



INAOE

Desarrollo de un sensor de microondas para la medición de posicionamiento angular.

Por:

Yolanda Lizette López Muñoz

Tesis sometida como requisito parcial
para obtener el grado de

**MAESTRA EN CIENCIAS EN LA
ESPECIALIDAD DE ELECTRÓNICA**

por el

**Instituto Nacional De Astrofísica
Óptica Y Electrónica**

Enero, 2024

Santa María Tonantzintla, Puebla

Supervisada por:

Dr. Jose Luis Olvera Cervantes

©INAOE 2024

Derechos Reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de reproducir y distribuir copias de esta tesis en su totalidad o en partes mencionando la fuente.



Esta página ha sido dejada en blanco intencionalmente.

Resumen

La tecnología del Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) busca crear entornos donde todos los objetos estén conectados e intercambien información entre ellos. Especialmente cuando se habla del desarrollo y la innovación en la ciencia y tecnología también se requiere que la adquisición y el procesamiento de datos sea preciso y confiable.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sensor de microondas capaz de identificar el posicionamiento angular, que facilite la conexión al IoT y permita su implementación en la salud estructural, más aun en la atención médica y su aplicación en la fisioterapia. Éste se basa en la teoría de los resonadores de microcinta, es compacto, utiliza un estator y un rotor, y está diseñado a una frecuencia de operación de 2.4 GHz (localizada en las bandas de frecuencias designadas para aplicaciones Industriales, Científicas y Médicas (IMC o por sus siglas en inglés, ISM) según el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) facilitando su aplicación en terapias físicas. Se utilizó el simulador de onda completa HFSS para el diseño y la simulación del sensor, en la fabricación se implementó el método de fotolitografía estándar. Se creó una carcasa y se usó un Analizador de redes vectoriales (VNA) para la caracterización del sensor, los resultados fueron procesados y analizados con ayuda de los programas Matlab, Excel y Rstudio. La simulación sugiere un comportamiento lineal entre el posicionamiento angular y la frecuencia de resonancia, estos resultados se ratificaron mediante el análisis estadístico, donde se obtuvo un coeficiente de correlación lineal negativo cercano a 1 entre las variables y un coeficiente de determinación de 0.9803. También se muestra una gran cercanía en los resultados obtenidos por el VNA y simulados, esto sugiere que el sensor propuesto mide posicionamiento angular, y es factible para su aplicación en un sistema inalámbrico que permita adaptarse a los diferentes usos en fisioterapia.

Abstract

The Internet of Things (IoT) technology aims to create environments where all objects are connected and exchange information among themselves. Especially when discussing development and innovation in science and technology, precise and reliable data acquisition and processing are required.

This work presents the development of a microwave sensor capable of identifying angular positioning, facilitating connection to the IoT, and allowing implementation in structural health, particularly in medical care and its application in physiotherapy. It is based on the theory of microstrip resonators, is compact, utilizes a stator and a rotor, and is designed to operate at a frequency of 2.4 GHz (located in frequency bands designated for Industrial, Scientific, and Medical (ISM) applications according to the Federal Institute of Telecommunications (IFT) in Mexico, facilitating its use in physical therapies.

The full-wave simulator HFSS was used for the design and simulation of the sensor, and standard photolithography methods were implemented in the manufacturing process. A housing was created, and a Vector Network Analyzer (VNA) was used for sensor characterization. The results were processed and analyzed using Matlab, Excel, and Rstudio programs.

Simulation suggests a linear relationship between angular positioning and resonance frequency. These results were confirmed through statistical analysis, where a negative linear correlation coefficient close to 1 was obtained between the variables and a determination coefficient of 0.9803. There is also a close match between the VNA and simulated results, suggesting that the proposed sensor measures angular positioning and is feasible for application in a wireless system adaptable to various uses in physiotherapy.

Agradecimientos

Mi travesía hasta este momento a sido una combinación de decisiones, acciones, privilegios, sacrificios y sobre todo mucha resiliencia; que sin el apoyo y la motivación de mis seres queridos no se habría logrado. Por eso me gustaría agradecer particularmente a mis padres y mi hermano por su amor incondicional, a mi tía Gris quien me enseñó que ser una mujer fuera del molde que lucha por sus sueños si logra el éxito, a cada miembro de mi familia que a su modo me ha enseñado algo que me hace ser la mujer que soy. También agradezco a mi compañero de vida, Roberto Araujo, por siempre impulsarme a seguir mis metas y acompañarme en cada paso.

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnología (CONAHCYT) por otorgarme la beca de posgrado para realizar mis estudios de la maestría en el INAOE, y a ésta misma por permitirme vivir experiencias y conocer personas únicas que me motivaron a concluir este trabajo. Especialmente a mi gran equipo de confianza Alan, Juan y Leo, a Aurea quien le dio brillo y alegría a los días nublados en Tonantzintla, a Sandra por recordarme que puedo ser lo que quiera ser, a JuanPi, el Dr. Reydezel, el Dr. Renero, Dr. Corona, y mis compañeros que siempre estuvieron dispuestos a compartir sus conocimientos, material, enseñanzas y consejos. A mi asesor el Dr. José Luis Olvera Cervantes, por darme la libertad de escoger este tema, orientarme en él y a lo largo del posgrado, al equipo técnico del laboratorio CyPCI del INAOE por su apoyo para el desarrollo del presente, y a cada amistad que se sumó a lo largo de estos 2 años.

Me siento muy bendecida, orgullosa y satisfecha con este trabajo, es por ello que como último pero no menos importante quiero agradecerme a mi, por creer en mi, por trabajar tan duro, dar lo mejor de mi y ser yo en todo momento, pero sobre todo quiero agradecerme por nunca darme por vencida.

Esta página ha sido dejada en blanco intencionalmente.

Índice general

Resumen	I
Abstract	II
Agradecimientos	III
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	2
1.2. Propuesta	9
1.2.1. Problemática	9
1.2.2. Objetivo General	10
1.2.3. Objetivos Específicos	10
2. Marco Teórico	11
2.1. Desarrollo de sensores de rotación	11
2.1.1. Definiciones básicas en el desarrollo de sensores de rotación	13
2.2. Resonadores de Microcinta	15
2.3. Medición de ángulos en el área de la salud	17
2.3.1. Goniometría	17
2.3.2. Instrumentos de medición	17
2.3.3. Selección del ángulo de medición	19
2.4. Método de medición	20

2.4.1. Analizador de Redes Vectoriales (VNA)	20
2.5. Análisis Estadístico	21
2.5.1. Prueba T de student	21
2.5.2. Análisis de varianza (ANOVA)	21
2.5.3. Coeficiente de correlación	22
2.5.4. Coeficiente de determinación cuadrado (R^2)	22
2.5.5. Error cuadrático medio (MSE)	22
2.5.6. Coeficiente de varación (CV)	23
3. Desarrollo Experimental	24
3.1. Sensor propuesto	24
3.1.1. Diseño del Prototipo	25
3.1.2. Fabricación del sensor	28
3.2. Caracterización del sensor	30
3.2.1. Metodología experimental	30
3.2.2. Análisis Estadístico	32
4. Resultados	35
4.1. Simulación del sensor propuesto	35
4.2. Diseño, fabricación y medición	36
4.3. Análisis estadístico	41
5. Discusiones	46
6. Conclusiones	52
6.1. Conclusiones generales	52
6.2. Trabajo futuro	53
Bibliografía	55

Índice de tablas

1.1. Sensores de rotación propuestos en la literatura	4
1.2. Información complementaria de la tabla 1.1	8
2.1. Definición de los instrumentos de medición en la goniometría.	18
3.1. Propiedades del dieléctrico.	25
3.2. Pruebas estadísticas para la caracterización del sensor	31
4.1. Parámetros del estator para el sensor propuesto.	38
4.2. Resultados para la caracterización del sensor propuesto.	41
4.3. Resultados para la prueba de repetibilidad en sensor con $f_o = 1GHz$	44
4.4. Valores para la evaluación del posicionamiento angular con ecuación caracteris- tica.	45
5.1. Tabla comparativa entre criterios simulados y medidos.	48
5.2. Tabla comparativa	51

Índice de figuras

2.1. Componentes principales de los sensores de rotación.	12
2.2. Ejemplos en el diseño de sensores de rotación.	12
2.3. Líneas de transmisión operando a frecuencias de $1/2$ y 1 longitudes de onda en a) y c) circuito abierto y b) y c) corto circuito [40].	15
2.4. Líneas de transmisión con operando a frecuencias de a) $1/4$ de longitud de onda en corto circuito y b) $3/4$ de longitud de onda en circuito abierto [40].	16
2.5. Propiedades de resonadores en serie y paralelo [6].	17
2.6. Tipos de instrumentos de medición.	18
2.7. Amplitud normal de los desplazamientos angulares para las articulaciones [3].	19
3.1. Resonador circular ($L_f = \lambda/4, w_f = 3\text{mm}$).	26
3.2. Diseño del estator.	27
3.3. Diseño del rotor.	28
3.4. Prototipo del sensor.	29
3.5. Sentido del giro para el desplazamiento del rotor.	29
3.6. Carcasa del sensor.	31
4.1. Frecuencia de resonancia vs coeficiente de reflexión (parámetro S_{11}) del prototipo para diferentes posiciones angulares.	35
4.2. Curva de tendencia de la simulación posición angular vs frecuencia de resonancia.	36
4.3. Fabricación del sensor propuesto.	37
4.4. Sistema de ensamblaje del sensor propuesto.	37

4.5. Carcasa.	37
4.6. Fabricación del sensor.	39
4.7. Sistema de ensamblaje para sensor de 1 GHz.	39
4.8. Frecuencia de resonancia del estator.	40
4.9. Frecuencia de resonancia del sensor propuesto. Medición del parámetro S_{11} . . .	40
4.10. Resultados de repetibilidad para la posición angular de 50° . Donde p_S es el valor p para la prueba de normalidad y p_B representa el valor p para la prueba de homogeneidad.	42
4.11. Curva de tendencia de la respuesta en frecuencia de simulación (línea y ecua- ción verde) y medición real promedio (línea punteada y ecuación negra) para diferentes posiciones angulares.	43
4.12. Análisis ANOVA para evaluar la reproducibilidad del sensor propuesto.	44
4.13. Resultados prueba de repetibilidad sensor 1GHz, con $RSME = 0.0343$	45
5.1. Análisis de dispersión y correlación del sensor propuesto.	47

Esta página ha sido dejada en blanco intencionalmente.

CAPÍTULO 1

Introducción

Hoy en día las tecnologías de comunicación inalámbrica son implementadas para abastecer la alta demanda que surge de la necesidad del ser humano por comunicarse de manera rápida y segura. Más aun cuando se habla del desarrollo e innovación de la ciencia y tecnología en el área de la salud, donde también se busca que la adquisición y el procesamiento de datos sea preciso y confiable. Si redirigimos la atención a nivel nacional, constantemente se desea que estas tecnologías sean accesibles y de fácil manejo.

Es así como el desarrollo de sensores de microondas ha tenido un gran impacto en los últimos años, ya que además de cumplir con estos requisitos permiten el intercambio de información mediante ondas electromagnéticas para sensar uno o varios parámetros y son fácilmente adaptables al entorno. Un buen ejemplo de estos son los sensores de rotación, que al igual que los de movimiento lineal, permiten monitorizar tanto el desplazamiento como la velocidad angular de un determinado objeto para diferentes aplicaciones como en la salud estructural, la ingeniería civil, la automatización industrial, entre otras [1]. Sin embargo, dentro de estos existe gran variedad en cuanto a la configuración del sensor; así pues, la tarea de encontrar un sensor con las características apropiadas para una aplicación en específico se ha vuelto cada vez más compleja.

En este trabajo se propone desarrollar un sensor de microondas que mida el posicionamiento angular, que favorezca a la conexión al IoT e implementación en la salud estructural, más aun en la atención médica .

En este primer capítulo se abordará la motivación de la tesis, el estado del arte de los sensores de rotación basados en el funcionamiento de las líneas de microcinta, y finalmente la propuesta.

Posteriormente, en el capítulo 2 se plantea la teoría y conceptos básicos necesarios para el desarrollo de este proyecto. Tales como los sensores de rotación en altas frecuencias, los resonadores de microcinta (MR, por sus siglas en inglés), la medición de ángulos en la goniometría, el método de medición y el análisis estadístico.

Luego, en el capítulo 3 se explica el desarrollo experimental, comenzando por definir el diseño del sensor propuesto para luego abordar la metodología del experimento.

En el capítulo 4 se muestran los resultados de la simulación, las mediciones, y el análisis estadístico para la caracterización del sensor. Mientras que en el capítulo 5 se presentan las discusiones de los resultados. Finalmente, el capítulo 6 incluye las conclusiones generales así como el trabajo futuro.

