

Caracterización de líquidos en la región de microondas usando sensor de permitividad dieléctrica

Characterization of liquids in the microwave region using dielectric permittivity sensor

Edison A. Zapata¹  Hernán D. Machuca¹  Vanessa García² 

¹Instituto Tecnológico Metropolitano, Facultad de Ingenierías. Medellín, Colombia.

²Corporación Universitaria Americana, Facultad de Ingenierías. Medellín, Colombia.

Resumen

Se propone y analiza numéricamente un sensor para la caracterización de la permitividad dieléctrica de sustancias en la región de las microondas. Para ello, se emplea una antena basada en un anillo resonador rectangular, en un sustrato TMM® 13i. Este es un compuesto cerámico de polímero dieléctrico termoestable con un factor de disipación de 0,0019 a 10 GHz, el cual nos permite obtener un dispositivo altamente resonante a la frecuencia de 2.4 GHz y 5 GHz. Se emplea el método anillo resonador con un capilar de vidrio pyrex en el centro para interrogar las características eléctricas de este sensor tales como la permitividad, permeabilidad y conductividad. Los resultados obtenidos revelan que el sensor propuesto presenta una sensibilidad de desplazamiento en la frecuencia fundamental, cuando este es empleado en la caracterización de muestras cuya permitividad está dentro del rango 1, a 32.5. Adicionalmente este presenta un tamaño compacto, pues solo mide 42 mm x 46 mm. Además, fueron indagados de manera simulada algunos metales pesados que se pueden encontrar en el medio ambiente. Los resultados obtenidos nos permiten evidenciar que el sensor propuesto resulta ser una alternativa interesante debido a que su fabricación es simple y económica. También, este puede ser fácilmente integrado en redes de sensado inalámbrico, las cuales son de amplio interés a nivel industrial ya que puede ser fácilmente integrado con tecnologías emergentes como internet de las cosas.

Abstract

A sensor is proposed and analyzed numerically for the characterization of the dielectric permittivity of substances in the microwave region. For this, an antenna is used based on a rectangular resonator ring, on a TMM® 13i substrate. This is a thermosetting dielectric polymer ceramic compound with a dissipation factor of 0.0019 at 10 GHz, which allows us to obtain a highly resonant device at the frequency of 2.4 GHz and 5 GHz. The ring resonator method is used with a Pyrex glass capillary in the center to interrogate the electrical characteristics of this sensor such as permittivity, permeability, and conductivity. The results obtained reveal that the proposed sensor presents a displacement sensitivity in the fundamental frequency, when it is used in the characterization of samples whose permittivity is within the range 1 to 80. In addition, it has a compact size, as it only measures 42 mm x 46 mm. In addition, some heavy metals that can be found in the environment were simulated. The results obtained allow us to show that the proposed sensor turns out to be an interesting alternative because its manufacture is simple and inexpensive. Furthermore, it can be easily integrated into wireless sensor networks, which are of wide interest at an industrial level since it can be easily integrated with emerging technologies such as the Internet of Things.

Keywords:

Microstrip antennas, Resonance frequency, Curvature sensor, Bio-chemical sensor, Dielectric

Palabras clave:

Antenas microcinta, Frecuencia de resonancia, Sensor de curvatura, Sensor bioquímico, permitividad

Cómo citar:

Zapata, E.A., García, V., Machuca, H.D. Caracterización de líquidos en la región de microondas usando sensor de permitividad dieléctrica. *Ingeniería y Competitividad*.2023,25(3) e-20712569. doi: 10.25100/iyv.v25i3.12569.

Recibido: 11-02-22

Aceptado 06-06-23

Correspondencia:

edisonzapata110337@correo.itm.edu.co, vgarcia@americana.edu.co, hernanmachuca91573@correo.itm.edu.co

Este trabajo está licenciado bajo una licencia internacional Creative Commons Reconocimiento-No Comercial-CompartirIgual4.0.



Conflicto de intereses:
Ninguno declarado



¿Por qué se realizó el estudio?

El estudio se realiza partiendo de la preocupación actual respecto al estado del medio ambiente, los diferentes agentes contaminantes y diferentes compuestos que pueden afectar la salud de los seres vivos. Al respecto pensando cómo poder identificar y caracterizar diferentes materiales y reconocer elementos contaminantes o compuestos ajenos en diferentes escenarios, se enfocó la idea sobre el uso de una antena microcinta que pudiera identificar y caracterizar diferentes elementos, dado que esta podría ser una opción válida y económica.

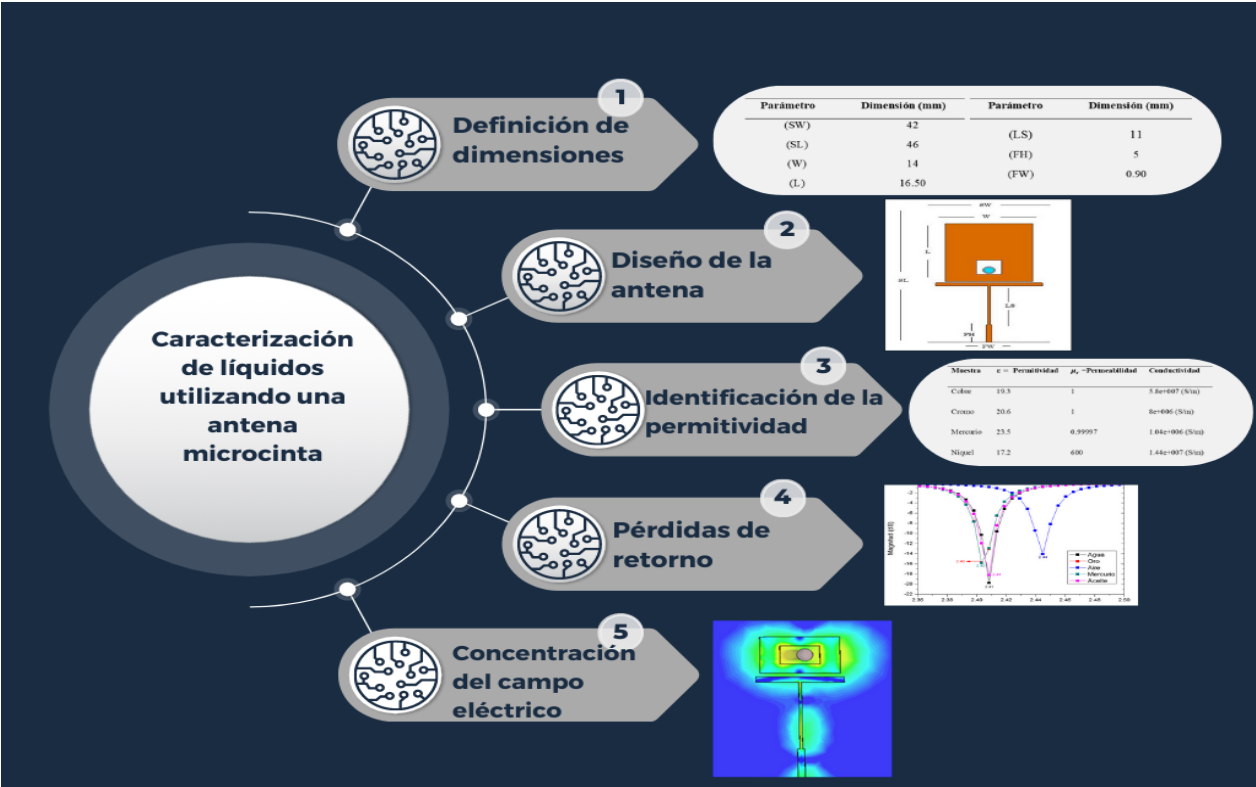
¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

Con los resultados obtenidos a partir de la representación del comportamiento del sensor propuesto indicaría que es una elección favorable para detectar varios elementos, como metales pesados y otros componentes presentes en el agua, esto debido a la diferencia en permitividad obtenida para elementos diferentes al airea y el desplazamiento en frecuencia que se logró observar.

¿Qué aportan estos resultados?

Los resultados obtenidos son valiosos para la construcción futura de la antena, dado que se pudo observar alta sensibilidad en la simulación y la geometría propuesta presenta un diseño compacto. En el futuro, este diseño puede ser utilizado para la detección de materiales contaminantes en el entorno a través de la medición de permitividad.

Graphical Abstract



Introducción

El desarrollo y crecimiento industrial que se ha dado a través de la historia ha generado diversas afectaciones en el medio ambiente. Diferentes factores recientemente han dado a relucir los agentes contaminantes en distintos entornos y espacios naturales que afectan la salud de los seres vivos que habitan el planeta [1]. Por ello se ha venido generando un creciente interés en desarrollar diferentes herramientas que permitan identificar partículas o agentes contaminantes en los recursos naturales como el agua, la tierra y el aire [2]. Este ha sido uno de los aspectos que ha generado mayor interés y por el cual se ha avanzado en la investigación sobre diseño y desarrollo de sensores para caracterización e identificación de materiales, componentes, líquidos, etc [3].

