM ANALYZER 100 KHZ – 8GHZ.....	63
15.3	CALIBRACION DEL VNA.....	65
15.4	DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO.....	69
15.4.1	EXPERIMENTACIÓN SENSOR CSRR	71
15.4.2	CSRR CUADRADO	71
16.	RESULTADOS Y ANALISIS	82
16.1	SENSOR CUADRADO:.....	82
16.2	CSRR CIRCULAR	85
16.3	GRAFICA DE RESULTADO DEL SENSOR CIRCULAR Y CUADRADO TEÓRICO Y PRÁCTICO EN SUBSTRATO AIRE	87
17.	CONCLUSIONES	93
18.	BIBLIOGRAFÍA	94

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 PARÁMETROS DE RELAJACIÓN DIELECTRICA PARA EL AGUA	21
TABLA 2 CONCENTRACIÓN DE LA DISOLUCIÓN DE GLIFOSATO	70
TABLA 3 RESULTADO EXPERIMENTAL RESONADOR CUADRADO.....	83
TABLA 4 RESULTADO EXPERIMENTAL RESONADOR CIRCULAR.....	86
TABLA 5 FRECUENCIA BAJO DIFERENTES PARÁMETROS	90

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 SENSOR PLANAR. (A) GEOMETRÍA. (B) LÍNEAS DE CAMPO ELÉCTRICO (E).....	23
FIGURA 2 POLARIZACIÓN DE UN MATERIAL DIELECTRICO.	25
FIGURA 3 LÍNEAS DE CAMPO CON $H \ll Y$. MODO QUASI TEM	27
FIGURA 4 LÍNEAS DE CAMPO CON $H > Y$	28
FIGURA 5 REPRESENTACIÓN CUANTITATIVA DE LA PERMITIVIDAD	30
FIGURA 6 CAVIDADES RESONANTES CIRCULARES.....	33
FIGURA 7 DIAGRAMA CAVIDADES RESONANTES CIRCULARES.....	34
FIGURA 8 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS $L_2= 33$ MM, $W = 3$ MM, $G = 2$ MM, $C = 2$ MM Y $R= 8$ MM.....	44
FIGURA 9 CREATE A NEW WORKSPACE.....	45
FIGURA10 WORKSPACE NAME	45
FIGURA 11 STANDARD	46
FIGURA 12 LAYOUT	46
FIGURA 13 NEW LAYOUT	47
FIGURA 14 PARÁMETROS SENSOR.....	47
FIGURA 15 SELECCIÓN DE CAPA.....	48
FIGURA 16 DISEÑO GEOMÉTRICO 1	48
FIGURA 17 DISEÑO GEOMÉTRICO 2	49
FIGURA 18 OPERACIÓN BOOLEANA	49
FIGURA 19 OPERACIÓN BOOLEANA 1	50
FIGURA 20 OPERACIÓN BOOLEANA DIFERENCIA	50
FIGURA 21 DISEÑO GEOMÉTRICO 3	50
FIGURA 22 DISEÑO GEOMÉTRICO 3	51
FIGURA 23 DISEÑO GEOMÉTRICO 4.....	51
FIGURA 24 DISEÑO GEOMÉTRICO 5.....	52
FIGURA 25 DISEÑO GEOMÉTRICO 6.....	52
FIGURA 26 UNIÓN DISEÑO	53
FIGURA 27 RESULTADO UNIÓN	53
FIGURA 28 LÍNEA DE TRANSMISIÓN CAPA 2	54
FIGURA 29 SELECCIÓN SUBSTRATO	55
FIGURA 30 DISEÑO GEOMÉTRICA 2.....	55
FIGURA 31 INSERT PIN	56
FIGURA 32 INSERT PIN 1 Y PIN 3	56
FIGURA 33 INSERT PIN 2 Y PIN 4.....	57
FIGURA 34 EM SIMULATIONSETUP.....	57
FIGURA35PORTSEEDITS	57
FIGURA 36 PORTS EDITS 2	58
FIGURA37 PORTS EDITS 3.....	58
FIGURA38 PLAN DE FRECUENCIA	59
FIGURA 39 SIMULACIÓN.....	59
FIGURA40 SIMULACIÓN PARÁMETROS S.....	60

FIGURA 41 SIMULACIÓN PARÁMETROS S.....	61
FIGURA 42 SIMULACIÓN S21	61
FIGURA 43 KIT DE SENSORES CSRR.....	62
FIGURA 44 ROHDE&SCHARZ FSH8 SPECTRUM ANALYZER 100 KHZ – 8GHZ...	63
FIGURA 45 SONDA ZV-Z192 HF CABLE.....	64
FIGURA 46 KIT DE CALIBRACIÓN SOLT.....	64
FIGURA 47 VNA PUERTO 1 OPEN	65
FIGURA 48 VNA PUERTO 2 OPEN	66
FIGURA 49 VNA PUERTO 1 SHORT	66
FIGURA 50 VNA PUERTO 2 SHORT	67
FIGURA 51 VNA LOAD.....	67
FIGURA 52 VNA TROUGH	68
FIGURA 53 CALIBRACION CON LÍNEA DE TRANSMISIÓN	68
FIGURA 54 CARTA DE SMITH VNA.....	69
FIGURA 55 ELEMENTOS DE EXPERIMENTACIÓN.....	71
FIGURA 56 CONCENTRACIÓN 0.2 ML.....	72
FIGURA 57 CONCENTRACIÓN 0.4 ML.....	73
FIGURA 58 CONCENTRACIÓN 0.6 ML.....	74
FIGURA 59 CONCENTRACIÓN 0.8 ML.....	75
FIGURA 60 CONCENTRACIÓN 1 ML.....	76
FIGURA 61 CONCENTRACIÓN 1.2 ML.....	77
FIGURA 62 CONCENTRACIÓN 1.4 ML.....	78
FIGURA 63 CONCENTRACIÓN 1.6 ML.....	79
FIGURA 64 CONCENTRACIÓN 1.8 ML.....	80
FIGURA 65 CONCENTRACIÓN 2 ML.....	81
FIGURA 66 CORRELACIÓN CSRR CUADRADO.....	83
FIGURA 67 CONCENTRACIÓN VS MAGNITUD CUADRADO	84
FIGURA 68 CORRELACIÓN CSRR CIRCULAR.....	86
FIGURA 69 CONCENTRACIÓN VS MAGNITUD CIRCULAR	87
FIGURA 70 ADS SUBSTRATO AIRE	88
FIGURA 71 VNA SUBSTRATO AIRE	88
FIGURA 72 VNA SUBSTRATO AIRE	89
FIGURA 73 SUBSTRATO AGUA PERMITIVIDAD 80	90
FIGURA 74 SUBSTRATO AGUA-PERMITIVIDAD 75.....	91
FIGURA 75 SUBSTRATO AGUA-PERMITIVIDAD 70.....	91

GLOSARIO

ADS: Sistema de diseño avanzado. Software para simular sensores de microondas, entre otros.

CSRR: Resonador de anillo dividido complementario. Es una estructura planar utilizada para medir magnitudes eléctricas.

FR4: Substrato que consiste en un material de fibra de vidrio, impregnado con una resina epóxica resistente a las llamas. Su nombre obedece a FR (Flame Retardant).

Microstrip: Línea de transmisión eléctrica fabricada utilizando placa de circuito impreso (PCB).

Permitividad: Constante dieléctrica que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio.

Parámetros S: Llamados parámetros de dispersión, son utilizados para definir el comportamiento de redes o sistemas de radiofrecuencia.

Substrato: Material dieléctrico utilizado en circuitos impresos o en presencia de una señal eléctrica.

1. TÍTULO.

Diseño y simulación de estructuras de sensores de microondas planares para la detección de presencia de glifosato en el agua.

2. ALTERNATIVA

Trabajo de Investigación tecnológica.

3. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Gestión y tecnología para la sustentabilidad de las comunidades.

4. EJE TEMÁTICO.

Agricultura de precisión: aplicaciones tecnológicas (sensores planares de microondas).

5. INTRODUCCIÓN

La utilización generalizada de los compuestos orgánicos en la sociedad moderna y su dispersión a través de las aguas residuales han dado lugar a una contaminación extensa de las fuentes y las aguas potables. En el uso diario hay hasta 70.000 productos químicos y emergentes conocidos que podrían estar presentes en varios recursos hídricos, incluso para la producción de agua potable. La gran mayoría de estos compuestos no están regulados en los desagües de aguas residuales o en el agua potable, mientras que las trazas de ciertos compuestos pueden afectar a la fauna acuática.

La gran mayoría de la contaminación de las fuentes de agua se da por el uso de pesticidas, herbicidas y plaguicidas en el sector agrario. Estos productos químicos tienen en su gran mayoría glifosato como componente activo y mayoritario, cabe anotar que es el herbicida más utilizado en el mundo en la actualidad; este, es una molécula formada por una fracción de glicina y un radical amino fosfato unido como sustituyente de uno de los hidrógenos del grupo a-amino¹.

El glifosato en el suelo es fuertemente absorbido por las partículas coloidales a través de la molécula del ácido fosfórico, presentando una vida media de 30 días y sufriendo degradación de tipo microbiana obteniendo ácido aminometilfosfónico y bióxido de carbono¹. Estas partículas son fuertes contaminantes de las fuentes de agua y en su gran mayoría no se detecta a tiempo, ocasionando problemas de salud.

En la actualidad, existen estudios que ratifican que el glifosato, acorta el desarrollo de los insectos, reduce la fertilidad de anfibios, puede causar efectos endocrinos en los mamíferos y hasta induce el crecimiento de células de cáncer de mama humano a través de receptores de estrógenos².

La detección de presencia de glifosato en fuentes de agua se basa principalmente en la utilización de métodos como la cromatografía³. Esta técnica implica el traslado de muestras al laboratorio por parte de personal especializado, la utilización de

¹Arroyave, Claudia. Guías para el manejo de Urgencias Toxicológicas. Convenio Universidad Nacional de Colombia. Ministerio de la Protección Social. 2008. Disponible en la web en: <https://www.minsalud.gov.co/Documentos%20y%20Publicaciones/Gu%C3%ADa%20de%20Manejo%20de%20Urgencias%20Toxicol%C3%B3gicas.pdf>

²Kaczewer, Jorge. Toxicología del glifosato: riesgos para la salud humana. Universidad de Buenos Aires. Dic. 2002. Disponible en la web: [http://www.ecoportel.net/Temas-Especiales/Salud/Toxicologia del Glifosato Riesgos para la salud humana](http://www.ecoportel.net/Temas-Especiales/Salud/Toxicologia%20del%20Glifosato%20Riesgos%20para%20la%20salud%20humana).

³Ayora, María José. Universidad de Jaén. Departamento de Química. Técnicas cromatográficas. 2010. Disponible en la web: [http://www4.ujaen.es/~mjayora/docencia_archivos/Quimica%20analitica%20ambiental/Tema 6.pdf](http://www4.ujaen.es/~mjayora/docencia_archivos/Quimica%20analitica%20ambiental/Tema%206.pdf).

equipos de alto costo como un cromatógrafo líquido de alta eficiencia HPLC (IDEAM 2009) y la manipulación del mismo por parte de operarios y expertos en el uso de los aparatos de laboratorio⁴.

El diseño de filtros en configuraciones planares bajo la tecnología de la utilización de resonadores de anillos complementarios divididos (CSRRs) de su sigla en inglés: *complementary-split-ring-resonators*; resulta bastante atractivo, para modelar el comportamiento eléctrico en presencia de una mezcla de agua y glifosato. Estos dispositivos ofrecen un excelente desempeño en las bandas de las microondas y sus estructuras son miniaturizadas con fabricación bajo procesos fotolitográficos sencillos.⁵

Este documento presenta una información completa sobre el uso de la electrónica de alta frecuencia, la caracterización de sensores planares, su implementación, curvas de comportamiento y descripción de su respuesta al ser expuestos a diferentes concentraciones de glifosato. Estos resultados permitirán el desarrollo de tablas y curvas de comportamiento para ser utilizadas en cualquier fuente de agua, con la manipulación de los prototipos creados en el trabajo de grado.

En el campo de la utilización de *software* especializado, este proyecto se desarrolló con la inclusión de diversos simuladores, a saber:

- ADS: Software que ofrece soluciones computacionales precisas y eficientes para el diseño y análisis de electromagnéticos. Incorpora un simulador 2D EM que permite elegir el método más adecuado para el diseño y electromagnética de dispositivos que operan en una amplia gama de altas frecuencias.
- MATLAB: Software de entorno matemático, que incorpora un lenguaje propio de programación en torno a solucionar problemas de ciencia e ingeniería. Ofrece muchas potentes herramientas adicionales en el campo de la simulación como *toolboxes* y *blocksets*, utilizados en este proyecto.

En este trabajo de grado se realiza la obtención de la concentración de glifosato en fuentes de agua a través del uso de sensores funcionales de microondas de bajo costo, especificando una adecuada metodología que permita el monitoreo de las mismas en zonas de influencia de herbicidas, y constituya un método de alertas tempranas para evitar problemas a la salud humana y al buen funcionamiento del ecosistema.

⁴Perez, Teresa. IDEAM. Protocolo: determinación de glifosato en aguas (en línea). Colombia. Ene. 2008. Disponible en la web en: http://www.ambientalex.info/guias/IDEAM_PROTOCOLO_DeterminaciondeGlifosatoenAguas.pdf.

⁵Pozar, M. David. (2012). *Microwave Engineering*. United States of America: John Wiley & Sons.

6. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

Durante las últimas décadas, se han realizado esfuerzos importantes sobre los diferentes riesgos del uso de herbicidas y más específicamente del uso del glifosato en el sector agrícola colombiano. Estudios realizados por la defensoría del Pueblo y de la Dirección Nacional de Estupefacientes (DNE), reportan cerca de 8.000 quejas de ciudadanos habitantes de zonas de influencia de este herbicida; de éstas, el 87% corresponde a daños en la vegetación, otras están directamente relacionadas con la salud humana y animal imputada a la exposición del glifosato⁶.

Se encontraron factores importantes en el transporte de los herbicidas hacia los cuerpos de agua naturales como la dispersión aérea por los vientos, la volatilización y el arrastre por aguas de lluvia y riego, causando daños o efectos adversos a los organismos acuáticos, la fauna presente en los cuerpos de agua y el consumo de la misma por parte de animales y humanos; lo cual constituye un problema ambiental importante en las últimas décadas⁷.

Sin embargo, los esfuerzos por definir y determinar la respectiva presencia del glifosato en el agua han comenzado a quedarse cortas con el gran aumento del uso de este componente. Entidades gubernamentales y educativas han intentado buscar diferentes mecanismos de desarrollo de detección y medición de niveles de concentración del glifosato, encontrándose entre otras técnicas la Cromatografía de gases (CG), o la Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia (CLAE) usada en estudios realizados por la Universidad Nacional de Colombia en el 2012 sobre suelos del Tolima para detectar su impacto en cultivos de arroz, aguas, suelos y sedimentos entre otros⁸.

Por otro lado investigadores de la Universidad de los Andes crearon un método alternativo a la cromatografía que consiste en aplicar una corriente eléctrica a una sustancia (glifosato en este caso), la cual sufre una reacción química cuando entra

⁶León, J. Burgos, C. Toro, C. Luengas, C Ruiz y C. Romero. Observaciones al 'Estudio de los efectos del Programa de Erradicación de Cultivos Ilícitos mediante la aspersion aérea con el herbicida Glifosato (PECIG) y de los cultivos ilícitos en la salud humana y en el medio ambiente' http://www.idea.unal.edu.co/publica/docs/Observ_IDEA_a_doc_CICAD.pdf (Bogotá, 11 de mayo de 2005).

⁷SANCHEZ, José. Ettiene, Gretty. Rivas, Zulay. Determinacion de glifosato en muestras de agua en la cuenca del rio catatumbo. Ciencia, 2005, 13(2), pp. 211-217 Disponible en la web en: <http://www.produccioncientifica.luz.edu.ve/index.php/ciencia/article/view/9253/9242>

⁸Bustos, Martha Cristina. Destino ambiental del glifosato en una zona arrocera del Tolima, Colombia. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Agronomía, Escuela de Posgrados Bogotá, D.C., Colombia 2012. Disponible en la web en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/7585/1/7797036.2012.pdf>

en contacto con el carbonato de plata y emite una señal que al ser medida, es proporcional a la concentración de dicha sustancia⁹.

Actualmente existe en la Universidad Nacional de Colombia, un semillero de investigación abierto desde el año 2009, por el Profesor Jaime Fernando González Mantilla sobre la “Implementación de la técnica de cuantificación de glifosato en aguas utilizando el método de microELISA”, técnica que se emplea en la detección de un antígeno inmovilizado, así los anticuerpo producirán una reacción la cual podrá ser medida espectrofotométricamente, este método es implementado con éxito en países como Canadá y que en Colombia no se ha implementado hasta el momento¹⁰.

Sin embargo, los métodos descritos anteriormente no ofrecen alertas tempranas, dado que se realizan partiendo del conocimiento de la presencia del glifosato y además de lo anterior necesitan personal especializado para el procesamiento en laboratorio de las muestras tomadas.

A partir de esta problemática y en vista de la gran importancia en la detección de glifosato, tanto a nivel agropecuario, como en fuentes de agua, aguas residuales y sedimentos, se realiza esta investigación tecnológica para generar una alternativa de alerta temprana, haciendo frente a la aplicación de sensores planares de microondas, para la medición de sus comportamientos eléctricos. Esto con el fin de generar una nueva alternativa como estrategia aplicable, considerando las especificidades sociales y económicas de la alerta por medio de sensores de bajo costo.

⁹Cortés, María. Suárez, Marco. Nuevo método para detectar glifosato. Universidad de los Andes. 25/04/2017, Disponible en la web en: <http://noticias.universia.net.co/vida-universitaria/noticia/2007/11/12/246129/nuevo-metodo-detectar-glifosato.html>

¹⁰Gonzalez, Jaime. Implementación de la técnica de cuantificación de glifosato en aguas utilizando el método de microELISA. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Bogotá. 2009. Disponible en la web en: http://www.hermes.unal.edu.co/pages/Consultas/Proyecto.xhtml?jsessionid=5CD4D230D894D8DA_C3ACFE415F884732.tomcat8?idProyecto=11251#resumen

7. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia, la agricultura constituye uno de los principales sectores económicos para la obtención de ingresos en la población, ocupando aproximadamente el 40% de la fuerza laboral y representando el 50% de las divisas del país. El modelo de desarrollo agrícola se sustenta, principalmente en el uso de agroquímicos, los cuales, en la mayoría de las ocasiones, son utilizados sin el respectivo concepto técnico⁵.

Los agroquímicos son sustancias químicas producidas sintéticamente, los cuales buscan la eliminación de plagas o de cualquier organismo patogénico de un cultivo. Dentro de los agroquímicos se encuentran los fertilizantes, fungicidas, herbicidas, insecticidas y reguladores de crecimiento. Se entiende por herbicida a los productos químicos (sustancias químicas o mezclas de sustancias), que se utilizan para el control y eliminación de plantas indeseadas, malas hierbas o maleza.

El herbicida más utilizado a nivel mundial es el glifosato. En Colombia este herbicida es utilizado ampliamente, tanto para las fumigaciones de cultivos ilícitos, como para la eliminación de plagas y malas hierbas en la agricultura, especialmente en cultivos de arroz, café, caña de azúcar, papa, tomate, cebolla entre otros. Vale la pena resaltar que, en el país, actualmente hay más de 100 presentaciones diferentes de herbicidas, los cuales contienen glifosato¹¹.

En los últimos años se ha prestado especial atención al estudio de la contaminación tanto del suelo como de aguas subterráneas, que por el uso de plaguicidas y debido a la utilización de productos químicos constituyen una importante fuente de contaminación en zonas de intensa actividad agrícola. En particular se han presentado diferentes estudios científicos donde se advierte sobre los impactos negativos relacionados al uso de pesticidas como el glifosato, se ha probado que este pesticida tiene efectos de toxicidad en anfibios¹², gusanos¹³, genera alteraciones del ciclo celular¹⁴, malformaciones embrionales, alteraciones del

¹¹D. Sánchez, J. Lis-Gutiérrez, J. Campo, and J. P. Herrera S., "Estudios Económicos Sectoriales: Estudio sobre plaguicidas en Colombia," 2013

¹²Dinehart SK, Smith LM, McMurry ST, Smith PN, Anderson TA, Haukos DA. "Acute and chronic toxicity of Roundup Weathermax and Ignite 280 SL to larval *Spea multiplicata* and *S. bombifrons* from the Southern High Plains, USA," *Environ. Pollut.*, vol. 158, no. 8, pp. 2610–2617, 2010. Disponible en la web en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749110001843>

¹³C. L. Achiorno, C. d. Villalobos, and L. Ferrari, "Toxicity of the herbicide glyphosate to *Chordodes nobilii* (Gordiida, Nematomorpha)," *Chemosphere*, vol. 71, no. 10, pp. 1816–1822, 2008

¹⁴J. Marc, O. Mulner-Lorillon, and R. Bellé, "Glyphosate-based pesticides affect cell cycle regulation," *Biol. Cell*, vol. 96, no. 3, pp. 245–249, 2004

sistema inmunológico en peces¹⁵. Así mismo, se ha comprobado que es un agente cancerígeno para el ser humano^{16,17}.

Sin embargo, teniendo en cuenta el uso de los diferentes compuestos agroquímicos, nuestro país no ha prestado la atención necesaria a esta problemática ambiental y sanitaria, no se ha optado por la implementación medidas suficientes de alertas tempranas para detectar la presencia de estos agentes en fuentes de primera necesidad como puede ser el agua.

En la actualidad los diferentes mecanismos de detección del Glifosato se han basado en pruebas químicas de los diferentes elementos (residuos de glifosato y AMPA ácido aminometilfosfonico) mediante pruebas colorimétricas o con métodos cromatográficos de identificación y cuantificación de gases de alta resolución de captura de electrones.

Se ha decidido en este trabajo de grado, fortalecer el desarrollo de un método de alerta innovador, por medio de la aplicación de sensores planares para el análisis del comportamiento eléctrico del compuesto.

Con base en lo anteriormente expuesto se hace indispensable presentar soluciones que permitan evaluar la calidad del agua que es empleada tanto para la producción agrícola, avícola, porcícola, ganadera, así como para el consumo humano en general.

En este contexto el presente proyecto se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuáles son las características geométricas y el rango de frecuencia adecuados para la detección de glifosato en el agua usando estructuras planares de microondas?

¹⁵L. C. Kreutz, L. J. Gil Barcellos, A. Marteninghe, E. Davi dos Santos, and R. Zanatta, "Exposure to sublethal concentration of glyphosate or atrazine-based herbicides alters the phagocytic function and increases the susceptibility of silver catfish fingerlings (*Rhamdia quelen*) to *Aeromonas hydrophila* challenge," *Fish Shellfish Immunol.*, vol. 29, no. 4, pp. 694–697, 2010.

¹⁶WHO International Agency for Research on Cancer, "IARC Monographs Volume 112 : evaluation of five organophosphate insecticides and herbicides," 2015.

¹⁷S. Thongprakaisang, A. Thiantanawat, N. Rangkadilok, T. Suriyo, and J. Satayavivad, "Glyphosate induces human breast cancer cells growth via estrogen receptors," *Food Chem. Toxicol.*, vol. 59, pp. 129–136, 2013

8. MARCO CONCEPTUAL

Muchos productos agrícolas, así como organismos vivos o alimentos, se pueden considerar materiales dieléctricos, Las propiedades dieléctricas son propiedades intrínsecas que describen la interacción electromagnética. A menudo se les conoce como la firma eléctrica de un material dado. Es la naturaleza intrínseca de estas propiedades lo que permite el desarrollo útil de aplicaciones de detección y aplicaciones de calentamiento dieléctrico. Las propiedades dieléctricas dependen de la frecuencia, temperatura y composición. Su dependencia de la composición es la base para el desarrollo de métodos y sensores para la evaluación rápida y no destructiva de las propiedades físicas de los materiales.

Para los materiales que contienen agua, el campo de aplicación de tales métodos y sensores es amplio, abarcando campos tales como alimentos, agricultura, farmacia y minería. Teniendo esto como premisa, los materiales dieléctricos, y por tanto su naturaleza electromagnética puede ser descrita mediante su permitividad y permeabilidad, las cuales determinan su interacción con los campos eléctrico y magnético en la región que ocupan¹⁸.

En el estudio de los materiales y sus propiedades, se relacionan ciertas características propias de cada uno de ellos como son: velocidad de propagación de la onda electromagnética presente a través de la región que ocupa dicho material, permeabilidad magnética (μ) y la permitividad eléctrica (ϵ) del material.

Las propiedades dieléctricas de los materiales dependen de la composición química del mismo, especialmente de la presencia de iones móviles y de los momentos dipolares permanentes asociados con el agua y cualquier otra molécula constitutiva del material de interés. Esto hace que las propiedades dieléctricas de la mayoría de los materiales usados en la industria agropecuaria varíen considerablemente con la frecuencia de los campos electromagnéticos a los cuales puedan ser sometidos¹⁹.

Kaatze²⁰ ha presentado que el comportamiento en frecuencia de la permitividad eléctrica en el caso de agua pura se puede representar teniendo en cuenta parámetros especiales como son: constante dieléctrica a altas frecuencias (ϵ_∞),

¹⁸S. K. Dinehart, L. M. Smith, S. T. McMurry, P. N. Smith, T. A. Anderson, and D. A. Haukos, "Acute and chronic toxicity of Roundup Weathermax?? and Ignite?? 280 SL to larval *Spea multiplicata* and *S. bombifrons* from the Southern High Plains, USA," *Environ. Pollut.*, vol. 158, no. 8, pp. 2610–2617, 2010.

¹⁹C. L. Achiorno, C. d. Villalobos, and L. Ferrari, "Toxicity of the herbicide glyphosate to *Chordodes nobilii* (Gordiida, Nematomorpha)," *Chemosphere*, vol. 71, no. 10, pp. 1816–1822, 2008.

²⁰U. Kaatze, "Complex Permittivity of Water as a Function of Frequency and Temperature," *J. Chem. Eng. Data*, vol. 34, no. 4, pp. 371–374, 1989.

tiempo de relajación de las moléculas en pico segundos y la contribución a frecuencia cero o en DC (ϵ_s). Estos parámetros son presentados en la Tabla 1 y serán objeto de estudio en el marco teórico.

Tabla 1. Parámetros de relajación dieléctrica para el agua

Temperatura [°C]	ϵ_s	ϵ_∞	τ [pS]	Frecuencia de relajación [GHz]
0	87.9	5.7	17.67	9.007
10	83.9	5.5	12.68	12.552
20	80.2	5.6	9.36	17.004
30	76.6	5.2	7.28	21.862
40	73.2	3.9	5.82	27.346
50	69.9	4.0	4.75	33.506
60	66.7	4.2	4.01	39.690

Fuente: “Glyphosate-based pesticides affect cell cycle regulation,” (J. Marc, O. Mulner-Lorillon, and R. Bellé)

En el caso de materiales mezclados con agua, se pueden usar los parámetros listados en la Tabla 1. Sin embargo, en mezclas orgánicas es usual que el agua se encuentre químicamente enlazada con otras moléculas formando mezclas no homogéneas. Así el entender y predecir el comportamiento dieléctrico de mezclas de materiales a diferentes frecuencias, temperaturas y niveles de hidratación, presenta en sí mismo un importante campo abierto de investigación.

Dado que las propiedades dieléctricas de los materiales empleados en la agricultura son en su mayoría desconocidas, es necesario determinarlas experimentalmente mediante las técnicas de medición adecuadas, dependiendo de los rangos de frecuencia de interés. En este sentido, diferentes topologías, recubrimientos y tecnologías han sido propuestos para el desarrollo de sensores con aplicaciones en el ámbito medioambiental.

Algunos trabajos recientes en esta área incluyen resonadores planares LC (inductor-capacitor) con recubrimientos TiO_2 , utilizados para el monitoreo del crecimiento de bacterias bajo diferentes parámetros ambientales tales como temperatura, humedad y presión²¹. Este mismo tipo de sensores también se han usado para el monitoreo de las propiedades eléctricas de soluciones biológicas,

²¹L. C. Kreutz, L. J. Gil Barcellos, A. Marteninghe, E. Davi dos Santos, and R. Zanatta, “Exposure to sublethal concentration of glyphosate or atrazine-based herbicides alters the phagocytic function and increases the susceptibility of silver catfish fingerlings (*Rhamdia quelen*) to *Aeromonas hydrophila* challenge,” *Fish Shellfish Immunol.*, vol. 29, no. 4, pp. 694–697, 2010

evaluar el crecimiento de bacterias y para cuantificar la calidad de alimentos empacados^{22, 23}.