1.1. Antecedentes

Los sensores de rotación son dispositivos diseñados para medir o detectar el ángulo o la posición de un objeto en rotación. Estos sensores son fundamentales en una amplia variedad de aplicaciones donde es crucial conocer la posición angular de un componente, ya sea para el control de maquinaria, sistemas de navegación, robótica, instrumentación, entre otros.

Generalmente, cuando se trata de dispositivos en altas frecuencias como en el espectro de las microondas, a estos sensores también se les conoce como sensores de desplazamiento angular.

Por ejemplo, el **Split-Ring Resonator (SRR)** es un tipo de tecnología que usualmente se emplea para diseñar sensores miniatura o mejorar la sensibilidad de los sensores de microondas, y utilizan los cambios de resonancia para medir el desplazamiento angular[2]. También pueden caracterizar materiales y detectar señales biológicas. Estos se han vuelto populares por ser simples, compactos y fáciles de diseñar e implementar [3].

Existen diferentes sensores que se basan en una configuración similar a esta tecnología, en donde su objetivo es innovar las características y/o mejorar el diseño del sensor, en otras palabras, pertenecen a la familia de los sensores SRR. A continuación describimos los que se considerarán en el presente trabajo.

- **Complementary-SSR (CSRR):** su configuración permite variar la distribución del campo en la línea de transmisión y cambia su impedancia [3].
- **Reoriented-CSRR (RCSRR):** como su nombre lo indica es una variación del CSRR, donde se añade una ranura interna en forma de C. Esta configuración permite simplificar el proceso de detección en el desplazamiento angular absoluto [3].
- **S-Shaped SRR (S-SRR):** su configuración posibilita excitar al sensor con campos magnéticos contrarios, además es muy atractivo para diseños miniaturizados basados en ondas coplanares (CPW, por sus siglas en inglés) ya que la frecuencia de resonancia del S-SRR es aún más pequeña que la de un par de SRRs manteniendo la misma área de un resonador individual [4].
- **Modified-CSRR (MCSRR):** produce una alteración en el fenómeno de acoplamiento cruzado porque la modificación en el diseño del rotor favorece el incremento de flujo magnético en la línea de microcinta [5].
- **S-Shaped Golden Spiral-Tapered-SRR (SGS-SRRs):** diseño basado en la estructura del número de oro/áureo [6].

De acuerdo con [7] la tecnología **Transversal Filtering (TSF)** permite la detección de desplazamiento angular con microondas en términos de inter-espaciado de la transmisión de cerros para filtros pasa banda o rechaza bandas, así como la modificación en la profundidad de pico.

En contraste, la configuración **Electric-LC (ELC)** mediante el acoplamiento magnético en la línea de transmisión da pie a la medición de la profundidad del pico en el coeficiente de transmisión y su ancho de banda, que a su vez son dependientes de la orientación del sensor. Por consiguiente, permiten la detección de la dirección del giro.

La tabla 1.1 presenta 15 trabajos sobre el desarrollo de sensores de rotación cuyas frecuencias de operación van desde 460 MHz a 6.22 GHz, lo que implica que la mayoría presenta dimensiones compactas.

Tabla 1.1: Sensores de rotación propuestos en la literatura

Artículo	Rango Dinámico	Frecuencia central	Puertos	Tecnología del sensor	Tipo de alimentación	Parámetro de medición	Sensibilidad	Linealidad	Simetría geométrica
[2]	0° - 90°	1.11 GHz	2	CSSRR	CSML	$f_r, S_{21} $	30°:0.21MHz/°; 60°:0.43MHz/°; 90°:0.77MHz/°	Sí [0°,90°] ajuste	Sí
[8]	0° - 90° 0° - 360°	6.22 GHz	2	CSRR	CPW	$f_r, S_{21} + \text{BW}$ $\log(f_r) + \angle S_{21} + \text{BW}$	TLY-5 subs: 3.18 MHz/°; RF-35 sub: 2.97 MHz/°s	Sí [30°, 60°] ajuste [30°, 150°]	Sí No
[9]	0° - 90°	2.93 GHz	2	SRR + CSRR	OCSRR + FEEDBACK	$f_r, S_{11} $	0.32 dB/°	Sí [14.4°, 57.6°] ajuste	Sí
[3]	0° - 360°	2.4 GHz	2	RCSRR	90° feedline	$f_r, S_{11} , S_{21} , \angle S_{11}, \angle S_{21}$	$\sigma < 10'$	Sí [0°,360°] ajuste por red neuronal	No
[10]	0° - 360°	3.5 GHz y 4.5 GHz	2	SRR + Flag	Slotline	$f_r, S_{11} , S_{21} + \angle, \Delta F$	Promedio: 0.63	Sí [0°,360°] ajuste	No

Continúa en la siguiente página...

Artículo	Rango Dinámico	Frecuencia central	Puertos	Tecnología del sensor	Tipo de alimentación	Parámetro de medición	Sensibilidad	Linealidad	Simetría geométrica
[1]	0° - 90°	4.13 GHz	2	CSRR	ML	$f_r, S_{11} , S_{21} $	/	Sí [0°, 45°] ajuste	No
[4]	0° - 90°	460 MHz	2	S-SRR	CPW	$f_r, \rightarrow, S_{11} , S_{21} + BW + \angle S_{11}, \angle S_{21}$	0.25 dB/°	Sí 2.1dB ajuste por escala log.	Sí
[11]	0° - 180°	1 GHz	2	Resonador U-Shape	U-Shape + ML	$f_r, S_{21} $	0.9	No	No
[12]	Ilimitado por el no. de pulsos	3.87GHz y 4.29GHz	2	Par de líneas SRRs	SRR + CPW	$f_r, S_{21} + T_{motor}$	/	No	Sí
[13]	0° - 90° (-21.151 dB)	6.15 GHz	2	CSRR	SIW + CSRR	$f_r, \rightarrow S_{21} , \angle + f_r, S_{11} +$ intensidad del \vec{E}	5 MHz/° (0.21 dB/°)	Sí [0°, 70°] comportamiento	Sí
[14]	0° - 7°	1.38 GHz	2	Horn-SRR	CPW	$f_r, S_{21} $	/	Sí [0°, 7°] comportamiento	Sí

Continúa en la siguiente página...

Artículo	Rango Dinámico	Frecuencia central	Puertos	Tecnología del sensor	Tipo de alineación	Parámetro de medición	Sensibilidad	Linealidad	Simetría geométrica
[5]	0° - ±350°	3.77GHz y 4.85GHz	2	MCSR	ML	$ J + f_r + \text{factor } Q + \angle S_{11}, \angle S_{22} + f_r, S_{21} + \angle$	4.3° en la $\angle S_{21}$ por grado de rotación	Sí [$\pm 5^\circ, \pm 60^\circ$] comportamiento	No
[7]	0° - 180°	961 MHz	2	Trozo de cto. abierto (ML)	TFS agujero en dieléctrico	$f_r, \rightarrow, S_{21} + \text{BW}$	0.2 dB/° 1.24 MHz/°	Sí [0°, 20°] Lrej [0°, 90°] BW comportamiento	No
[15]	0° - 90° 23.7 dB	800 MHz	2	ELC	CPW	$f_r, \rightarrow, S_{21} $	0.26/°	Sí [10°, 80°] ajuste por escala log.	Sí
[6]	0° - 89°	2.5 GHz	2	SGS-SRRs	CPW	$f_r, S_{21} $	0.283	Sí [0°, 89°] ajuste	Sí

No especifica (*l*)

Ángulo de rotación (\angle)

Medición de la fase (\angle)

Profundidad de pico (\rightarrow)

Aproximadamente el 60% de los trabajos que se investigaron corresponden a un rango dinámico limitado (menor o igual a 90°), de los cuales solamente 1 reporta no tener simetría geométrica. En contraste, los sensores con un rango dinámico mayor corresponden a aquellos que no presentan simetría geométrica. También, en [3]-[5] se incluye la fase como parámetro de medición, asimismo en [4], [7], [8] el ancho de banda (BW). Y únicamente 4 de los autores decidieron utilizar la profundidad de pico para medir el desplazamiento angular. Otro dato a resaltar sobre estos trabajos es que del 86.7% de los autores que reportaron linealidad en sus sensores, solamente uno no lo expresó como rango lineal.

El 33.3% de los trabajos tiene la capacidad de detectar la dirección de giro; de estos, la mitad reportan haber utilizado la fase o su relación como parámetro de medición (*véase la tabla 1.2*). También revela que la mayoría de los sensores fueron desarrollados con propósitos generales. Aquellos en los que se especifica su aplicación y con base en [16], solamente [3] esta dentro de las banda IMC¹.

El trabajo más utilizado como referencia para el diseño de otros sensores de rotación es [8]. En este se presentan los resultado de un sensor con dos rotores de diferente substrato pero misma tecnología, y cuyo rango de dinámico va de 0° a 90° ; sin embargo, proponen (de manera teórica) ciertos ajustes que permitirán mejorar el desempeño del sensor, como considerar una escala logarítmica en la frecuencia de resonancia, medir la fase del coeficiente de transmisión y eliminar la simetría del rotor. De esta manera se incrementan los rangos (dinámico y lineal) además de permitir la detección del giro.

¹Industriales, Científicas y Médicas (ISM por sus siglas en inglés)

Artículo	Detección en la dirección de giro	Aplicación	Mediciones adicionales	Año
[2]	Sí Cambio en la orientación de la frecuencia de resonancia	Sensor para monitoreo de bioseñales no invasivo y compacto, y detección de fluidos químicos.		2018
[8]	No Sí Rango de operación	Calibración y control de errores en campos de robótica, industria y automóvil.	✓	2021
[9]	No	N/E <i>(automatización, control aeroespacial, materiales artificiales)</i>		2021
[3]	Sí Con fase	Robótica		2021
[10]	Sí Diferencia de fase	N/E		2020
[1]	No	N/E		2020
[4]	N/E	N/E	✓	2015
[11]	Sí Traslape de área de los resonadores cambio en $\text{fr} (\pm 90^\circ)$	N/E <i>(sensores microfluídicos, de película delgada, biológicos de microondas, sensores de tensión)</i>	✓	2014
[12]	No	Ámbito aeroespacial	✓	2017
[13]	No	N/E <i>(rotación de turbina, codificadores rotativos, deformación, torsión, flexión, etc...)</i>	✓	2020
[14]	No	N/E		2013
[5]	Sí Fase relativa	Aplicaciones espaciales e industriales	✓	2019
[7]	No	N/E		2019
[15]	No	N/E	✓	2013
[6]	No	N/E		2016

No específica (N/E)

Tabla 1.2: Información complementaria de la tabla 1.1

1.2. Propuesta

1.2.1. Problemática

Aunque en los últimos años las investigaciones de los sensores microondas que miden el desplazamiento angular ha aumentado, aún falta mucho para establecer métodos que faciliten su desarrollo, en lo que respecta a su implementación en sectores industriales.

Tomemos como ejemplo el ámbito de la salud. Aunque la tecnología actual ha alcanzado niveles impresionantes, su accesibilidad sigue siendo una barrera tanto para profesionales de la salud como para pacientes. La realidad es que no todos cuentan con los recursos económicos necesarios para aprovechar estas tecnologías y servicios de vanguardia. Este desafío se vuelve aún más evidente en el campo de la fisioterapia, una de las profesiones más recientes en México [17]. Donde el área de trabajo enfocada en la rehabilitación compite directamente con el de personas escasamente preparadas dedicadas a realizar técnicas de presión en el cuerpo que brindan al paciente una sensación de bienestar instantáneo, que no requiere de tecnología innovadora y por ende son de bajo costo, ha orillado a los fisioterapeutas a inclinarse por sub-especialidades donde se atienden pacientes que requieran terapias y tratamientos sumamente especializados y/o que cuenten con los recursos para acceder a estos. Encima, hace falta contemplar que, si bien las terapias físicas pueden ser aplicadas con poca tecnología, en la mayoría de los casos el paciente requiere de una tercera persona que pueda trasladarlo para recibir la rehabilitación, ayudar y/o recordar realizar los ejercicios fuera de las instalaciones, y verificar que estos sean ejecutados adecuadamente. Al igual que muchas otras circunstancias como la incertidumbre en la duración del tratamiento y su eficiencia, son limitantes que favorecen al descenso en las terapias y la desconfianza en los profesionales.

En este caso, la integración de sensores de microondas para medir el desplazamiento angular podría representar una oportunidad transformadora. Sin embargo, para que esta innovación alcance su máximo potencial, es imperativo abordar no solo las complejidades tecnológicas sino también las barreras que podrían obstaculizar su adopción generalizada.

Lo anterior revela la necesidad de desarrollar dispositivos de bajo costo, compactos, duraderos, inalámbricos, portátiles y con bajo consumo energético que permitan adquirir y procesar la información de manera sencilla y eficaz, los cuales puedan complementarse con estrategias para mejorar la calidad de la terapia y fortalecer la confianza entre profesional-paciente. Por ello, se propone diseñar, fabricar y caracterizar un sensor de microondas que mida el posicionamiento

to angular, que favorezca su conexión al Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) e implementación en terapias físicas, como en la goniometría, concepto que se abordará más adelante.