Sin embargo, esta no es la única aplicación que se ha dado a los sensores basados en microondas, la medición precisa de las constantes dieléctricas de materiales sólidos y líquidos tiene un significado importante en los campos médico, industrial, químico y biológico [4], [5], [6]. En la actualidad, los instrumentos utilizados para medir la constante dieléctrica de los objetos son relativamente caros. El método de cavidad resonante [7], [8], el método de reflexión de transmisión [9], [10], [11] y el método de espacio libre se utilizan para medir la constante dieléctrica relativa [12].

Los sensores resonantes han sido ampliamente utilizados en diferentes aplicaciones tales como; caracterización dieléctrica sólida [13], [14], aplicación biomédica [15], mediciones de permitividad para mezclas líquidas [7], [12], [6], o incluso caracterización del contenido de agua del suelo [16], [17]. Generalmente, los más utilizados son los sensores planos debido a su bajo costo, bajo perfil, fácil fabricación, alta precisión, robustez y tamaño compacto, el principio de detección de tales sensores se basa en detectar el cambio en la frecuencia resonante cuando se coloca una muestra sobre la superficie resonante.[17]

La muestra puede ser tanto un material sólido como un líquido. Se ha prestado especial atención a los sensores para medir las propiedades dieléctricas de los microfluidos [3]. Los desarrollos recientes en el campo de los sensores planos de microondas han llevado a un renovado interés respecto a la capacidad de realizar mediciones no invasivas y en tiempo real de las propiedades de los materiales [18]. En general, los materiales se pueden dividir en medios eléctricos y magnéticos. Los materiales dieléctricos se representan solo mediante la constante dieléctrica compleja relativa, mientras que los materiales magnéticos se indican mediante la constante dieléctrica compleja relativa y la conductividad magnética [6].

El monitoreo y la medición de las propiedades dieléctricas de los materiales sólidos o líquidos en las bandas de microondas utilizando antenas de microcinta evidencian su principio de operación como sensor bioquímico [19], [20], [21], [22]. Entre las ventajas plausibles de los sensores planos de microondas es que tienen un tamaño compacto, un bajo costo y la facilidad de fabricación e integración en comparación con los sensores predominantes [23]. Sin embargo, se pueden considerar algunos de sus principales inconvenientes que restringen su uso y limitan el rango de aplicaciones, tales como su sensibilidad y selectividad [18]. Se requiere el desarrollo de sensores planos de microondas de alta sensibilidad para realizar mediciones de permitividad complejas de alta precisión para monitorear las pequeñas variaciones entre diferentes muestras [21].

Los anillos resonadores también están entre los métodos más utilizados en la caracterización de materiales, debido a que, se pueden analizar las propiedades de una muestra de forma sencilla midiendo la frecuencia de operación del sensor [24], [25]. El modo de uso de estos dispositivos se da gracias a la posibilidad de correlacionar los efectos físicos y el desplazamiento de las frecuencias de resonancia de la antena por medio del análisis de las pérdidas por retorno o parámetro S_{11} [26], [27]. Este tipo de sensores se caracterizan por ser dispositivos pasivos, de monitorización inalámbrica y funcionales en la medición de deformaciones o curvaturas. Estos, presentan ventajas como mediciones en tiempo real, uso de pequeñas muestras de prueba para realizar las mediciones, además, presentan un tamaño reducido [28], [29].

La integración de antenas microcinta como sensores representa una atractiva solución para aplicar en campos de la biología y la química [30], [31]. En aplicaciones donde se necesita la detección y caracterización de la presencia de determinados líquidos en tiempo real, esta es una herramienta muy útil para la determinación de la composición de alguna mezcla [32]. Hoy en día existen sensores para diversas aplicaciones, para monitoreo de la temperatura, presión, humedad, PH, biológicos y químicos entre otros [33]. De la misma manera, existen diferentes técnicas para la caracterización de la permitividad de diferentes elementos entre los cuales se encuentran; método destructivo, que como su nombre lo indica este modifica la muestra después de realizar la medición ya que, esta se puede realizar con el uso de productos químicos, líneas de transmisión o cavidades resonantes [34].

Estos métodos son considerados destructivos ya que, una parte del material a evaluar debe estar dentro de la antena microcinta y a diferencia del segundo método conocido como método no destructivo la muestra queda disponible después de realizar la medición la cual se realiza utilizando una sonda coaxial o el método de espacio libre [19]. Las antenas microcinta usadas como sensores han tomado relevancia por parte de investigadores e industria, debido a su bajo costo, rápido tiempo de respuesta, alta sensibilidad utilizada para relacionar la frecuencia de resonancia con la permitividad de materiales puestos a prueba en estas estructuras [35], [36], [37].

Sin embargo, para poder operar las antenas en este tipo de aplicaciones, es necesario tener información científica de las propiedades de los materiales, las características físicas y químicas de ciertas reacciones fisicoquímicas [38], [39], [40], ya que algunos productos químicos y líquidos detectados usando los sensores basados en antenas microcinta son peligrosos para la salud humana [41]. Teniendo en cuenta lo anterior, esta investigación tiene como objetivo proponer un sensor de permitividad dieléctrica para la caracterización de líquidos en la región de microondas. Para lo anterior, el diseño del sensor electromagnético estará basado en una antena microcinta con estructura en forma de anillo resonador que funciona a 2.45 GHz y a 5 GHz cuando se modifica la ranura en forma rectangular [42], [19]. En el centro del parche microcinta se conduce una muestra de líquido o sólido a través del tubo de ensayo de cristal transparente pyrex incrustado en el centro.

El material utilizado en esta estructura también es utilizado en sensores de temperatura debido a que soporta altas temperaturas y evita la dilatación térmica o fracturación. Este sustrato es conocido como TMM® 13i con una constante dieléctrica de 12.85 (+/- 0.350) y está disponible en un rango de espesor de 0.015 a 0.500 (+/- .0015 in) [43]. Típicamente es utilizado en circuitos de radiofrecuencia y microondas, sistemas

de antenas de posicionamiento global, amplificadores de potencia y combinadores, antenas de parche, acopladores, polarizadores, lentes dieléctricos y probadores de chips [44]. Este material tiene la ventaja de no fracturarse a elevadas temperaturas, es importante seleccionar el sustrato apropiado para la antena con el fin de evitar fallas, en el caso de este sustrato no se tendrán fallas por cuenta de la temperatura [45].

Materiales y métodos

Se emplea una antena basada en un anillo resonador rectangular, en un sustrato TMM® 13i. Este es un compuesto cerámico de polímero dieléctrico termoestable con un factor de disipación de 0,0019 a 10 GHz, el cual nos permite obtener un dispositivo altamente resonante a la frecuencia de 2.4 GHz y 5 GHz. Se emplea el método anillo resonador con un capilar de vidrio pyrex en el centro para interrogar las características eléctricas de este sensor tales como la permitividad, permeabilidad y conductividad.

Principio de funcionamiento y diseño del sensor

Sensor impreso basado en anillo resonador cuadrado

En esta sección se realiza la caracterización de las antenas de microcinta utilizadas como sensores. Teniendo en cuenta su configuración básica, estas antenas son construidas con la técnica de circuitos impresos debido a las ventajas ofrecidas como: bajo costo, alto rendimiento y miniaturización del diseño [46].

Las antenas de microcinta pueden ser simuladas utilizando diferentes configuraciones por ejemplo líneas de transmisión, modelos de cavidad resonante ya que son muy utilizadas para aplicaciones inalámbricas gracias a su bajo costo de producción y tamaño reducido [47].

Recientes investigaciones han utilizado algoritmos electromagnéticos computacionales para reducir el tiempo de simulaciones de este tipo de antenas de microcinta y así obtener mejores resultados al momento de diseñar antenas.