Todas estas aproximaciones obtienen las propiedades dieléctricas de los materiales evaluando la impedancia a cierta frecuencia de resonancia, determinada a partir de los valores de las inductancias y capacitancias utilizadas. Sin embargo, estos desarrollos experimentales tienen la limitación de requerir de analizadores de impedancia o amplificadores look-in, dificultando las posibilidades de emplearlos como sistemas portables.

Se propuso emplear un resonador planar con un recubrimiento de nitruro de silicio (Si_3N_4), material que permite que incluso este tipo de sensor pueda ser empleado para aplicaciones espaciales, pero incrementa significativamente sus costos de fabricación. Dickley y Varghese (entre otros investigadores)^{24,25}; ha propuesto utilizar capacitores inter-digitados fabricados sobre silicio poroso para la detección gases como NH_3 , CO , CO_2 , O_2 , H_2 y CH_4 . Estos sensores presentan mejoras de sensibilidad y precisión en este campo, pero requieren procesos de fabricación laboriosos en instalaciones especializadas lo que hace que el sensor final sea costoso. Así mismo, el uso de resonadores LC fabricados en tecnología CMOS, utilizando como transductor electroquímico de potencial-a-capacitancia un electrolito-nitrato-óxido-silicio (ENOS) fueron propuestos para la medición de pH en materiales líquidos, como agua. Estos estudios han aportado en el mejoramiento en los tiempos y linealidad en la respuesta de este tipo de sensores, pero dependen de procesos y litografías CMOS de costo elevado.

El principal interés del presente trabajo de grado, es el desarrollo de un sensor electromagnético basado en tecnologías planares el cual pueda ser utilizado como una solución conveniente y de bajo costo en la medición de residuos de glifosato en las aguas. La fundamentación teórica del sensor desarrollado se presenta en el capítulo 9 (Marco Teórico).

²²WHO International Agency for Research on Cancer, "IARC Monographs Volume 112 : evaluation of five organophosphate insecticides and herbicides," 2015.

²³S. Thongprakaisang, A. Thiantanawat, N. Rangkadilok, T. Suriyo, and J. Satayavivad, "Glyphosate induces human breast cancer cells growth via estrogen receptors," *Food Chem. Toxicol.*, vol. 59, pp. 129–136, 2013

²⁴U. Kaatze, "Complex Permittivity of Water as a Function of Frequency and Temperature," *J. Chem. Eng. Data*, vol. 34, no. 4, pp. 371–374, 1989.

²⁵K. G. Ong, C. a. Grimes, C. L. Robbins, and R. S. Singh, "Design and application of a wireless, passive, resonant-circuit environmental monitoring sensor," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 93, no. 1, pp. 33–43, 2001

9. MARCO TEÓRICO

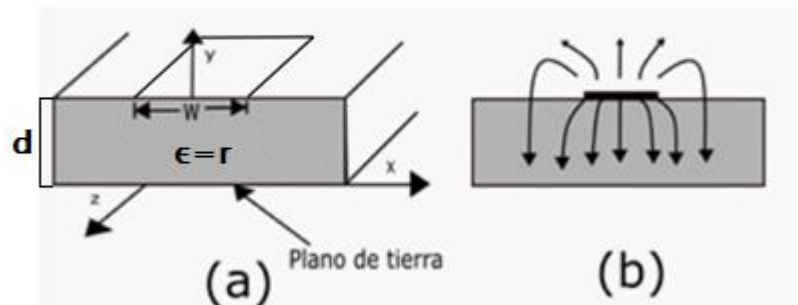
Si un material ocupa una región determinada, propagando una onda electromagnética, la velocidad de propagación (v) de dicha onda estará determinada por (Véase ecuación 1):

$$v = 1/\sqrt{\mu\epsilon} \quad (1)$$

Donde μ y ϵ son la permeabilidad magnética y la permitividad eléctrica del material, respectivamente. Se observa que una mayor permitividad provoca que la velocidad de la onda disminuya, como se puede comprobar en la expresión de la velocidad de propagación (1). Y debido a esto, una menor velocidad supone que la longitud de onda en el material es menor cuanto mayor sea su permitividad²⁶.

Los sensores planares tienen una geometría similar a la mostrada en la figura 1a; en donde se coloca un conductor delgado de ancho (W) sobre un substrato que se aterriza de espesor d y de permitividad relativa r . En la figura 1 se muestra de la configuración de las líneas de campo eléctrico para este tipo de estructuras.

Figura 1 Sensor planar. (a) Geometría. (b) Líneas de campo eléctrico (E).



Fuente Autor

²⁶García, Beatriz. Estudio y optimización de sensores de microondas para la caracterización y monitorización de materiales en procesos industriales. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. 2008. Disponible en la web en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10628/tesisUPV2850.pdf>

La mayoría de los productos agrícolas se pueden considerar como materiales no magnéticos, entonces, su permeabilidad se puede tomar igual a la permeabilidad en el espacio libre (μ_0), mientras que su permitividad absoluta puede ser representada como mediante una expresión compleja de la forma (Véase ecuación 2,3):

$$\varepsilon_a = \varepsilon'_a - j\varepsilon''_a \quad (2)$$

Así, su permitividad relativa al espacio libre está dada por:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_0} = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (3)$$

Donde:

ε_a =*permitividad absoluta*

ε_0 =*permitividad en el vacio*

La constante dieléctrica, es decir la parte real de la permitividad (ε'), es asociada con la capacidad del material para almacenar energía en forma de campo eléctrico, mientras que la constante de pérdidas (ε'') es asociada con la capacidad el material para disipar energía, y puede ser asociada con todos los mecanismos de relajación dieléctrica y conducción iónica.

Un importante fenómeno que contribuye a la dependencia en frecuencia de las propiedades dieléctricas es la polarización (originada por la orientación impuesta debido a la presencia de un campo eléctrico externo) de las moléculas con momentos dipolares permanentes. La formulación matemática desarrollada por Debye para describir este proceso en materiales polares puros se representa mediante (Véase ecuación 4):

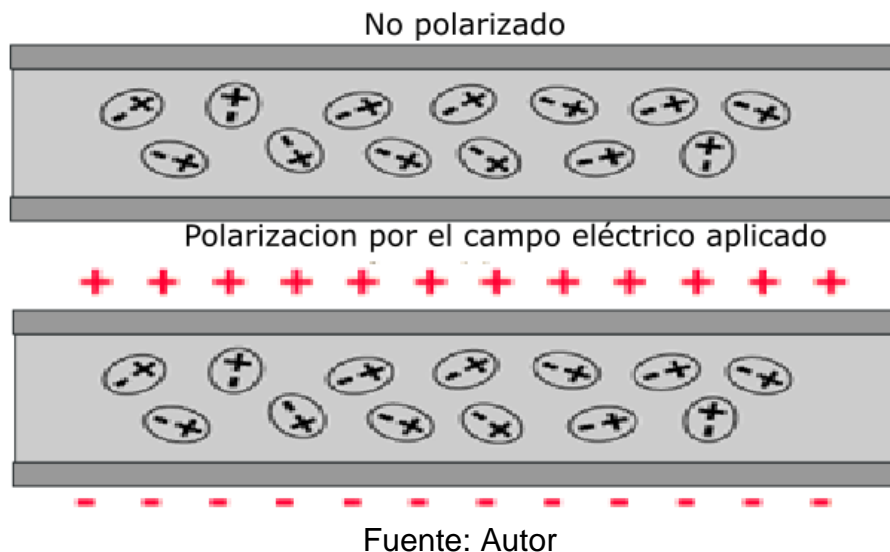
$$\varepsilon = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (4)$$

Donde (ε_∞) representa la constante dieléctrica a muy altas frecuencias en las cuales el tiempo de orientación molecular no es suficiente para contribuir a la polarización, (ε_s) representa la contribución a frecuencia cero (contribución estática o de DC), ω frecuencia angular y τ (tao) es el tiempo de relajación, asociado con el tiempo que requieren los dipolos para regresar a su estado de orientación una vez que el campo eléctrico externo es retirado.

Con las ecuaciones anteriores, es claro que tanto la permitividad como la permeabilidad, son variables que definen las propiedades electromagnéticas del material, y que van a determinar cómo se va a comportar dicho material cuando se le aplique un campo electromagnético.

En los sensores de microondas el comportamiento está íntimamente ligado a la permitividad, dado que se trabajan con materiales no magnéticos por lo que su permeabilidad siempre se considerará como $\mu=1$. En los materiales, las partículas con carga eléctrica se encuentran dispuestas, de tal forma que el material sea eléctricamente neutro en cualquier punto del mismo; cuando se aplica un campo eléctrico externo en el material, dichas partículas con carga se desplazan teniendo diferentes orientaciones, haciendo que el material adquiera determinada polarización²⁷. En la figura 2 se muestra el comportamiento descrito anteriormente.

Figura 2 Polarización de un material dieléctrico.



La polarización adquirida hace que surja un campo eléctrico en el interior del material. La permitividad es una medida de la capacidad de polarización del material bajo la acción de un campo externo, es decir, si el material es fácilmente polarizado o no. Cuando se alinean los dipolos del material ocurre el fenómeno de la polarización, el cual predomina en la banda de microondas²⁵.

²⁷Nave, Carl. Hyperphysics. Department of Physics and Astronomy. Georgia State University. Atlanta, Georgia. 2008. Disponible en la web en: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/electric/dielec.html>

La presencia de este campo eléctrico externo da origen a un campo magnético que interactúa con el material de una manera única; lo cual, se puede correlacionar específicamente con las propiedades de este material. Dada esta interacción, la permitividad de los materiales cambia y se manifiesta como un cambio de frecuencia, atenuación, reflexión de la señal o un cambio de fase²⁸.

En los sensores planares la velocidad de fase y la constante de propagación puede ser expresada así (Véase ecuación 5,6):

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (5)$$

$$\beta = k_o \epsilon_e \quad (6)$$

Donde:

ϵ_e = constante dieléctrica

V_p = velocidad de fase

c = velocidad de la luz en el vacío

k_o = constante de propagación (número de una onda plana en el espacio libre)

β = constante de fase

Debido a que algunas de las líneas de campo están en la región dieléctrica y algunas están en el aire, la constante dieléctrica efectiva satisface la relación:

$$1 \leq \epsilon_e \leq \epsilon_r \quad (7)$$

Donde:

ϵ_r = Relación permitividad del material con respecto al vacío

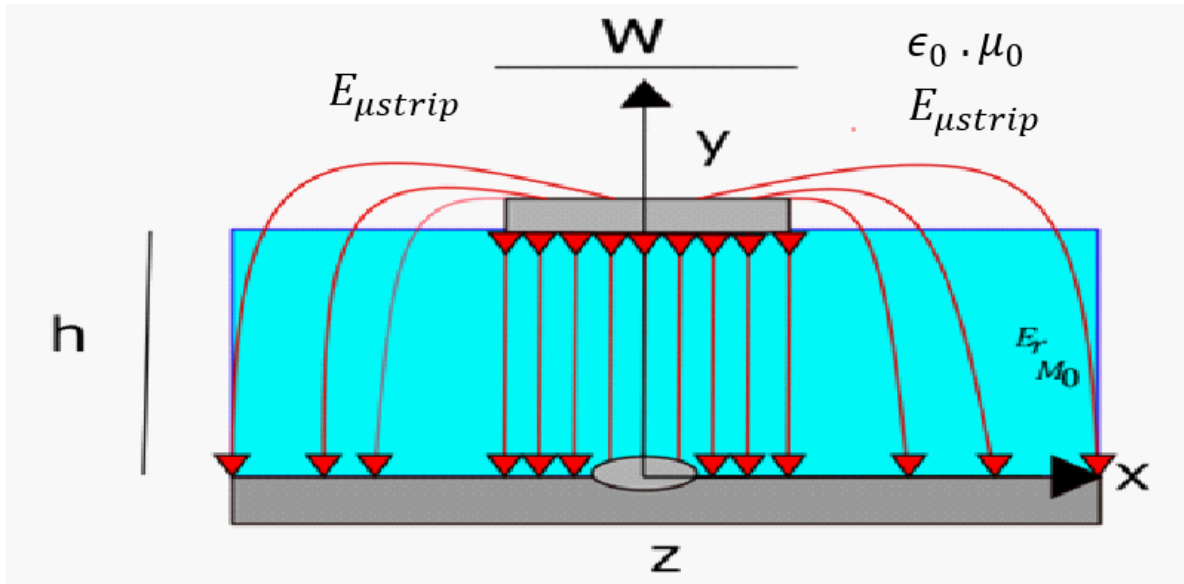
Y depende de la constante dieléctrica del sustrato, el grosor del sustrato, el ancho del conductor y la frecuencia.²⁹

²⁸O. Korostynska, I. Nakouti, A. Mason and A. I. Al-Shamma'a, "Planar electromagnetic wave sensor for instantaneous assessment of pesticides in water," *2013 Seventh International Conference on Sensing Technology (ICST)*, Wellington, 2013, pp. 942-947. Disponible en la web en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6727788&isnumber=6727602>

²⁹Pozar, M. David. (2012). *Microwave Engineering*. United States of America: John Wiley & Sons. Op. cit., p.9.

En todo resonador planar la constante dieléctrica efectiva o permitividad está asociada al comportamiento del medio y la inclusión de las líneas de campo dentro de las mismas. En las figuras 3 y 4 se muestra el comportamiento de las líneas de campo en dos condiciones diferentes: i) TEM y ii) QuasiTEM

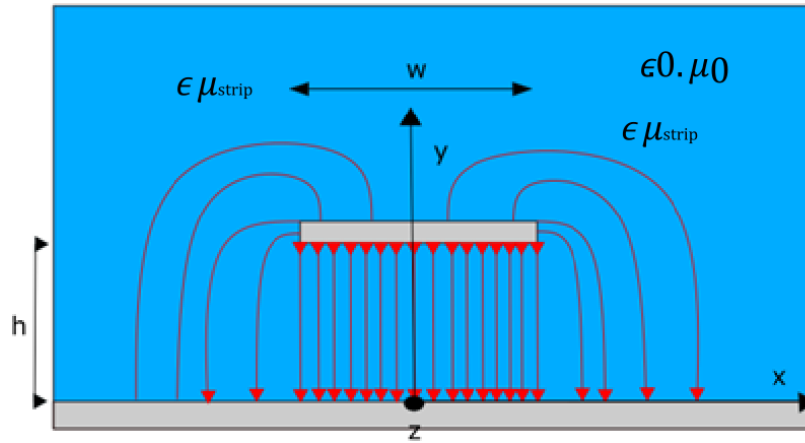
Figura 3 Líneas de campo con $h \ll y$. Modo quasi TEM



Fuente Autor

En el modo TEM la condición de las líneas de campo presentan algunos cambios en su comportamiento dado que es posible que el dieléctrico no abarque la totalidad de las mismas. Por tal motivo se considera quasi TEM.

Figura 4 Líneas de campo con $h > y$.



Fuente Autor

En esta condición las líneas de campo presentan una distribución más consistente con el modelo TEM, dado que la constante dieléctrica es homogénea y envuelve completamente la línea. Sin embargo, en el objeto de estudio, no es posible incorporar dicha solución dado que aparte del sustrato seleccionado, también existe una mezcla de cantidades variables de agua destilada y glifosato.

En las líneas de campo obtenidas en el análisis electromagnético conlleva a la formulación de expresiones matemáticas para establecer la permitividad efectiva (ϵ_e) (Véase ecuación 8):

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} + \frac{1}{\sqrt{1 + 12d/W}} \quad (8)$$

En donde se cumple que d/W es mayor que 1 según el diseño planteado (W corresponde a el ancho de la línea de transmisión y d corresponde a la altura del sustrato).

Por lo tanto, una vez que se mide la frecuencia de trabajo, se puede calcular la permitividad efectiva y, así obtener la permitividad de la solución para distintos niveles de concentración de glifosato. Cabe anotar que el objeto de esta investigación es la caracterización de la concentración del glifosato y su respuesta en el parámetro de transmisión (S_{21}). Estos elementos constituyen la base fundamental para la obtención de la permitividad efectiva.

J. Baena ³⁰ analizó la respuesta resonante del CSRR, destacando su pequeño tamaño eléctrico y la tasa de pérdida de energía (factor de calidad, Q). Una línea de microcinta con los agujeros que tienen esta forma podría realizar una buena respuesta para mediciones de permitividad con menos volumen de solución bajo prueba y mayor precisión.

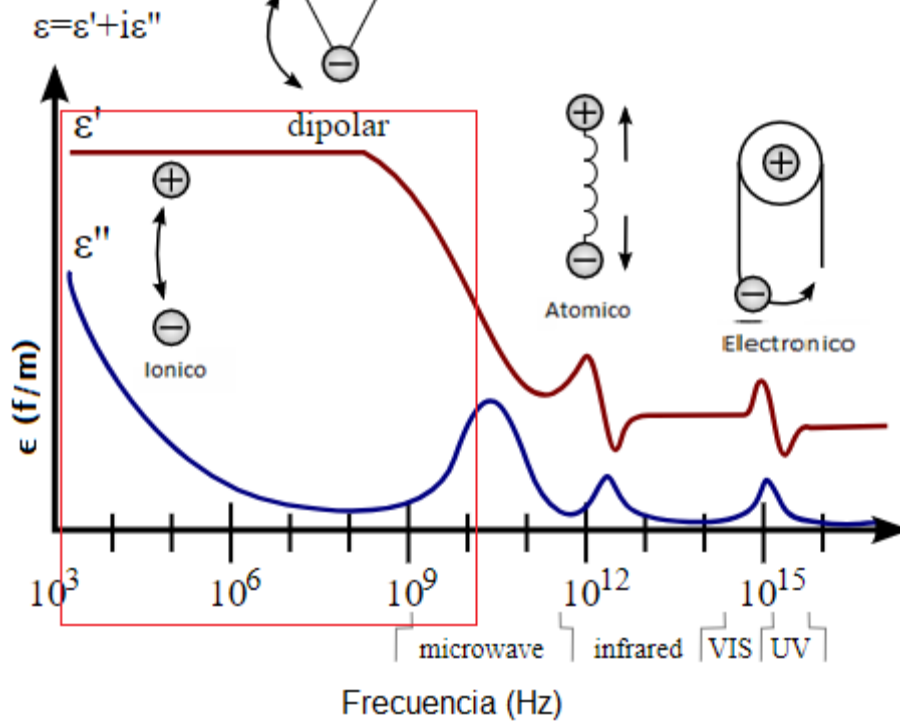
Además, hasta ahora, no se ha introducido una verdadera medición de la caracterización de la respuesta en frecuencia con respecto a la variación de los parámetros (S), la permitividad de una solución de partículas de glifosato en presencia del agua. Debido a las ventajas de la geometría CSRR, sería posible medir la respuesta eléctrica de los compuestos en términos de concentración y tamaño de la muestra.

Se demostró que esta caracterización es útil para determinar su uso en futuros trabajos sobre la implementación de estos sensores en fuentes de agua diversas a partir de distintos mecanismos dieléctricos o efectos de la polarización que contribuyan a la permitividad total del material (conducción eléctrica, relajación dipolar, resonancias dieléctricas, procesos no lineales, etc.)³¹. Esto es debido a que los materiales contienen diferentes tipos de portadores de carga que pueden ser desplazados por la acción de un campo eléctrico. Según el rango de frecuencias, será un mecanismo u otro el que contribuya al almacenamiento de energía en el material²⁵. En la figura 5 se representa la variación de la permitividad tanto en su parte compleja o en su parte real en diferentes frecuencias.

³⁰ J. Baena, J. Bonache, F. Martin, R. Sillero, F. Falcone, T. Lopetegi, M. A. G. Laso, J. Garcia-Garcia, I. Gil, M. Portillo, and M. Sorolla, IEEE T. Microw. Theory 53, 1451 (2005).

³¹ Clarke, R N, Gregory, A P, Cannell. A guide to the characterisation of dielectric materials at RF and microwave frequencies. Institute of Measurement and Control / National Physical Laboratory. 2003. Disponible en la web en: <http://www.npl.co.uk/publications/a-guide-to-the-characterisation-of-dielectric-materials-at-rf-and-microwave-frequencies>

Figura 5 Representación cuantitativa de la permitividad



Fuente: <http://laplace.us.es/wiki/images/6/6d/Permitividad-compleja.png>
 (consultado el 11 de diciembre de 2017 3:35 p.m.)

La parte real de la permitividad o constante dieléctrica se nombra por ϵ' y la parte imaginaria o factor de pérdidas por ϵ'' .

En la Figura 5 se representa en el recuadro en color rojo, el rango de frecuencias en las cuales se desarrollará el presente proyecto; teniendo en cuenta la línea de trabajo se especifica en el rango de las microondas dado el principio de funcionamiento de los sensores planares a utilizar.

Los diseños planares de microondas se utilizan cada vez más para diversas aplicaciones de detección debido a su versatilidad, perfil plano y bajo peso. Su diseño puede adaptarse a aplicaciones particulares, junto con fiabilidad y por la relación costo-eficiencia. Se fabrican fácilmente utilizando métodos comunes para la producción de placas de circuitos impresos (PCB) y su impedancia puede

adaptarse a la línea de entrada fácilmente, proporcionando resultados bastante confiables³².

Teniendo en cuenta las condiciones de los sensores planares, el desarrollo del proyecto proporcionará evidencias sobre el uso de la permitividad, el rango de frecuencias apropiado y la detección de la presencia de glifosato en el agua basándose en la respuesta eléctrica de los mismos.

³²Nave, Carl. Hyperphysics. Department of Physics and Astronomy. Georgia State University. Atlanta, Georgia. 2008 Op. cit.

10. ESTADO DEL ARTE

Con la finalidad de profundizar en el conocimiento de factores relacionados con la permitividad, así encontrar diferentes mecanismos que aporten en el entendimiento del comportamiento de la energía en el material, se realizó la revisión bibliográfica en relación con las temáticas que se presentan a continuación:

10.1 MEDIDAS DE PERMITIVIDAD BASADAS EN TECNOLOGÍA DE MICROCINTA

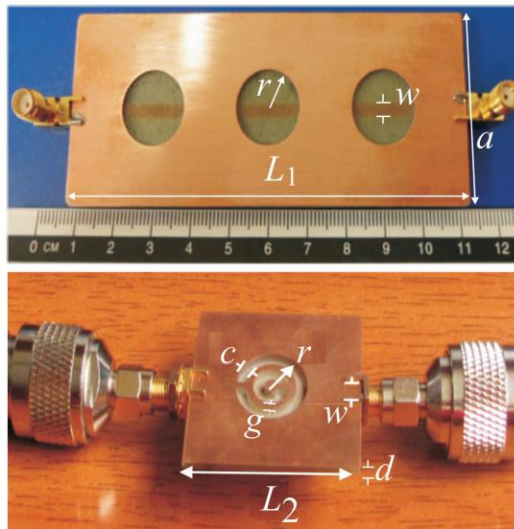
Por medio de dispositivos en los que se conoce el campo electromagnético se permitió desarrollar mediciones de la permitividad como sensores basados en *microstrip* y guías de ondas coplanares empleando técnicas de microondas por medio de un resonador de cavidad.

Un dispositivo capaz de medir la permitividad de líquidos por medio de un anillo resonador (CSRR) en conjunto con una línea de microcinta, la simulación y medición de los parámetros de dispersión son relacionados por medio de la calibración del dispositivo, la frecuencia de resonancia y la permitividad conocida de las respectivas muestras. Estas medidas son interesantes por las limitadas técnicas invasivas en la identificación de nanomateriales y la falta de medidas en el rango de microondas³³.

En la figura 6 se observan configuraciones de resonadores CSRRs ; el primero, utilizando únicamente círculos en el material conductor simulando el resonador de Fabry-Perot y el segundo, basado en un diseño CSRR circular dividido, que se utilizo en esta propuesta.

³³Laura M. Pulido-Mancera , Juan C. González , Alba Avila , Juan D. Baena . (2013). MEASUREMENTS OF PERMITTIVITY BASED IN MICROSTRIP TECHNOLOGY. 10/05/2017, de Universidad Nacional de Colombia Sitio web: <http://revistas.unal.edu.co/index.php/momento/article/view/45069/46425>

Figura 6 Cavidades resonantes circulares



Fuente: Baena Juan, Pulido Laura, Avila Alba. (2013). Medidas de permitividad basadas en tecnología de microcinta. [Figura]. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/momento/article/view/45069/46425>

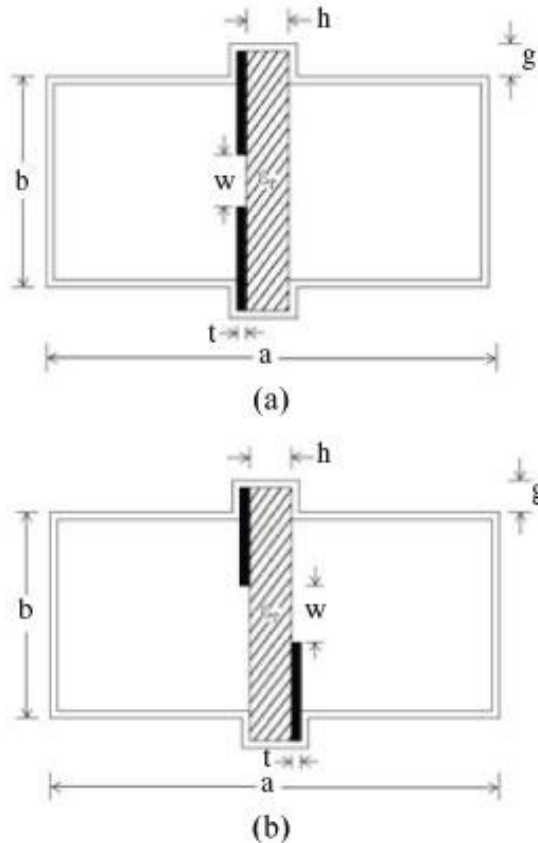
10.2 NUEVOS DISEÑOS DE FILTROS PLANARES EN TECNOLOGÍAS DE MICROCINTA Y FINLINE UTILIZANDO RESONADORES DE ANILLOS DIVIDIDOS

Al incorporar CSRR's se pretende demostrar la factibilidad de producir filtros en configuraciones planares filtro pasa banda (BPF) y un filtro antipodal supresor de banda (BSF), los resonadores de anillos complementarios divididos (CSRR's) acoplados eléctricamente a una línea de transmisión y los resonadores de anillos divididos (SRR's) acoplados magnéticamente son empleados en el mejoramiento del diseño del respectivo filtro.

Estos resultados experimentales por medio de los diferentes componentes que incluyen filtros pasa bajo de microcinta, filtros pasa banda y supresores de banda, así como filtros supresores de banda en antipodal, demostraron la gran utilidad y validez de las nuevas estructuras logrando bajas pérdidas de inserción y bandas de transición muy agudas con alta capacidad de rechazo³⁴.

³⁴A. León A. Casanueva J. Herrero F. Marante. (2013). Novel designs of planar filters in microstrip and finline technologies using split ring resonators. 11/05/2017, de Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, vol. 21 N° 1, 2013, pp. 6-15 Sitio web: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052013000100002

Figura 7 Diagrama cavidades resonantes circulares



Fuente: A. León¹ A. Casanueva² J. Herrero² F. Marante¹. (2013). Nuevos diseños de filtros planares en tecnologías de microcinta y finline utilizando resonadores de anillos divididos. [Figura]. Recuperado de http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052013000100002

10.3 MEDIDOR DE LA PERMITIVIDAD DIELECTRICA COMPLEJA DE LÍQUIDOS EN EL RANGO DE AUDIOFRECUENCIA

Es un sistema electrónico para la medición de la permitividad dieléctrica compleja en muestras líquidas en el rango de frecuencias de 600 Hz a 25KHz. Se encuentra conformado por dos partes principales: una celda capacitiva que recibe la muestra líquida y un circuito medidor de impedancia (técnica de detección de fase síncrona para medir las partes resistiva y reactiva de la celda que permite variar la

frecuencia). En esta forma se obtiene el espectro de las partes real e imaginaria, ϵ' y ϵ'' , de la permitividad dieléctrica de la muestra en el rango mencionado³⁵.