1.2.2. Objetivo General

El objetivo general de este trabajo se enfoca en diseñar, modelar, fabricar y caracterizar un sensor de microondas capaz de identificar el posicionamiento angular, con una frecuencia central de 2.4 GHz, utilizando tecnología de microcinta. Cuyo diseño favorezca la conexión al IoT y que permita su implementación en la salud estructural, más aun en la atención médica y su aplicación en la fisioterapia.

1.2.3. Objetivos Específicos

1. Desarrollar un sensor capaz de medir el posicionamiento angular cuyo desempeño permita una comparación significativa con lo descrito en la literatura.
2. Implementar un diseño que favorezca la frecuencia de operación dentro de la banda ICM, con dimensiones reducidas.
3. Desarrollar un sensor basado en el principio de funcionamiento de los resonadores de microcinta, cuyo comportamiento sea lineal.
4. Caracterizar el dispositivo mediante el análisis estadístico de las mediciones del sensor.
5. Utilizar elementos que disminuyan el costo para el desarrollo del sensor, haciéndolo accesible y de fácil fabricación.
6. Generar un diseño que sea factible para su aplicación en la goniometría.

CAPÍTULO 2

Marco Teórico

2.1. Desarrollo de sensores de rotación

Con base en la sección 1.1 es necesario considerar ciertas características y parámetros para el desarrollo de sensores de rotación, de los cuales se destacan las siguientes categorías:

1. Características y parámetros del sensor

La frecuencia de operación, el rango dinámico, la sensibilidad y linealidad son algunos de los parámetros más utilizados para comparar de manera cuantitativa la caracterización de los sensores, tal como se describe en [8], [19] y [20]. Más aun, los parámetros de sensibilidad y linealidad facilitan la comprensión del comportamiento de acuerdo con la relación que existe entre los parámetros de medición establecidos. Sus definiciones pueden variar dependiendo del autor.

2. Parámetros de Medición

Su objetivo principal es registrar el movimiento angular, aunque también permiten obtener otras mediciones como la proximidad y/o la velocidad. Además pueden contribuir en la detección de la dirección del giro.

La frecuencia de resonancia, la profundidad del pico, el ancho de banda (BW), así como el valor absoluto y la fase de los parámetros S son los parámetros que se reportan en la literatura con mayor frecuencia.

3. Configuración del sensor

Se refiere a la combinación de tecnologías que utiliza el sensor para detectar el movimiento angular, y en caso de ser necesario la proximidad, la velocidad y/o la detección de giro.

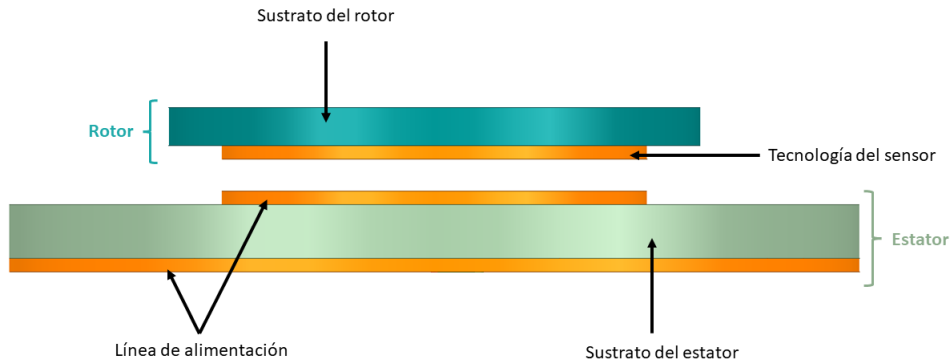


Figura 2.1: Componentes principales de los sensores de rotación.

Los sensores de rotación de microcinta están formados por dos componentes principales. Una parte estática la cual se denomina **estator**, generalmente esta diseñado a base de líneas de transmisión que permiten alimentar al sensor y transmitir información. Por otro lado, tenemos el **rotor** donde se encuentra el diseño de la tecnología del sensor (el cual puede o no ser simétrico), tales como SRR, CSRR, RCSRR, MCSRR, TSI, ELC, SGS-SRRs, entre otros. En la mayoría de los casos esta es la parte móvil del sensor. En la figura 2.1 se muestra la composición básica de los sensores de rotación, mientras la figura 2.2 presentan algunos de los diseños en los sensores de rotación de la tabla 1.1.

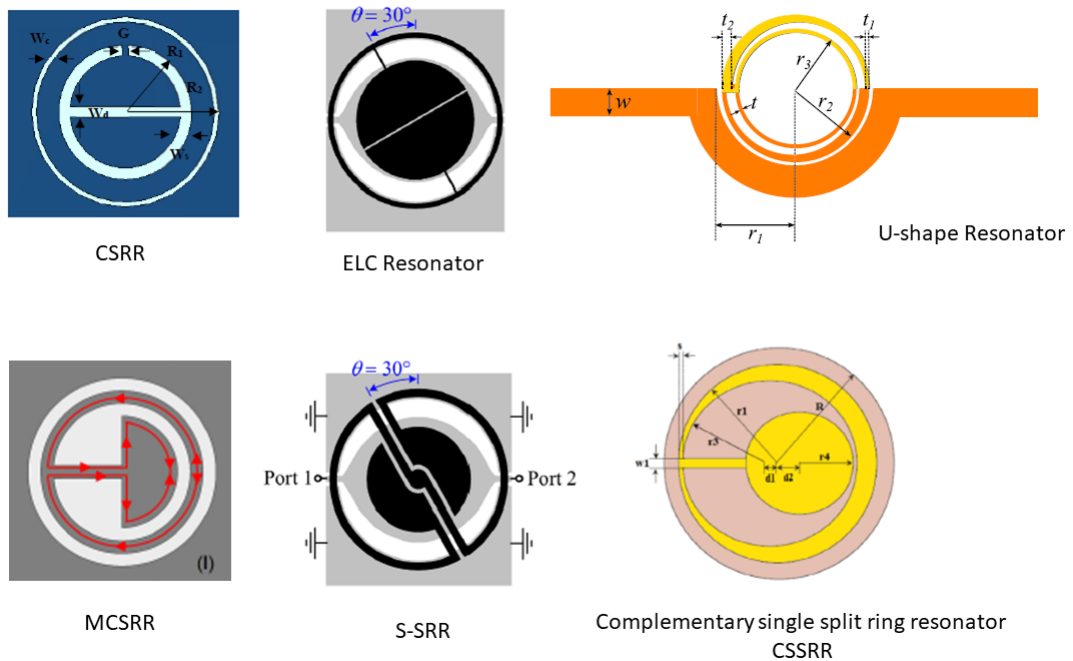


Figura 2.2: Ejemplos en el diseño de sensores de rotación.

2.1.1. Definiciones básicas en el desarrollo de sensores de rotación

Los sensores discutidos con anterioridad se basan en el principio de funcionamiento de las líneas de microcinta por lo que comenzaremos definiéndolas.

Como Joan Buitrago lo menciona en [21], las líneas de transmisión (TL, por sus siglas en inglés) son elementos que permiten transmitir la energía de un punto a otro, que constan de un conductor y un dieléctrico. El modelo físico depende del tipo de onda que se desee transmitir; por ejemplo, las **líneas de microcinta (ML)** son utilizadas para circuitos de microondas, i.e., transmiten ondas localizadas en un rango de frecuencias de 300 MHz a 300 GHz, y dependiendo de su modelo pueden llegar a medir parámetros como desplazamiento, discontinuidades, velocidad, entre otros.

Tal es el caso de los resonadores de microcinta, que son utilizados como componentes de señal o como acopladores para filtros u otros circuitos [22] (más adelante se abordará con mayor profundidad este tema). Los cuales se desarrollan en base a las necesidades particulares de la aplicación; por ejemplo, para diseñar un resonador de microcinta en forma de anillo (MRR) primero se necesitan establecer las características del sustrato y la frecuencia de operación para posteriormente calcular las dimensiones de los componentes tal como se describe en [23].

Otro tipo de líneas de transmisión planares son las **Slotline** que consisten en una ranura delgada en el plano de tierra a un lado del sustrato, aquí la impedancia característica es controlada por el ancho de la ranura en la línea.

Las **guías de ondas coplanares (CPW)** son similares a las slotlines, puede ser vista como una ranura con un tercer conductor centrado, por lo que son particularmente útiles para fabricar circuitos activos [24].

Los sensores de desplazamiento utilizan como característica la *frecuencia* para establecer sus dimensiones (como en los anillos resonadores), a esta la denominamos **frecuencia de operación (f_o)**, así mientras mayor sea la frecuencia seleccionada menor serán las dimensiones del sensor. Otra de sus aplicaciones es utilizar la frecuencia como parámetro de medición; es decir, la **frecuencia de resonancia (f_r)**, esta permite la medición del desplazamiento de acuerdo con el aumento de longitud eléctrica efectiva¹ [25].

¹La longitud eléctrica es la relación entre la longitud física de la línea de transmisión y la longitud de onda de la

En contraste, algunos autores prefieren fijar la frecuencia y con base en las diferencias en la magnitud del parámetro S seleccionado describir el comportamiento del sensor; es decir, medir la variación de la **profundidad del pico** (\rightarrow).

El **rango dinámico** es el límite de grados que tiene un sensor en el que se garantiza su correcto funcionamiento. Este parámetro puede incrementar debido a varias consideraciones, por ejemplo, eligiendo una buena configuración del rotor y el estator, reduciendo los planos de simetría o con anillos giratorios independientes en el rotor [8].

De acuerdo con lo estipulado en la categoría **I**, la *sensibilidad* y la *linealidad* son los parámetros que facilitan la comprensión del comportamiento del sensor.

Una de las ventajas de presentar linealidad en un sensor es la correcta caracterización y fácil procesamiento de los datos, ya que en la literatura este concepto está muy bien estudiado, por ende, será iterativo con el usuario, agilizando su comprensión y adaptación para manejar el dispositivo.

Los *parámetros S* provienen de la teoría de redes de dos puertos [21], estos permiten describir el rendimiento de una red y sirven para el análisis y diseño de redes de radiofrecuencia (RF) principalmente en microondas. De estos se derivan términos importantes como lo son las pérdidas por inserción, pérdidas por reflexión, acoplamiento, coeficientes de transmisión, entre otros [11]. El **parámetro S_{11}** cuantifica las pérdidas por retorno, y el **parámetro S_{21}** mide la ganancia o pérdida entre los puertos de entrada y salida. Estos parámetros se utilizan para medir la respuesta del sensor ante los cambios de ángulo, obteniendo por lo general la **magnitud**. Sin embargo, en algunas ocasiones también es posible medir la **fase** para obtener más información, tal como se muestra en [10], o con el fin de establecer nuevas técnicas de medición como en [5]. Así mismo pueden analizarse contemplando la relación que existe entre ellos, por ejemplo, viniendo de la **diferencia de magnitud** (ΔM) o la **diferencia de fase** (ΔF).

El **ancho de banda (BW)** tiene un objetivo similar al de la fase de los parámetros S , dependiendo del sensor este puede brindar más información de su comportamiento.

onda electromagnética transmitida en la línea [25].

El **número de puertos** contribuye en la compatibilidad del sensor con la implementación de tecnologías IoT, así como a su fácil adaptación con equipos de medición como el VNA. Finalmente, se ha descubierto que la **simetría geométrica** en el diseño del sensor es un parámetro relacionado con el acoplamiento de resonancias, lo que puede contribuir a una limitación en el rango dinámico [4], [5].

2.2. Resonadores de Microcinta

Los resonadores de microcinta desempeñan un papel fundamental en aplicaciones de microondas, desde filtros hasta amplificadores sintonizados, brindando versatilidad y eficiencia en el manejo de señales. Esta sección ofrece un vistazo integral a su funcionamiento.

La operación de estos resonadores, si bien comparte similitudes con la teoría de circuitos tradicional, se distingue por el uso de elementos distribuidos. Se utilizan secciones de líneas de transmisión con diversas longitudes y terminaciones para formar resonadores [24]. Su esencia radica en la capacidad que tienen para operar como transformadores de impedancia.

Cuando la frecuencia de la señal es exactamente $1/2$ longitud de onda (λ) y ésta coincide con el largo de la línea, la impedancia de carga se presenta tal cual es. Por ende en cada terminación de la línea se tienen puntos de voltaje máximo y corriente mínima [26].