Se han utilizado redes neuronales para el cálculo del parche radiante y evaluar qué geometría podría ser más eficiente para determinada función [48]. También se han utilizado métodos de aprendizaje automático para calcular determinadas frecuencias de operación de las antenas de microcinta con dimensiones definidas como en [49]. En este trabajo, inicialmente se diseña una antena monopolo rectangular cuadrado impreso (PRMS), este tipo de antena consta de un plano de tierra impreso de material conductor, generalmente en cobre ubicado bajo un material dieléctrico; encima del dieléctrico se ubica el parche radiante del mismo material conductor, su diseño consta de un parche rectangular unido a una línea de alimentación, y esta a su vez es acoplada al conector SMA [50], [51]. Luego de construir el parche radiante de forma rectangular se realiza una ranura entre este y la línea de alimentación formando una (T) [52], [53], con el fin de lograr que la antena funcione como resonador, ya que el campo magnético es perpendicular al anillo resonador e induce una corriente a través de este [54]. El anillo resonador se obtiene cuando, en el centro del parche radiante se realiza una ranura en forma de rectángulo, esta va variando de tamaño hasta obtener una frecuencia de resonancia o frecuencia de operación [55] de 5 GHz. Luego, se realiza otra modificación en la ranura cuadrada con el fin de obtener una frecuencia de resonancia en el rango de los 2.45 GHz y así, evaluar cuál de estas dos frecuencias de

operación presenta mejores resultados en la medición del sensor. Para determinar las dimensiones del parche rectangular se emplean las siguientes ecuaciones [56], [57], [55]:

$$w = \frac{c}{2f \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad \text{Ec. (1)}$$

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad \text{Ec. (2)}$$

$$\Delta L = 0.412h \left[\left(\frac{\epsilon_{eff} + 0.3}{\epsilon_{eff} - 0.258} \right) \left(\frac{\left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{\left(\frac{w}{h} + 0.813 \right)} \right) \right] \quad \text{Ec. (4)}$$

Utilizando las ecuaciones (1) y (2) se calcula el ancho (W) y largo (L) del parche radiante; de estas ecuaciones se calcula la ϵ_{eff} (Constante dieléctrica efectiva), μ_0 (permeabilidad del espacio libre) y ΔL (Extensión de la longitud de la capa radiante), c es la velocidad ($3 \times 10^8 \frac{m}{s}$), f es la frecuencia de operación y ϵ_r (Constante dieléctrica del sustrato).

Las características principales del sustrato utilizado Rogers RT6002 son las siguientes:

$$\epsilon_{eff} = \frac{1}{2}(\epsilon_r + 1) + \frac{1}{2}(\epsilon_r - 1) \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{h}{w} \right)}} \right] \quad \text{Ec. (3)}$$

Constante dieléctrica = 12.85
 Pérdidas tangenciales = 0.0012
 Espesor del dieléctrico = 1.27 mm
 Grosor del cobre = 0.0175 mm
 Conductividad térmica = 0.6 [W/K/m]

A continuación se presentan los resultados simulados: luego de la evaluación paramétrica utilizando la función de barrido paramétrico del *software CST Studio Suite* (software de análisis de simulación electromagnética para diseñar, analizar y optimizar componentes y sistemas electromagnéticos)[58], [59]. En la [tabla 1](#) se presentan los parámetros y dimensiones de la antena propuesta. En la [figura 1](#) (a) se observa el diseño de la antena utilizada como sensor la cual dentro del parche radiante posee una ranura cuadrada donde se encuentra insertado el tubo capilar pyrex con un radio exterior de 2 mm; el radio interno es de 1.5 mm y una longitud total de 30 mm. La [figura 1](#) (b) presenta el circuito equivalente de la estructura resonante (antena). Donde (R) representa la resistencia, (L) la bobina y (C) un capacitor.

Tabla 1. Dimensiones de la antena. Fuente: autores

Parámetros	Dimensión
	(mm)
(SW)	42
(SL)	46
(W)	11
(L)	6
(LS)	11
(FH)	5
(FW)	0.90

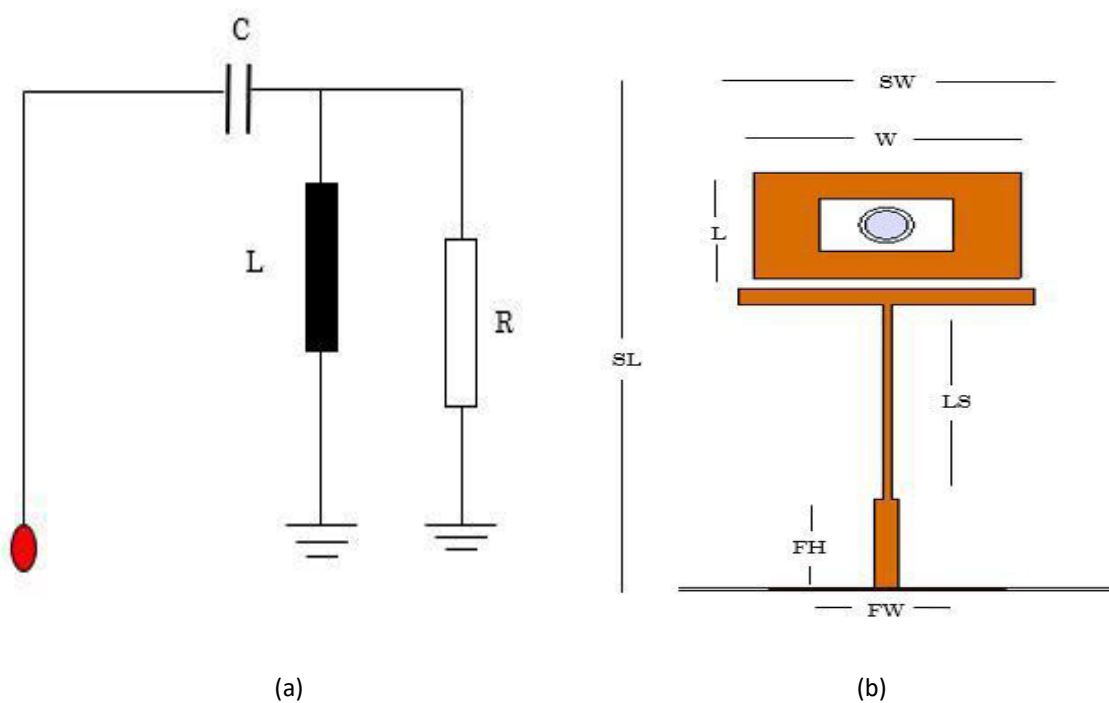


Figura 1. (a) Diseño de la antena, (b) Circuito equivalente. Fuente: autores

Luego de modificar las dimensiones de la ranura y del parche radiante se obtiene la respuesta en frecuencia o pérdidas de retorno (S_{11}) iniciales que se pueden apreciar en la [figura 2](#) a una frecuencia de operación de 5 GHz.

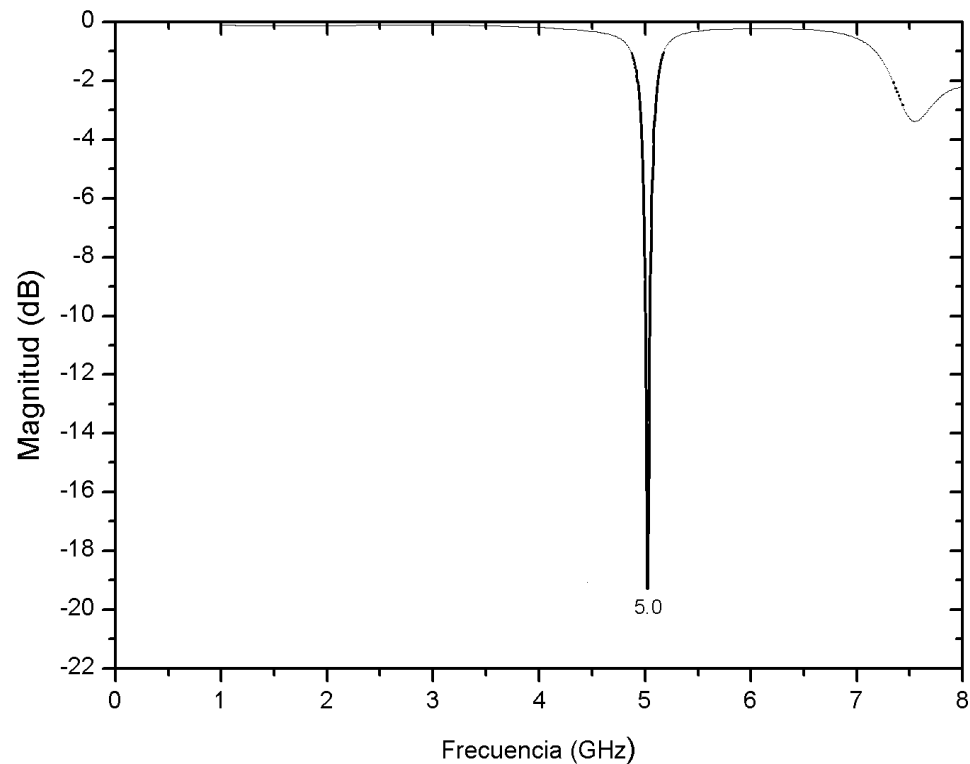
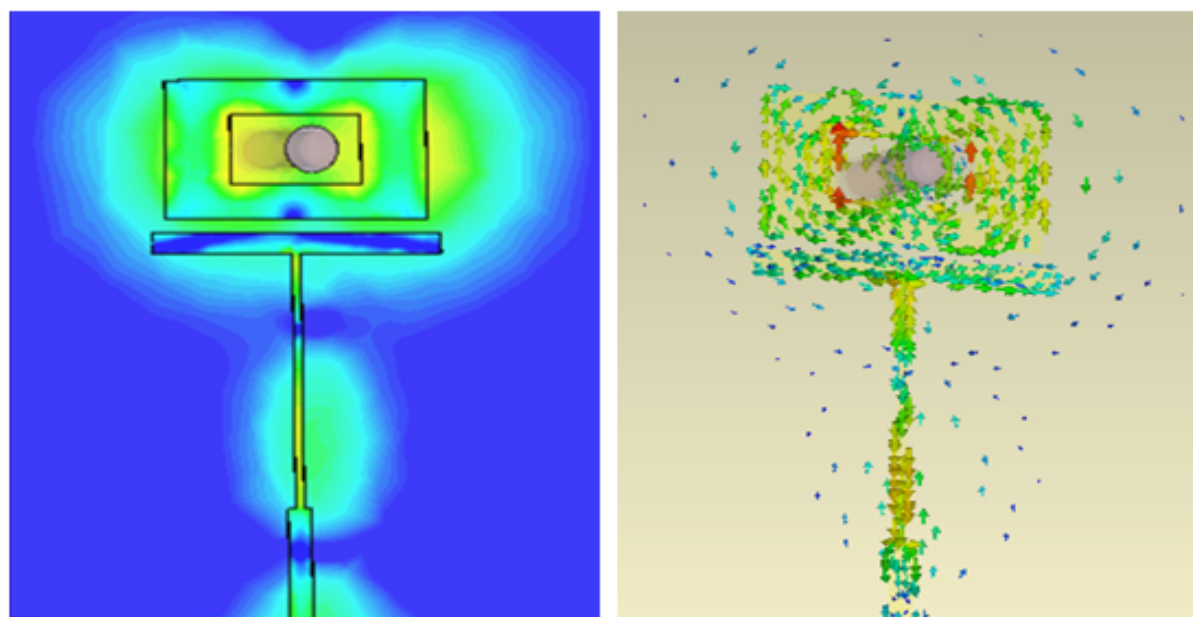