10.4 CARACTERIZACION DE LAS PROPIEDADES DIELECTRICAS POR PERTURBACIÓN

La permeabilidad de la muestra bajo prueba es fijada en el lugar donde el campo eléctrico o magnético tiende a ser más intenso, dependiendo si se quiere medir permitividad o permeabilidad, si la muestra bajo prueba es introducida donde hay máximo campo eléctrico y mínimo campo magnético, las propiedades dieléctricas de la muestra pueden ser caracterizadas; si la muestra es insertada con máximo campo magnético y mínimo campo eléctrico, las propiedades magnéticas pueden ser obtenidas³⁶.

10.5 MEDICIONES DIELECTRICAS DE ALTA FRECUENCIA

El conocimiento de la importancia de las ondas electromagnéticas de alta frecuencia y sus diversas aplicaciones de gran utilidad, como la capacidad de viajar a través de estructuras de ondas guiadas, capacidad de lanzamiento desde antenas como ondas de propagación y la capacidad de transportar información de banda ancha por mucho tiempo, abre la posibilidad de la selección de métodos relevantes para aplicaciones particulares, centrados en materiales de aplicaciones prácticas, incluyendo microelectrónica, embalaje e interconexión electrónica, matrices de antenas compactas y condensadores³⁷.

Estas mediciones deben ser capaces de caracterizar numerosos materiales con variaciones de permitividad y pérdida, tales como vidrio, cuarzo, epoxi, polímeros aislantes, semiconductores de alta resistividad, carburo de silicio, alúmina, zafiro, aluminato de lantano, entre otros teniendo como objetivo reportar la permitividad relativa de una muestra bajo prueba para una orientación especificada del campo eléctrico y la frecuencia según sus diferentes factores.

³⁵Munguía Aguilar Horacio, Arellano Tánori Oscar. (MEDIDOR DE LA PERMITIVIDAD DIELECTRICA COMPLEJADE LIQUIDOS EN EL RANGO DE AUDIOFRECUENCIA). 2001. 08/05/2017, de Instituto Tecnológico de Chihuahua Sitio web: https://www.researchgate.net/publication/282577546_MEDIDOR_DE_LA_PERMITIVIDAD_DIELECTRICA_COMPLEJA_DE_LIQUIDOS_EN_EL_RANGO_DE_AUDIOFRECUENCIA

³⁶L. F. Chen, C. K. Ong, C. P. Neo, V. V. Varadan, V. K. Varadan, "Microwave Electronics Measurement and Materials Characterization" John Wiley & Sons, Ltd. 2004.

³⁷ James Baker-Jarvis, M. D. (2010). High-Frequency dielectric Measurements. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 8 pág

Muchas aplicaciones como la propagación en materiales de construcción requerirían datos de permitividad conocidos con una precisión de 10%, mientras que para placas de cableado impresos para resonadores podemos requerir una respuesta dentro del 1%, las placas de circuito y las placas de cableado impreso operan con el campo eléctrico principalmente normal al plano del panel, por lo tanto, este componente del tensor de permitividad es de interés primordial.

Los métodos pueden agruparse en técnicas de frecuencia discreta o de banda ancha identificando en cada uno sus respectivas fortalezas y debilidades que realizaran la caracterización para la selección del más adecuado.

Se dará una descripción breve sobre tres técnicas diferentes de caracterización de material dieléctrico: un resonador de cilindro dividido, múltiples líneas de transmisión y un método de sonda de campo cercano:

10.6 RESONADOR DE CILINDRO DIVIDIDO

Los métodos resonantes tienen las incertidumbres más bajas, usualmente menos del 1% para la parte real de la permitividad. Para las mediciones resonantes, la permitividad se determina a partir de las mediciones de la frecuencia de resonancia y del factor de calidad. Los resonadores *split-cylinder* y *Split-post* son particularmente útiles para mediciones de permitividad porque son no destructivos y pueden medir sustratos de diferentes espesores³⁸.

10.7 MÚLTIPLES LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Las líneas de transmisión eléctrica están modeladas en capas metálicas que están en uno o ambos lados de un sustrato o en una pila de múltiples capas de materiales dieléctricos. El proceso implica la adquisición de parámetros de dispersión con un analizador vectorial de redes (VNA); utilizando el algoritmo para calcular los parámetros del dispositivo, en este caso la constante de propagación de la línea de transmisión³⁹.

³⁸ James Baker-Jarvis, M. D. (2010). High-Frequency dielectric Measurements. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine* Op.Cit. 8

³⁹ James Baker-Jarvis, M. D. (2010). High-Frequency dielectric Measurements. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine* Op.Cit. 8

10.8 SONDA DE CAMPO CERCANO

Las propiedades locales de los materiales delgados se hace más fácilmente usando el campo cercano, porque la resolución puede ser mucho menor que $\lambda / 2$, La sonda de microondas de campo cercano consiste usualmente en un resonador conectado a una sonda en el fondo, de manera que cuando la sonda se aproxima a un material, desplaza la resonancia de la cavidad siendo el desarrollo de un modelo teórico y numérico que relaciona los cambios en el resonador de la cavidad del sistema con el material bajo prueba⁴⁰.

Este trabajo de grado profundiza en el uso de los sensores planares por medio de circuitos resonantes; por tal motivo, en el estado del arte se nombraron algunas técnicas adicionales para detectar la permitividad de materiales dieléctricos, que son referentes de estudio. Sin embargo, el proyecto tomará como punto de partida la tecnología de microcinta, proponiendo los objetivos que se presentan en la siguiente sección.

⁴⁰ James Baker-Jarvis, M. D. (2010). High-Frequency dielectric Measurements. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine* Op.Cit. 9

11.OBJETIVOS

11.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una serie de prototipos con sensores planares de microondas para la detección de presencia de glifosato en fuentes de agua.

11.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar un set de muestras de sensores de microondas planares de rango de frecuencia máximo 3GHz.
- Analizar por medio de mediciones la respuesta en frecuencia de circuitos de microondas planares.
- Correlacionar la respuesta eléctrica de un circuito de microondas planar con la concentración de glifosato en fuentes de agua.

12. ALCANCES Y LIMITACIONES

12.1 ALCANCES

El trabajo de grado en desarrollo abarcara los siguientes alcances como resultados esperados de la investigación:

- Diseño de prototipos de RF y Microondas con aplicaciones ambientales utilizando herramientas y ambientes de simulación.
- Fabricación de estructuras planares de RF y Microondas.
- Medición y caracterización de estructuras de RF y Microondas.
- Análisis de datos experimentales.

12.2 LIMITACIONES

Teniendo como limitantes:

- Realizar las mediciones en un ambiente controlado de laboratorio, utilizando herbicidas con glifosato comercial.
- Correlacionar la respuesta eléctrica a partir de las características de transmisión de cada prototipo fabricado.

13. METODOLOGIA

El diseño y simulación de estructuras de sensores de microondas planares para la detección de presencia de glifosato en el agua se enmarcará bajo un parámetro investigativo y documental de análisis de aplicaciones y simulaciones de los distintos comportamientos en relación con las respuestas eléctricas generadas por los diferentes componentes. La metodología constara de 4 fases: estudio de factibilidad, investigación del proyecto, ejecución y simulación del comportamiento y validación e implementación del sensor según sus resultados eléctricos.

13.1 ESTUDIO DE FACTIBILIDAD

Se analizará la disponibilidad de material bibliográfico en Colombia, teniendo en cuenta los métodos y elementos propios de los sensores planares aplicados en la actualidad, para establecer la viabilidad bajo la coyuntura del uso y aplicación de la detección del glifosato en el agua:

- Identificación de la información actual del uso de herramientas y factores que intervienen en la implementación de sensores de microondas aplicables en el modelo práctico de detección de presencia de glifosato.

13.2 INVESTIGACIÓN DEL PROYECTO

En esta fase el objetivo principal es documentar los aspectos técnicos esenciales junto al desarrollo estructural del marco referencial y la caracterización de aplicación eléctrica de los componentes:

- Definición de requerimientos en cuanto a cálculo de variables, herramientas e instrumentos para el análisis de comportamiento de los sensores, tanto en su implementación, como en su comportamiento eléctrico.

13.3 EJECUCIÓN Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO

Se desarrollarán los circuitos característicos para el respectivo análisis de su comportamiento y su respectiva simulación 3D:

- Diseñar estructuras planares que permitan determinar cambios en la permitividad, considerando los materiales y geometrías adecuadas, Para este fin se utilizan simuladores de diseño avanzado como Keysight-ADS, estos permiten estimar el comportamiento en cada una de las estructuras permitiendo variar parámetros del sustrato de fabricación y el entorno de cada sensor, así como brindando la posibilidad de aproximar la respuesta eléctrica ante variaciones externas de permitividad.
- Fabricar y verificar experimentalmente la respuesta en frecuencia de cada sensor diseñado, en este caso se fabricaron sensores en PCB's con sustratos FR-4 en diferentes geometrías de sensores. La respuesta en frecuencia se midió empleando un analizador vectorial de redes (VNA, por sus siglas en inglés).
- Elaborar un conjunto de muestras patrón con diferentes concentraciones de pesticidas. En este caso se elaboraron un conjunto de muestras tomando como referencia la recomendación de uso comercial variando la concentración gradualmente.

13.4 IMPLEMENTACIÓN DEL SENSOR SEGÚN SUS RESULTADOS ELÉCTRICOS

En esta fase se tuvo como propósito la implementación práctica y análisis del comportamiento en el VNA según la frecuencia aplicada y el comportamiento eléctrico de cada patrón:

- Se obtuvo la respuesta en frecuencia para cada muestra patrón mediante el conjunto de sensores diseñados, una vez validada las muestras, de acuerdo con la etapa anterior, se midió la respuesta en frecuencia de los sensores en condiciones de medida para cada muestra, utilizando para ello el VNA.
- Finalmente se correlaciono la respuesta eléctrica de los sensores con las concentraciones de pesticida en muestras de laboratorio.

14. CSRR (COMPLEMENTARY SPLIT-RING RESONATOR) Y SIMULACION EN ADS (ADVANCED DESIGN SYSTEM)

Las respuestas de los diferentes materiales y diseños del resonador dependen de una serie de factores tales como permitividad, permeabilidad y la conductividad del resonador, siendo estos factores influyentes en la determinación de las características del material que se desea analizar afectando la distribución en el campo electromagnético cercano. Esta variación de los diferentes diseños y materiales son la caracterización que permitan la respuesta que se desea obtener para la determinación de la presencia de glifosato en el agua.

14.1 CSRR (COMPLEMENTARY SPLIT-RING RESONATOR)

Se consideró por medio de la investigación realizada que los distintos efectos en las características geométricas del diseño de un CSRR permitirían predecir la frecuencia de resonancia con el objetivo de poder detectar la presencia de glifosato en el agua, los CSRR están diseñados con la finalidad que el resonador sea eléctricamente pequeño a comparación de la longitud de onda del campo electromagnético de la fuente de excitación.

La respuesta del resonador se basa en la capacitancia efectiva distribuida con la inductancia del sensor diseñado, basándose en la propagación de fase⁴¹ y obteniendo generalmente la frecuencia de resonancia (F_0) por medio de la siguiente ecuación 9:

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_T L_C}} \quad (9)$$

Donde L_C y L_T son inductancia y capacitancia distribuida total.

Los lazos de corriente contribuyen directamente a la inductancia efectiva y las brechas afectan a las capacitancias netas, con la respectiva frecuencia de resonancia gracias al diseño planteado se obtuvo la potenciación de las densidades de energía eléctrica y magnética de los campos cercanos al resonador siendo que cualquier cambio significativo alrededor del mismo provoque la variación de frecuencia de resonancia. Estas diferentes variaciones de resonancia y las

⁴¹Bonache, J.; Siso, G.; Gil, M.; Iniesta, A.; Garcia-Rincon, J.; Martin, F. Application of composite right/left handed (CRLH) transmission lines based on complementary split ring resonators (CSRRs) to the design of dual-band microwave components. *Microw. Wirel. Compon. Lett. IEEE* 2008, 18, 524–526.

propiedades eléctricas del material utilizado en conjunto a la permitividad y permeabilidad podemos relacionarlas entre sí (véase ecuación 10)⁴²:

$$\frac{\Delta f_r}{f_r} = \frac{\int (\Delta \epsilon E_0 \cdot E_0 + \Delta \mu H_1 H_0) dv}{\int (\epsilon_0 |E_0|^2 + \mu_0 |H_0|^2) dv} \quad (10)$$

Donde:

Δf_r = Cambio de frecuencia de resonancia.

f_r = Frecuencia de resonancia.

$\Delta \epsilon$ y $\Delta \mu$ son el cambio en la permitividad y permeabilidad.

E_0 y H_0 son las distribuciones de campo eléctrico y del campo magnético sin la perturbación.

E_1 y H_1 son las distribuciones de campo eléctrico y magnético con la perturbación.

dv = derivada con respecto al voltaje

Siendo la perturbación pequeña y el campo de distribución sin cambios podemos reducir la ecuación de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta f_r}{f_r} = \frac{\int (\Delta \epsilon |E_0|^2 + \Delta \mu |H_0|^2) dv}{\int (\epsilon_0 |E_0|^2 + \mu_0 |H_0|^2) dv} \quad (11)$$

En los resultados que se desean obtener se implementó la perturbación del resonador debido a la variación del material y la deformación del diseño así querer obtener un cambio en la frecuencia de resonancia para la caracterización de la detección de los diferentes comportamientos. Con esto utilizamos nuestro sensor CSRR excitado por una línea de transmisión aplicada como un sensor de campo cercano así producir un campo eléctrico perpendicular a la superficie del sensor⁴³:

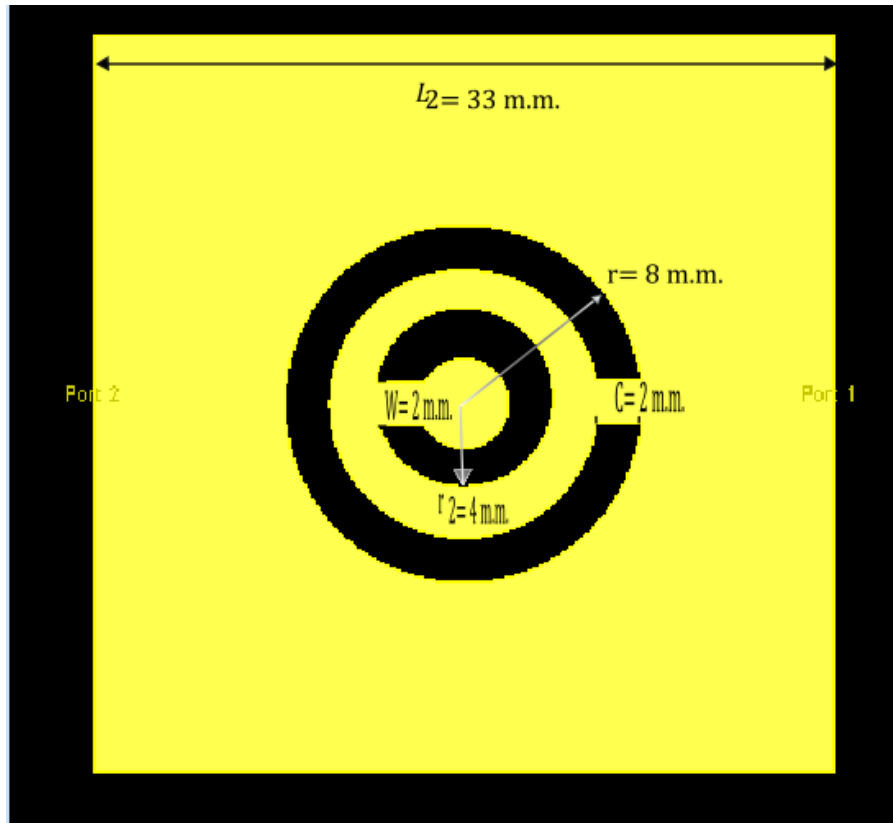
El objetivo en el diseño de práctico del sensor es obtener una alta sensibilidad para determinar las diferentes variaciones en la medición del comportamiento del resonador, por tal motivo el tamaño del sensor debe ser lo suficientemente pequeño como para no ser mucho más grande que las características detectas.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se establecieron las condiciones geométricas tal que el CSRR tuviese una frecuencia de resonancia en el rango entre 100 KHz y 3GHz. Así, en la Figura 8, se presenta una ilustración de del sensor fabricado, resaltando la geometría del mismo:

⁴² . Pozar, D.M. Microwave Engineering, 3rd ed.; Wiley: Danvers, MA, USA, 2005.

⁴³Albishi, A. and Ramahi, O. (2017). *Detection of Surface and Subsurface Cracks in Metallic and Non-Metallic Materials Using a Complementary Split-Ring Resonator*. [online] US National Library of Medicine National Institutes of Health. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4239939/> [Accessed 1 Nov. 2017].

Figura 8 parámetros geométricos $L_2=33\text{ mm}$, $W=3\text{ mm}$, $r=8\text{ mm}$, $C=2\text{ mm}$ y $r_2=4\text{ mm}$



Fuente: Autor

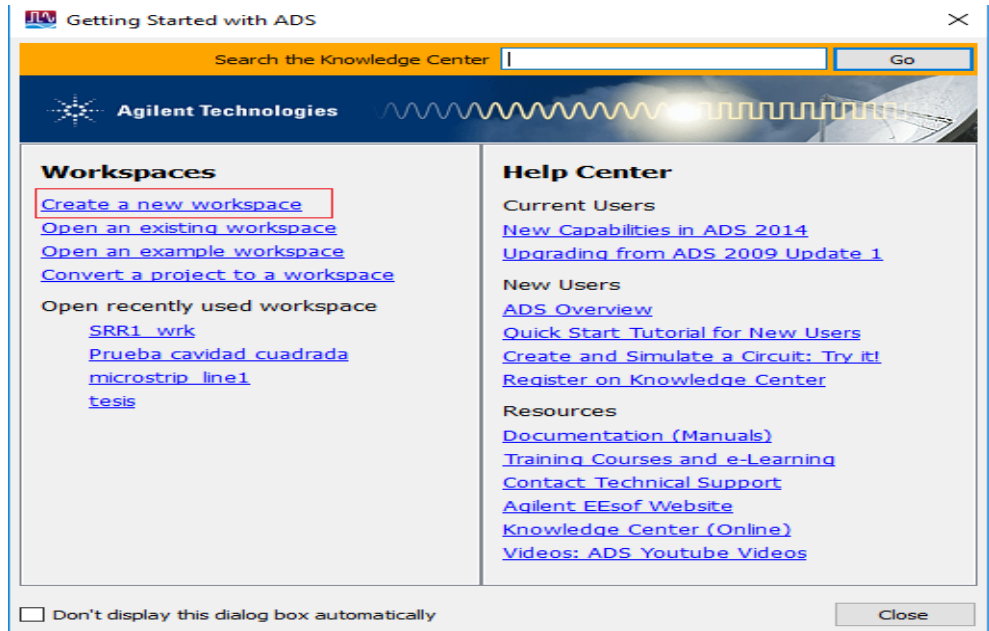
14.2 DISEÑO SENSOR CSRR UTILIZANDO ADS

Para el análisis del comportamiento electromagnético del sensor planar, se utilizó el software ADS (*Advanced Design System*) programa de simulación en el diseño de dispositivos y sistemas electrónicos que permiten la interacción entre simulaciones electromagnéticas de 2 y 3 dimensiones con modelos de circuito equivalente. Esta herramienta contiene las prestaciones necesarias para el diseño y optimización del dispositivo propuesto.

A continuación, se presenta secuencialmente la implementación del CSRR en el ambiente de simulación ADS, así como sus respectivos resultados obtenidos.

1. Crear un espacio de trabajo. Para crear un nuevo espacio de trabajo, seleccionar del menú la opción *créeate a new workspace* ver figura 9.

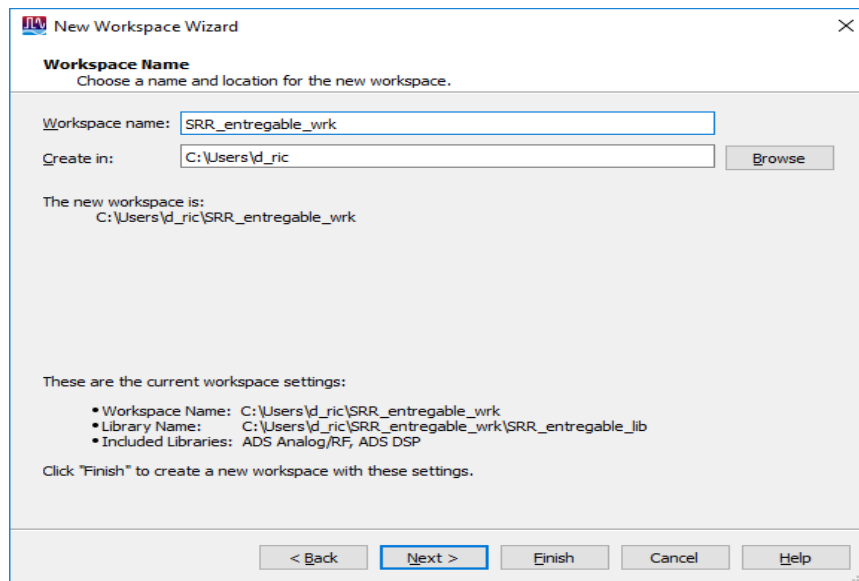
Figura 9 Create a new workspace



Fuente Autor

2. Se procede a dar el nombre al espacio de trabajo (Workspace Name) como se ilustra en la figura 10. seguido de la opción *next*.

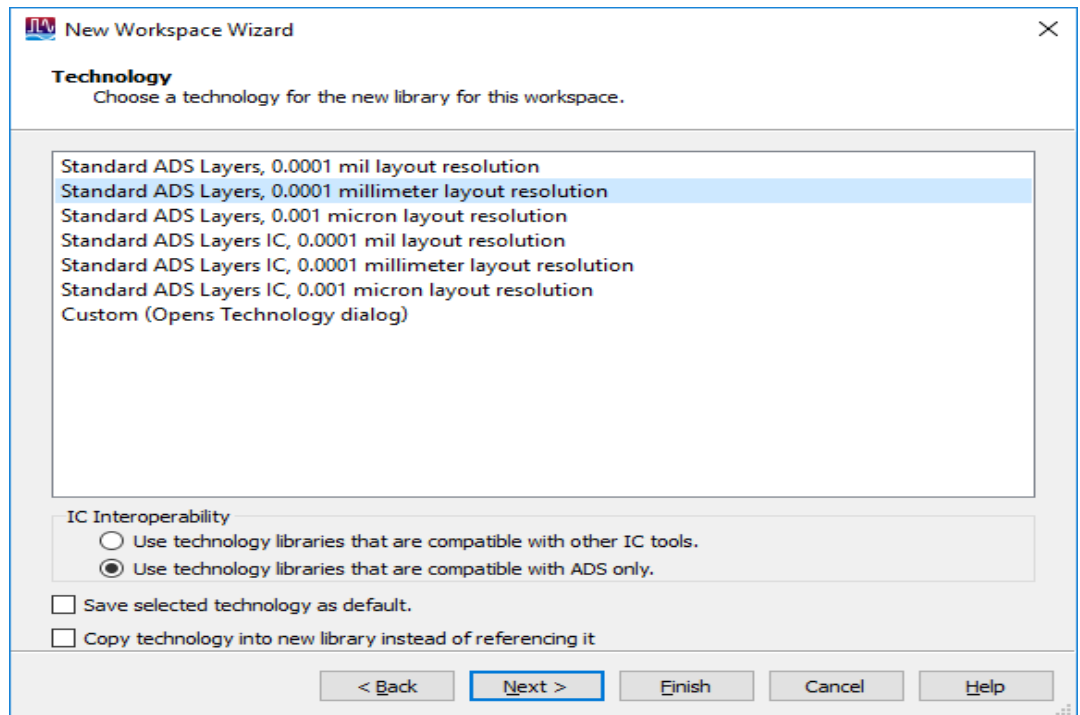
Figura10 Workspace name



Fuente Autor

3. En la resolución del layout se procede a utilizar 0.0001 mm como se especifica en la figura 11.

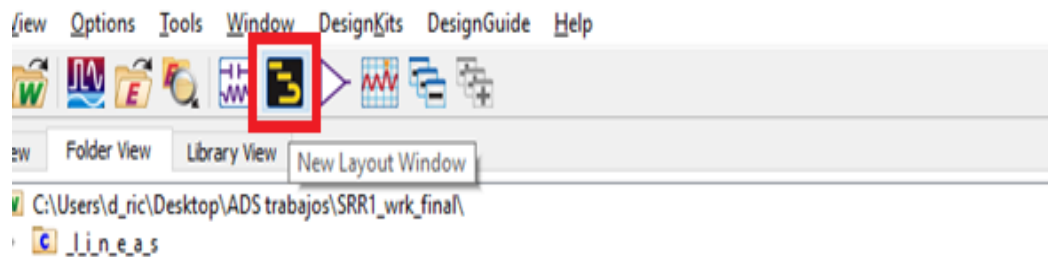
Figura 11 Layout Standard



Fuente Autor

4. Una vez creado el respectivo espacio de trabajo se procede a elegir la opción del *layout*, utilizando el icono de la barra de tareas que se resalta en la figura 12.

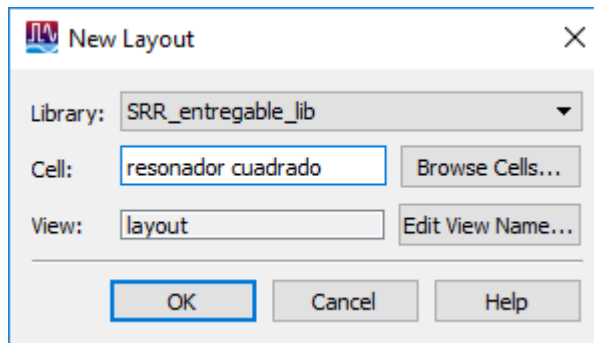
Figura 12 Layout



Fuente Autor

5. Se procede a nombrar la celda del layout (New layout) a realizar como se muestra en la figura 13.

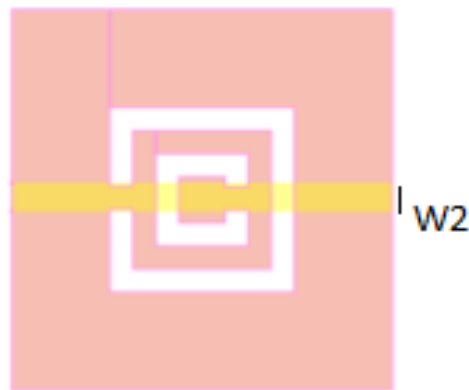
Figura 13 New Layout



Fuente Autor

6. Se procede con la respectiva verificación de las especificaciones del sensor (parámetros geométricos del resonador) y W2 (parámetros de la línea de transmisión) teniendo como base la figura 14.