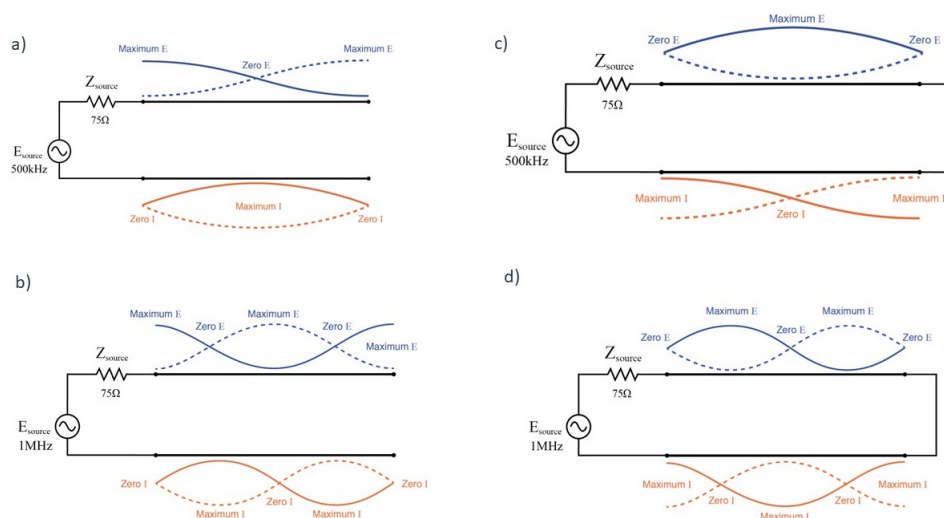


Figura 2.3: Líneas de transmisión operando a frecuencias de $1/2$ y 1 longitudes de onda en a) y c) circuito abierto y b) y c) corto circuito [40].

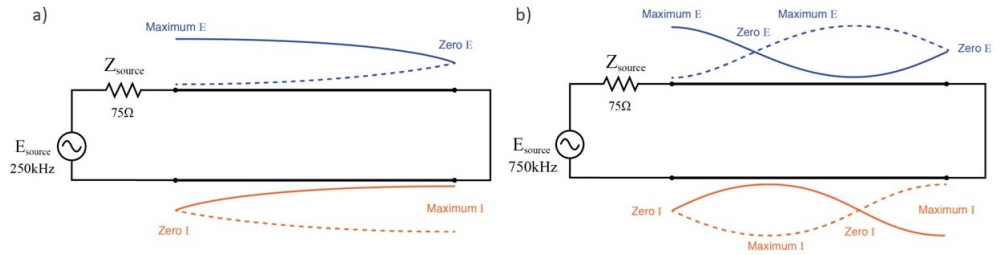


Figura 2.4: Líneas de transmisión con operando a frecuencias de a) $1/4$ de longitud de onda en corto circuito y b) $3/4$ de longitud de onda en circuito abierto [40].

Mientras tanto, cuando la frecuencia de la señal es igual a $\lambda/4$ o múltiplos, la impedancia se transforma, convirtiendo circuitos abiertos en cortocircuitos y viceversa [26]. Este fenómeno es esencial para la coincidencia de impedancias en aplicaciones prácticas.

Un ejemplo ilustrativo es el análisis de los resonadores lineales de microcinta, los cuales se fundamentan en los circuitos RLC concentrados. En este cada modo resonante se asocia con valores RLC específicos, y la excitación del resonador se describe mediante un coeficiente de acoplamiento κ . Este enfoque permite relacionar el factor de calidad intrínseco Q_{in} con el factor de calidad medido Q_L mediante la fórmula $Q_{in} = (1 + \kappa)Q_L$ [27].

Así pues, al trabajar en un rango de frecuencias cercano a la frecuencia de resonancia los resonadores pueden modelarse con un circuito equivalente en serie o paralelo [26]. La figura 2.5 presenta las propiedades de cada caso.

A pesar de su utilidad, las aproximaciones actuales, aunque útiles, han llevado a fórmulas de diseño imprecisas, lo que ha obligado a depender de métodos de prueba y error. Aunque se han intentado métodos más rigurosos, basados en la aproximación cuasiestática, estos aún se enfrentan a limitaciones, especialmente al momento de incrementar la frecuencia [28].

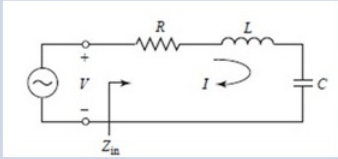
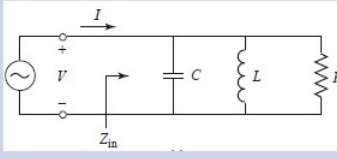
	Resonador en Serie	Resonador en Paralelo
Circuito equivalente		
Impedancia/Admitancia de entrada	$Z_{in} = R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C}$	$Y_{in} = \frac{1}{R} + j\omega C - j\frac{1}{\omega L}$
Frecuencia de resonancia	$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$
Q sin carga	$Q_0 = \frac{\omega_0 L}{R}$	$Q_0 = \frac{R}{\omega_0 L}$
Q externo	$Q_e = \frac{\omega_0 L}{R_L}$	$Q_e = \frac{\omega_0 R_L}{L}$

Figura 2.5: Propiedades de resonadores en serie y paralelo [6].

2.3. Medición de ángulos en el área de la salud

2.3.1. Goniometría

La «goniometría» es la técnica de medición de los ángulos creados por la intersección de los ejes longitudinales de los huesos a nivel de las articulaciones [29], dependiendo del área de interés es la aplicación que esta puede tener. Por ejemplo cuando un paciente sufre de latigazo cervical, la lesión puede ser referida por el profesional de la salud al área de rehabilitación, donde la goniometría se utilizaría para establecer un pronóstico, determinar el punto de inicio del tratamiento, evaluar su progresión en el tiempo, modificar el tratamiento o darle un punto final, así como motivar al paciente y evaluar la secuela.

2.3.2. Instrumentos de medición

En la tabla 2.1 se presentan los diferentes instrumentos utilizados en la goniometría para realizar mediciones [29]. Además, la figura 2.6 muestra algunas ilustraciones e imágenes de estos [30]-[34].



Figura 2.6: Tipos de instrumentos de medición.

Nombre	Descripción
Goniómetro Universal	Principal instrumento que se utiliza para medir ángulos, es económico, portátil y fácil de utilizar. Se compone de un cuerpo (que es un transportador) y dos brazos, uno fijo y el otro móvil. Suele estar fabricado de material plástico transparente y se presenta en distintos tamaños.
Electrogoniómetro	Son sofisticados instrumentos electrónicos, de alto costo, que utilizan electrodos a nivel del eje, del brazo proximal y distal, y que registran la medición a través de un software en la pantalla de una computadora. Se utilizan fundamentalmente para investigación.
Inclinómetro	Este instrumento se utiliza cuando no es posible aplicar correctamente el goniómetro, utiliza la fuerza de gravedad como punto de referencia para su calibración. De esta manera, la posición inicial de medición no depende de la apreciación visual. Existen dos tipos: los mecánicos y los electrónicos o electroinclinómetros.
Ojímetro	También llamada <i>estimación visual</i> , le permite al examinador tener una primera impresión del grado de movilidad de la articulación que tiene que medir. Sin embargo, debido a que se trata de una ponderación imprecisa y altamente subjetiva, no debe ser utilizada como método de evaluación.

Tabla 2.1: Definición de los instrumentos de medición en la goniometría.

En México, debido a la falta de acceso a herramientas cuantitativas y precisas, que se derivan de los altos costos, generalmente se utilizan los goniómetros universales como la herramienta principal. Pese a los grandes beneficios que este instrumento proporciona, uno de sus mayores inconvenientes es la rigidez y la dificultad de posicionamiento en el paciente, ya que en su mayoría la estabilidad del instrumento depende del profesional que este realizando la prueba. Provocando que los datos obtenidos con esta herramienta sean susceptibles a mediciones imprecisas que varían de persona en persona.

2.3.3. Selección del ángulo de medición

En [35], Marques presenta 3 tablas donde se condensa la información sobre las articulaciones, los movimientos medibles en la goniometría y sus respectivos rangos de movimiento (véase la figura 2.7).

Con el propósito de atender el objetivo 6, y considerando que el diseño del sensor propuesto es completamente novedoso y persigue alcanzar un amplio rango dinámico, se seleccionó la articulación de la rodilla (Joelho) como referencia primordial para su creación, ya que exhibe un único grado de libertad; es decir, un solo tipo de movimiento, con un rango de movimiento considerado $[0^{\circ}-140^{\circ}]$.

1 Ángulos de las Articulaciones de los Miembros Superiores			2 Ángulos de las Articulaciones de los Miembros Inferiores				
Articulación	Movimiento	Grado de movimiento	Articulación	Movimiento	Grado de movimiento		
Hombro	Flexión	0 – 180	Cadera	Flexión	0 – 125		
	Extensión	0 – 45		Extensión	0 – 10		
	Aducción	0 – 40		Aducción	0 – 15		
	Abducción	0 – 180		Abducción	0 – 45		
	Rotación Medial	0 – 90		Rotación Medial	0 – 45		
Codo	Rotación Lateral	0 – 90	Rotación Lateral	0 – 45	Rodilla	Flexión	0 – 140
	Flexión	0 – 145	Tobillo	Flexión dorsal		0 – 20	
Radio-cubital	Extensión	145 – 0	Flexión planar	0 – 45	Articulaciones Metacarpofalángicas	Abducción	0 – 20
	Pronación	0 – 90	Abducción	0 – 20		Flexión de 1er dedo	0 – 45
Muñeca	Supinación	0 – 90	Aducción	0 – 40		2do a 5to dedo	0 – 40
	Flexión	0 – 90	Articulaciones Interfalángicas	Extensión de 1er dedo		0 – 90	
	Extensión	0 – 70		2do a 5to dedo	0 – 45		
	Aducción	0 – 45	Articulaciones Interfalángicas	Flexión (I) – 1er dedo	0 – 90		
Abducción	0 – 20	(IP) – 2do a 5to dedo		0 – 35			
Artrosis del pulgar	Flexión	0 – 15		(ID) – 2do a 5to dedo	0 – 60		
Articulaciones Metacarpofalángicas	Abducción	0 – 70	3 Ángulos de las Articulaciones de la Columna Vertebral				
	Extensión	0 – 70	Movimiento	Vértebras Cervicales	Vértebras Lumbar		
	Flexión	0 – 90	Flexión	0 – 65°	0 – 95°		
	Extensión	0 – 30	Extensión	0 – 50°	0 – 35°		
Articulaciones Interfalángicas	Abducción	0 – 20	Flexión lateral	0 – 40°	0 – 40°		
	Aducción	0 – 20	Rotación	0 – 55°	0 – 35°		
	Flexión	0 – 110					
	Extensión	0 – 10					

Figura 2.7: Amplitud normal de los desplazamientos angulares para las articulaciones [3].

2.4. Método de medición

Cuando se requiere adquirir la señal de un dispositivo en altas frecuencias podemos utilizar diferentes herramientas/instrumentos, llamados analizadores, los cuales permiten realizar mediciones de acuerdo con el tipo de parámetro requerido; por ejemplo, el analizador de espectro es un dispositivo de prueba que mide la potencia de la señal (conocida o desconocida) en un rango de frecuencias determinado. Esta herramienta proporciona información detallada del comportamiento de la relación señal a ruido (SNR), la fase y la modulación de la onda. En contraste el analizar de red se utilizan para probar las especificaciones de los componentes de redes eléctricas (amplificadores, filtros, antenas, cables, mezcladores, etc) y verificar las simulaciones de diseño para asegurarse de que los sistemas y sus componentes funcionen correctamente juntos [24].

Para atender el objetivo 4, es necesario realizar mediciones que permitan caracterizar el sensor. Así pues el instrumento de medición seleccionado para esta labor es el analizador de redes vectoriales, el cual se describe con más detalle a continuación.

2.4.1. Analizador de Redes Vectoriales (VNA)

También conocido como Vector Network Analyzer o VNA por sus siglas en inglés, es un instrumento de prueba que mide los parámetros de una red eléctrica, valida de forma rápida y precisa el rendimiento de componentes y dispositivos de RF. Además de las aplicaciones mencionadas anteriormente, los VNA en ocasiones se suelen utilizar en operaciones de campo para verificar y solucionar problemas en sistemas de microondas y RF desplegados.

La cantidad de puertos y rutas, rango de frecuencias, el rango dinámico ², el trace noise ³ y velocidad de medición⁴ son algunos de los aspectos básicos del los VNA, una característica única es que contiene tanto una fuente, que se utiliza para generar una señal de estímulo conocida, como un conjunto de receptores, que se utilizan para determinar los cambios en este estímulo causados por el dispositivo bajo prueba (DUT).

²Es el rango de atenuación medible de máximo a mínimo para un rango de frecuencia específico: atenuación máxima del DUT sean al menos de 3 a 6 dB menos que la especificación del rango dinámico del VNA.

³Mide cuánto ruido aleatorio genera el VNA y pasa a la medición [mildB (0,001 dB)]

⁴Se refiere al tiempo que lleva realizar un solo barrido o medición.