Figura. 2. Parámetros S11 iniciales a 5GHz. Fuente: autores.

Principio del sensor

Los sensores basados en antenas de microcinta han estado llamando la atención en la investigación ya que pueden ser utilizados en diferentes campos de la Ingeniería. Utilizando la frecuencia de resonancia de determinada antena y observando su rendimiento electromagnético inicial se pueden determinar características importantes que modifican el patrón inicial de trabajo cuando este es perturbado por un elemento extraño que es agregado a la antena y modifica la distribución del campo eléctrico que circula por la superficie de esta [60]. Consecuentemente este tipo de sensores se conocen como estructuras basados en guía de onda integrada en sustrato (*substrate-integrate waveguide resonator*) (SIW) [61], [62] y se centra en el cambio de frecuencia producido cuando se inserta un capilar de vidrio dentro de la ranura que forma el anillo resonador rectangular [63], [64]. Estos cambios se presentan debido a que, las líneas de campo eléctrico de la antena de microcinta no están del todo confinadas entre la línea de alimentación y el plano a tierra, estos campos interactúan con el capilar y por ende con el material contenido dentro de este desplazando así la frecuencia de operación original hacia la derecha o hacia la izquierda. [65]

En la [figura 3](#) (a) se observa cómo se concentra el campo eléctrico en el capilar de vidrio pyrex vacío; en la [figura 3](#) (b) se observa la corriente de superficie que circula entre los bordes del anillo rectangular alrededor del capilar.



(a)

(b)

Figura 3. (a) Concentración del campo eléctrico, (b) Corriente de superficie. Fuente: autores

La antena de microcinta se fabrica con un proceso de grabado de PCB (*Printed Circuit Board*), Proceso de grabado y corte de pistas [66]. Sobre el diseño propuesto se realiza un orificio de 2 mm de diámetro dentro del anillo resonador rectangular para insertar el capilar de vidrio borosilicato con un diámetro externo $D_{ext} = 2\text{ mm}$, el diámetro interno es de $D_{int} = 1.5\text{ mm}$ y una altura de $A = 30\text{ mm}$. La ranura del anillo resonador y el orificio del capilar provocan una perturbación en la frecuencia original de la antena microcinta, después de optimizar estas dimensiones e introducir el capilar se obtiene una frecuencia de resonancia de referencia inicial que cambia cuando se agrega determinado material dentro de este capilar produciendo el desplazamiento de la frecuencia y así se genera el principio de detección de la muestra del material. La frecuencia de resonancia se desplaza cuando la constante dieléctrica del material insertado en el capilar es diferente al sensor de antena propuesto. Esta frecuencia también se desplaza cuando el diámetro interno del capilar es variado en tamaño ya que perturba el desplazamiento de la corriente de superficie que circula por las paredes de la antena propuesta. Cuando el diámetro interno del capilar es muy grande el cambio en la frecuencia aumenta, al aumentar la constante dieléctrica se llega al punto donde la cavidad se vuelve insensible y no proporciona ningún cambio significativo en la constante dieléctrica [67]. La sensibilidad es mayor cuando se utilizan materiales con baja constante dieléctrica para cualquier diámetro en el capilar. [62]

Resultados

Los resultados presentados en este documento se realizan de forma simulada, de la misma manera se eligen diferentes sustancias químicas con diferentes características electromagnéticas que ofrece el *software CST Studio*. Se utilizan porciones de sustancias

y materiales como el Oro, Metanol, Mercurio y Aceite, estas son introducidas dentro del capilar y se procede a la simulación, las mediciones se repiten 5 veces para verificar la respuesta obtenida.

La medida de sustancias y materiales evaluados es de 4.5 milímetros cúbicos. En la [tabla 2](#) se presentan algunas cualidades que muestran estos elementos tales como la permitividad eléctrica (Constante dieléctrica) ϵ (Describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio), permeabilidad μ_r (permeabilidad magnética, capacidad de una sustancia o un medio para atraer y hacer pasar a través de ella campos magnéticos) y la conductividad (Propiedad natural de los cuerpos que permiten el paso a través de sí del calor o la electricidad) [\[68\]](#)

Tabla 2. Propiedades básicas de los materiales utilizados en la simulación. Fuente: autores

Muestra	ϵ = Permitividad	μ_r = Permeabilidad	Conductividad
Aire	1.00059	0,99991	0.02 W/m*K
Oro	14.98	0,999964	4.10 x 10e7 (S/m)
Metanol	32.5	21.54	Alta
Mercurio	17.165	0.99997	1.04e+006 (S/m)
Aceite	2.33	1	0.145W/(m/K)

En la [figura 4](#) se observan los cambios generados en el parámetro S11 del sensor producido por las sustancias evaluadas, se produce un desplazamiento en frecuencia hacia la izquierda de la frecuencia fundamental de 5 GHz. Siendo el oro y el mercurio materiales que coinciden en la misma frecuencia de resonancia de 3.46 GHz y a su vez, poseen casi la misma permeabilidad. Por otro lado, el metanol y el aceite no comparten cualidades idénticas mencionadas en la [tabla 2](#) sin embargo, ambos componentes no contienen iones disueltos y por ende no conducen la electricidad. Por su parte, el aire no representó ningún desplazamiento en frecuencia en esta evaluación.

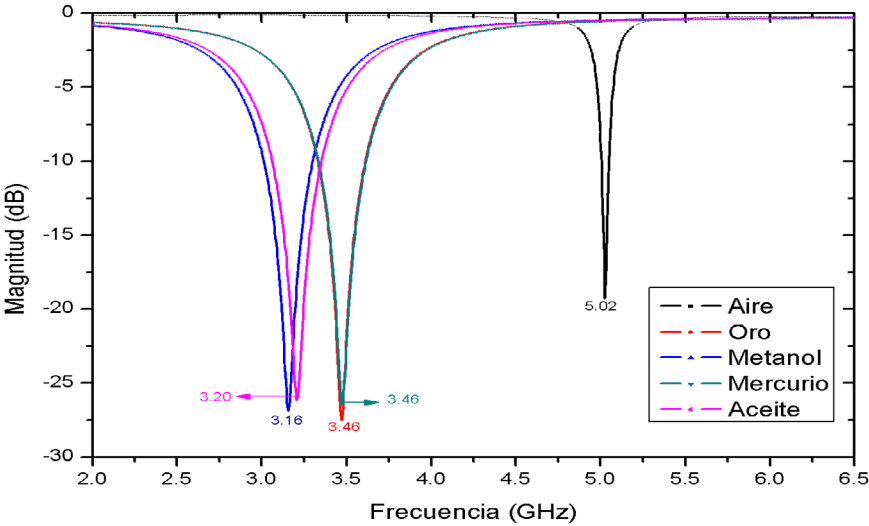


Figura 4. Medida de pérdidas de retorno de diferentes elementos. Fuente: autores.