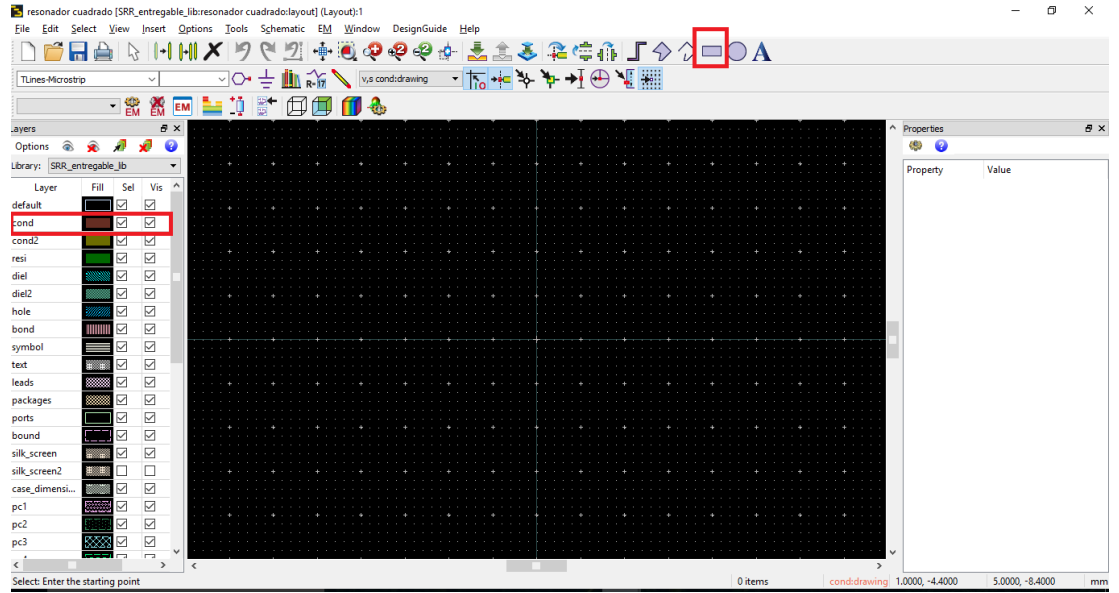
Figura 14 Parámetros sensor



Fuente Autor

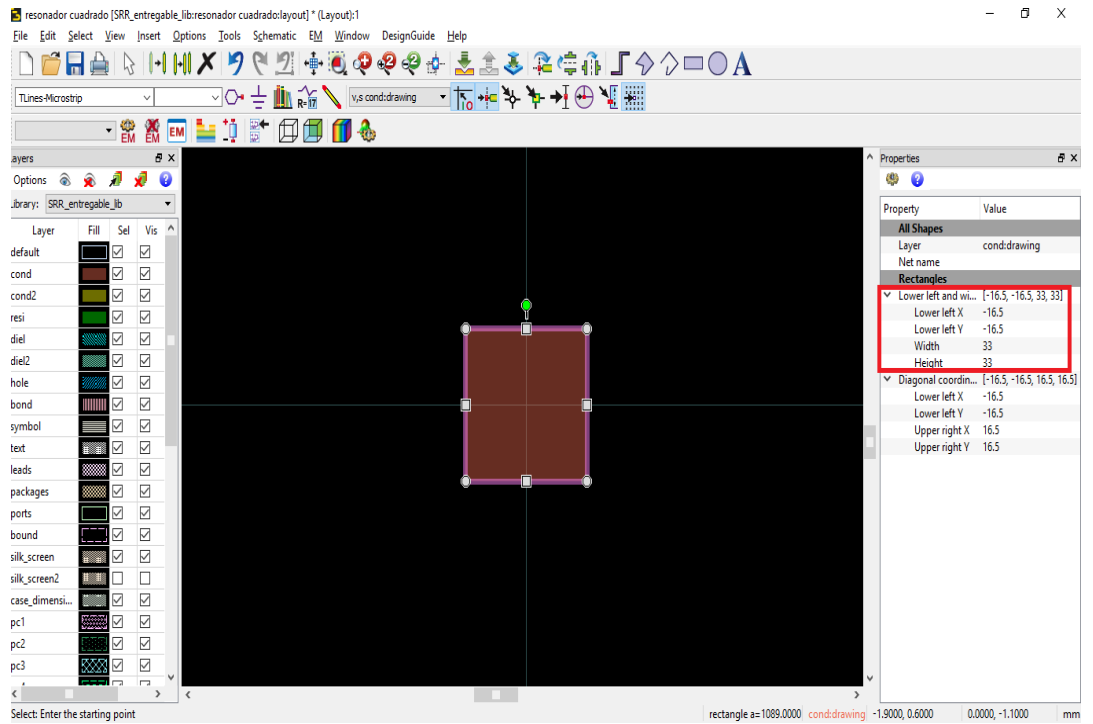
7. De acuerdo con la figura 15, se selecciona la capa "Cond" en la pila *layers*, esta capa corresponde a la capa conductora superior de la PCB, así posteriormente se dibuja un cuadrado de lado 33 mm usando la herramienta cuadrado. Nótese que las dimensiones y posición relativa quedan especificadas en la ventana de propiedades como ilustra en la figura 16.

Figura 15 Selección de capa



Fuente Autor

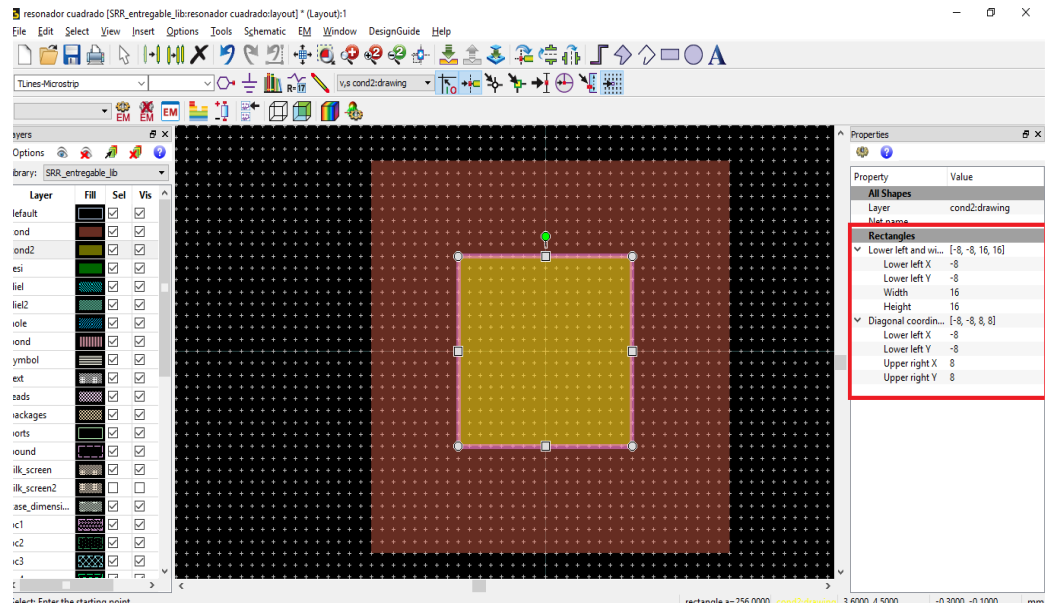
Figura 16 Diseño geométrico 1



Fuente Autor

8. Posteriormente, para definir los anillos resonadores se pueden realizar las operaciones booleanas entre capas. Así, considerando que el anillo resonador externo tiene un lado de 16 mm, se dibuja otro rectángulo utilizando la capa Cond 2 como capa auxiliar como se ilustra en la figura 17.

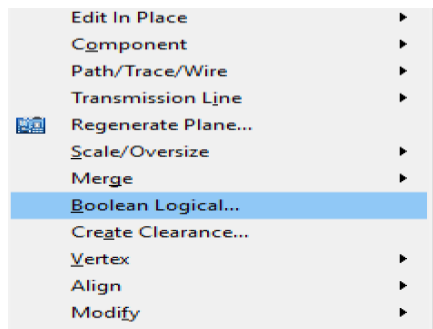
Figura 17 Diseño geométrico 2



Fuente Autor

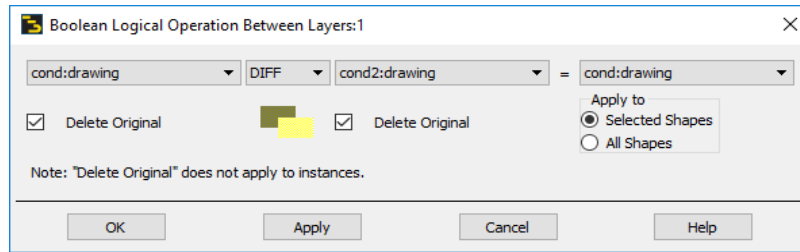
9. Seguidamente se seleccionan los elementos con los cuales se desea realizar la operación booleana, en este caso los rectángulos de las capas Cond 1 y Cond 2, seleccionando la opción *Boolean Logical* del menú (edit) se realiza la operación de sustracción como se ilustran en las figuras 18 y 19. Así tener como resultado la diferenciación obtenida en la figura 20.

Figura 18 Operación Booleana



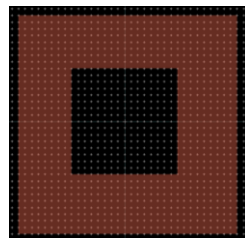
Fuente Autor

Figura 19 Operación Booleana 1



Fuente Autor

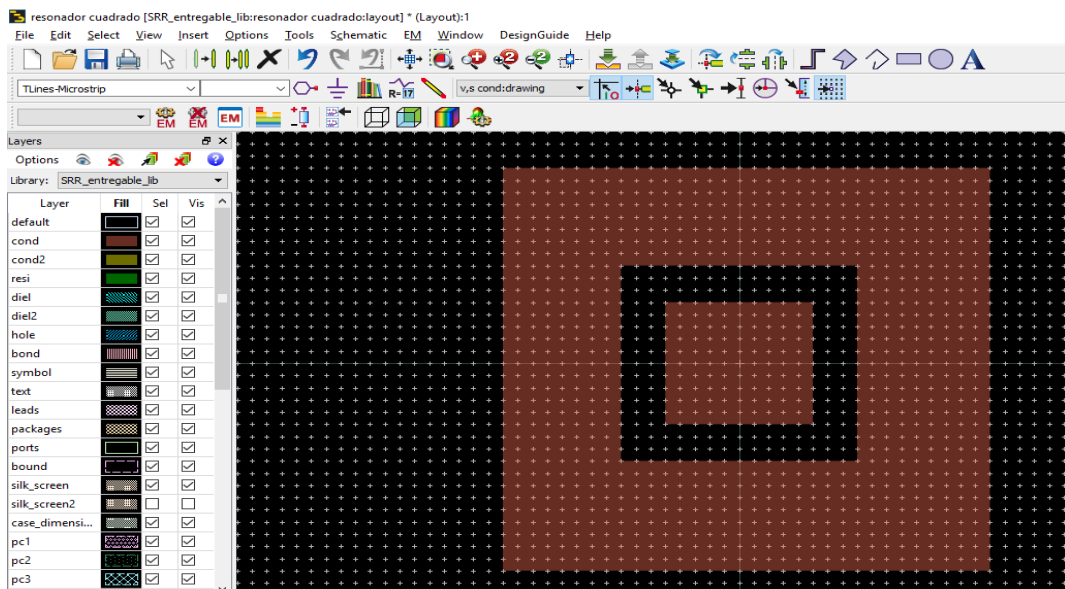
Figura 20 Operación Booleana Diferencia



Fuente Autor

11. Se realiza el paso número 7 con el cambio de dimensiones a 12 mm y así obtener como resultado la figura 21.

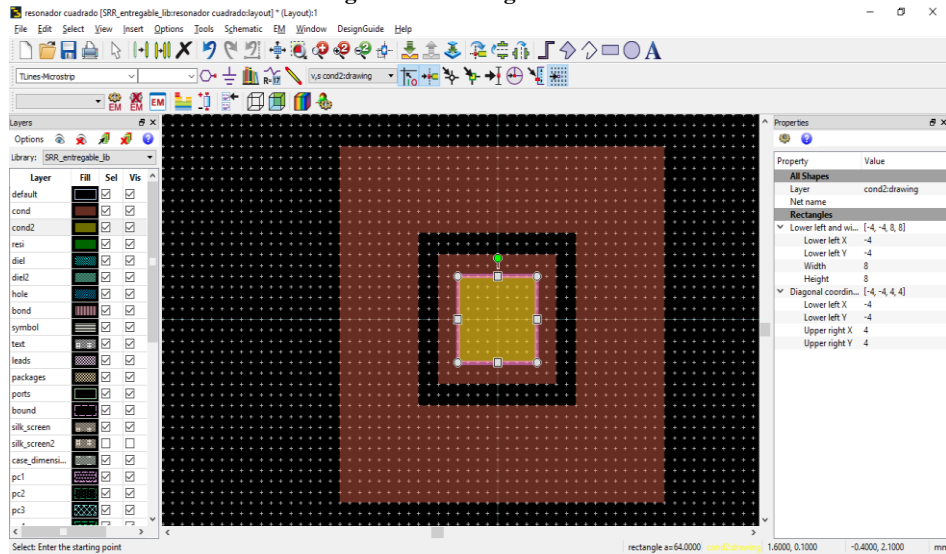
Figura 21 Diseño geométrico 3



Fuente Autor

12. Se realiza el paso 8 con el cambio de dimensiones a 10 mm y así obtener como resultado la figura 22.

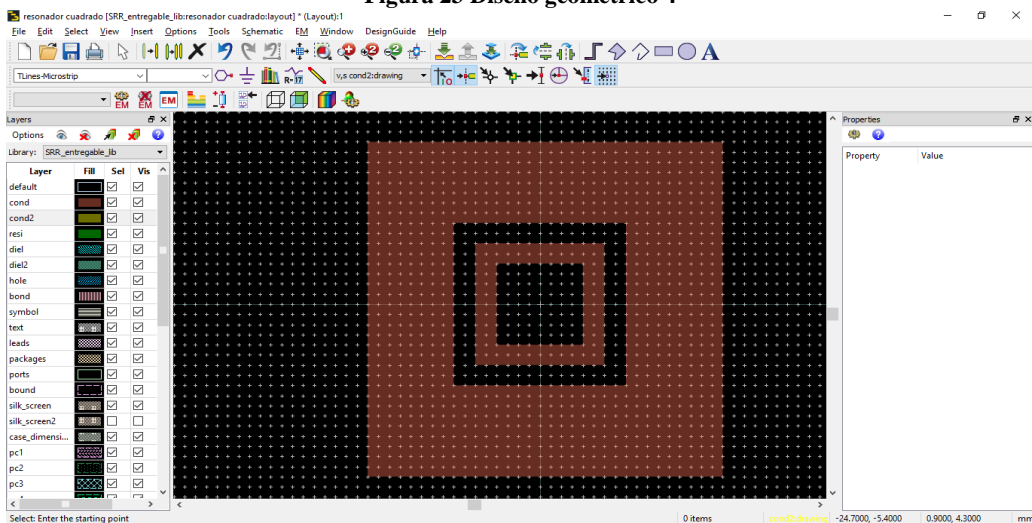
Figura 22 Diseño geométrico 3



Fuente Autor

13. Se seleccionan los elementos con los cuales se desea realizar la nueva operación booleana, en este caso los rectángulos de las capas Cond 1 y Cond 2, de las magnitudes 12 y 10 mm y procedemos a realizar la opción *Boolean Logical* teniendo como resultado la diferenciación obtenida en la figura 23.

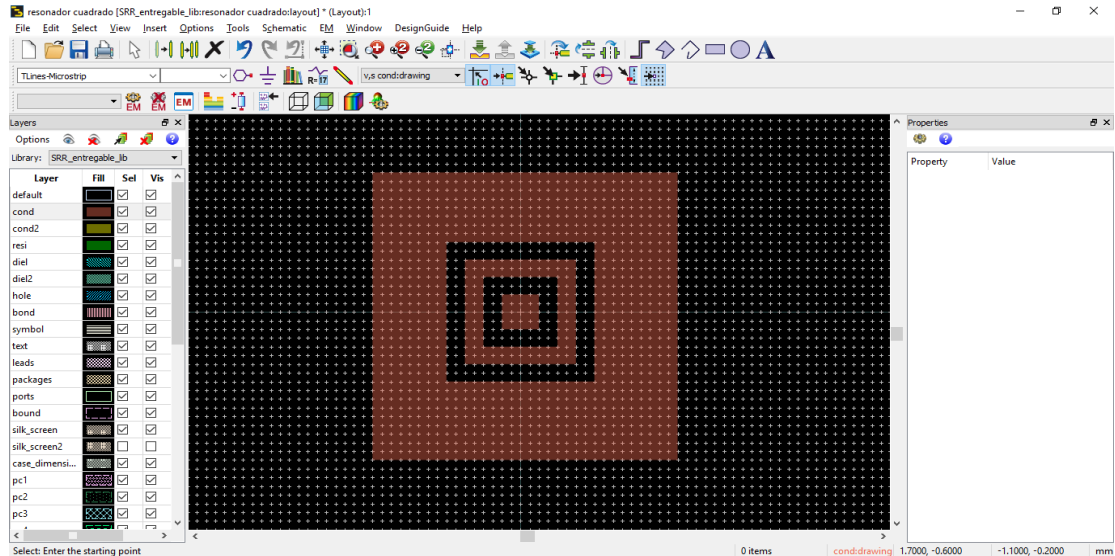
Figura 23 Diseño geométrico 4



Fuente Autor

14. Completando el diseño de nuestro resonador se realiza un cuadrado en el interior con dimensiones de 4 mm para completar con nuestras figuras geométricas que conformaran el anillo complementario resonador como se evidencia en la figura 24.

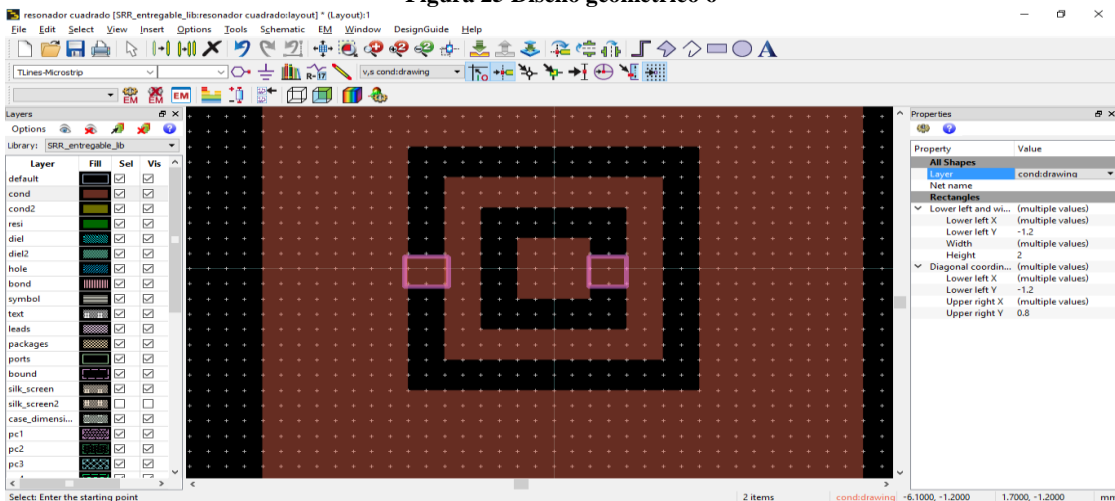
Figura 24 Diseño geométrico 5



Fuente Autor

15. Para completar el diseño anillo complementario resonador se debera realizar las uniones de nuestras figuras geométricas con la creación de dos cuadrados de 2.5 mm las cuales se ubicaran como se muestra en la figura 25.

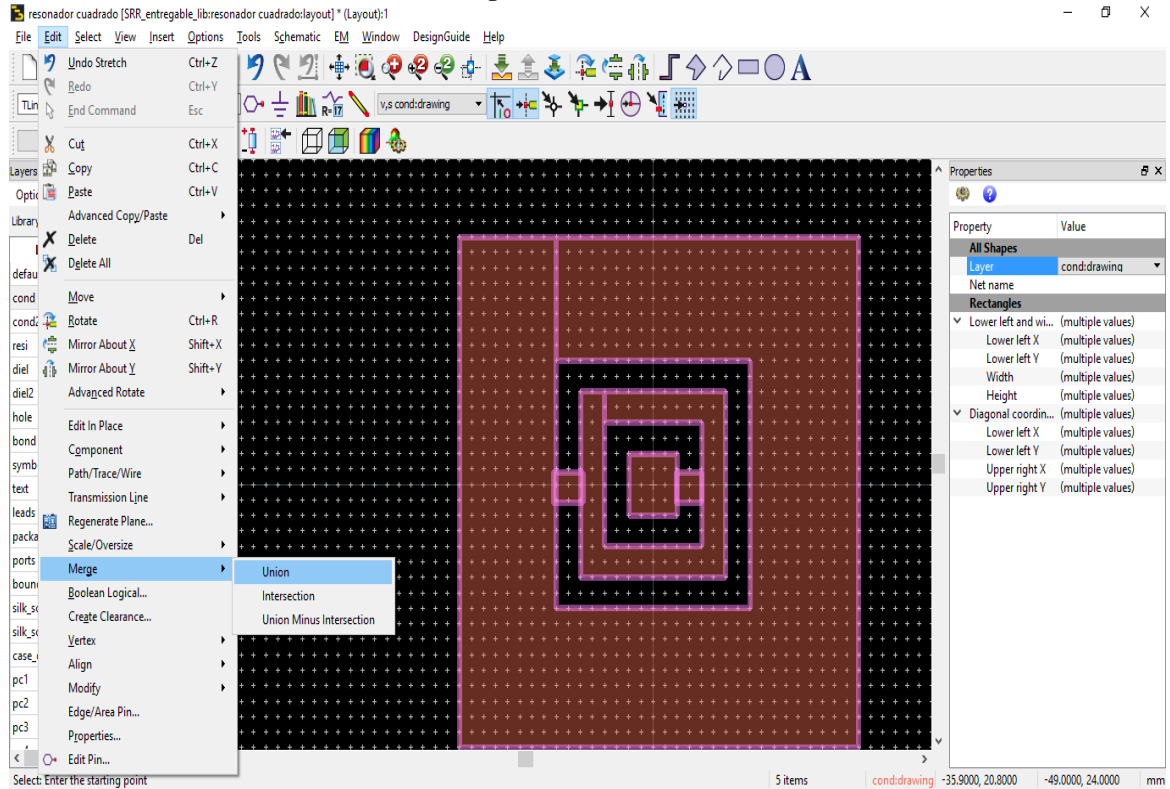
Figura 25 Diseño geométrico 6



Fuente Autor

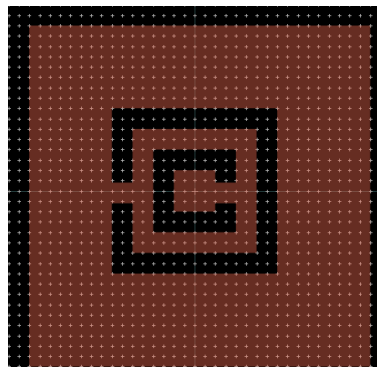
16. Para realizar el enlace de nuestros diferentes complementos se procede a seleccionar todos los elementos que conforman el anillo resonador en la opción *Edit-Merge- Unión* como se muestra en la figura 26. Dando como resultado la respectiva conformación del resonador como se evidencia en la figura 27.

Figura 26 Unión Diseño



Fuente Autor

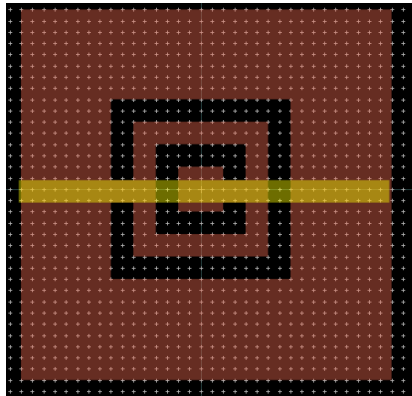
Figura 27 Resultado Unión



Fuente Autor

17. Con la finalización en el diseño del resonador se procede en capa conductora a realizar la línea de transmisión de dimensiones 33 X 2 mm como se evidencia en la figura 28, estas dimensiones establecen una impedancia de 50 ohm para la línea homogénea así buscar acoplar adecuadamente el CSRR a los puertos de medición del VNA

Figura 28 Línea de transmisión capa 2



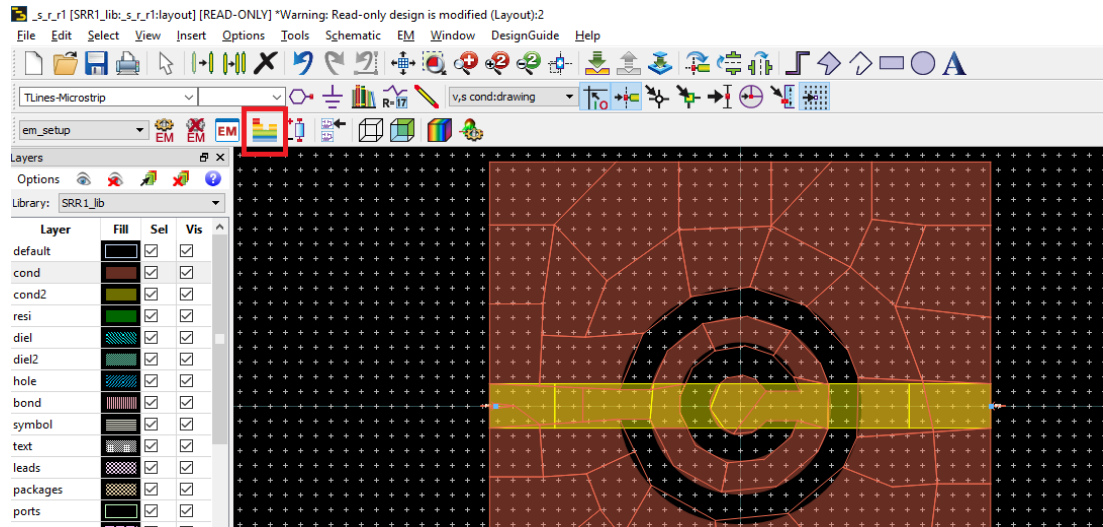
Fuente Autor

14.3 SIMULACIÓN SENSOR CSRR Y PARÁMETROS EN (S)

Una vez definida la geometría del CSRR, se establecen las condiciones adecuadas de simulación. A continuación, se presentan secuencialmente los pasos seguidos para simular la respuesta en frecuencia del sensor diseñado.

1. En el desarrollo del sensor se procede a determinar las características físicas de nuestro aislante o dieléctrico, seleccionando la opción *Substrate Editor* como se evidencia en la figura 29.

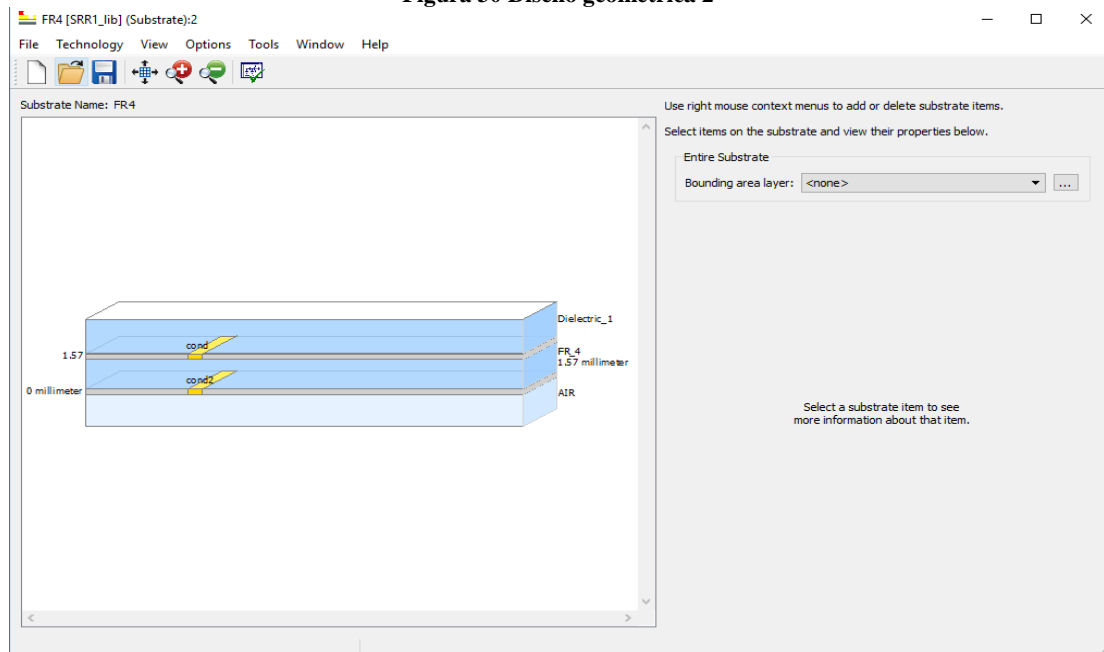
Figura 29 Selección Substrato



Fuente Autor

2. En las respectivas pruebas de ensayo y error se encontró como la configuración más óptima del substrato la configuración de la figura 30 para obtener una respuesta eléctrica estable.