La calibración y el tipo de señales que se pueden medir en este instrumento dependerá del número de puertos y la cantidad de rutas con las que este equipado. Por ejemplo para dispositivos de un solo puerto únicamente se pueden medir las señales reflejadas, en un dispositivo de 2 puertos y una ruta se pueden medir tanto las señales la señal reflejada como la transmitida (S_{11} y S_{21}), sin embargo, el DUT debe invertirse físicamente para medir los parámetros inversos (S_{22} y S_{12}); este procedimiento se evita si el dispositivo cuenta con 2 puertos y 2 rutas.

2.5. Análisis Estadístico

Al tratar de interpretar los resultados de un estudio se pueden presentar errores respecto a la validez de los resultados obtenidos, especialmente en el análisis cuantitativo. Esto destaca la importancia en la formulación precisa de hipótesis, así como en la correcta selección en el valor de probabilidad⁵. Tal como se menciona en [36] dependiendo del contexto de trabajo es que se puede realizar este proceso.

A continuación se definirán las pruebas estadísticas seleccionadas para interpretar de manera adecuada los resultados medidos del sensor propuesto. Y con el propósito de mitigar la subjetividad en el análisis de los datos, tomando a consideración la posible aplicación del sensor, se establece un nivel de significancia $\alpha= 0.05$. Esto implica un intervalo de confianza en las pruebas de un 95 %.

2.5.1. Prueba T de student

La prueba estadística T de student, también conocida como la prueba T de dos muestras independientes, es utilizada para estimar si las medias de dos grupos con distribuciones normales son significativamente diferentes. En otras palabras, con la prueba T de muestras independientes es posible determinar si los grupos de estudio provienen de dos distintas poblaciones [37]. Para esta prueba se deben de tomar en cuenta únicamente una variable continua de distribución normal y una varianza aproximadamente igual entre ambos grupos de prueba [38].

2.5.2. Análisis de varianza (ANOVA)

Cuando se aplica una prueba de análisis de varianza (ANOVA) se comparan más de dos grupos independientes con distribución normal, a diferencia de la prueba t de muestras independientes

⁵También conocido como nivel de significancia α . Establece el límite de la región de rechazo.

donde se analizan únicamente dos grupos [37]. Con esta prueba es posible estimar si dos grupos pueden ser provenientes de una misma población, o si todos los grupos de estudio son distintos entre sí [38].

2.5.3. Coeficiente de correlación

. El coeficiente de correlación de Pearson r proporciona información sobre la presencia o ausencia de una relación lineal entre dos variables. Si existe relación entonces es posible determinar dos características: el sentido y cercanía [39]. El valor de r puede situarse entre -1 y $+1$. La prueba de significación se hace con la hipótesis nula de que no hay asociación, $r = 0$.

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (2.5.1)$$

Donde x y y son las variables para las que se desea calcular la correlación y \bar{x} y \bar{y} sus respectivas medias.

Antes de decidir la aplicabilidad de una correlación lineal se debe siempre graficar en una “nube de puntos” la relación entre las dos variables [40]. En resumen r es un instrumento estadístico que mide el grado de asociación lineal entre dos variables.

2.5.4. Coeficiente de determinación cuadrado (R^2)

Al realizar una regresión lineal, el coeficiente R^2 representa la variación de la variable aleatoria y_i que trata de ser relacionada con x_i . Esta medida da información sobre que tan bien ajustados son los datos a la recta generada por la regresión y si el modelo puede explicar la naturaleza del fenómeno estudiado [41].

$$R^2 = 1 - \frac{\text{Varianza no explicada}}{\text{Varianza total}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.5.2)$$

2.5.5. Error cuadrático medio (MSE)

El error cuadrático medio (MSE) es una métrica que determina el promedio de las diferencias entre los valores estimados con respecto a las predicciones de un modelo. El MSE se define matemáticamente por la siguiente expresión:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{real} - y_{pred})^2 \quad (2.5.3)$$

Donde y_{real} es la i -ésima estimación, y_{pred} la i -ésima predicción y n el numero total de estimaciones [41].

2.5.6. Coeficiente de variación (CV)

El coeficiente de variación es una medida de dispersión utilizada para determinar si al calcular la desviación estándar, esta varía demasiado respecto a la media poblacional [41]. La expresión matemática está dada por:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (2.5.4)$$

Donde σ corresponde a la desviación estándar y \bar{x} a la media poblacional .

El CV proporciona una manera de comparar la relativa variabilidad entre estas dos distribuciones sin verse afectado por las diferencias en las escalas numéricas. También sirve para interpretar la dispersión de los datos en relación con la media. Un CV bajo indica que la variabilidad es pequeña en relación con la media, mientras que un CV alto indica una variabilidad significativa en relación con la media.

CAPÍTULO 3

Desarrollo Experimental

Como ya se mencionó, este trabajo tiene como objetivo desarrollar un sensor de microondas capaz de medir el posicionamiento angular, considerando aplicaciones practicas como la goniometría, que facilite la conexión con el IoT y sea accesible. Para ello, se realizaron los siguientes pasos.

- Paso 1: Selección del sustrato.
- Paso 2: Diseño del estator y rotor.
- Paso 3: Simulación del sensor.
- Paso 4: Fabricación del sensor.
- Paso 5: Propuesta de la metodología experimental.
- Paso 6: Análisis estadístico.

A continuación se presenta la metodología detallada para el desarrollo del sensor propuesto. En la sección 3.1 se describe el diseño, la simulación y la fabricación del sensor, mientras en la sección 3.2 se mencionan los pasos para su caracterización.

3.1. Sensor propuesto

De acuerdo con lo descrito en la categoría III de la sección 2.1, el sensor propuesto esta compuesto por una parte fija y una móvil. Para el diseño de la parte fija (el estator), se tomo como referencia el principio de funcionamiento de un resonador lineal de microcinta; sin embargo,

este modelo fue modificado en su geometría para tomar una forma circular; así en conjunto con el parche móvil (i.e., el rotor), se adquiere la señal cuando existe un movimiento angular.

3.1.1. Diseño del Prototipo

3.1.1.1. Selección del dieléctrico

Se optó por utilizar una placa de material FR4 como dieléctrico, de doble cara para el estator y de una capa para el rotor. La tabla 3.1 muestra las propiedades consideradas para el diseño y la simulación del dieléctrico.

Substrato	FR4
ϵ_r	4.40
$\tan(\delta)$	0.02
h	1.60 mm
W_s	21.64 mm
L_s	28.32 mm

Tabla 3.1: Propiedades del dieléctrico.

3.1.1.2. Estator

Primero se eligió la frecuencia de operación basándose en la aplicación deseada y considerando la comodidad del paciente. Ésta fue seleccionada en 2.4 GHz, ya que se encuentra dentro de las bandas de frecuencias designadas para aplicaciones ICM [16], como se verá a continuación esto permite que las dimensiones sean compactas, lo que facilitará su aplicación en terapias físicas.

Luego se calcularon las dimensiones para un resonador lineal en corto circuito de $\lambda/4$ con base en [24] y se utilizó el programa HFSS para ratificar su funcionamiento. Donde $\lambda \approx 68.49$ mm, el ancho del resonador $w = 3$ mm y la longitud del resonador $L = \lambda/4 \approx 17$ mm, además se eligió al cobre como material conductor con un espesor t de 1.4 mil (≈ 0.03556 mm) y permeabilidad relativa $\epsilon_r = 1$.

Entonces, con ayuda de la ecuación 3.1.1 se obtuvo el tamaño del radio que permitió darle forma circular al resonador. El ángulo de apertura " θ " se eligió de $\frac{\pi}{2}$ con el objetivo de obtener un rango dinámico amplio.

$$L = \theta r \quad (3.1.1)$$

$$\therefore r = L/\theta$$

donde L representa la longitud de arco de un segmento AB [mm],
 θ el ángulo de apertura [rad], y r el radio del círculo [mm].

Dada la nueva forma del resonador, las dimensiones del plano de tierra se ajustaron con las ecuaciones para el diseño de resonadores circulares [42]:

$$L_s = L_f + 2(r_o + g) \quad (3.1.2)$$

$$W_s = 2 \times 2r_{int} \quad (3.1.3)$$

$$r_o = r_{int} + \frac{w}{2} \quad (3.1.4)$$

$$r_i = r_{int} - \frac{w}{2} \quad (3.1.5)$$

donde (3.1.2) se obtiene al contemplar una línea de alimentación en el resonador.

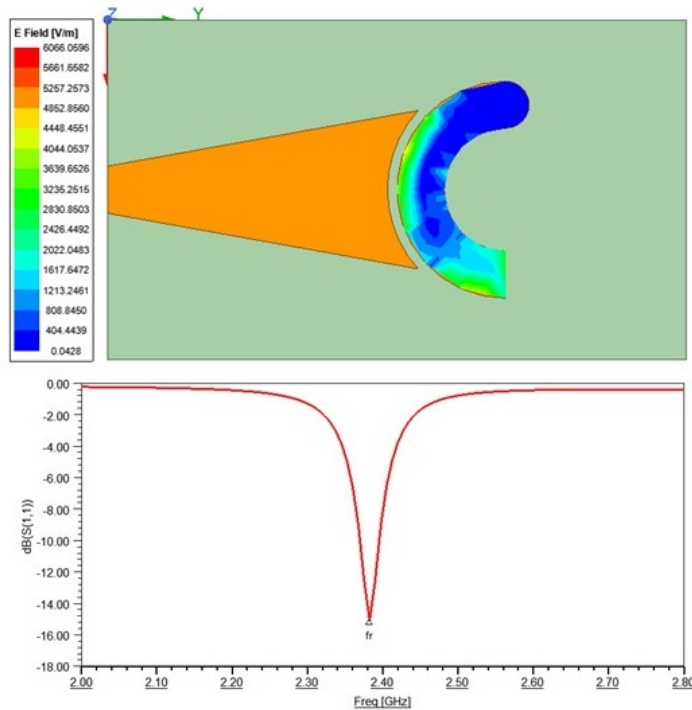


Figura 3.1: Resonador circular ($L_f = \lambda/4$, $w_f = 3\text{mm}$).

También se optó por implementar una línea de alimentación tipo *traped* para anillos resonadores circulares, con el objetivo de mejorar el acoplamiento. Las dimensiones para la línea de alimentación fueron calculadas de acuerdo con [43], donde la longitud $L_f = \lambda/4$, el ancho $w_f = w$ y el ángulo de apertura $\theta_a = 90$. Al igual que con el resonador lineal, este fue evaluado en el simulador de onda completa. El resultado (véase la figura 3.1) demostró que el cambio en la geometría no afecta el funcionamiento del resonador; sin embargo, fueron necesarios algunos ajustes para mejorarlo. Entre ellos se consideró $L_f = \lambda/8$ para minimizar las pérdidas por retorno, luego se añadió un agujero en el centro del resonador para adaptar el parche giratorio, también se tomaron en cuenta las posibles interferencias entre la línea de alimentación y el conector SMA por lo que se redujo w_f a 1.5 mm. La figura 3.2 presenta el diseño final.

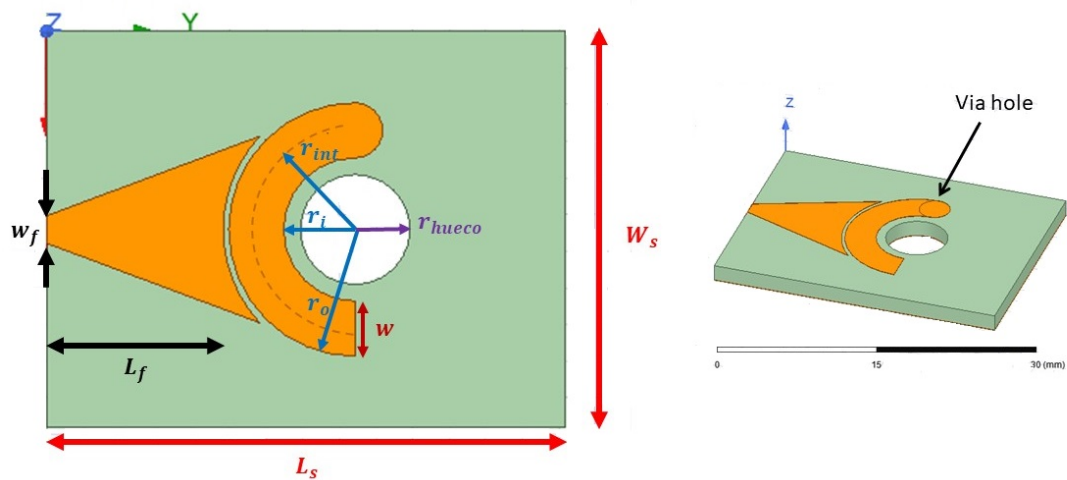


Figura 3.2: Diseño del estator.