De nuevo en la [figura 5](#) se presentan los resultados simulados de la reacción del sensor al evaluar algunos metales pesados como el cobre, cromo, mercurio, níquel y plomo que generalmente son tóxicos para los seres humanos y cuyas características generales mencionadas en este documento se encuentran en la [tabla 3](#). Todos los metales pesados mencionados y evaluados han presentado un desplazamiento en frecuencia hacia la izquierda en 3.46 GHz ubicándose en -28 pérdidas por dB a excepción del níquel que se ubica en -22 pérdidas por dB siendo este uno de los materiales con mayor permeabilidad eléctrica (600).

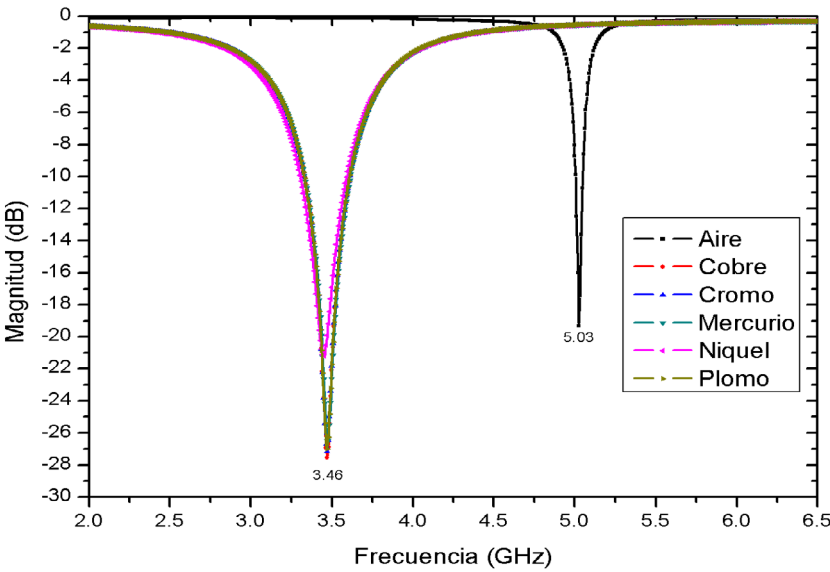


Figura 5. Medida de pérdidas de retorno de metales pesados y aire. Fuente: autores.

Tabla 3. Permitividad relativa de los materiales utilizados en la simulación.

Muestra	$\epsilon =$ Permitividad	$\mu_r =$ Permeabilidad	Conductividad
Cobre	19.3	1	5.8e+007 (S/m)
Cromo	20.6	1	8e+006 (S/m)
Mercurio	23.5	0,99997	1.04e+006 (S/m)
Níquel	17.2	600	1.44e+007 (S/m)
Plomo	12	0,999983	4.8e+006 (S/m)

En la [figura 5](#) se presentó la evaluación simulada a algunos materiales conocidos como metales pesados que se encuentran en la librería del software *CST STUDIO*, los metales pesados son un grupo de elementos químicos que presentan una alta densidad. Dichos materiales, son en general tóxicos para los seres humanos y entre los más susceptibles de presentarse en el agua se destacan el mercurio, níquel, cobre, plomo y cromo. Los metales pesados se encuentran generalmente como componentes naturales de la corteza terrestre, en forma de minerales, sales u otros compuestos. [\[69\]](#)

Estos metales no pueden ser degradados o destruidos fácilmente de forma natural o biológica ya que no tienen funciones metabólicas específicas para los seres vivos, agrupan sustancias como cadmio y mercurio, principales contaminantes, además de níquel y plomo, entre otras. Además estos pueden incorporarse a un sistema de abastecimiento de agua por medio de residuos industriales que son vertidos sin previos tratamientos, y posteriormente se depositan en lagos, ríos y distintos sistemas acuíferos. [70]

En los cultivos la acumulación de metales pesados se produce por medio de absorción del agua de regadío contaminada por la tierra, mediante las raíces o por la deposición de partículas aerotransportadas en el follaje. [71]

En la [figura 5](#) se presentó la evaluación de los metales pesados mencionados con anterioridad a una frecuencia de resonancia de 5 GHz, donde es poco apreciable el comportamiento evaluativo simulado de estos elementos, por consiguiente, se realiza una leve modificación en el ancho y largo del resonador aumentando su dimensión para obtener una frecuencia de trabajo en el rango de 2.45 GHz. En la [figura 6](#) se presenta el diseño simulado para la frecuencia de trabajo ajustada en 2.45 GHz y en la [tabla 4](#) se presentan los parámetros y sus dimensiones.

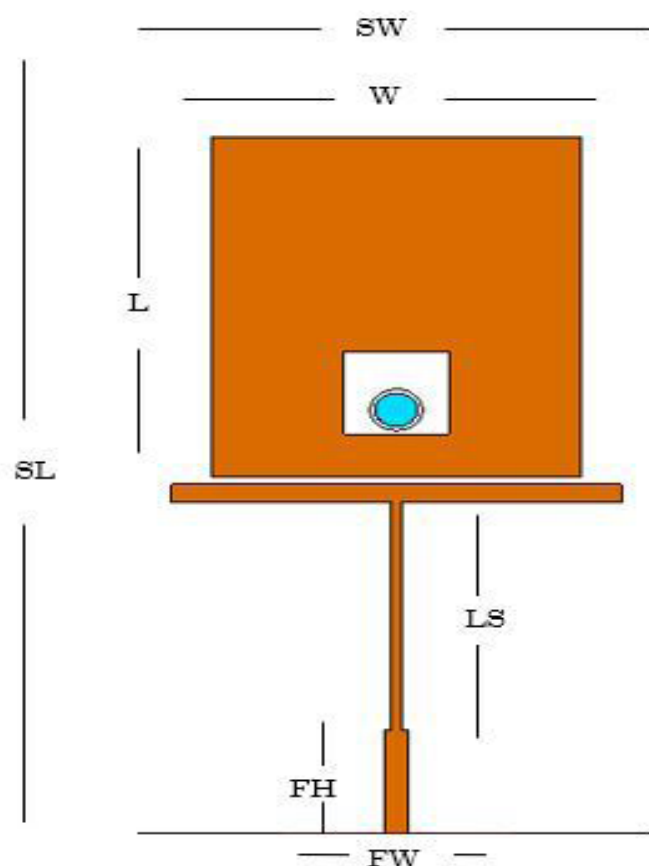


Figura 6. Dimensiones del sensor ajustado para 2.45 GHz. Fuente: autor.

Tabla 4. Dimensiones de la antena. Fuente: autores

Parámetro	Dimensión (mm)
(SW)	42
(SL)	46
(W)	14
(L)	16.50
(LS)	11
(FH)	5
(FW)	0.90

En la [figura 7](#), se realizó una medición entre diferentes muestras de materiales para observar la sensibilidad entre metales pesados y sustancias. Donde el agua posee una una permitividad de 80 y una conductividad de 0.055 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para el (agua pura), su respuesta en frecuencia se desplaza hacia la derecha ubicándose en 2.44 GHz alejándose de la frecuencia fundamental de 2.45 GHz. siendo esta el elemento con la permitividad más elevada que se evalúa de forma simulada y su desplazamiento no se realiza hacia frecuencias menores como sucede con los demás elementos.

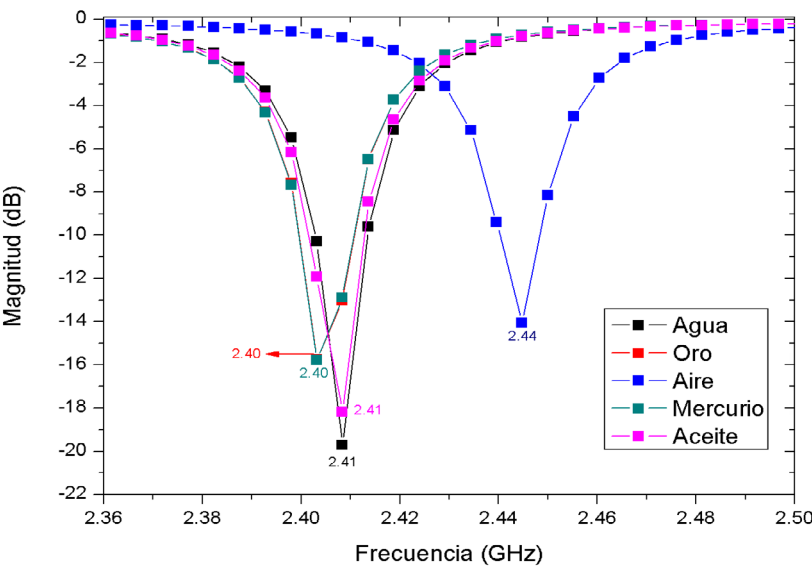


Figura 7. Medida de pérdidas de retorno de diferentes elementos. Fuente: autores.