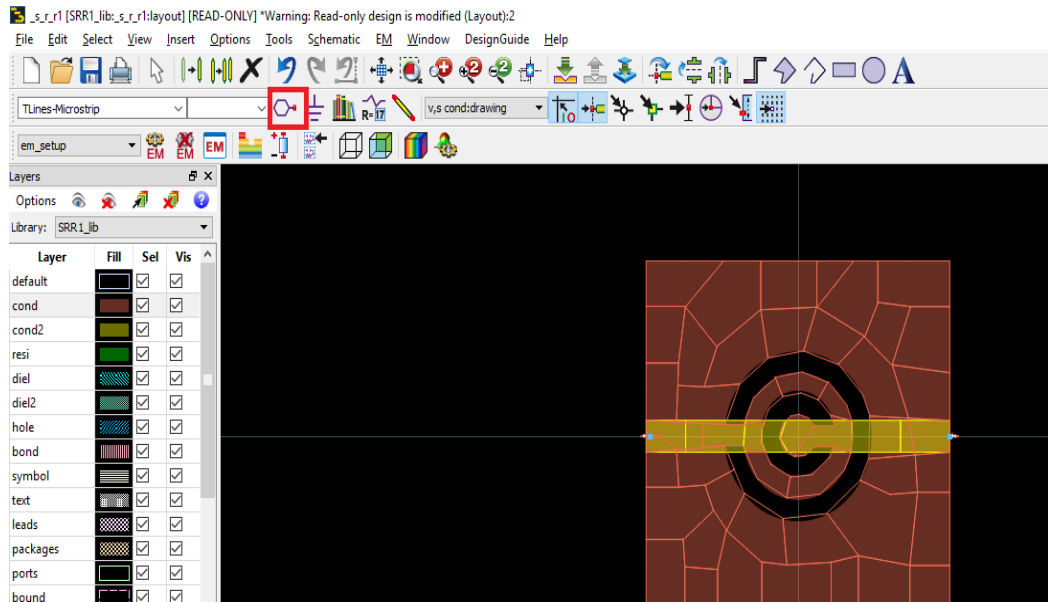
Figura 30 Diseño geométrica 2



Fuente Autor

3. Con el sustrato seleccionado se realizaron puertos de simulación que corresponden a cada puerto del VNA con impedancia características de 50Ω . Para esto vamos a la opción “Insert Pin” como en la figura 31.

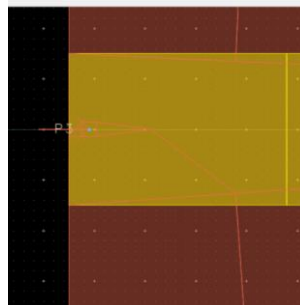
Figura 31 Insert Pin



Fuente Autor

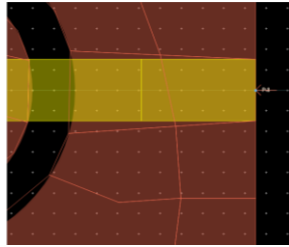
4. Se colocan los cuatro pines por efectos de simulación, esto posteriormente permitirá definir la excitación en cada uno de los puertos, definiendo la ubicación de los terminales pin 1 con pin 3 como se demuestra en la figura 32 y los pines 2 y 4 como en la figura 33.

Figura 32 Insert pin 1 y pin 3



Fuente Auto

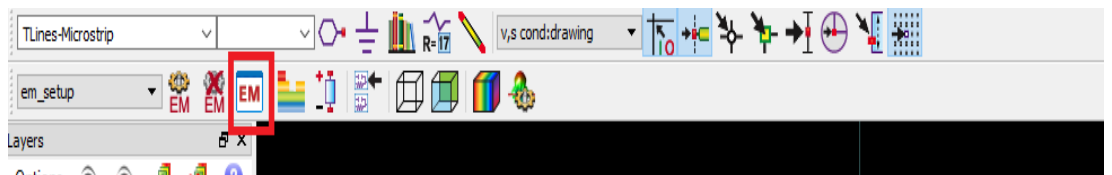
Figura 33 Insert pin 2 y pin 4



Fuente Autor

5. A continuación, se establecen los parámetros de simulación y se establece el simulador a usar, en este caso se utilizará el *momentum RF* ya que nos permite identificar el acoplamiento y la automatización del rendimiento del circuito, en seguida se ejecuta la opción *EM Simulation Setup* como en la figura 34.

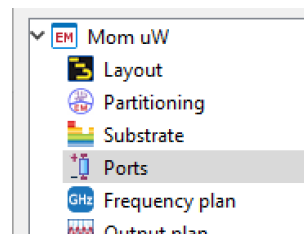
Figura 34 EM Simulation Setup



Fuente Autor

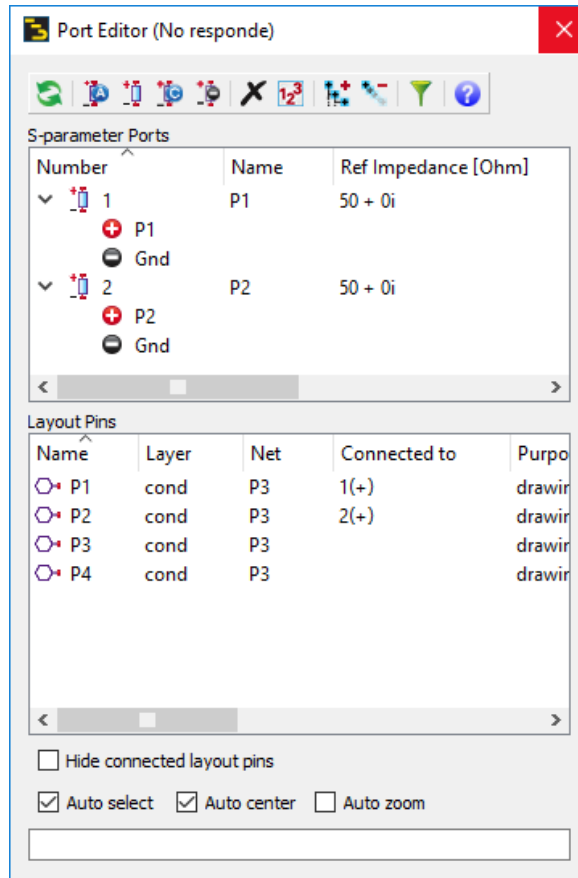
6. En la ventana emergente, la cual nos direcciono la opción EM procedemos a elegir la opción *Ports-Edit* como se evidencia en las figuras 35 y 36.

Figura 35 Ports Edits



Fuente Autor

Figura 36 Ports Edits 2



Fuente Autor

7. Para la configuración de nuestros puertos de excitación se procede a la modificación del Pin 3 en el Gnd del P 1 y el Pin 4 con el Gnd del P2 como se demuestra en la figura 37.

Figura 37 Ports Edits 3

Number	Name	Ref Impedance [Ohm]	Calibration	Ref Offset [mm]	Term Type
1	P1	50 + 0i	TML	0	inputOutput
	+				
	-				
	Gnd				
2	P2	50 + 0i	TML	0	inputOutput
	+				
	-				
	Gnd				
	P3				
	P4				

Fuente Autor

- En el análisis de la investigación del resonador CSRR se toma como rango de frecuencia hasta los 3GHz. Se selecciona la opción *frequency plan* en la ventana emergente y se configura el rango de frecuencia para operar como en la figura 38.

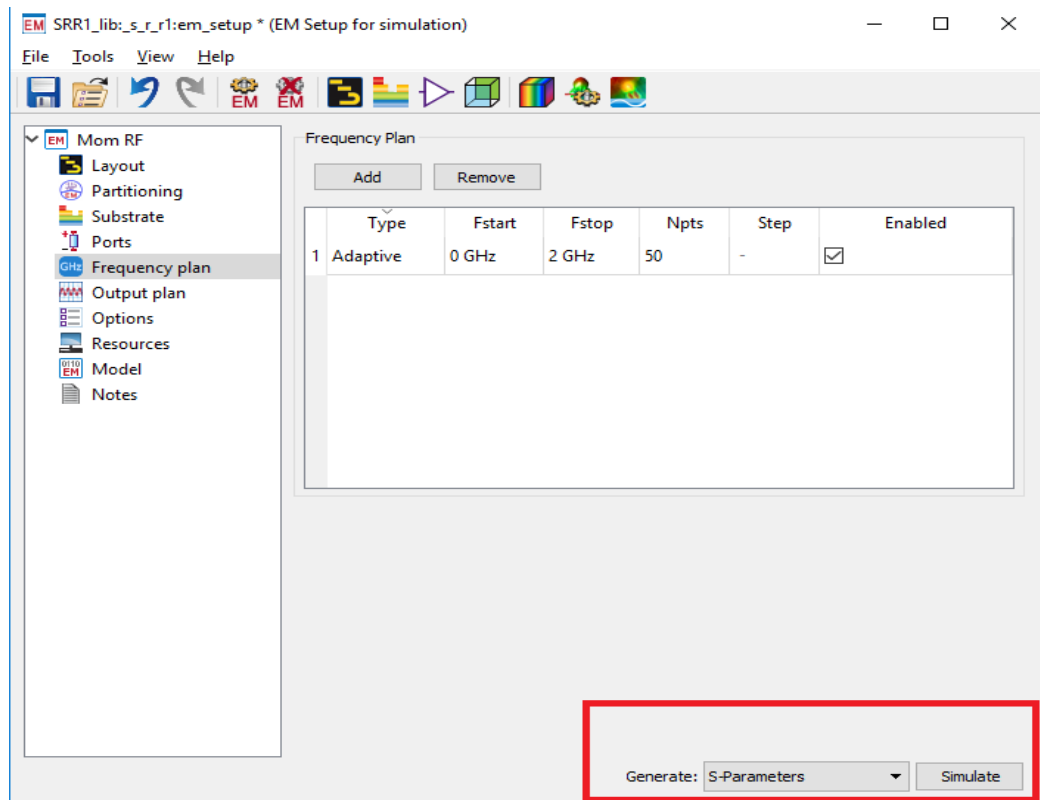
Figura 38 Plan de frecuencia

	Type	Fstart	Fstop	Npts	Step	
1	Adaptive	0 GHz	3 GHz	100	-	<input checked="" type="checkbox"/>

Fuente Autor

- Al terminar las diferentes configuraciones de la caracterización del sensor se procede a generarla simulación de los parámetros en (S) en la opción *Simulate* de la esquina inferior izquierda como en la figura 39.

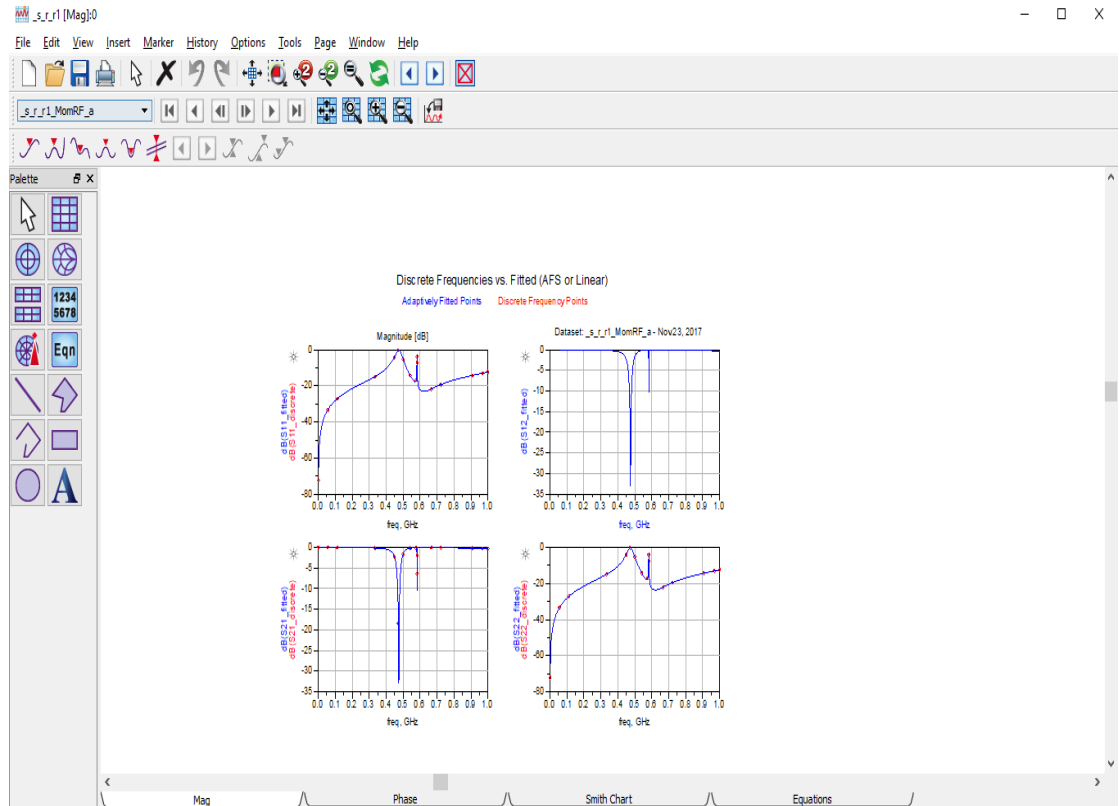
Figura 39 simulación



Fuente Autor

10. En los parámetros en (S) obtenidos se puede evidenciar el comportamiento de la reflexión y transmisión a partir de su frecuencia de resonancia como se evidencia en la figura 40.

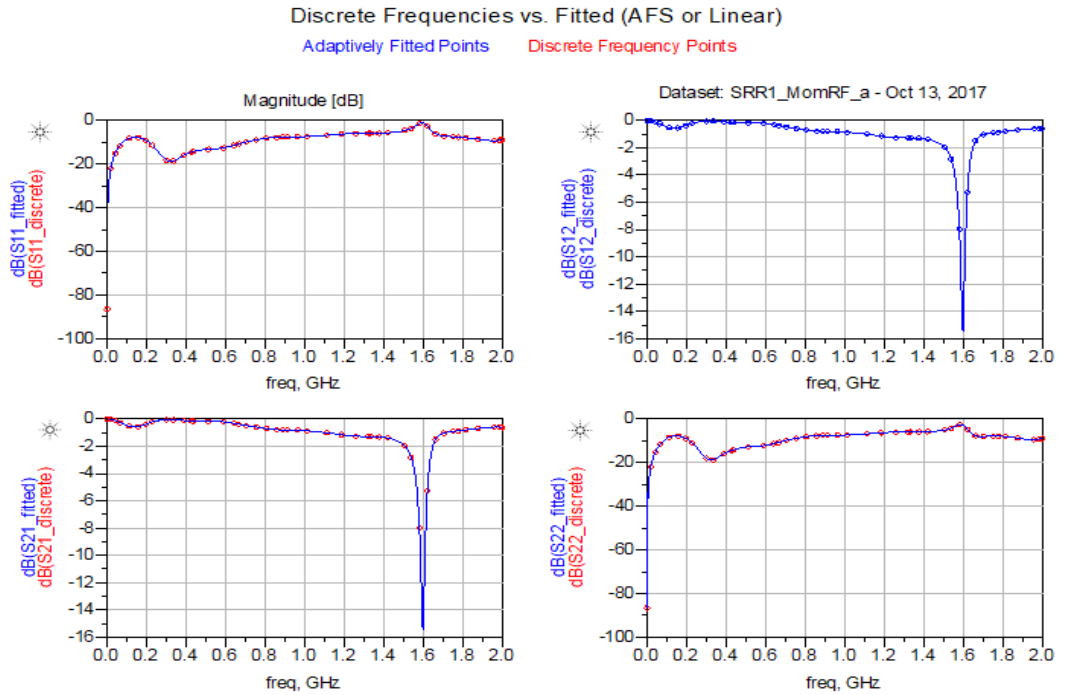
Figura 40 Simulación parámetros en (s)



Fuente Autor

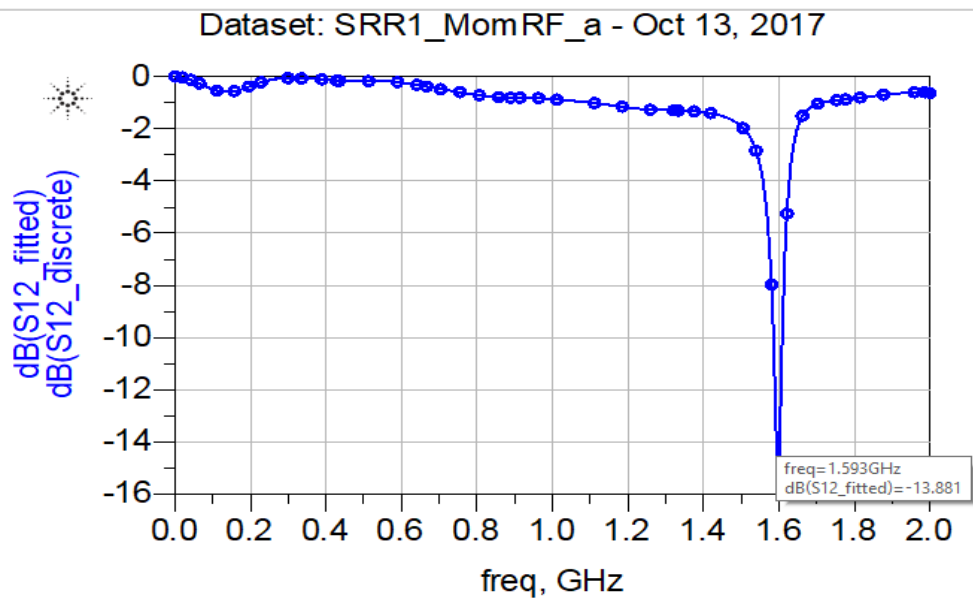
11. Se logra evidenciar en las figuras 41 y 42 que a partir de los parámetros de transmisión (S_{12} y S_{21}) se logró determinar que el CSRR se encuentra resonando a una frecuencia de 1.6 GHz en presencia de aire. Esto corresponde efectivamente a la frecuencia para la cual se diseñó el CSRR. En la presentación de resultados y análisis se tendrá en cuenta estos resultados para la caracterización experimental y su respectiva simulación.

Figura 41 Simulación parámetros (S)



Fuente autor

Figura 42 Simulación S₂₁



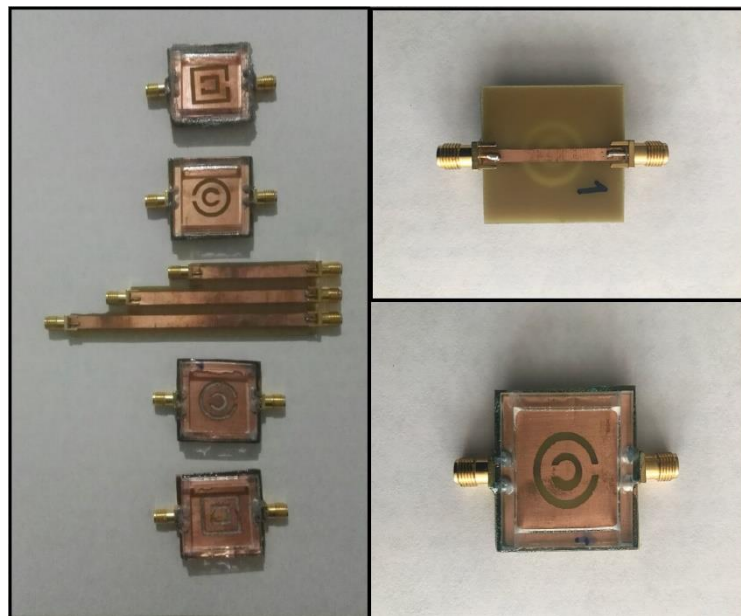
Fuente Autor

15. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Una vez validado el diseño de las estructuras mediante las simulaciones electromagnéticas descritas en la sección anterior, se fabricaron los sensores utilizando reacción químico convencional en PCB's fabricadas con FR-4 el cual están formadas por 9 lazos de hilos de prepeg impregnados con resina epóxica . En la Figura 43 se muestra una foto de los CSRR fabricados, los cuales son utilizados como sensores de detección de glifosato en agua.

La correlación de la respuesta eléctrica de las estructuras diseñadas en este trabajo con la concentración de glifosato presente en agua se realizó utilizando un VNA previamente calibrado utilizando un procedimiento de calibración SOLT, la cual permite eliminar los efectos parásitos asociados a los cables y conectores requeridos para realizar las mediciones. A continuación, se explica el procedimiento de calibración mencionado

Figura 43 kit de sensores CSRR



Fuente Autor

15.1 MÉTODO DE CALIBRACION SHORT-OPEN-LOAD-THRU (SOLT)

SOLT es un acrónimo de corto (Short), abierto (Open), carga (Load) y “a través” (Thru), el cual es un método de calibración para analizadores de redes más utilizado. Requiere el uso estándares conocidos para corto circuito, circuito abierto, una carga de precisión (por lo general (50 o 75 Ohms)). Uno a uno se va conectando los estándares en los puertos para ser medidos por el instrumento (estos pasos son asistidos por el instrumento para seguir un orden específico).

Finalmente se interconectan ambos planos de referencia utilizando el adaptador *Thru*. De esta forma se establece el plano de medición en las terminales de dispositivo a medir, eliminando los efectos del equipo de medida

15.2 CALIBRACIÓN VNA ROHDE&SCHARZ FSH8 SPECTRUM ANALYZER 100 KHZ – 8GHZ

- En la figura 44 se observa el modelo del VNA (*ROHDE&SCHARZ FSH8 SPECTRUM ANALYZER 100 KHz – 8GHz*) Propiedad de la Universidad Católica de Colombia.

Figura 44 ROHDE&SCHARZ FSH8 SPECTRUM ANALYZER 100 KHZ – 8GHz



Fuente Autor

- En la figura 45 se realizan las conexiones del VNA que serán el medio de excitación para el resonador, por medio de la Sonda ZV-Z192 HF.

Figura 45 Sonda ZV-Z192 HF cable



Fuente Autor

- En la figura 46 se encuentra el kit de Calibración SOLT, permitiendo establecer el plano de calibración de las mediciones de parámetros de dispersión.

Figura 46 Kit de calibración SOLT



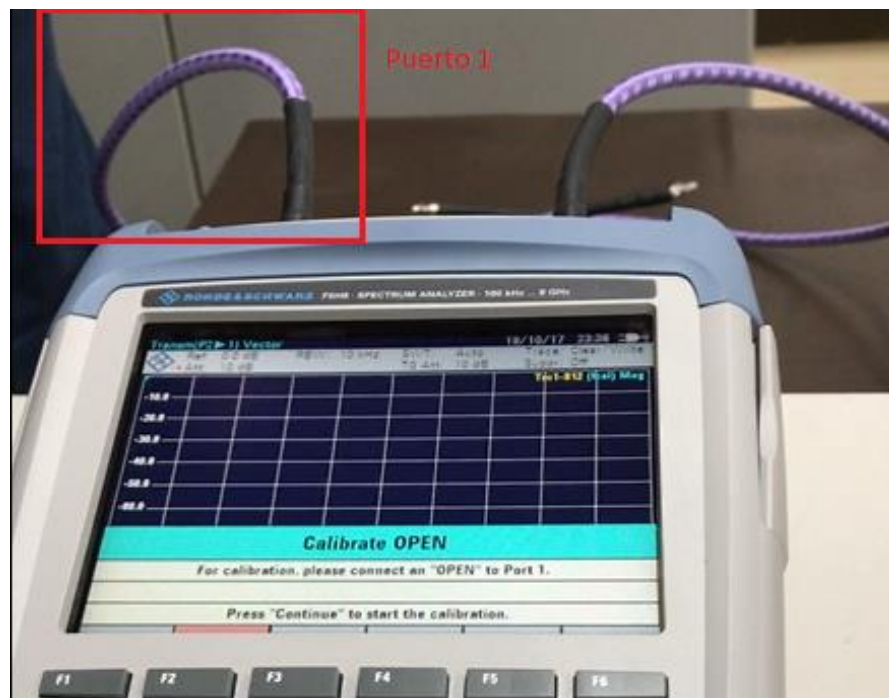
Fuente Autor

15.3 CALIBRACION DEL VNA

Usando el kit de calibración mostrado en la figura 46 se realizó la calibración del VNA, esto permite eliminar los errores sistemáticos como los efectos de los cables, conectores, acoplamiento y ambiente del equipo de medición, a continuación, se describe secuencialmente el proceso de calibración asistida:

1. El procedimiento de calibración se inicia conectando la estructura OPEN en el puerto 1, como se ilustra en la figura 47.

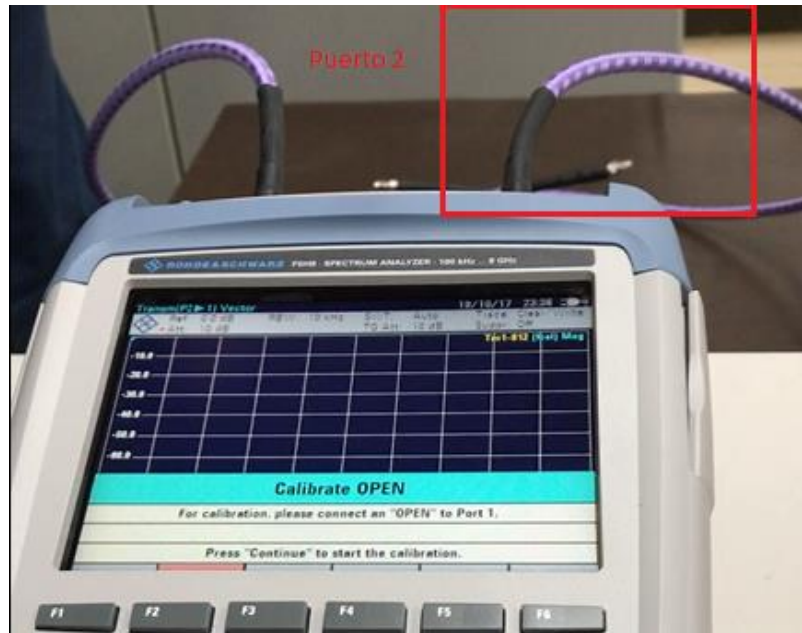
Figura 47 VNA puerto 1 Open



Fuente Autor

2. Simultáneamente SOLT permite determinar y eliminar los efectos de los cables y los conectores e ambos puertos. Así como se ilustra en la figura 48, la estructura OPEN se mide seguidamente en el puerto 2.

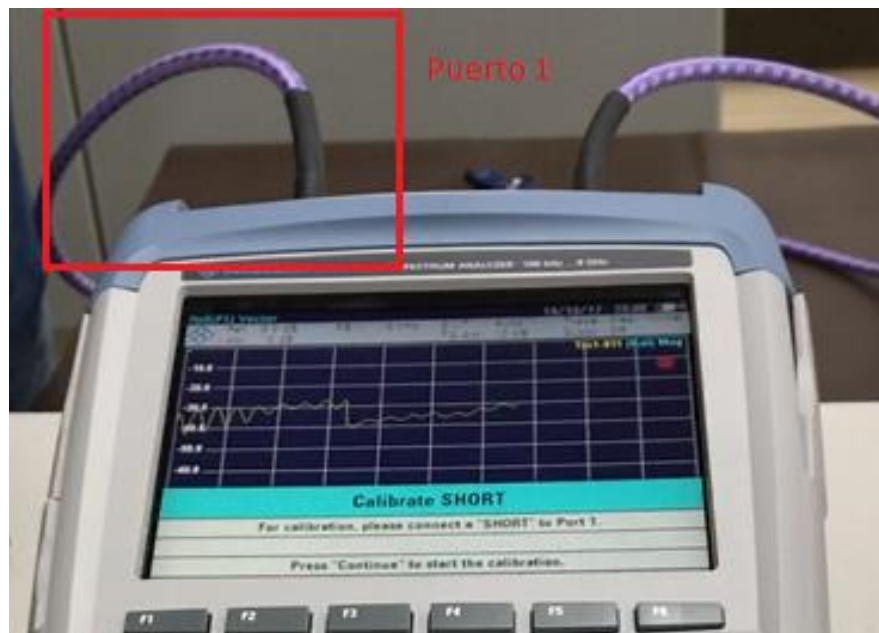
Figura 48 VNA puerto 2 Open



Fuente Autor

3. Posteriormente se miden las estructuras SHORT. Estas, colocan en corto circuito los respectivos puertos. En la figura 49 se muestra la medición del SHORT en el puerto 1.

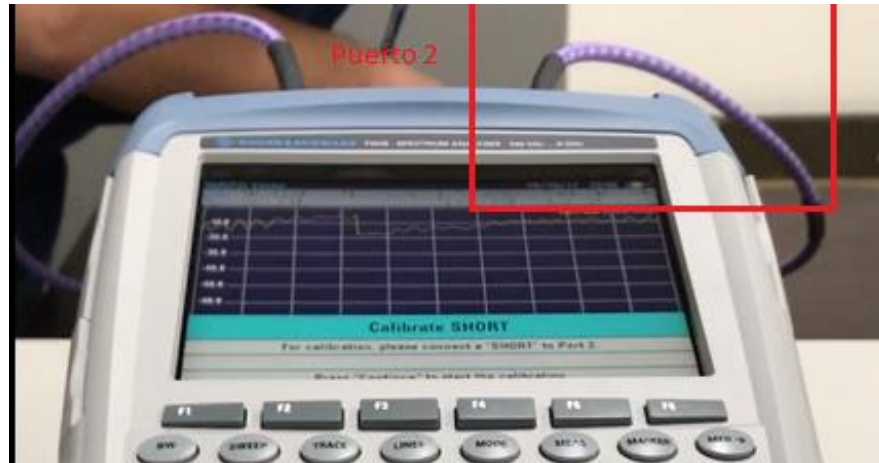
Figura 49 VNA puerto 1 Short



Fuente Autor

- Se continua con la calibración del VNA con la medición del circuito SHORT por el puerto 2 como estructura de comportamiento existente ilustrada en la figura 50.