3.1.1.3. Rotor

Una vez obtenido el resonador se procedió a diseñar el parche móvil, para ello se tomaron las medidas del resonador circular w , r_{int} , r_o , r_i , y r_{hueco} , éste también tiene material conductor de cobre con espesor t . En contraste con la parte fija, la forma del dieléctrico es circular pero mantiene las dimensiones del resonador, tal como se muestra en la figura 3.3 incisos a) y b), asimismo se eliminó la sección del parche de cobre que pudiera interferir con el corto circuito del estator (véase el inciso c).

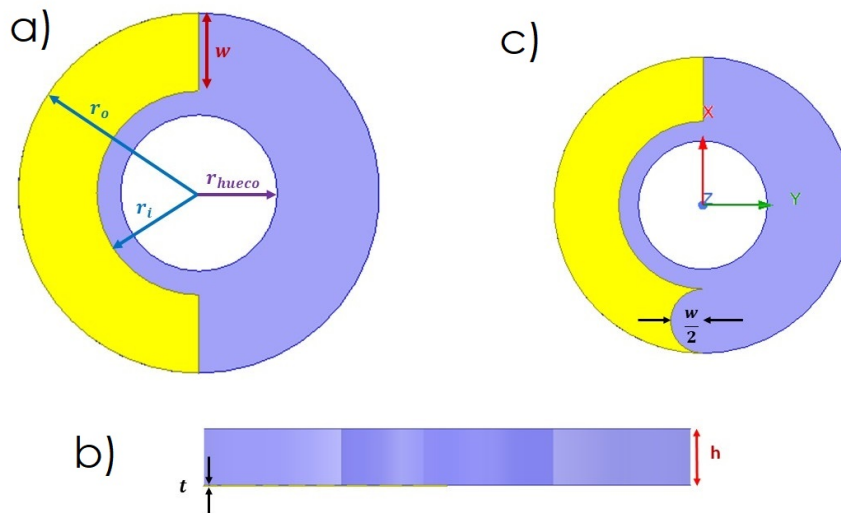


Figura 3.3: Diseño del rotor.

Después de diseñar las dos partes del sensor se procedió a colocar el estator encima del rotor, de tal manera que las partes de cobre tanto del resonador como del parche estén en contacto (véase la figura 3.4). Esta posición se define como el «punto inicial o de referencia». Para producir el desplazamiento del sensor se estableció que el sentido de giro es en contra de las manecillas del reloj (véase la figura 3.5). Luego se procedió a simular el desplazamiento del rotor para determinar el rango dinámico del sensor. Derivado de la geometría del sensor se estableció un rango dinámico de 0° a 160° .

3.1.2. Fabricación del sensor

El proceso de fabricación se realizó mediante litografía casera, implementando el método de máscara de vinilo resistente al ácido. Se requirieron de 2 diferentes placas FR4 con espesor de 1.6mm ambas con doble revestimiento de cobre (placa 1: marca IIVVERR y placa 2: marca desconocida) para la fabricación del estator y una placa FR4 con espesor de 1.6mm con una capa de cobre para el rotor.

Se usaron conectores SMA hembra de latón tipo Jack para montaje en PCB de 50Ω de la marca YWBL-WH. Finalmente, se utilizó alambre de estaño/plomo para soldar los conectores SMA al sustrato, así como para crear el corto circuito entre el plano de tierra (GND) y el resonador.

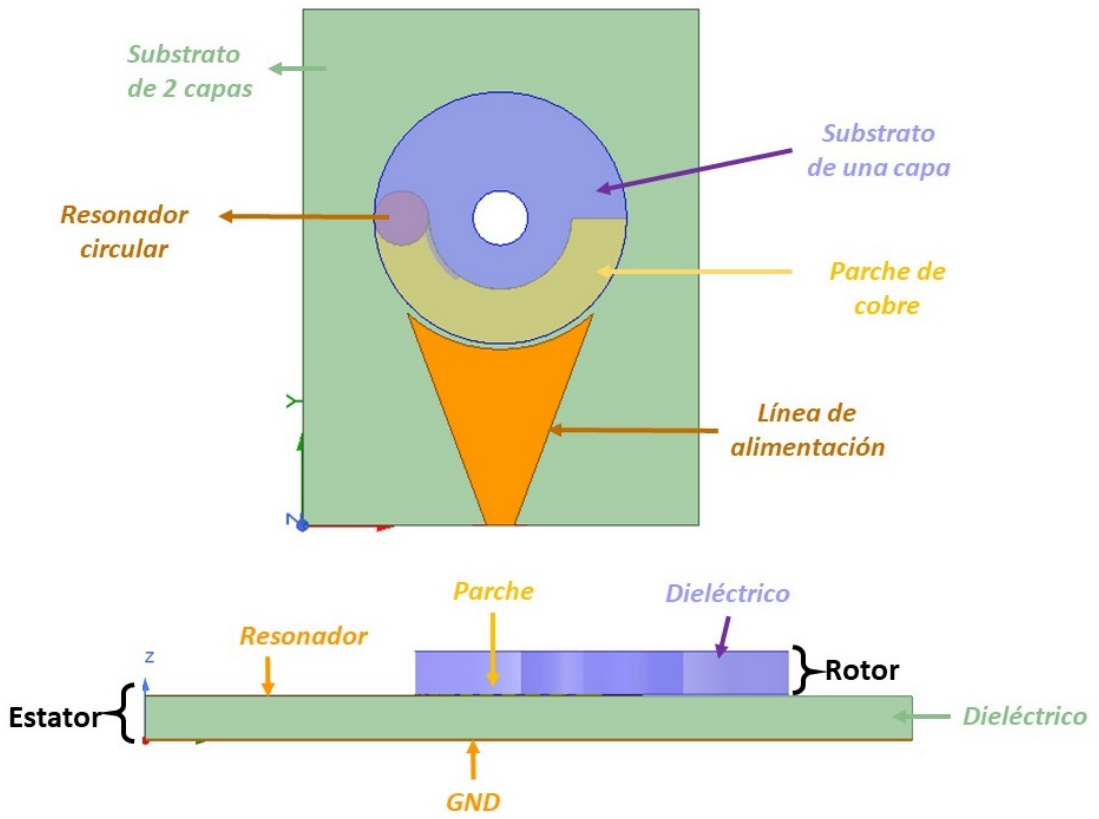


Figura 3.4: Prototipo del sensor.

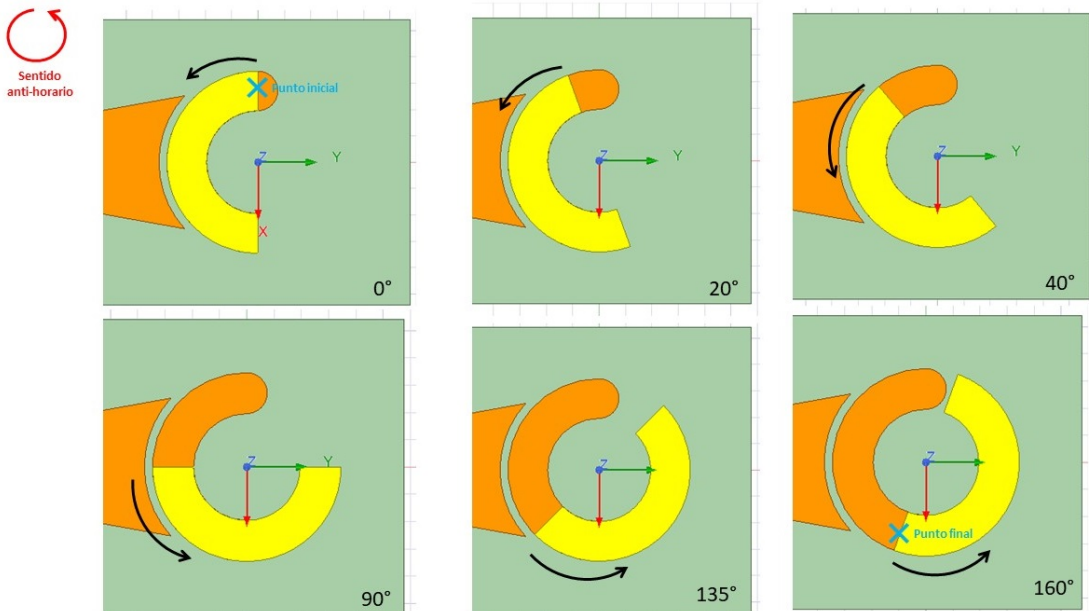


Figura 3.5: Sentido del giro para el desplazamiento del rotor.

3.2. Caracterización del sensor

En este trabajo se consideran 8 criterios para validar la caracterización del sensor, estos son:

1. **Repetibilidad:** se refiere a la capacidad del sensor para producir mediciones consistentes cuando se miden los mismos ángulos en condiciones similares.
2. **Reproducibilidad:** lo mismo que la repetibilidad pero bajo diferentes condiciones o por diferentes operadores.
3. **Precisión:** se refiere a la cercanía de las mediciones del sensor a un valor de referencia o valor verdadero.
4. **Exactitud:** se refiere a la veracidad de las mediciones del sensor en relación con un valor de referencia.
5. **Sensibilidad:** se refiere a la capacidad del sensor para detectar cambios en la magnitud de la variable que está midiendo (i.e., el ángulo θ).
6. **Linealidad:** se refiere a qué tan bien la respuesta del sensor se ajusta a una línea recta.
7. **Estabilidad a lo largo del tiempo:** sirve para verificar la estabilidad del sensor en diferentes intervalos del tiempo.
8. **Comparación con otros sensores:** se comparan las características más relevantes con sensores de referencia o comerciales para rectificar que el sensor propuesto sea competente.

Con base en lo anterior, la tabla 3.2 muestra las pruebas estadísticas seleccionadas para los criterios 1 al 7. Dado que el criterio 8 se evaluara por medio de una tabla comparativa, éste se contempla a parte.

3.2.1. Metodología experimental

Para lograr la caracterización del sensor se utilizó un analizador de red tipo VNA de la marca Keysight, modelo N9928A, con un barrido de 100 MHz a 2.5 GHz y 401 puntos de muestreo. Al igual que en [44] se creó una carcasa que además de unir la estructura, permitir el aislamiento eléctrico y controlar el desplazamiento del sensor, sirve como método de comparación, ya que en la parte superior de éste se colocaron marcas de referencia:

Criterio	Prueba estadística
Repetibilidad y Reporducibilidad	T de student y/o ANOVA
Exactitud	Coefficiente de correlación
Precisión	RMSE
Sensibilidad y linealidad	Regresión lineal y R^2
Estabilidad en el tiempo	CV

Tabla 3.2: Pruebas estadísticas para la caracterización del sensor

- cada 10° en un rango de [0°, 180°] (líneas largas), y
- cada 5° en un rango de [0°, 100°] (líneas medianas).

La carcasa fue diseñada en el software AutoCAD y fabricada en una impresora 3D de la marca FLASHFORGUE modelo Finder con material PLA al 10%. Esta conformada por 3 partes: a) la base, b) la tapa y c) el adaptador (véase la figura 3.6).

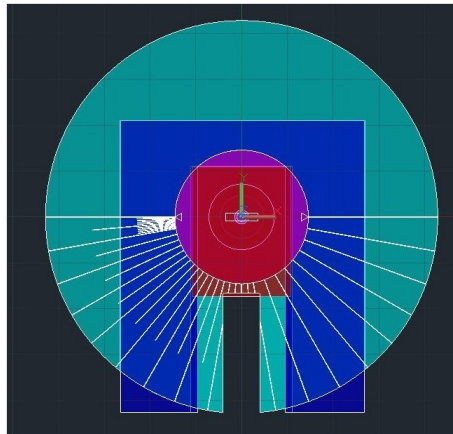


Figura 3.6: Carcasa del sensor.

Con el objetivo de cumplir con los criterios, se efectuaron 3 experimentos para la recolección de datos utilizando ambas placas. En total, se obtuvieron 6 muestras por cada ángulo medido, las primeras 5 muestras (M1, M2, M3, M4 y M5) están constituidas por 5 mediciones cada una, en tanto que la ultima muestra (M6) cuenta con 10 mediciones.

Cada experimento fue realizado consecutivamente, bajo el mismo ambiente pero en diferentes periodos de tiempo, y siempre como primer paso se procedió a la calibración utilizando el sistema de los 3 estándares SOL, tal como se describe en [45]. Se realizaron varios desplazamientos

desde la posición inicial 0° hasta la posición final 160° en incrementos de 10° , a continuación se describe cada uno.

3.2.1.1. Experimento 1

Las primeras muestras M1 y M2 se extrajeron de la placa 1. Para ello, el sensor se colocaba en la posición inicial, luego este se desplazaba hasta la posición deseada, se capturaba la respuesta en frecuencia y se regresaba a la posición inicial. Estos pasos se repetían hasta obtener 5 mediciones, finalmente se incrementaba la posición angular hasta llegar a 160° . Una vez capturada la primera muestra se repitió el proceso para la segunda muestra.