En la [figura 8](#) se observa el desplazamiento en frecuencia del cobre que posee una permitividad relativa de 19.3 esta se ha desplazado hacia la derecha de la frecuencia fundamental en 3.47 GHz, esto puede ocurrir debido a que el material del sensor también es de cobre y presenta una mejor conductividad eléctrica que los demás metales pesados evaluados, esto genera una reacción diferente a la de los demás elementos.

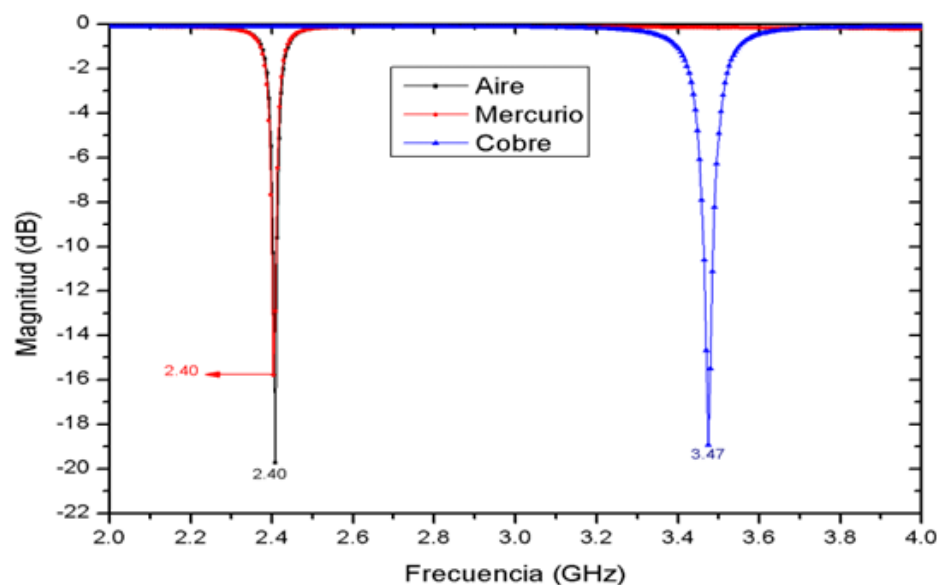


Figura 8. Medida de pérdidas de retorno de varios elementos. Fuente: autores.

En la [figura 9](#) se puede apreciar que la respuesta en frecuencia de los materiales medidos se ha desplazado hacia la izquierda de la frecuencia fundamental, sin embargo, se puede apreciar que esta respuesta se puede medir a partir de las pérdidas por dB que produce cada material en el sensor, es decir, el plomo con -19 dB, el níquel con -17 dB y el cromo con -16 dB.

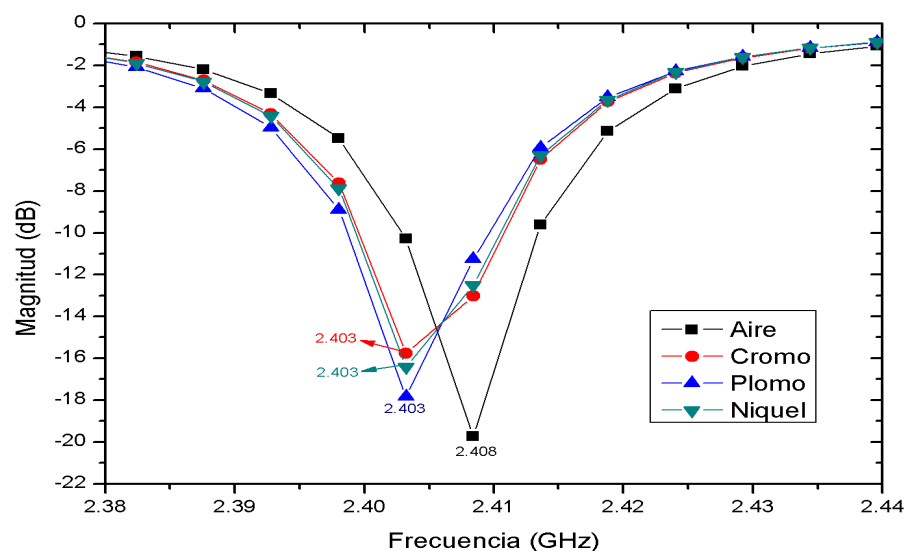


Figura 9. Medida de pérdidas de retorno de diferentes elementos. Fuente: autores

El comportamiento de este sensor simulado muestra que este podría ser una buena opción para la detección de diferentes elementos como los metales pesados y otros elementos que estén presentes en el agua ya que, la frecuencia de resonancia presenta

un desplazamiento en presencia de elementos con permitividad diferente a la del aire. La configuración de este sensor es relativamente simple y fácil de construir, además de sus componentes que son de fácil acceso y de bajo costo. Las frecuencias de resonancia principales son frecuencias de trabajo muy utilizadas en el medio inalámbrico.

Conclusiones

En este trabajo se propone y simula un sensor basado en la permitividad de los materiales, es reutilizable y de bajo costo, basado en una antena monopolo de anillo resonador cerrado. El funcionamiento del sensor se basa en la medición del cambio de frecuencia de resonancia en función de la permitividad relativa, y se puede utilizar para detectar cambios en el rango de frecuencias de 2.45 GHz y 5 GHz.

Así pues, el sensor propuesto podría emplearse para detectar presencia de materiales contaminantes por medio de la permitividad que poseen estos elementos. Se realizó la simulación de la estructura del sensor, al igual que la simulación de introducir diferentes muestras, cada una con diferentes propiedades dieléctricas. Luego de ajustar el diseño del sensor, se obtuvieron resultados más claros en la frecuencia de 2.45 GHz. Los resultados simulados mostraron que el sensor propuesto proporciona sensibilidad y tamaño compacto. Como trabajo a futuro, se desarrollará la construcción y validación de este prototipo de sensor para detectar materiales contaminantes del medio ambiente mediante la detección de la permitividad dieléctrica de estos.

El sensor tipo antena presentado en este documento puede determinar la permitividad dieléctrica de algunos elementos, materiales y compuestos basándose en la alteración de la frecuencia de resonancia fundamental de la antena diseñada.

Cuando se utilizan substratos mas delgados el diseño de la antena se puede minimizar sin perder sus propiedades de resonancia, reduciendo el material de construcción y aumentando la sensibilidad del diseño.

Como trabajo futuro se espera diseñar el modelo propuesto y evaluar diferentes materiales como alcoholes, metales pesados, aguas contaminadas y residuos orgánicos.

Referencias

- [1] D. Ashokan and K. Rajathi, "A green Approach for Synthesis of Pyridinium Sulfonamide Ionic Liquids: Characterization and Their Biological Activities," *Chem. Africa*. no. 0123456789, 2023, doi: 10.1007/s42250-023-00653-z.
- [2] H. Y. Gan *et al.*, "Differential Microwave Microfluidic Sensor Based on Microstrip Complementary Split-Ring Resonator (MCSRR) Structure," *IEEE Sens. J.*, vol. 20, no. 11, pp. 5876–5884, 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.2973196.
- [3] A. Benleulmi, N. Boubekur, and D. Massicotte, "Novel substrate integrated waveguide architectures for microfluidic biosensing and environmental detection," *I2MTC 2020 - Int. Instrum. Meas. Technol. Conf. Proc.*, pp. 1–5, 2020, doi: 10.1109/I2MTC43012.2020.9129240.
- [4] R. A. Alahnomi, Z. Zakaria, E. Ruslan, S. R. Ab Rashid, and A. A. Mohd Bahar, "High-Q sensor based on symmetrical split ring resonator with spurlines for solids material detection," *IEEE Sens. J.*, vol. 17, no. 9, pp. 2766–2775, 2017, doi: 10.1109/JSEN.2017.2682266.