Figura 50 VNA puerto 2 Short



Fuente Autor

- Se realiza la medición del circuito LOAD con la conexión de los puertos 1 y 2 como se realizó en los dos circuitos anteriores (Ver figura 51).

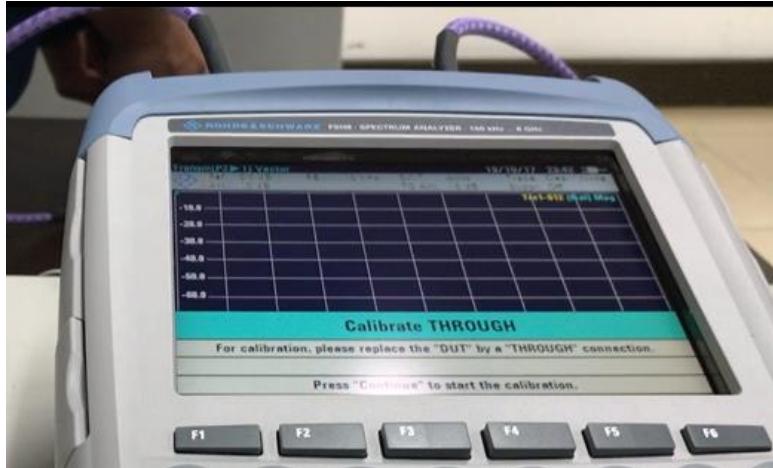
Figura 51 VNA LOAD



Fuente Autor

6. El estándar THRU permite determinar los errores producidos por el acoplamiento de los puertos. en la figura 52 se muestra la medición de este estándar siguiendo el procedimiento de calibración

Figura 52 VNA TROUGH



Fuente Autor

7. Una forma práctica de comprobar el procedimiento de calibración es medir seguidamente una estructura conocida, como una línea de transmisión. En este caso se utilizaron un conjunto de líneas con impedancia característica de 50 ohm, mostradas en la Figura 53. Nótese en la Figura 54 como el coeficiente de reflexión se centra en la carta de Smith, evidenciando el correcto acoplamiento esperado.

Figura 53 Calibración con línea de transmisión



Fuente Autor

Figura 54 Carta de Smith VNA



Fuente Autor

15.4 DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO

Una vez se ha calibrado el analizador vectorial de redes como se describió en la sección 15.3, se procedió a elaborar un conjunto de muestras que serán medidas en los CSRR diseñados, lo cual permitirá obtener la correlación de la respuesta eléctrica del sensor con la respectiva variación de concentración del glifosato en el agua.

Se trata de utilizar en primera instancia el diseño del sensor planar rectangular (al que se llamará en lo sucesivo: **Sensor cuadrado**, bajo las siguientes pruebas:

- Respuesta eléctrica del sensor en presencia de aire.
- Respuesta eléctrica del sensor en presencia de agua destilada. Volumen de la muestra 2 ml.
- Respuesta eléctrica del sensor en presencia de una disolución de agua destilada y glifosato siguiendo descripción de la tabla 2. Tamaño de la muestra: 2ml.

En la tabla 2 se muestra la concentración de la disolución utilizada en las pruebas experimentales de los resonadores.

Tabla 2 concentración de la disolución de glifosato

Volumen de Glifosato (ml)	Disolución (g/L)
0.2	0.2432
0.4	0.4864
0.6	0.7296
0.8	0.9728
1.0	12.160
1.2	14.592
1.4	17.024
1.6	19.456
1.8	21.888
2.0	24.320

Fuente: Autor

En cada uno de los pasos se tabulan los datos del coeficiente de transmisión S_{21} y su respuesta en frecuencia. Dichas mediciones se representan en las tablas 3 y 4 en el capítulo 16,1 & 16,2 (Resultados y análisis), respectivamente.

Para la elaboración de las muestras a caracterizar se utilizó:

- 1. Glifosato (ESTELARTM 1280 SL, Marca - DOW AgroScience) /** Ingrediente activo: Glifosato 608 g/L, sal Dimetilamina de Glifosato, Glifosato equivalente ácido 480 g/L, de formulación a 20° C.
- 2. Agua destilada:** Sustancia compuesta en la unidad de moléculas de H_2O y ácido purificado filtrado por separación volátil, siendo utilizada para la disminución de error en la determinación de la concentración del herbicida.
- 3. Kit de sensores planares CSRR:** sensores anteriormente simulados y diseñados con la caracterización de resonancia específica, se presentan en la figura 43. Se utilizan dos sensores por diseño para estimar el comportamiento de los mismos en la práctica.

15.4.1 Experimentación sensor CSRR

Se inicia la fase de la experimentación de las mediciones de los sensores CSRR; en la mesa de trabajo se encuentran los elementos anteriormente descritos y el instrumento de medición (VNA) como se evidencia en la figura 55:

Figura 55 Elementos de experimentación



Fuente Autor

Para el cálculo de la disolución (mezcla de agua y glifosato) se tuvo en cuenta el agua destilada como disolvente, glifosato como agente a disolver o soluto y para la concentración se realizó una mezcla de 500 ml de agua y pasos de 0.2 ml de glifosato. El nivel de concentración obedece al usó la fórmula de dilución, a saber: $C1 * V1 = C2 * V2$ en donde el dato a conocer es la concentración 2 ($C2$) de la disolución.

$C1$ = Concentración inicial en moles.

$V1$ = Volumen inicial de la disolución.

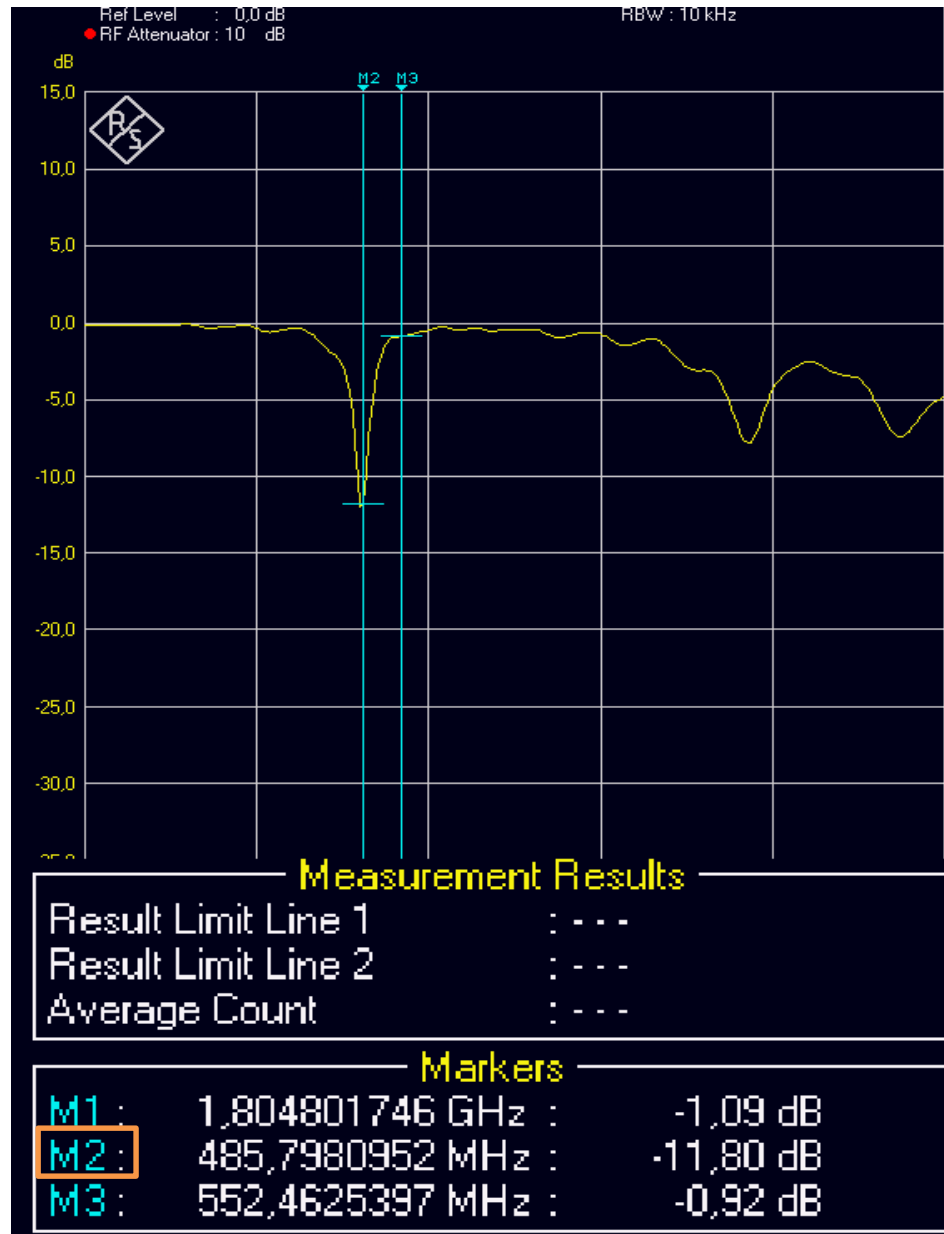
$C2$ = Concentración final en moles.

$V2$ = Volumen final de la disolución.

15.4.2 CSRR Cuadrado

Las figuras 56 a 65 muestran el parámetro de transmisión medido en el VNA para diferentes concentraciones de glifosato en agua:

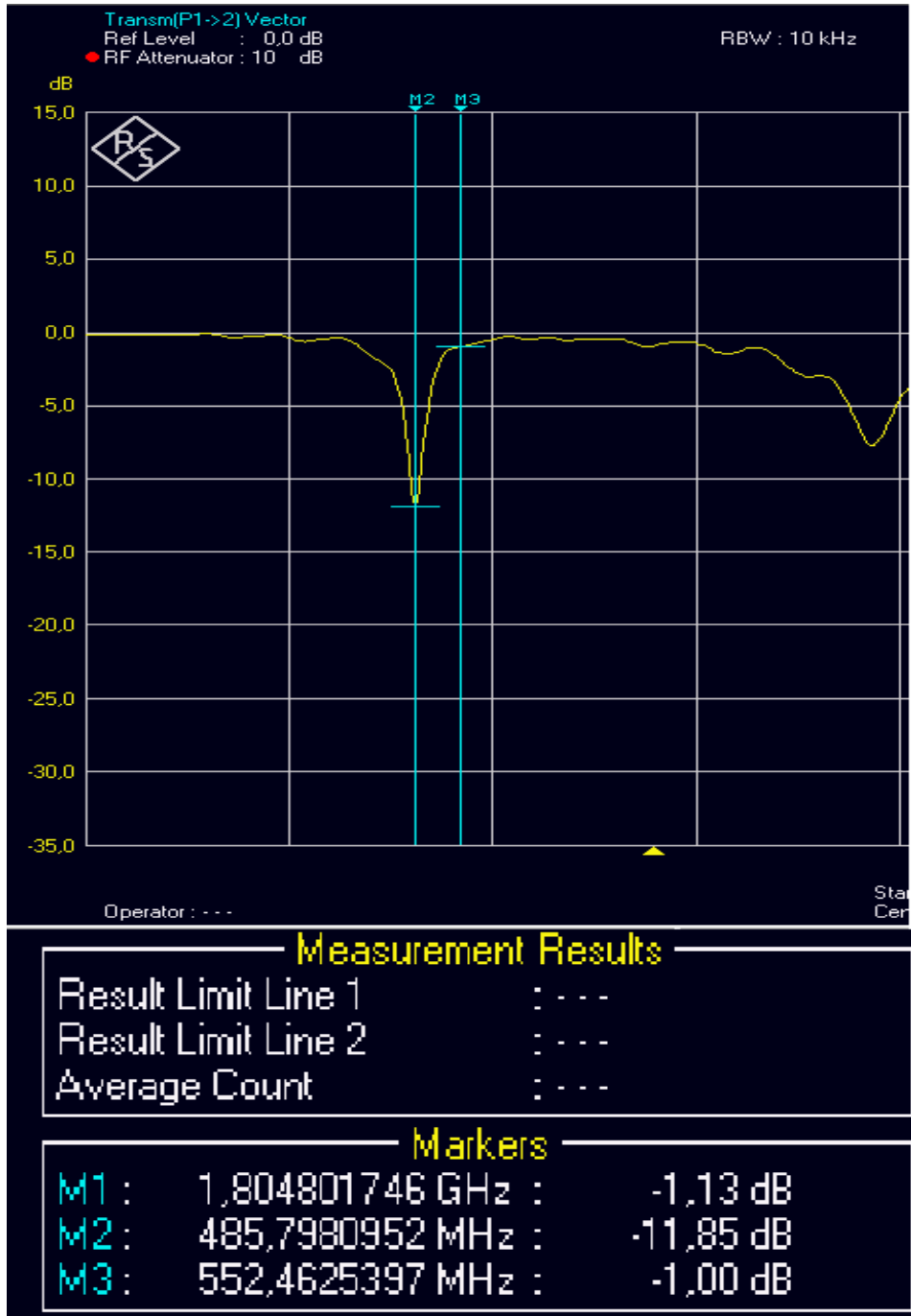
Figura 56 Concentración 0.2 ml



Fuente Autor

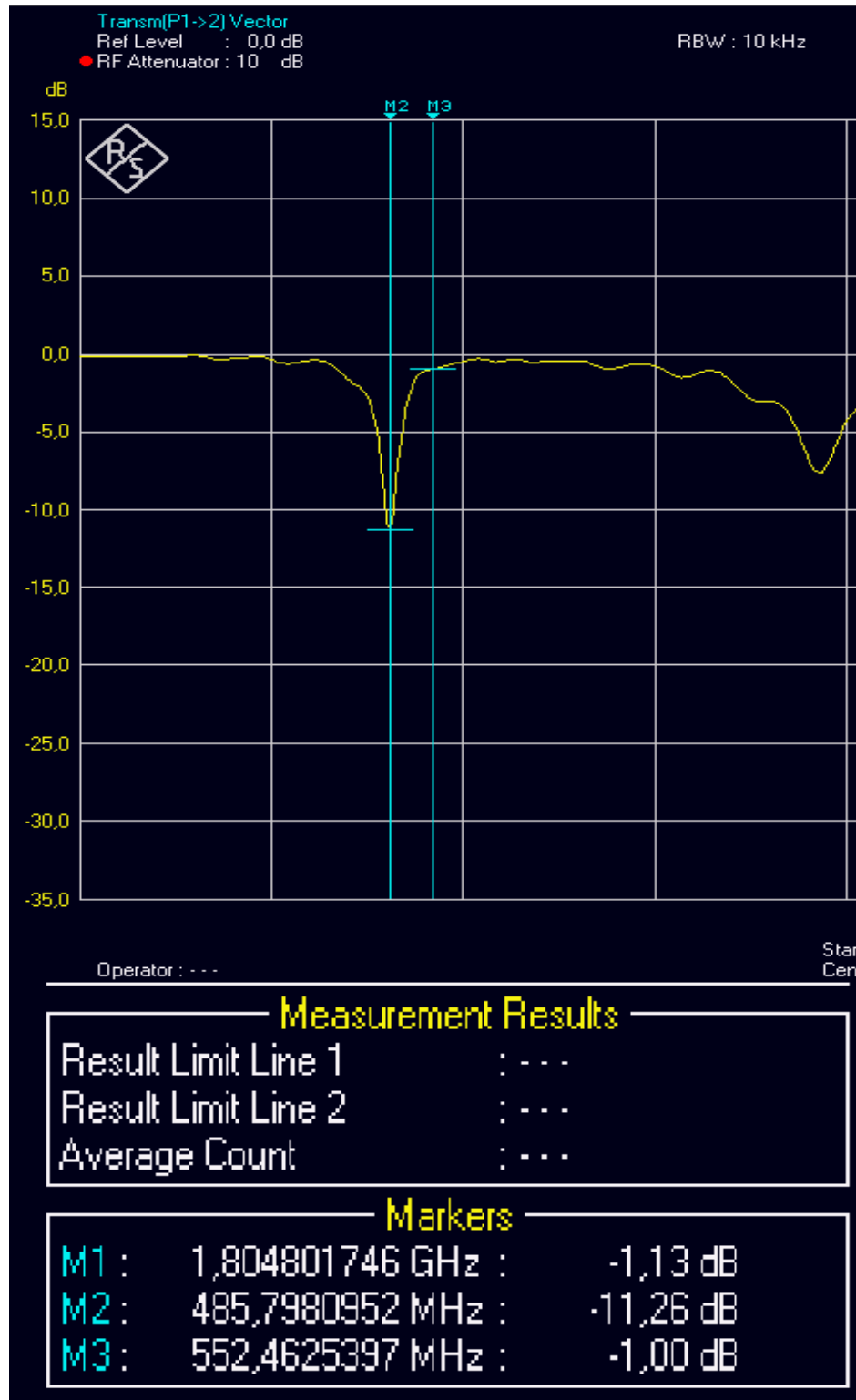
En cada una de las figuras de la 56 a la 65 se encuentra el marcador M2 (cuadrado naranja) que muestra la respuesta en frecuencia a la cual está resonando el sensor y su respectivo parámetro S_{21} correspondiente al coeficiente de transmisión.