Para la recolección de datos correspondientes a la posición 0° , se colocaba el sensor en una posición inicial alternada entre 160° , 170° o 180° , y se procedía con los pasos ya mencionados.

3.2.1.2. Experimento 2

Después, se extrajeron las muestras M3 y M4 siguiendo el procedimiento del experimento anterior pero en este caso se utilizó la placa 2 para obtener los datos de la muestra M4. Tras adquirir estas muestras se esperó un periodo de tiempo (40 min aprox.) para proceder con las mediciones de la muestra M5 en la placa 1 siguiendo el mismo procedimiento.

3.2.1.3. Experimento 3

Finalmente, se obtuvo la muestra M6 midiendo la placa 1. Para esto, primero fueron seleccionados al azar 4 ángulos de referencia: 0° , 30° , 60° , 120° y 160° . Así, por cada ángulo de referencia se realizaron 10 mediciones.

3.2.2. Análisis Estadístico

Después se procedió a evaluar el desempeño del sensor basándose en la tabla 3.2, para lo cual fueron necesarios los programas Rstudio y Excel (este último solo se utilizó para analizar los criterios 5 y 6).

Como primer paso se evaluó la repetibilidad del sensor, tomando los resultados del [Experimento 1](#), se implementó la prueba **T de student** para analizar las muestras M1 y M2 en cada posición angular; siempre verificando los supuestos estadísticos de normalidad y homogeneidad. Sí el

valor $p > \alpha$ se podrá corroborar que no existen diferencias significativas entre las muestras; es decir, hay un 95 % de probabilidad que cada vez que el sensor se coloque en la posición θ la respuesta en frecuencia este dentro del intervalo de confianza para dicha posición angular.

Seguidamente se utilizaron los datos de ambas muestras para calcular la frecuencia promedio de cada ángulo y su respectiva desviación estándar, además de evaluar la exactitud de la señal obtenida, la precisión de las mediciones reales con el modelo simulado, la linealidad y la sensibilidad del sensor.

Entonces, para evaluar la exactitud se analizó la relación entre la frecuencia promedio de los 17 ángulos medidos y el valor de las frecuencias de resonancia simuladas, utilizando el **coeficiente de correlación** (ec. 2.5.1). En cuanto a la precisión del sensor se utilizó la ecuación 3.2.1, donde y_{real} equivale a la frecuencia promedio de cada ángulo y y_{pred} son los valores de la frecuencia simulada para cada ángulo. Si la magnitud del coeficiente de correlación se aproxima a 1 y el resultado de RMSE es cercano a 0 GHz significará que el sensor es confiable, es decir; que proporciona mediciones cercanas al valor verdadero y ratifica una relación lineal entre las variables.

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (3.2.1)$$

Siendo así, se realiza una **regresión lineal simple** entre la respuesta en frecuencia promedio y el posicionamiento angular. Por consiguiente, se calcula el **coeficiente de determinación cuadrado**, para corroborar la linealidad y la sensibilidad del sensor.

Posteriormente, se determinó el **coeficiente de variación** entre las muestras M3 y M5 del [Experimento 2](#). Con el fin de precisar si la variabilidad en el tiempo es un factor que afecte la funcionalidad del sensor. Mientras más bajo sea el porcentaje significa que los efectos de la variabilidad en el tiempo son menos significativos, por consiguiente, las mediciones pueden considerarse estables en el tiempo.

Ahora bien, con tal efecto de evaluar la reproducibilidad del sensor se procedió a lo siguiente:

A) **Análisis ANOVA**. Se realizó una comparación entre la respuesta de los 17 ángulos para

2 sensores diseñados a la misma frecuencia de operación pero fabricados con diferentes métodos y substratos, i.e., análisis de M3 y M4. Si el valor de $p > \alpha$ entonces es posible obtener mediciones consistentes replicando la fabricación del sensor.

B) Comprobar el principio de funcionamiento. Se diseñó, simuló y fabricó un nuevo sensor con $f_{operacion} = f_o = 1$ GHz, aplicando el mismo desarrollo experimental. En tal caso si los resultados satisfacen las condiciones anteriores, entonces se podrá concluir que es posible reproducir el sensor para diferentes frecuencias de operación sin modificar su funcionamiento.

Por último, se obtuvo la ecuación característica que permite medir directamente la posición angular. Las respuestas en frecuencia de M6 se sustituyeron en esta ecuación, dando como resultado 10 mediciones de posición angular, después se calculó el promedio por cada grado de referencia. Y para determinar si el sensor es capaz de medir correctamente el posicionamiento angular mediante la ecuación obtenida se realizó una **prueba T de student** entre el ángulo de referencia y la posición angular promedio. En este caso si el valor $p > \alpha$ se podrá concluir que hay un 95 % de certeza que el sensor medirá correctamente la posición angular.

CAPÍTULO 4

Resultados

Tal como se mencionó en el capítulo anterior, en total fueron desarrollados 3 sensores, dos de ellos fueron fabricados a una $f_o = 2.4$ GHz y el otro con $f_o = 1$ GHz. Por lo que a partir de este capítulo deberá entenderse por sensor propuesto al sensor fabricado a 2.4 GHz con la placa 1.

4.1. Simulación del sensor propuesto

La figura 4.1 muestra la respuesta en frecuencia del sensor para diferentes posiciones angulares (incrementos de 10°), donde la posición inicial corresponde a la curva 0° y la posición final a la curva 160° . Mientras que la figura 4.2 presenta la frecuencia de resonancia por cada posición angular simulada y su curva de tendencia. Estos fueron sometidos a un ajuste de regresión lineal, obteniendo un $R^2 = 0.9793$ y una recta con pendiente negativa igual a $6 \text{ MHz}/10^\circ$ (ec. 4.1.1).

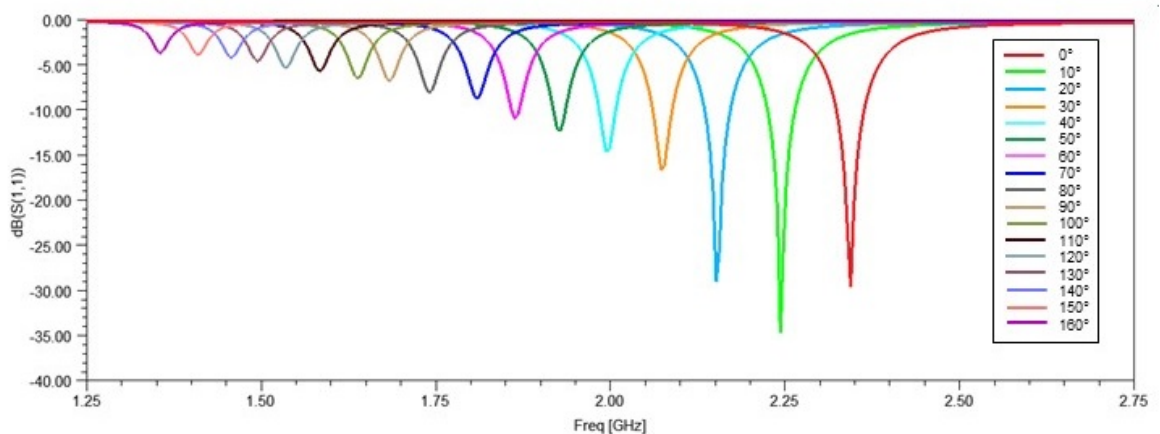


Figura 4.1: Frecuencia de resonancia vs coeficiente de reflexión (parámetro S_{11}) del prototipo para diferentes posiciones angulares.

Posición [°]	f_r [GHz]
0	2.3481
10	2.2344
20	2.1556
30	2.0725
40	1.9937
50	1.9238
60	1.8669
70	1.8013
80	1.74
90	1.6919
100	1.6306
110	1.5825
120	1.5344
130	1.5037
140	1.46
150	1.4075
160	1.3594

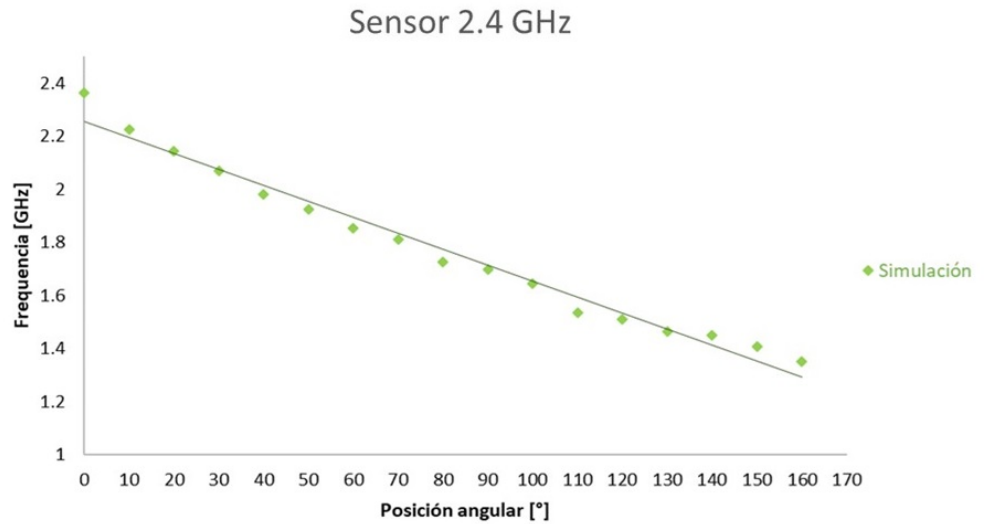


Figura 4.2: Curva de tendencia de la simulación posición angular vs frecuencia de resonancia.

$$f = -0.006x + 2.2552 \quad (4.1.1)$$

donde x corresponde a la posición angular.

4.2. Diseño, fabricación y medición

La tabla 4.1 muestra el valor de los parámetros utilizados para el diseño del estator. El cual esta conformado por un resonador en corto circuito de $\lambda/4$, con forma semicircular y frecuencia de operación de 2.4 GHz. Es una red de un puerto, con línea de alimentación tipo tapered de $\lambda/8$, y utiliza un conector hembra SMA Tipo K (véase la figura 4.3).

Se fabricó un sistema de ensambleje (véase la figura 4.4) para que al momento de realizar las mediciones el parche de cobre del rotor estuviera siempre en contacto con el resonador del estator. Una vez ensamblado el sensor, se coloca dentro del adaptador de la carcasa, este se introduce a la base de la carcasa y luego se coloca la tapa. Posteriormente se conectaba el sensor al VNA para realizar los experimentos. En la figura 4.5 del lado izquierdo se observa el adaptador con el sensor dentro de la base de la carcasa y del lado izquierdo la tapa de la carcasa.

Las figuras 4.6 y 4.7 muestran la fabricación de los sensores descritos en 3.2.2. Cabe resaltar que se utilizó el mismo rotor para los sensores diseñados con $f_o = 2.4$ GHz. Para finalizar, las

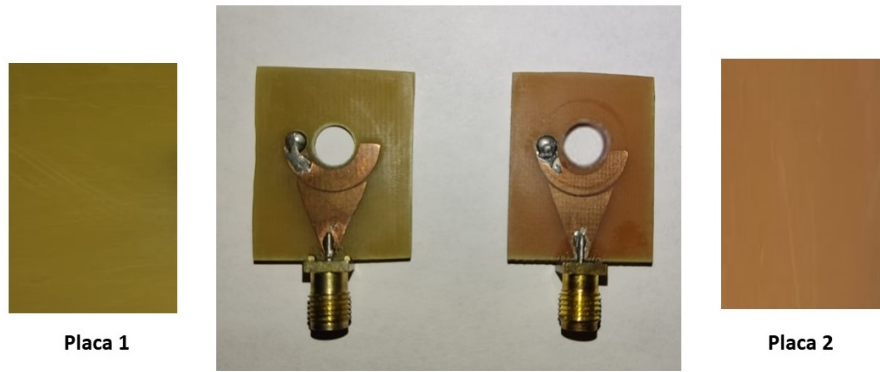


Figura 4.3: Fabricación del sensor propuesto.



Figura 4.4: Sistema de ensamblaje del sensor propuesto.



Figura 4.5: Carcasa.

L	17.00 mm
w	3.00 mm
r_{int}	5.41 mm
r_o	6.91 mm
r_i	3.91 mm
r_{hueco}	3.00 mm
L_f	8.50 mm
w_f	1.50 mm
<i>Conductor</i>	Cobre
t	1.40 mil
<i>Dielectrico</i>	FR4
h	1.60 mm

Tabla 4.1: Parámetros del estator para el sensor propuesto.

figuras 4.8 y 4.9 indican la f_r del resonador, así como un ejemplo de la respuesta en frecuencia del sensor propuesto para diferentes posiciones angulares, respectivamente.