- [5] P. Velez, K. Grenier, J. Mata-Contreras, D. Dubuc, and F. Martin, "Highly-sensitive microwave sensors based on Open Complementary Split Ring Resonators (OCSRRs) for dielectric characterization and solute concentration measurement in liquids," *IEEE Access*, vol. 6, no. c, pp. 48324–48338, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2867077.
- [6] W. Liu, H. Sun, and L. Xu, "A microwave method for dielectric characterization measurement of small liquids using a metamaterial-based sensor," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 5, 2018, doi: 10.3390/s18051438.
- [7] Z. Wei *et al.*, "A high-sensitivity microfluidic sensor based on a substrate integrated waveguide re-entrant cavity for complex permittivity measurement of liquids," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 11, 2018, doi: 10.3390/s18114005.
- [8] E. Y. Teran-Bahena, S. C. Sejas-Garcia, and R. Torres-Torres, "Permittivity Determination Considering the Metal Surface Roughness Effect on the Microstrip Line Series Inductance and Shunt Capacitance," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 68, no. 6, pp. 2428–2434, Jun. 2020, doi: 10.1109/TMTT.2020.2979964.
- [9] M. Gil, P. Velez, F. Aznar-Ballesta, J. Munoz-Enano, and F. Martin, "Differential Sensor Based on Electroinductive Wave Transmission Lines for Dielectric Constant Measurements and Defect Detection," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 3, pp. 1876–1886, 2020, doi: 10.1109/TAP.2019.2938609.
- [10] T. Chretiennot, D. Dubuc, and K. Grenier, "A Microwave and microfluidic planar resonator for efficient and accurate complex permittivity characterization of aqueous solutions," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 61, no. 2, pp. 972–978, 2013, doi: 10.1109/TMTT.2012.2231877.
- [11] J. Naqui, C. Damm, A. Wiens, R. Jakoby, L. Su, and F. Martin, "Transmission lines loaded with pairs of magnetically coupled stepped impedance resonators (SIRs): Modeling and application to microwave sensors," *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, vol. 2, 2014, doi: 10.1109/MWSYM.2014.6848494.
- [12] H. Hao, D. Wang, Z. Wang, B. Yin, and W. Ruan, "Design of a high sensitivity microwave sensor for liquid dielectric constant measurement," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 19, pp. 1–14, 2020, doi: 10.3390/s20195598.
- [13] A. Aquino, C. G. Juan, B. Potelon, and C. Quendo, "Dielectric Permittivity Sensor Based on Planar Open-Loop Resonator," *IEEE Sensors Lett.*, vol. 5, no. 3, pp. 10–13, 2021, doi: 10.1109/LENS.2021.3055544.
- [14] J. G. D. Oliveira, J. G. D. Junior, E. N. M. G. Pinto, V. P. S. Neto, and A. G. D'Assunção, "A new planar microwave sensor for building materials complex permittivity characterization," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 21, pp. 1–15, 2020, doi: 10.3390/s20216328.
- [15] M. Zhang *et al.*, "Microfluidic microwave biosensor based on biomimetic materials for the quantitative detection of glucose," *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–11, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-20285-6.
- [16] S. Liao, B. Gao, L. Tong, X. Yang, Y. Li, and M. Li, "Measuring complex permittivity of soils by waveguide transmission/reflection method," *Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, vol. 2019-July, no. 1, pp. 7144–7147, 2019, doi: 10.1109/IGARSS.2019.8900535.

- [17] J. G. D. Oliveira, E. N. M. G. Pinto, V. P. S. Neto, and A. G. D'assunção, "CSRR-based microwave sensor for dielectric materials characterization applied to soil water content determination," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 1, 2020, doi: 10.3390/s20010255.
- [18] R. A. Alahnomi *et al.*, "Review of Recent Microwave Planar Resonator-Based Sensors ;," *Sens. Rev.*, vol. 2267, no. 21, pp. 1–38, 2021.
- [19] "Submersible Printed Split-Ring Resonator-Based Sensor for Thin-Film Detection and Permittivity Characterization - IEEE Journals & Magazine."
- [20] A. A. Mohd Bahar, Z. Zakaria, M. K. Md. Arshad, A. A. M. Isa, Y. Dasril, and R. A. Alahnomi, "Real Time Microwave Biochemical Sensor Based on Circular SIW Approach for Aqueous Dielectric Detection," *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–13, 2019, doi: 10.1038/s41598-019-41702-3.
- [21] E. M. Amin and N. Karmakar, "Development of a chipless RFID temperature sensor using cascaded spiral resonators," in *2011 IEEE SENSORS Proceedings*, Oct. 2011, pp. 554–557. doi: 10.1109/ICSENS.2011.6127344.
- [22] S. Wang and M. S. Tong, "Mechanical deformation detection of building structures using microstrip patch antennas as sensors," *IEEE Sens. J.*, vol. 18, no. 21, pp. 8676–8684, 2018, doi: 10.1109/JSEN.2018.2865551.
- [23] R. Becker, "Non-invasive cancer detection using volatile biomarkers: Is urine superior to breath?," *Med. Hypotheses*, vol. 143, p. 110060, 2020, doi: 10.1016/j.mehy.2020.110060.
- [24] Z. O. Rodríguez-Moré, H. Lobato-Morales, R. A. Chávez-Pérez, and J. L. Medina-Monroy, "Complex dielectric permittivity of rum and its mixtures with methanol, ethanol, and water at frequencies up to 15 GHz," *J. Microw. Power Electromagn. Energy*, vol. 52, no. 1, pp. 16–30, 2018, doi: 10.1080/08327823.2017.1421013.
- [25] H. Hamzah, A. Abduljabar, J. Lees, and A. Porch, "A compact microwave microfluidic sensor using a re-entrant cavity," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 3, 2018, doi: 10.3390/s18030910.
- [26] D. Rodríguez Ávila, E. González Gutiérrez, M. Coto Mederos, and F. Marante Rizo, "Consideraciones de diseño de antenas de microcinta multibandas," *Rev. Digit. las Tecnol. la Inf. y las Comun.*, vol. 13, no. 2, pp. 1–12, 2014.
- [27] A. Hernández, F. López, O. Ossa, A. Hernández, F. López, and O. Ossa, "Generación de doble banda en antenas de Microcinta rectangulares utilizando ranuras separadas en secuencia de cantor," *Ingeniare. Rev. Chil. Ing.*, vol. 28, no. 2, pp. 204–213, Jun. 2020, doi: 10.4067/S0718-33052020000200204.
- [28] G. Andria, F. Attivissimo, A. Di Nisio, A. Trotta, S. M. Camporeale, and P. Pappalardi, "Design of a microwave sensor for measurement of water in fuel contamination," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 136, pp. 74–81, 2019, doi: 10.1016/j.measurement.2018.12.076.
- [29] J. Krupka, "Frequency domain complex permittivity measurements at microwave frequencies," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 6, 2006, doi: 10.1088/0957-0233/17/6/R01.

- [30] E. E. Reyes, M. A. Dominguez, and D. A. Catano, "Diseño de un sensor de permitividad dieléctrica relativa de un medio empleando una antena de microcinta con estructuras metamateriales," *Actas Ing.*, no. October 2015, pp. 110–114, 2015.
- [31] C. Dalmay, A. Pothier, P. Blondy, F. Lalloue, and M. O. Jauberteau, "Label free biosensors for human cell characterization using radio and microwave frequencies," in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2008, pp. 911–914. doi: 10.1109/MWSYM.2008.4632981.
- [32] A. Soltan, R. A. Sadeghzadeh, and S. Mohammad-Ali-Nezhad, "Microwave sensor for liquid classification and permittivity estimation of dielectric materials," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 336, p. 113397, 2022, doi: 10.1016/j.sna.2022.113397.
- [33] M. Santra and K. U. Limaye, "Estimation of complex permittivity of arbitrary shape and size dielectric samples using cavity measurement technique at microwave frequencies," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 53, no. 2, pp. 718–721, 2005, doi: 10.1109/TMTT.2004.840570.
- [34] B. Meng, J. Booske, and R. Cooper, "Short Papers," vol. 43, no. 11, pp. 2633–2636, 1995.
- [35] J. Naqui and F. Martin, "Transmission lines loaded with bisymmetric resonators and their application to angular displacement and velocity sensors," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 61, no. 12, pp. 4700–4713, Dec. 2013, doi: 10.1109/TMTT.2013.2285356.
- [36] J. Naqui, M. Durán-Sindreu, and F. Martín, "Novel sensors based on the symmetry properties of split ring resonators (SRRs)," *Sensors*, vol. 11, no. 8, pp. 7545–7553, 2011, doi: 10.3390/s110807545.
- [37] S. Kulkarni and M. S. Joshi, "Design and Analysis of Shielded Vertically Stacked Ring Resonator as Complex Permittivity Sensor for Petroleum Oils," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 63, no. 8, pp. 2411–2417, Aug. 2015, doi: 10.1109/TMTT.2015.2451110.
- [38] M. Abdolrazzaghi, A. Abdolali, and S. Hashemy, "Improvements in DNA biosensors using joint split ring resonators coupled with thin film microstrip line," *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.*, vol. 31, no. 2, pp. 126–131, 2016.
- [39] R. Mirzavand, M. M. Honari, and P. Mousavi, "High-resolution dielectric sensor based on injection-locked oscillators," *IEEE Sens. J.*, vol. 18, no. 1, pp. 141–148, 2018, doi: 10.1109/JSEN.2017.2772923.
- [40] M. Karami, P. Rezaei, S. Kiani, and R. A. Sadeghzadeh, "Modified planar sensor for measuring dielectric constant of liquid materials," *Electron. Lett.*, vol. 53, no. 19, pp. 1300–1302, 2017, doi: 10.1049/el.2017.2481.
- [41] D. Dag, R. K. Singh, and F. Kong, "Dielectric properties, effect of geometry, and quality changes of whole, nonfat milk powder and their mixtures associated with radio frequency heating," *J. Food Eng.*, vol. 261, no. February, pp. 40–50, 2019, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2019.04.017.
- [42] A. Benayad and M. Tellache, "A compact energy harvesting multiband rectenna based on metamaterial complementary split ring resonator antenna and modified hybrid junction ring rectifier," *Int. J. RF Microw. Comput. Eng.*, vol. 30, no. 2, pp.