Figura 57 Concentración 0.4 ml



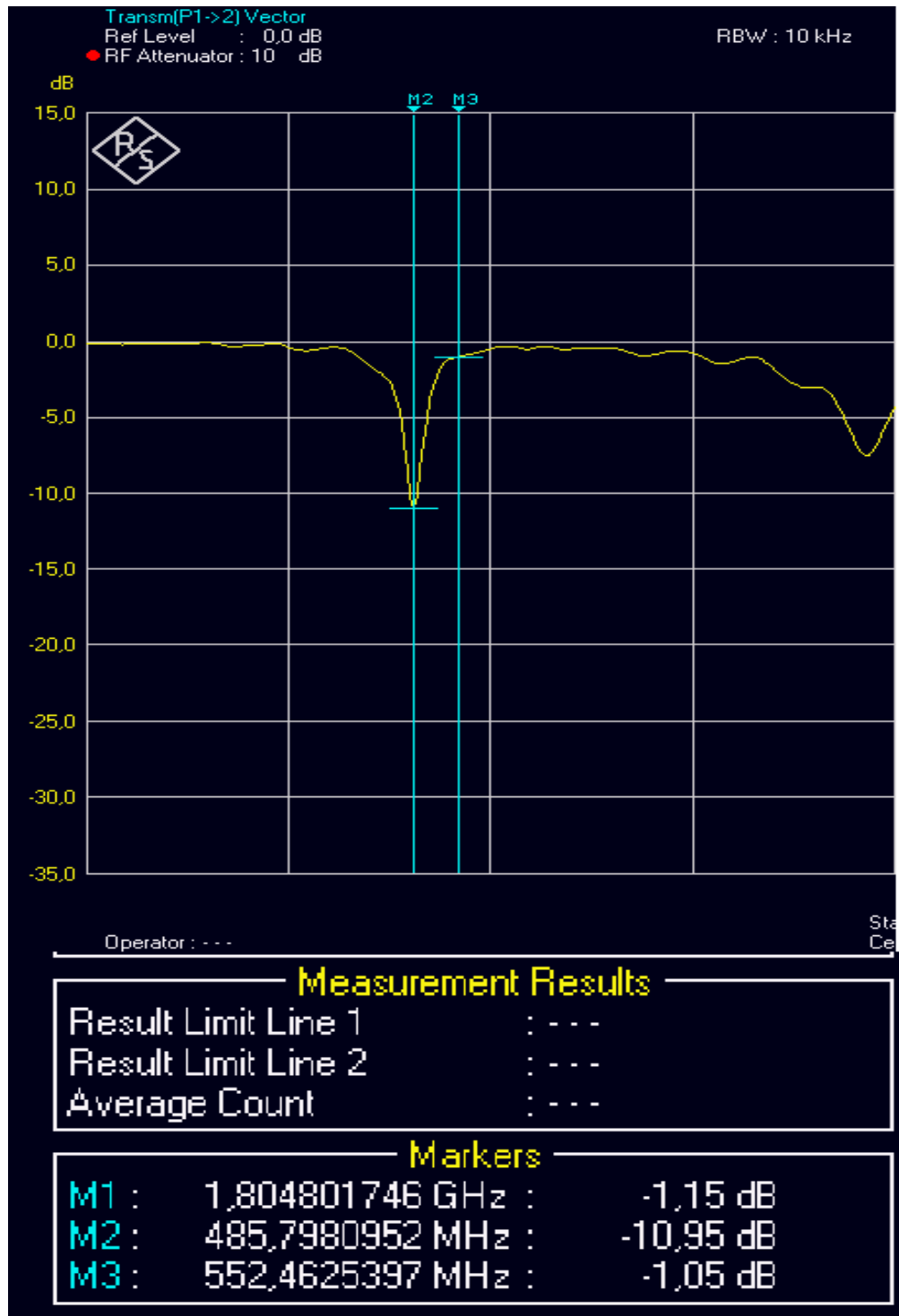
Fuente Autor

Figura 58 Concentración 0.6 ml



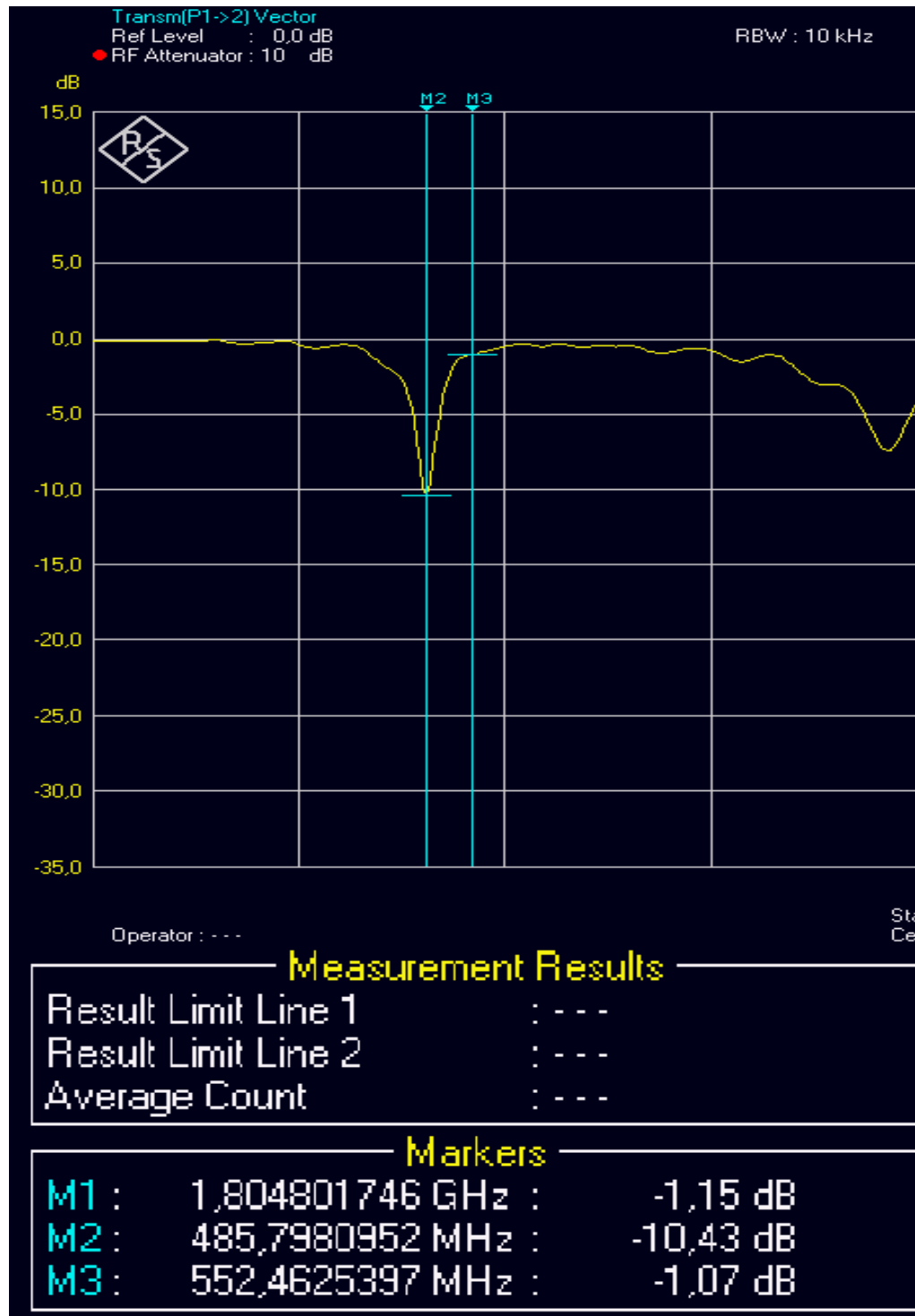
Fuente Autor

Figura 59 Concentración 0.8 ml



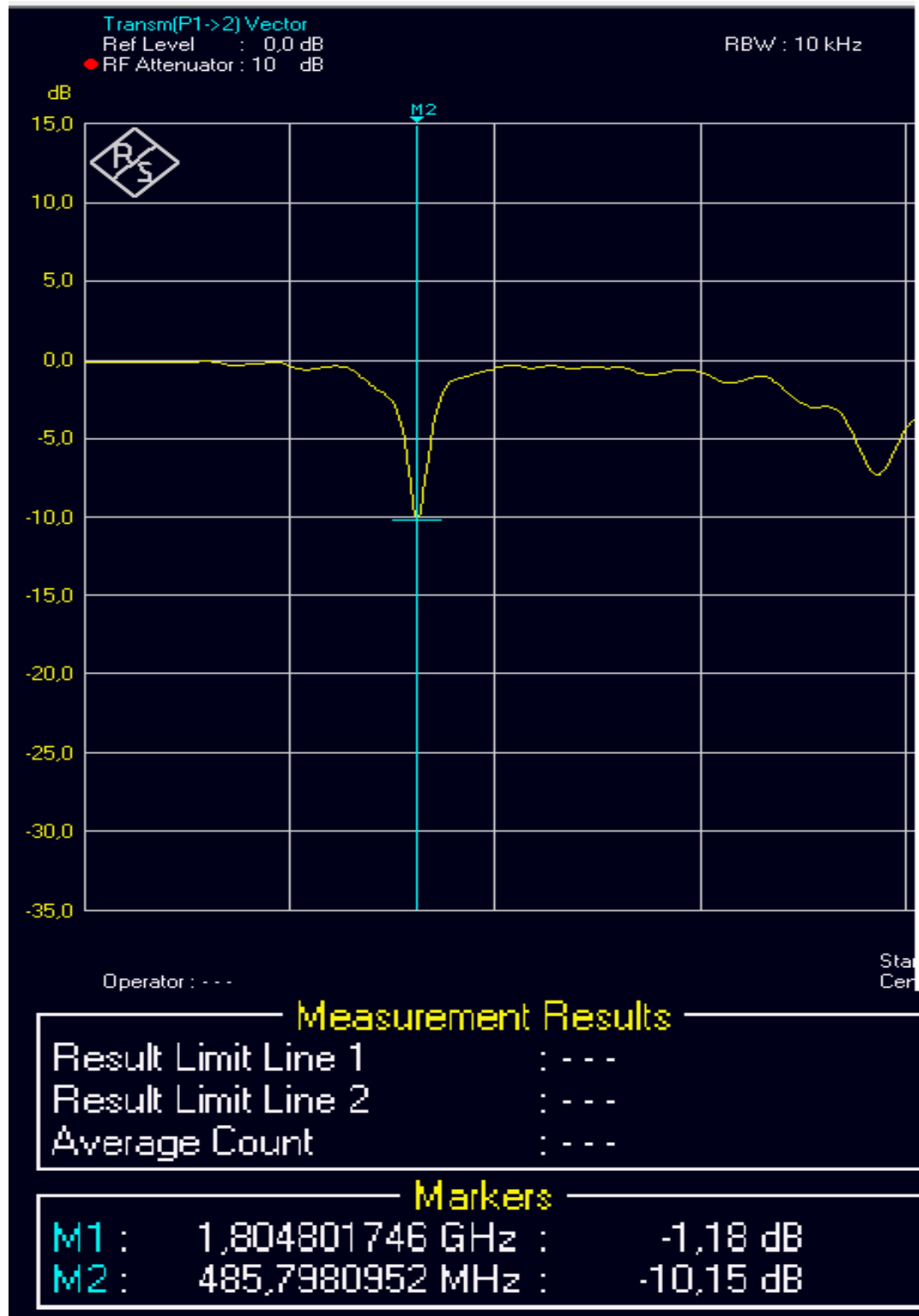
Fuente Autor

Figura 60 Concentración 1 ml



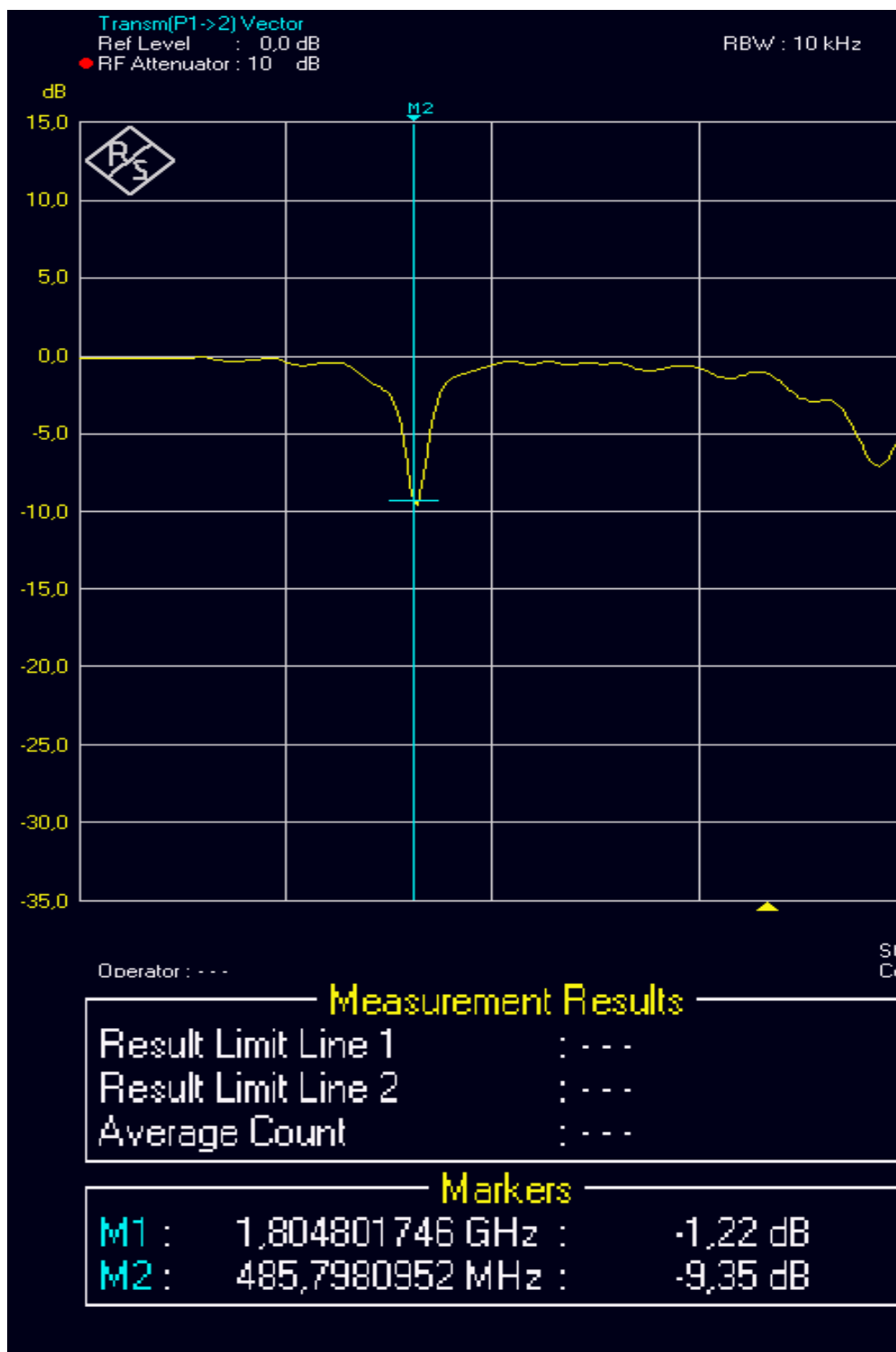
Fuente Autor

Figura 61 Concentración 1.2 ml



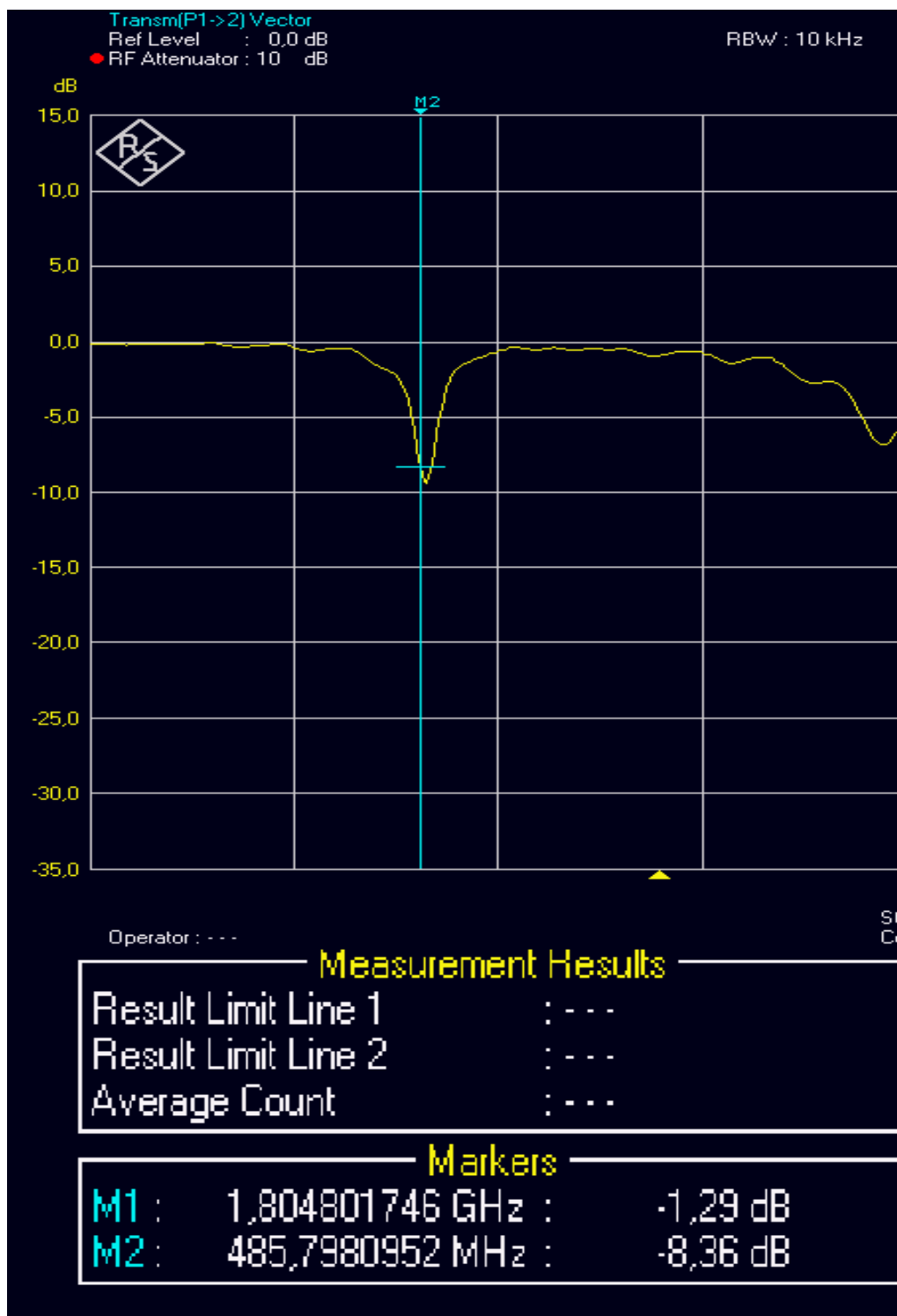
Fuente Autor

Figura 62 Concentración 1.4 ml



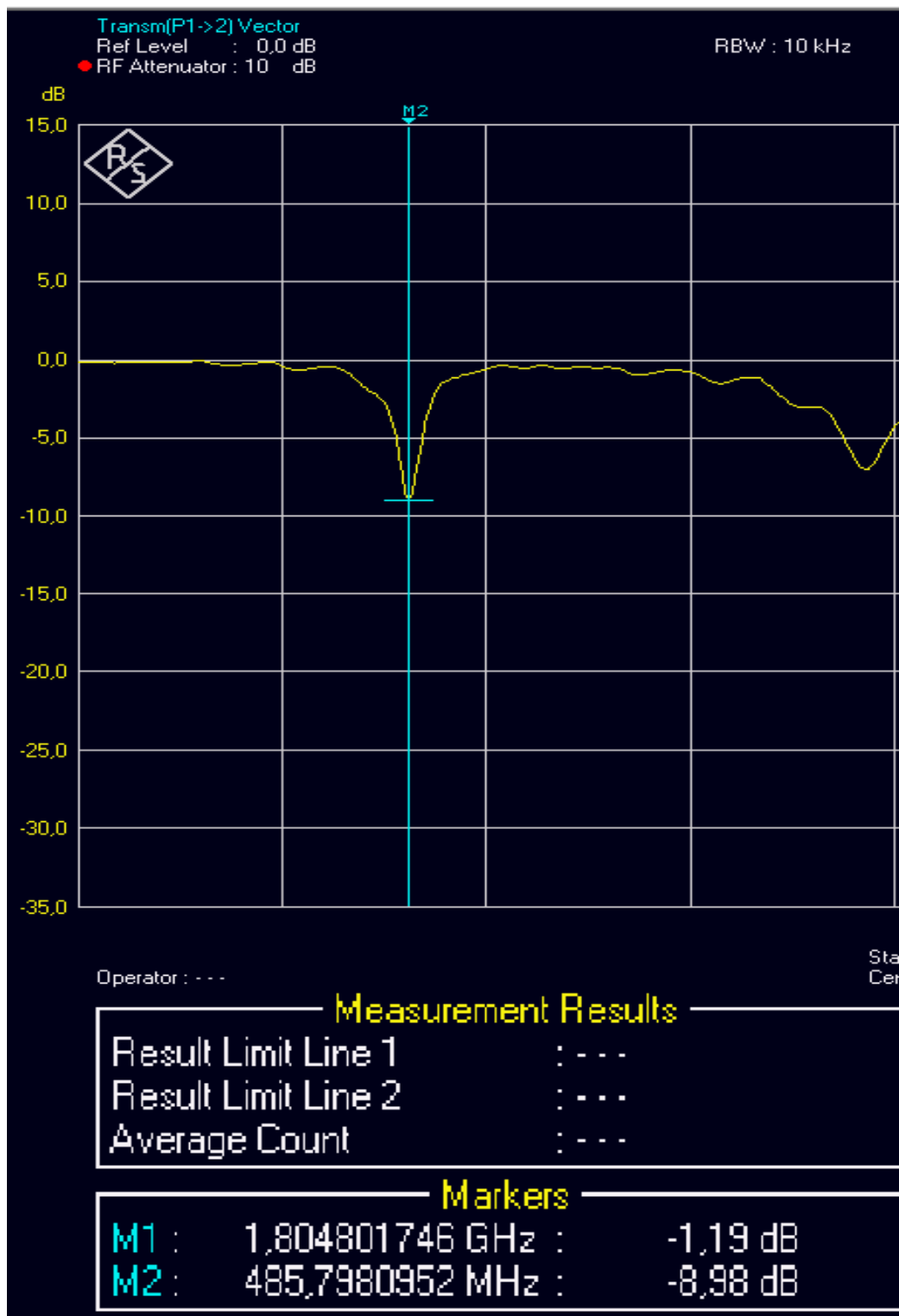
Fuente Autor

Figura 63 Concentración 1.6 ml



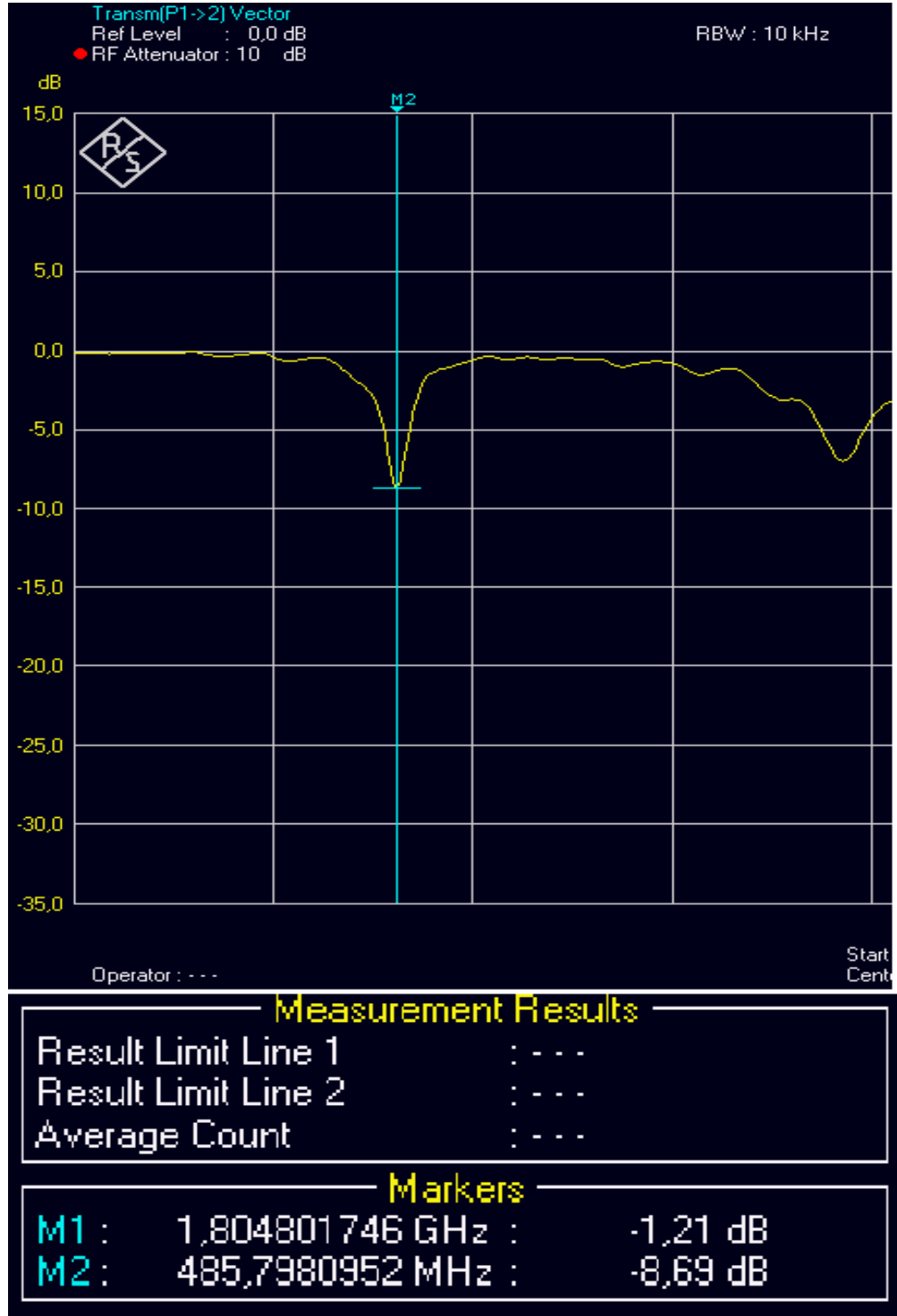
Fuente Autor

Figura 64 Concentración 1.8 ml



Fuente Autor

Figura 65 Concentración 2 ml



Fuente Autor

16.RESULTADOS Y ANALISIS

El presente Trabajo De Grado considero 3 escenarios:

- a. Sensores en presencia de aire como medio de referencia.
- b. Sensores en presencia de agua destilada.
- c. Sensores en presencia de disolución de agua y glifosato.

Para las mediciones, los puertos del analizador vectorial de redes fueron conectados al sensor, midiéndose el coeficiente de transmisión (S_{21}) en un rango de 100.00 KHz a 3.00 GHz. Estos resultados fueron tomados como referencia para evaluar; posteriormente el desempeño de los sistemas propuestos.

A continuación, se presenta con su respectivo análisis:

Parámetros A. Los resultados conjuntos (figuras 56 a 65) del comportamiento del sensor cuadrado en magnitud y frecuencia al variar la concentración de glifosato. En conjunto con los resultados del comportamiento del sensor cuadrado en magnitud y concentración, su respectiva linealización y su coeficiente de variación.

Parámetros B. Los resultados conjuntos de las gráficas del comportamiento del sensor circular en magnitud y frecuencia al variar la concentración de glifosato, en conjunto con los resultados del comportamiento del sensor circular en magnitud y concentración, su respectiva linealización y su coeficiente de variación.

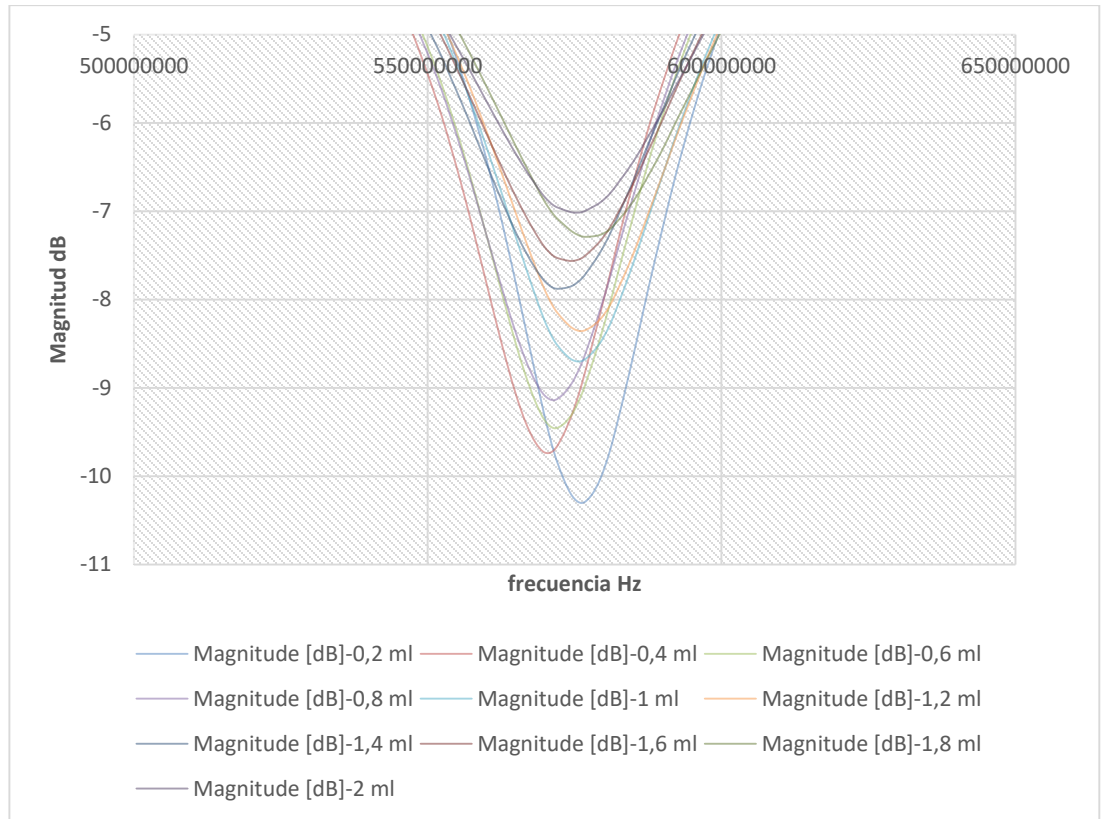
Parámetros C. Resultado del comportamiento de los sensores cuadrado y circular en presencia de aire.

Parámetros D. La variación de la permitividad del agua y su comparación con el resultado experimental para 0.2 ml de glifosato en 500 ml de agua.

16.1 SENSOR CUADRADO:

Parámetros A. Basándose en las figuras 56 a 65 se realizó la correlación del comportamiento del sensor teniendo en cuenta su respectiva frecuencia de resonancia, utilizando como parámetros la concentración y la magnitud dada en dB.

Figura 66 Correlación CSRR cuadrado



Fuente Autor

Tabla 3 Resultado experimental resonador cuadrado

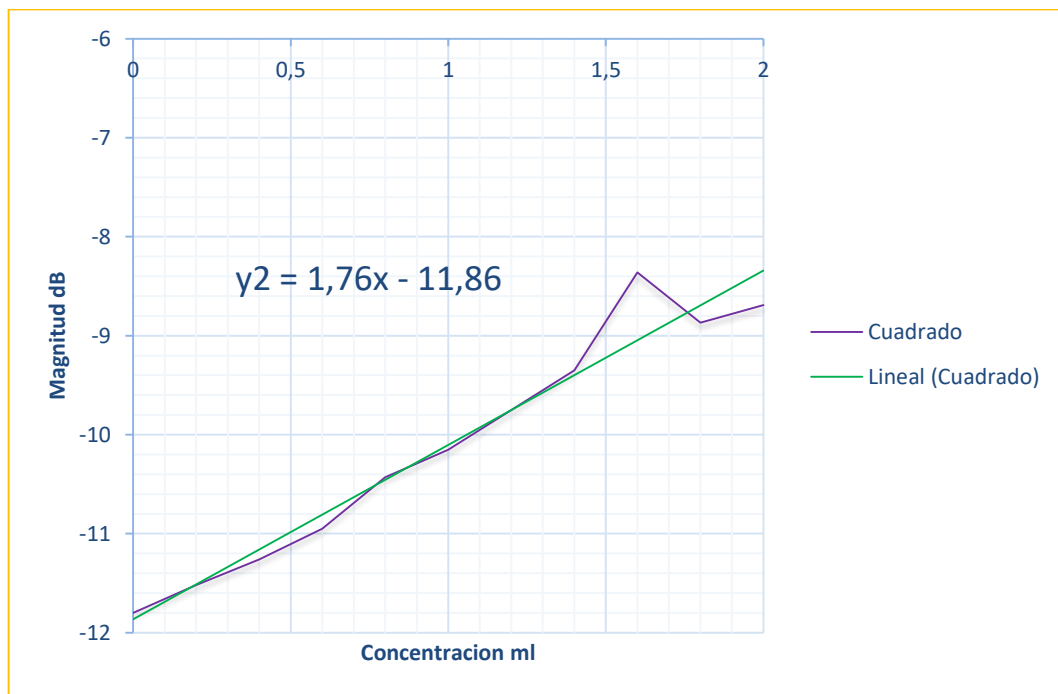
RESULTADO EXPERIMENTAL RESONADOR CUADRADO		
Concentración cada 400 ml	Parámetro S_{21} (dB)	Frecuencia (MHz)
0	-11,8	585,80
0,2	-11,52	576,23
0,4	-11,26	571,47
0,6	-10,95	571,47
0,8	-10,43	576,23
1	-10,15	576,23
1,4	-9,35	573,05
1,6	-8,36	574,64
1,8	-8,87	577,82
2	-8,69	574,64

Fuente Autor

La tabla 3 muestra los datos obtenidos en cada uno de los experimentos al variar la disolución por el incremento de la concentración de glifosato en la mezcla. De igual forma la figura 66 muestra la tendencia de los datos. En todas las mediciones la frecuencia de resonancia se mantuvo constante por lo que se presenta una buena caracterización con respecto a las variables adicionales de la investigación, a saber: la magnitud del coeficiente de reflexión y la concentración de la disolución utilizada.

En este caso el parámetro S_{21} va disminuyendo en magnitud; este comportamiento está asociado directamente a la concentración de la disolución, como se observa en la figura 67; en cuyo caso la relación es claramente lineal siendo su coeficiente de correlación (de Pearson) muy cercano a 1 (0.9532), lo que demuestra la correlación lineal de los datos o el grado de variación conjunta de los datos.

Figura 67 Concentración Vs Magnitud cuadrado



Fuente Autor

El comportamiento de los datos arrojó la función descrita en figura 67, siendo su ecuación una función de la permitividad, dada que es la constante de la misma. Es posible afirmar que la permitividad es una función de una constante asociada al valor de la pendiente de la recta. Más adelante se presenta otra evidencia que sustenta los datos obtenidos en la figura 67.

Se sabe que la frecuencia en modo TEM está asociada a la variación de la permitividad (véase la ecuación 12) ⁴⁴:

$$f \approx \frac{c}{2\sqrt{\epsilon}L} \quad (12)$$

Donde:

ϵ = Permitividad

L = longitud de la línea de transmisión

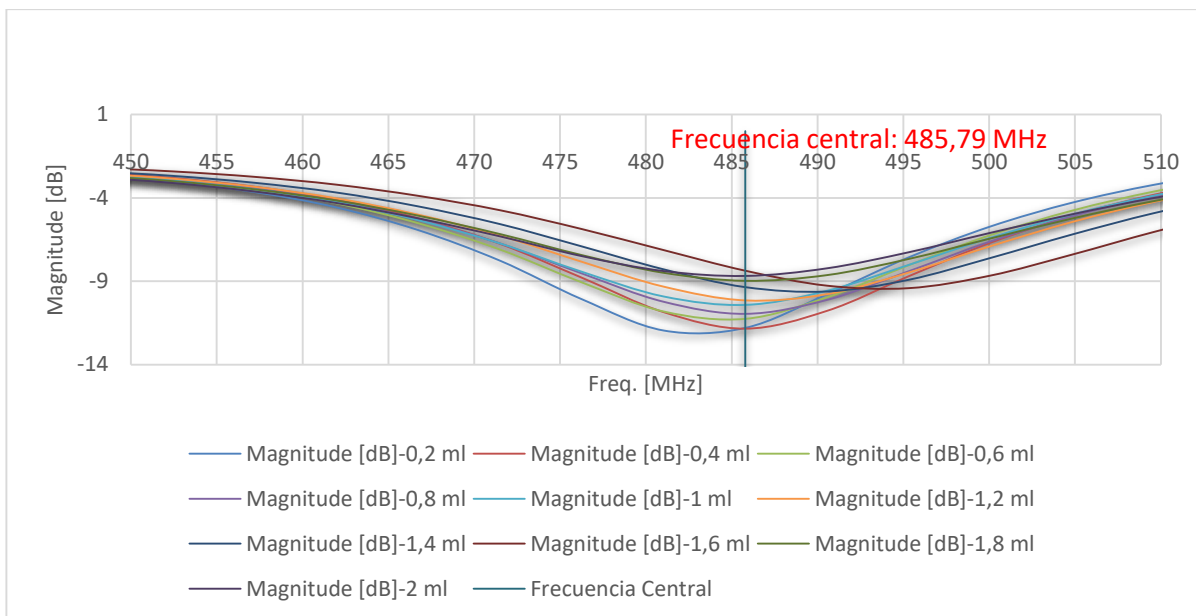
Y siendo la frecuencia constante en toda la experimentación realizada, por lo tanto, una vez que se mide la frecuencia de trabajo, el efecto de la permitividad efectiva se puede calcular y, por lo tanto, obtener la permitividad de la disolución. Sin embargo, el volumen necesario debe ser lo suficientemente grande para estar en concordancia con lo descrito en las figuras 3 y 4, y poder tomar como referencia el comportamiento del sensor en presencia de aire.

16.2 CSRR CIRCULAR

Parámetros B. En la etapa experimental del resonador circular se utilizó la misma metodología que en la práctica de mediciones del CSRR cuadrado; de igual manera con el comportamiento de la frecuencia de resonancia, se realizó la correlación de las gráficas y el análisis del comportamiento: concentración vs. Magnitud la cual se pueden ver sus resultados en la figura 68 y su respectiva tendencia en la figura 69.

⁴⁴ Microwave Engineering. USA: John Wiley & Sons Op.Cit 283

Figura 68 Correlación CSRR circular



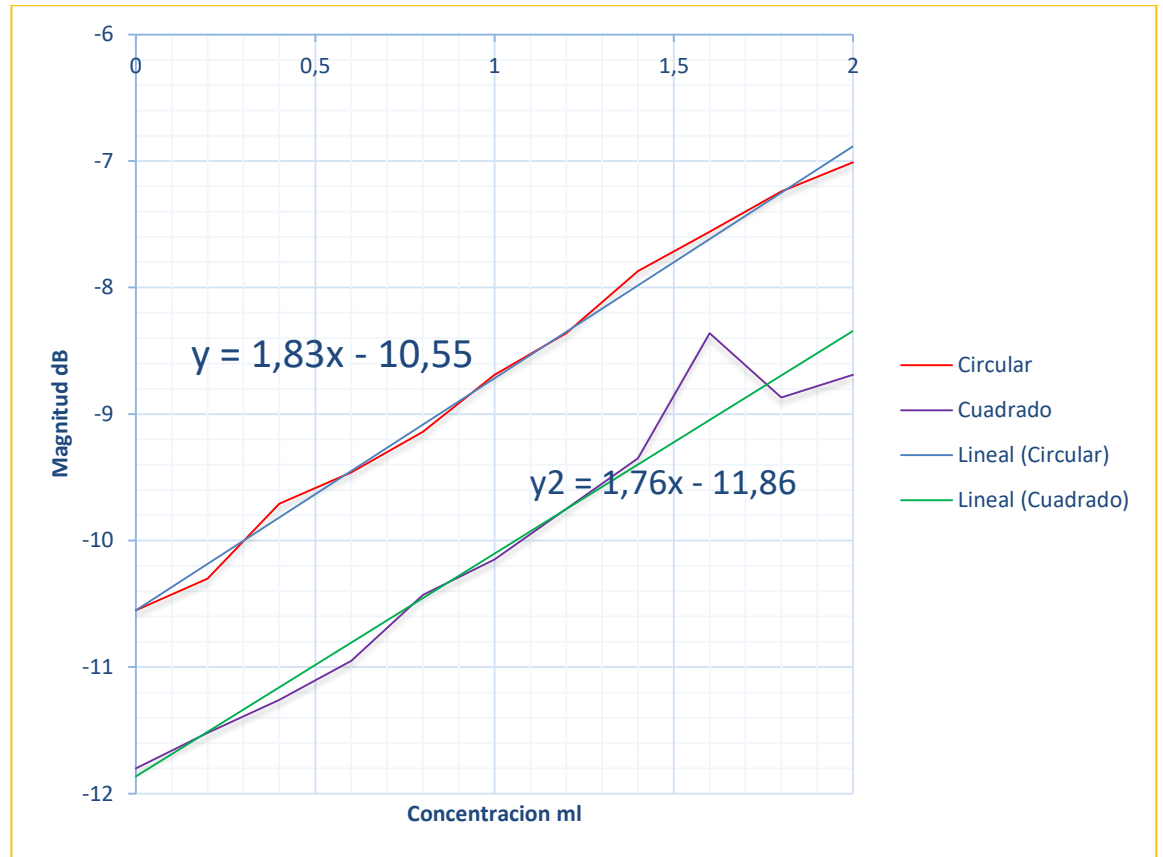
Fuente Autor

Tabla 4 Resultado experimental resonador circular

RESULTADO EXPERIMENTAL RESONADOR CIRCULAR		
Concentración *400 ml	Parámetro S21 (dB)	Frecuencia (MHz)
0	-10,55	485,80
0,2	-10,3	481,03
0,4	-9,71	485,79
0,6	-9,46	485,79
0,8	-9,14	485,79
1	-8,69	485,79
1,2	-8,36	485,79
1,4	-7,87	490,55
1,6	-7,56	495,32
1,8	-7,24	485,79
2	-7,01	485,79

Fuente Autor

Figura 69 Concentración Vs Magnitud Circular



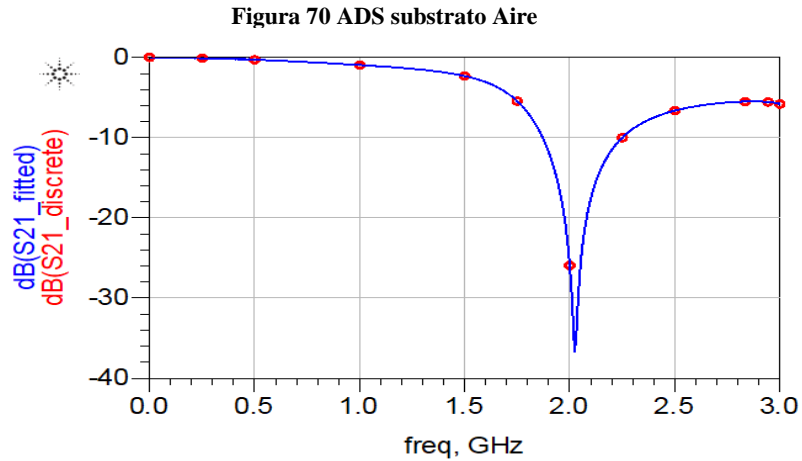
Fuente Autor

Según los resultados anteriores, el comportamiento es similar al sensor cuadrado y los resultados varían en la frecuencia de resonancia y en magnitud del coeficiente de reflexión según la concentración de la disolución. Este resultado corrobora la premisa del comportamiento de los sensores dada en la teoría y en el procedimiento observado en el sensor cuadrado, obteniendo evidencias de la caracterización de los sensores en presencia de glifosato.

16.3 GRAFICA DE RESULTADO DEL SENSOR CIRCULAR Y CUADRADO TEÓRICO Y PRÁCTICO EN SUBSTRATO AIRE

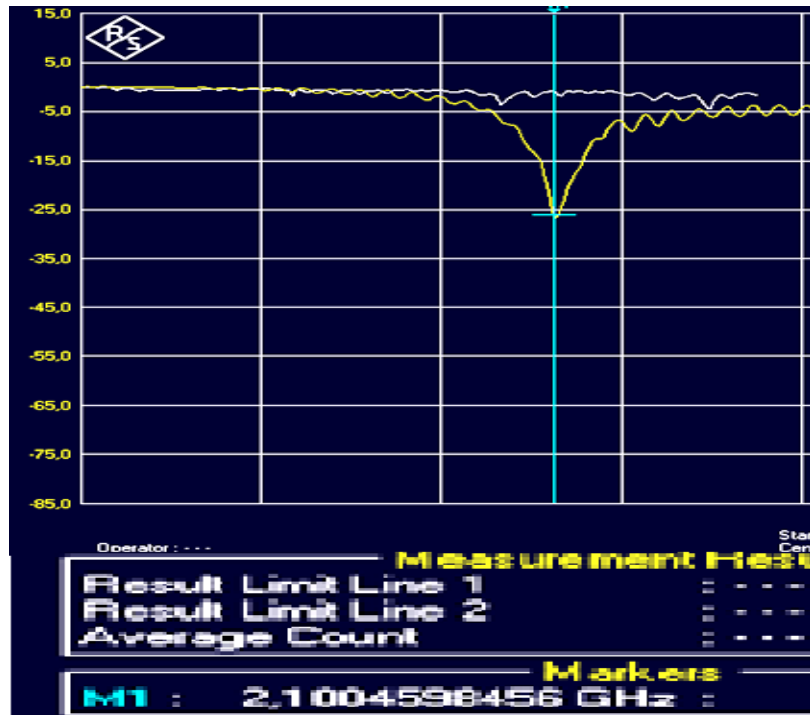
Parámetro C. A continuación, se presenta la gráfica del comportamiento del sensor en presencia del substrato aire de forma simulada, mostrada en la figura 70 y a través de su lectura en el instrumento de forma experimental en la figura 71; logrando evidenciar la similitud aproximada de la frecuencia de resonancia.

Teniendo como resultado aproximado en la simulación un valor de 2.0456 GHz y en el experimental 2.1004 GHz.



Fuente Autor

Figura 71 VNA substrato Aire



Fuente Autor

Es importante tener en cuenta que en este estudio se tienen valores diferentes pero aproximados por el acoplamiento en donde no se tiene en cuenta las terminales de

Además de lo anterior, en el agua destilada la permitividad es 80 y como se observan en la figura 56 y en el resumen de la tabla 5, variando la frecuencia en presencia del agua. En la tabla 5 se muestran los datos obtenidos en frecuencia bajo diferentes parámetros, se utilizó para ejemplarizar el resultado de sensor en presencia de solo aire, solo agua.

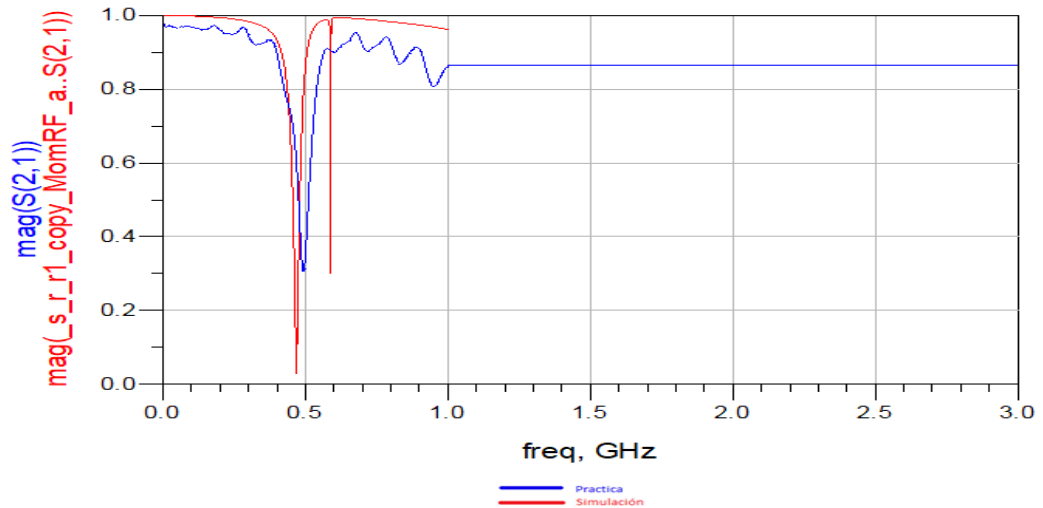
Tabla 5 Frecuencia bajo diferentes parámetros

Medio	Frecuencia de resonancia (GHz)	
	Simulación	Experimental
Aire Sensor Circular	2.05 GHz	2.10 GHz
Agua destilada Sensor Circular	490 MHz	485,79MHz

Fuente Autor

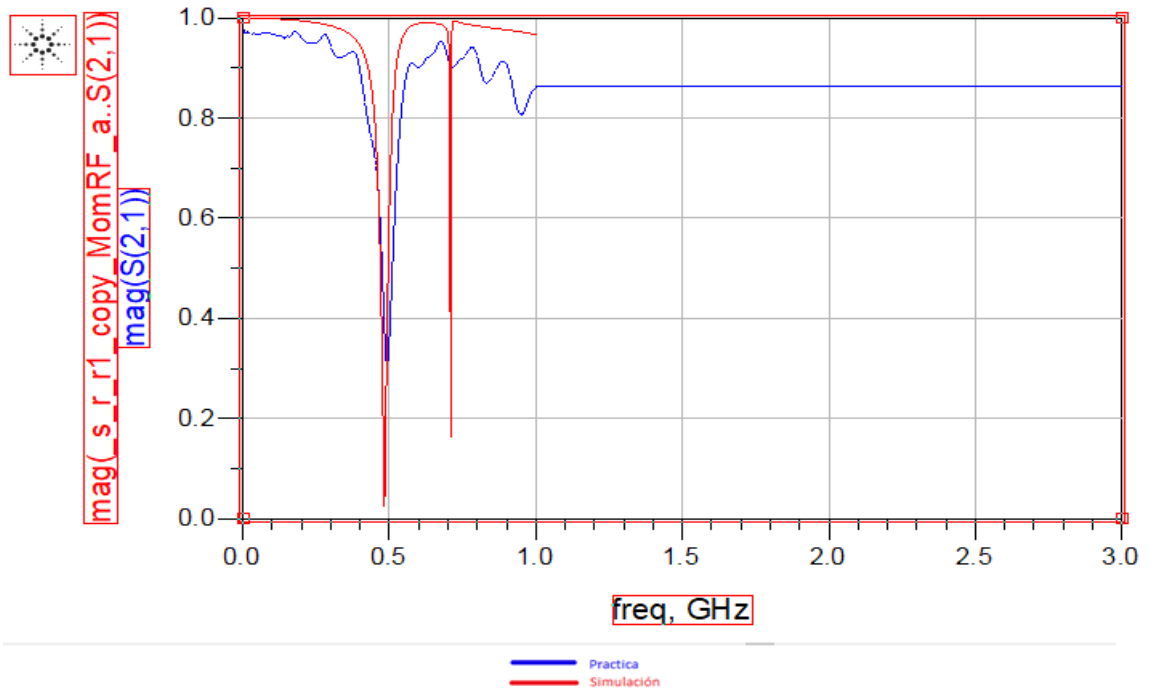
Parámetro D. Se realizó la variación de la permitividad por medio de la simulación, la cual tendrá como objetivo la comparación con la gráfica obtenida para la disolución de 0.2 ml de glifosato en 400 ml de agua destilada. En las figuras 73 a 75 se hizo una variación del parámetro de la permitividad a valores cercanos a la del agua para caracterizar la mezcla de glifosato con agua destilada realizada en la experimentación.

Figura 73 Substrato Agua permitividad ≈80



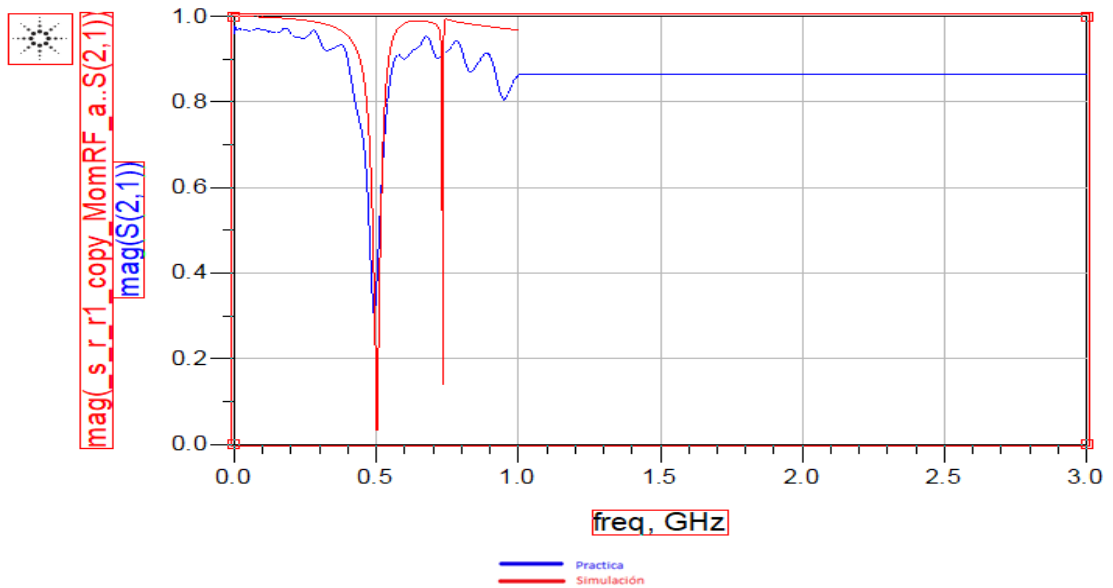
Fuente Autor

Figura 74 Substrato Agua-permitividad ≈ 75



Fuente Autor

Figura 75 Substrato Agua-permitividad ≈ 70



Fuente Autor

De las figuras 73-75 se puede ver que el comportamiento tiende a aumentar en frecuencia cuando se disminuye la permitividad, esta variación confirma la afirmación hecha en los ítems anteriores, sobre la relación inversa y proporcional, entre la frecuencia y la permitividad efectiva. Se puede inferir que la permitividad está cercana a 70 en la disolución utilizada, por la cercanía de los datos de frecuencia en ambas curvas usando el sensor circular.

17. CONCLUSIONES

El dispositivo resonante basado en el CSRR ha sido desarrollado para medir en el rango de frecuencia adecuados para la detección de glifosato en el agua, obteniendo una frecuencia de detección entre 400 y 600 MHz para la disolución y un rango de 1.5 GHz a 2.2 GHz para el aire. Esta frecuencia soporta la disolución recomendada por el fabricante del glifosato que señala 30ml de glifosato por cada 20 l de agua; dando una concentración de 0.912 que se encuentra muy cercana a las utilizadas para caracterizar los prototipos.

Los sensores planares ofrecen confiabilidad en cuanto a las mediciones realizadas sobre ellos, dado que la respuesta arrojó para diferentes concentraciones de glifosato en agua: una respuesta exactamente igual en frecuencia. Esta característica, permite concluir que si es posible realizar la caracterización de los sensores con respecto a su respuesta en frecuencia.

El comportamiento del coeficiente de transmisión con respecto a la concentración de las diversas disoluciones utilizadas; permitió el modelamiento de las variables a través de una relación lineal que permite inferir una relación estrecha entre la frecuencia y el valor de la permitividad o constante dieléctrica del substrato utilizado y en general de cualquier substrato.

Las dimensiones, diseño y estructuras física utilizadas, cumplieron con las expectativas y son objeto de resultados asertivos y con valores muy cercanos a los simulados. Este comportamiento deja ver el uso de los dispositivos planares en el campo de la microondas y abren la puerta a estudios futuros sobre implementos portátiles de RF que estimulen el diseño y creación de herramientas para medición directa de fuentes de agua.

Como trabajos futuros se plantean:

Prueba de los sensores con cavidades en sus estructuras internas (ver figura 75) para probar la sensibilidad y respuesta en frecuencia en presencia de menos cantidad de substrato.

Estudiar los parámetros (S) para establecer la permitividad real de la disolución utilizada y su injerencia en dispositivos portátiles que permitan la toma de resultados desde la fuente real de agua.

Variación de la cantidad de disolución utilizada (2ml para este estudio) y su comparación con este estudio, para comprobar el alcance de las líneas de campo a través del substrato.

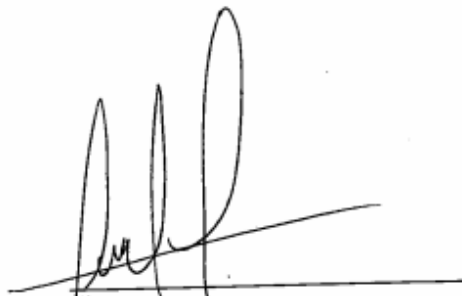
18. BIBLIOGRAFÍA

- A. León A. Casanueva J. Herrero F. Marante. (2013). Novel designs of planar filters in microstrip and finline technologies using split ring resonators. 11/05/2017, de Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, vol. 21 N° 1, 2013, pp. 6-15 Sitio web: <http://.> (s.f.).
- Albishi, A. a.-M.-R. (s.f.).
- Arroyave, Claudia. Guías para el manejo de Urgencias Toxicológicas. Convenio Universidad Nacional de Colombia. Ministerio de la Protección Social. 2008. Disponible en la web en: [https://www.minsalud.gov.co/Documentos%20y%20Publicaciones/Gu%C3%ADa%20de%](https://www.minsalud.gov.co/Documentos%20y%20Publicaciones/Gu%C3%ADa%20de%20). (s.f.).
- Bonache, J., Siso, G., Gil, M., Iniesta, A., Garcia-Rincon, J., & Martin, F. A.-b. (s.f.).
- Bustos, Martha Cristina. Destino ambiental del glifosato en una zona arrocera del Tolima, Colombia. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Agronomía, Escuela de Posgrados Bogotá, D.C., Colombia 2012. Disponible en la web en: <http://www.bdigital.unal.> (s.f.).
- C. L. Achiorno, C. d. Villalobos, and L. Ferrari, "Toxicity of the herbicide glyphosate to *Chordodes nobilii* (Gordiida, Nematomorpha)," *Chemosphere*, vol. 71, no. 10, pp. 1816–1822, 2008. (s.f.).
- C. L. Achiorno, C. d. Villalobos, and L. Ferrari, "Toxicity of the herbicide glyphosate to *Chordodes nobilii* (Gordiida, Nematomorpha)," *Chemosphere*, vol. 71, no. 10, pp. 1816–1822, 2008. (s.f.).
- Clarke, R N, Gregory, A P, Cannell. A guide to the characterisation of dielectric materials at RF and microwave frequencies. Institute of Measurement and Control / National Physical Laboratory. 2003. Disponible en la web en: <http://www.npl.co.uk/publicati>. (s.f.).
- Cortés, María. Suárez, Marco. Nuevo método para detectar glifosato. Universidad de los Andes. 25/04/2017, Disponible en la web en: <http://noticias.universia.net.co/vida-universitaria/noticia/2007/11/12/246129/nuevo-metodo-detectar-glifosato.html>. (s.f.).
- D. Sánchez, J. Lis-Gutiérrez, J. Campo, and J. P. Herrera S., "Estudios Económicos Sectoriales: Estudio sobre plaguicidas en Colombia," 2013. (s.f.).
- Dinehart SK, Smith LM, McMurry ST, Smith PN, Anderson TA, Haukos DA. "Acute and chronic toxicity of Roundup Weathermax and Ignite 280 SL to larval *Spea multiplicata* and *S. bombifrons* from the Southern High Plains, USA," *Environ. Pollut.*, vol. 158, no. 8, . (s.f.).
- García, Beatriz. Estudio y optimización de sensores de microondas para la caracterización y monitorización de materiales en procesos industriales.


- Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. 2008. Disponible en la web en: <https://riunet.upv.es/bi>. (s.f.).
- Gonzalez, Jaime. Implementación de la técnica de cuantificación de glifosato en aguas utilizando el método de microELISA. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Bogotá. 2009. Disponible en la web en: <http://www.her>. (s.f.).
- Introduction to Network Analyzer Measurements Fundamentals and Background. (2017). National instruments, (. p.-1. (s.f.).
- Introduction to Network Analyzer Measurements Fundamentals and Background. (2017). National instruments, (1), pp.32-44. (s.f.).*
- J. Baena, J. B. (2005). Equivalent-Circuit Models for Split-Ring Resonators and Complementary Split-Ring Resonators Coupled. *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 53, NO. 4, APRIL 2005, 53(4), 1451 - 1461.*
- J. Marc, O. Mulner-Lorillon, and R. Bellé, "Glyphosate-based pesticides affect cell cycle regulation," *Biol. Cell*, vol. 96, no. 3, pp. 245–249, 2004. (s.f.).
- J. Marc, O. Mulner-Lorillon, and R. Bellé, "Glyphosate-based pesticides affect cell cycle regulation," *Biol. Cell*, vol. 96, no. 3, pp. 245–249, 2004. (s.f.).
- James Baker-Jarvis, M. D. (2010). High-Frequency dielectric Measurements. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 8. (s.f.).
- K. G. Ong, C. a. Grimes, C. L. Robbins, and R. S. Singh, "Design and application of a wireless, passive, resonant-circuit environmental monitoring sensor," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 93, no. 1, pp. 33–43, 2001. (s.f.).
- L. C. Kreutz, L. J. Gil Barcellos, A. Marteninghe, E. Davi dos Santos, and R. Zanatta, "Exposure to sublethal concentration of glyphosate or atrazine-based herbicides alters the phagocytic function and increases the susceptibility of silver catfish finger. (s.f.).
- L. C. Kreutz, L. J. Gil Barcellos, A. Marteninghe, E. Davi dos Santos, and R. Zanatta, "Exposure to sublethal concentration of glyphosate or atrazine-based herbicides alters the phagocytic function and increases the susceptibility of silver catfish finger. (s.f.).
- L. F. Chen, C. K. Ong, C. P. Neo, V. V. Varadan, V. K. Varadan, "Microwave Electronics Measurement and Materials Characterization" John Wiley & Sons, Ltd. 2004. (s.f.).
- Laura M. Pulido-Mancera , Juan C. González , Alba Avila , Juan D. Baena . (2013). MEASUREMENTS OF PERMITTIVITY BASED IN MICROSTRIP TECHNOLOGY. 10/05/2017, de Universidad Nacional de Colombia Sitio web: <http://revistas.unal.edu.co/index.php/momento/arti>. (s.f.).
- León, J. Burgos, C. Toro, C. Luengas, C. Ruiz y C. Romero. Observaciones al 'Estudio de los efectos del Programa de Erradicación de Cultivos Ilícitos mediante la aspersión aérea con el herbicida Glifosato (PECIG) y de los cultivos ilícitos en la salud huma. (s.f.).
- Masa Campos, J. L. (2017). *Tema 5 – parte II La línea microstrip*, 2017. Recuperado el 01 de Noviembre de 2017, de http://arantxa.ii.uam.es/~jlmasa/trsf/tema4y5/tema5_microstrip.pdf

- Microwavejournal.com*. (2017). *SOLR Calibration for Grounded Coplanar Waveguide Lines*. [online] Available at: <http://www.microwavejournal.com/articles/3059-solr-calibration-for-grounded-coplanar-waveguide-lines> [Accessed 23 Oct. 2017]. (s.f.).
- Munguía Aguilar Horacio, Arellano Tánori Oscar. (MEDIDOR DE LA PERMITIVIDAD DIELECTRICA COMPLEJADE LIQUIDOS EN EL RANGO DE AUDIOFRECUENCIA). 2001. 08/05/2017, de Instituto Tecnológico de Chihuahua Sitio web: <https://www.researchgate.net/publication/282577>. (s.f.).
- Nave, Carl. Hyperphysics. Department of Physics and Astronomy. Georgia State University. Atlanta, Georgia. 2008. Disponible en la web en: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbaseees/electric/dielec.html>. (s.f.).
- O. Korostynska, I. Nakouti, A. Mason and A. I. Al-Shamma'a, "Planar electromagnetic wave sensor for instantaneous assessment of pesticides in water," 2013 Seventh International Conference on Sensing Technology (ICST), Wellington, 2013, pp. 942-947. Dispon. (s.f.).
- O. Korostynska, I. Nakouti, A. Mason and A. I. Al-Shamma'a, "Planar electromagnetic wave sensor for instantaneous assessment of pesticides in water," 2013 Seventh International Conference on Sensing Technology (ICST), Wellington, 2013, pp. 942-947. Dispon. (s.f.).
- Perez, Teresa. IDEAM. Protocolo: deterinación de glifosato en aguas (en línea). Colombia. Ene. 2008. Disponible en la web en: http://www.ambientalex.info/guias/IDEAM_PROTOCOLO_DeterminaciondeGlifosatoenAguas.pdf . (s.f.).
- Pozar, D. (2012). *Microwase Engineering*. USA: John Wiley & Sons.
- Pozar, D. M., & Wiley: Danvers, M. U. (s.f.).
- S. K. Dinehart, L. M. Smith, S. T. McMurry, P. N. Smith, T. A. Anderson, and D. A. Haukos, "Acute and chronic toxicity of Roundup Weathermax?? and Ignite?? 280 SL to larval *Spea multiplicata* and *S. bombifrons* from the Southern High Plains, USA," *Environ.* . (s.f.).
- S. Thongprakaisang, A. Thiantanawat, N. Rangkadilok, T. Suriyo, and J. Satayavivad, "Glyphosate induces human breast cancer cells growth via estrogen receptors," *Food Chem. Toxicol.*, vol. 59, pp. 129–136, 2013. (s.f.).
- S. Thongprakaisang, A. Thiantanawat, N. Rangkadilok, T. Suriyo, and J. Satayavivad, "Glyphosate induces human breast cancer cells growth via estrogen receptors," *Food Chem. Toxicol.*, vol. 59, pp. 129–136, 2013. (s.f.).
- SANCHEZ, José. Ettiene, Gretty. Rivas, Zulay. Determinacion de glifosato en muestras de agua en la cuenca del rio catatumbo. *Ciencia*, 2005, 13(2), pp. 211-217 Disponible en la web en: <http://www.produccioncientifica.luz.edu.ve/index.php/ciencia/article/vi>. (s.f.).
- U. Kaatze, "Complex Permittivity of Water as a Function of Frequency and Temperature," *J. Chem. Eng. Data*, vol. 34, no. 4, pp. 371–374, 1989. (s.f.).
- WHO International Agency for Research on Cancer, "IARC Monographs Volume 112 : evaluation of five organophosphate insecticides and herbicides," 2015. (s.f.).


WHO International Agency for Research on Cancer, "IARC Monographs Volume 112: evaluation of five organophosphate insecticides and herbicides," 2015. (s.f.).



Firma
Duver Ricardo Vargas Solano
Código: 702004



Firma
José Luis Zamora Fernández
Código: 701986



Firma Asesor del Trabajo de Grado
Germán Andrés Álvarez

Fecha 06/11/2017