- 1–11, 2020, doi: 10.1002/mmce.22031.
- [43] G. Varshney, R. Singh, V. S. Pandey, and R. S. Yaduvanshi, "Circularly polarized two-port MIMO dielectric resonator antenna," *Prog. Electromagn. Res. M*, vol. 91, no. April, pp. 19–28, 2020, doi: 10.2528/pierm20011003.
 - [44] E. Maza, "In papyro comparison of TMM (edgeR), RLE (DESeq2), and MRN normalization methods for a simple two-conditions-without-replicates RNA-seq experimental design," *Front. Genet.*, vol. 7, no. SEP, pp. 1–8, 2016, doi: 10.3389/fgene.2016.00164.
 - [45] G. Rajeshkumar, R. Vishnupriyan, and S. Selvadeepak, "Tissue Mimicking Material an Idealized Tissue Model for Clinical Applications: A Review," *Mater. Today Proc.*, vol. 22, pp. 2696–2703, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.400.
 - [46] M. I. Nawaz, Z. Huiling, M. S. S. Nawaz, K. Zakim, S. Zamin, and A. Khan, "A review on wideband microstrip patch antenna design techniques," in *ICASE 2013 - Proceedings of the 3rd International Conference on Aerospace Science and Engineering*, Aug. 2013, pp. 42–49. doi: 10.1109/ICASE.2013.6785554.
 - [47] H. Yiğit and K. Karayahşi, "A novel model-based technique to improve design processes for microstrip antennas," *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 162, no. November 2022, 2023, doi: 10.1016/j.aeue.2023.154570.
 - [48] D. Ustun, A. Toktas, and A. Akdagli, "Deep neural network-based soft computing the resonant frequency of E-shaped patch antennas," *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 102, pp. 54–61, 2019, doi: 10.1016/j.aeue.2019.02.011.
 - [49] K. Sharma and G. P. Pandey, "Efficient modelling of compact microstrip antenna using machine learning," *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 135, no. December 2020, p. 153739, 2021, doi: 10.1016/j.aeue.2021.153739.
 - [50] A. Barreto, J. Morales, and I. Hernández, "Análisis y diseño de un monopolo impreso para UWB," *Rev. Ing. electrónica, automática y Comun.*, vol. 35, no. 1, pp. 16–32, 2014.
 - [51] H. H. M. Ghouz, M. F. Aboee, and M. Aly Ibrahim, "Novel wideband microstrip monopole antenna designs for WiFi/LTE/WiMax devices," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 9532–9539, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2963644.
 - [52] Ö. Bayraktar, D. Uzer, S. Sinan Gültekin, and R. Top, "Usage of T-Resonator Method at Determination of Dielectric Constant of Fabric Materials for Wearable Antenna Designs," *Mater. Today Proc.*, vol. 18, pp. 1796–1802, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.06.666.
 - [53] F. Shama, M. Hayati, and M. Ekhteraei, "Compact microstrip lowpass filter using meandered unequal T-shaped resonator with ultra-wide rejection band," *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 85, no. December 2017, pp. 78–83, 2018, doi: 10.1016/j.aeue.2017.12.038.
 - [54] L. M. Castellanos, F. López, and E. Reyes-Vera, "Metamateriales: principales características y aplicaciones," *Rev. la Acad. Colomb. Ciencias Exactas, Físicas y Nat.*, vol. 40, no. 156, pp. 395–401, Jul. 2016, doi: 10.18257/RACCEFYN.345.
 - [55] O. D. Ossa Molina, A. L. Forero Camen, C. Espinal Ramirez, E. E. Reyes Vera, and F. E. López Giraldo, "Efectos en el coeficiente de reflexión de una antena de

microcinta rectangular debidos a las modificaciones de posición de una ranura en la capa radiante," *Rev. EIA*, vol. 14, no. 28, pp. 85–97, 2018, doi: 10.24050/reia.v14i28.1143.

- [56] E. A. Zapata-Ochoa, F. López-Giraldo, and G. D. Goéz, "Simulación de una antena microcinta rectangular espiral multibanda para la aplicación de captación de energía de radiofrecuencia," *TecnoLógicas*, vol. 24, no. 51, p. e1924, 2021, doi: 10.22430/22565337.1924.
- [57] R. Pandey, A. K. Shankhwar, and A. Singh, "Design, analysis, and optimization of dual side printed multiband antenna for rf energy harvesting applications," *Prog. Electromagn. Res. C*, vol. 102, no. February, pp. 79–91, 2020, doi: 10.2528/pierc20022901.
- [58] S. A. Kurkin, A. A. Badarin, A. A. Koronovskii, N. S. Frolov, and A. E. Hramov, "Modeling Instabilities in Relativistic Electronic Beams in the CST Particle Studio Environment," vol. 10, no. 1, pp. 59–68, 2018, doi: 10.1134/S2070048218010088.
- [59] R. C. Ciobanu, R. F. Damian, C. M. Schreiner, M. Aradoaei, A. Sover, and A. M. Raichur, "Simulation of Dielectric Properties of Nanocomposites with Non-Uniform Filler Distribution," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 7, 2023, doi: 10.3390/polym15071636.
- [60] Z. Liu, Q. Guo, M. Li, C. Xu, and Y. Li, "Anti-interfering method for environmental foreign bodies for the microstrip antenna sensor," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 195, no. December 2021, p. 111132, 2022, doi: 10.1016/j.measurement.2022.111132.
- [61] H. Lobato-Morales, A. Corona-Chávez, D. V. B. Murthy, and J. L. Olvera-Cervantes, "Complex permittivity measurements using cavity perturbation technique with substrate integrated waveguide cavities," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 81, no. 6, 2010, doi: 10.1063/1.3442512.
- [62] K. Saeed, R. D. Pollard, and I. C. Hunter, "Substrate integrated waveguide cavity resonators for complex permittivity characterization of materials," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 56, no. 10, pp. 2340–2347, 2008, doi: 10.1109/TMTT.2008.2003523.
- [63] R. Khajeh Mohammad Lou, M. Naser-Moghadasi, and R. A. Sadeghzadeh, "Compact Multi-Band Circularly Polarized CPW Fed Antenna Based on Metamaterial Resonator," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 94, no. 4, pp. 2853–2863, 2017, doi: 10.1007/s11277-016-3722-x.
- [64] M. M. Hasan *et al.*, "Polarization insensitive dual band metamaterial with absorptance for 5G sub-6 GHz applications," *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–21, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-12106-7.
- [65] I. Mohammad and H. Huang, "Monitoring fatigue crack growth and opening using antenna sensors," *Smart Mater. Struct.*, vol. 19, no. 5, 2010, doi: 10.1088/0964-1726/19/5/055023.
- [66] J. Anguera, A. Fernández, C. Puente, A. Andújar, and J. Groot, "Antenna Boosters versus Flexible Printed Circuit Antennas for IoT Devices," *Signals*, vol. 3, no. 2, pp. 326–340, 2022, doi: 10.3390/signals3020021.

- [67] D. L. NELSON, A. HERBET, S. BOURGOIN, J. GLOWINSKI, and M. HAMON, "Characteristics of Central 5-HT Receptors and Their Adaptive Changes following Intracerebral 5,7-Dihydroxytryptamine Administration in the Rat," *Mol. Pharmacol.*, vol. 14, no. 6, 1978.
- [68] M. Chen, X. Wang, Z. Zhang, K. Sun, C. Cheng, and F. Dang, "Negative permittivity behavior and magnetic properties of C/YIG composites at radio frequency," *Mater. Des.*, vol. 97, pp. 454–458, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2016.02.119.
- [69] L. F. Londoño Franco, P. T. Londoño Muñoz, and F. G. Muñoz Garcia, "Los Riesgos De Los Metales Pesados En La Salud Humana Y Animal," *Biotechnología en el Sect. Agropecu. y Agroindustrial*, vol. 14, no. 2, p. 145, 2016, doi: 10.18684/bsaa(14)145-153.
- [70] S. K. Bose and U. C. Chakraborty, "Resolutions Adopted at the General Session of the VIII All India Pediatric Conference at Vellore on the 21st December, 1956," *Indian J. Pediatr.*, vol. 24, no. 1, p. 14, 1957, doi: 10.1007/BF02796157.
- [71] O. R. Mancilla Villa *et al.*, "Concentración iónica y metales pesados en el agua de riego de la cuenca del río Ayuquila-Tuxcacuesco-Armería," *Idesia (Arica)*, no. ahead, pp. 0–0, 2017, doi: 10.4067/s0718-34292017005000303.