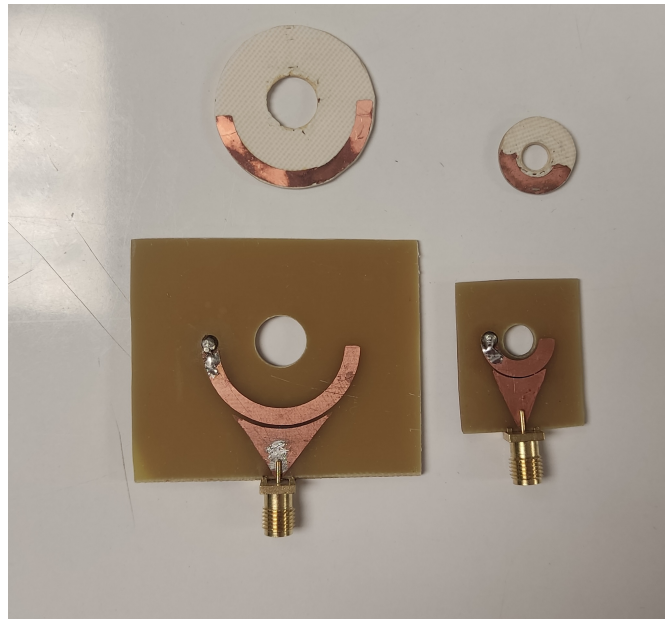


Figura 4.6: Fabricación del sensor.



Rotor

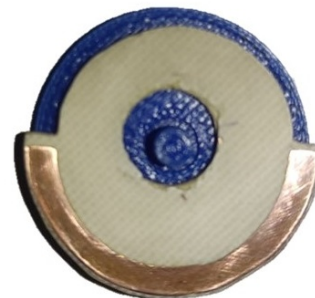


Figura 4.7: Sistema de ensamblaje para sensor de 1 GHz.

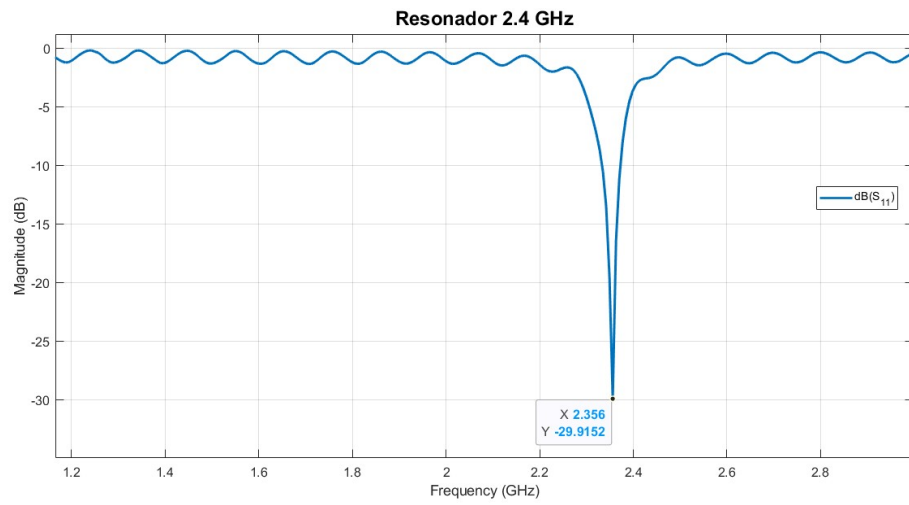


Figura 4.8: Frecuencia de resonancia del estator.

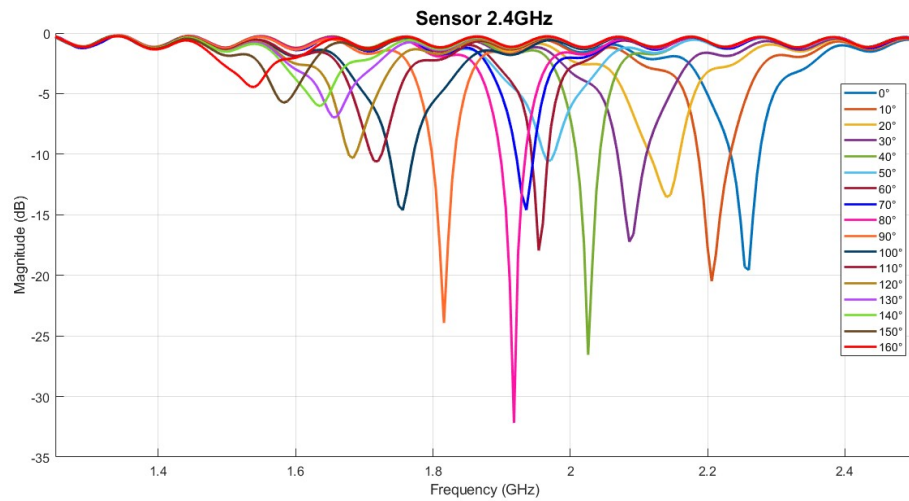


Figura 4.9: Frecuencia de resonancia del sensor propuesto. Medición del parámetro S_{11} .

4.3. Análisis estadístico

En la tabla 4.2 se recapitulan los resultados para la caracterización del sensor. El cual contiene los criterios 1 y 7, así como la frecuencia de resonancia promedio para cada posición angular con su respectiva desviación estándar.

Posición [°]	$t_{student}$	\bar{f}_r [GHz]	σ [GHz]	CV
0	0.205	2.2606	0.0175	1.23 %
10	0.139	2.2162	0.0294	1.08 %
20	0.2791	2.1784	0.0225	1.06 %
30	0.4094	2.0848	0.0129	0.79 %
40	1	1.9996	0.0168	0.92 %
50	0.3234	1.9924	0.0579	2.94 %
60	0.7321	1.993	0.1371	6.57 %
70	0.9077	1.8052	0.0292	1.51 %
80	0.5707	1.7194	0.0340	1.37 %
90	0.19	1.6702	0.0294	1.32 %
100	0.0944	1.5916	0.0136	2.78 %
110	0.6247	1.552	0.0286	1.63 %
120	0.7245	1.5184	0.0099	0.78 %
130	0.8383	1.4878	0.0085	0.50 %
140	1	1.4524	0.0064	0.58 %
150	0.7454	1.4092	0.0105	0.62 %
160	0.2797	1.3138	0.0183	1.26 %

Tabla 4.2: Resultados para la caracterización del sensor propuesto.

De acuerdo con la ec. 3.2.1 se obtuvo un **RMSE = 0.0497 GHz**. La figura 4.10 es una representación de la aplicación de la prueba T de student para una posición específica (50°) y la verificación de los supuestos estadísticos. En ésta se aprecia claramente que $p_B > p_S > \alpha$, esto indica que los datos de las muestras pueden considerarse homogéneas y normales. Así para cada posición angular, donde no necesariamente $p_B > p_S$ pero estos siempre son mayores que α .

```

> #----- ANALISIS DE VARIANZA -----
> ##          Supuestos estadísticos --> independencia de los datos
> # Normalidad: la distribución de los datos tienen distribución normal? p>0.05*
> shapiro.test(freq)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  freq
W = 0.92305, p-value = 0.3831 →  $p_S$ 

> # Homogeneidad: los datos tienen varianzas homogéneas? p>0.05*
> bartlett.test(freq ~ tipo)

      Bartlett test of homogeneity of variances

data:  freq by tipo
Bartlett's K-squared = 0.14194, df = 1, p-value = 0.7064 →  $p_B$ 

> t.test(freq ~ tipo)

      Welch Two Sample t-test

data:  freq by tipo
t = 1.055, df = 7.6987, p-value = 0.3234
alternative hypothesis: true difference in means between group m3 and group m4 is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.04610869  0.12290869
sample estimates:
mean in group m3 mean in group m4
      2.0116      1.9732

```

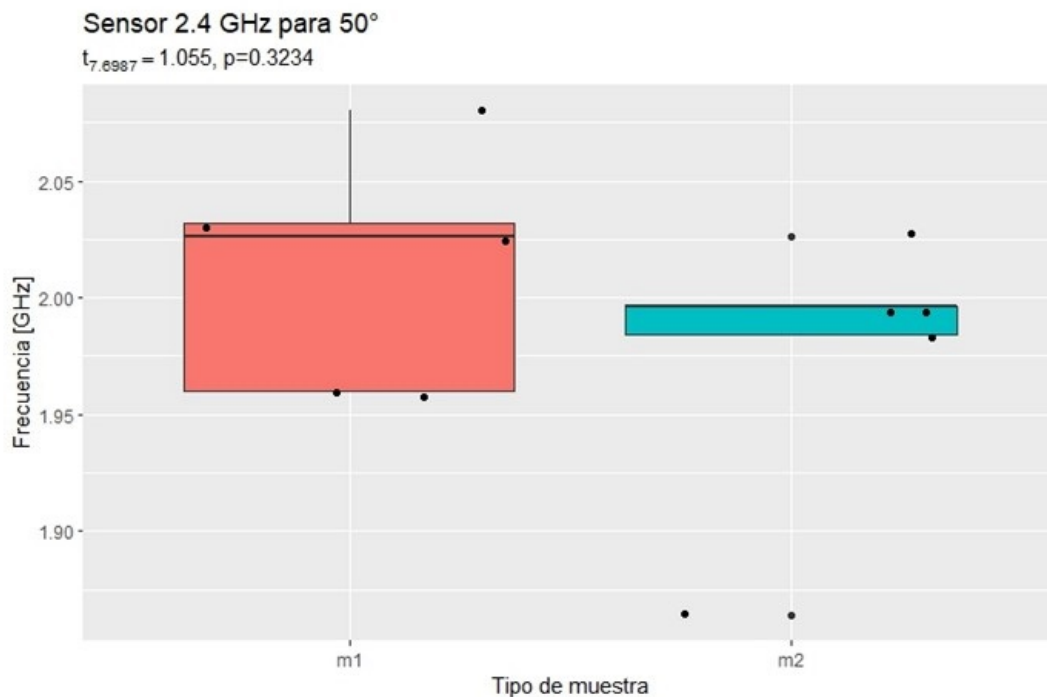


Figura 4.10: Resultados de repetibilidad para la posición angular de 50°. Donde p_S es el valor p para la prueba de normalidad y p_B representa el valor p para la prueba de homogeneidad.

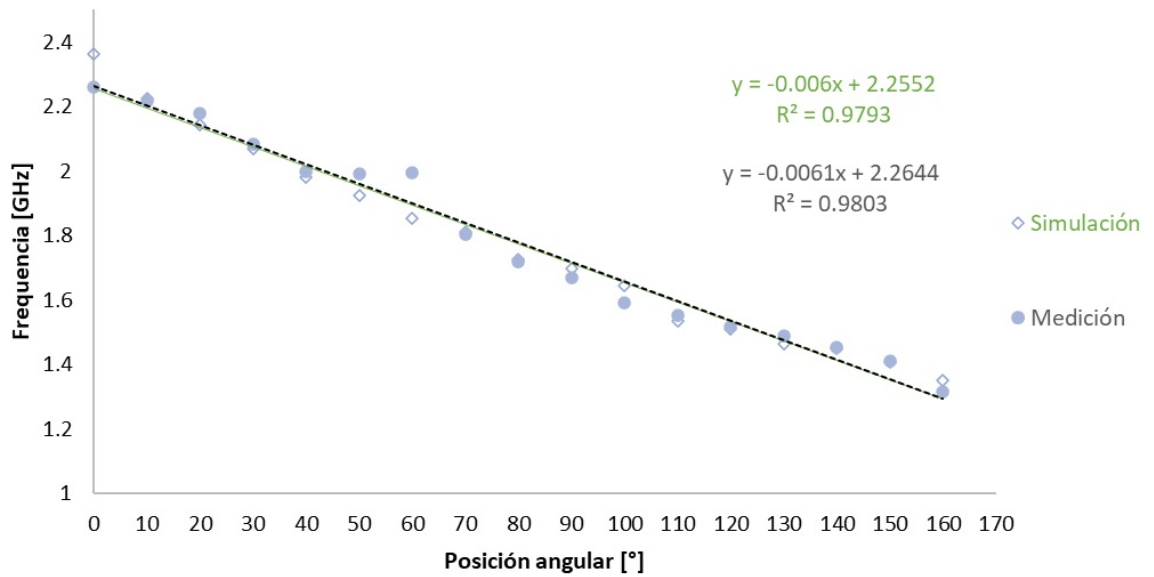


Figura 4.11: Curva de tendencia de la respuesta en frecuencia de simulación (línea y ecuación verde) y medición real promedio (línea punteada y ecuación negra) para diferentes posiciones angulares.

Además, la figura 4.11 ilustra el modelo de regresión con pendiente negativa (ec. 4.3.1) así como el $R^2 = 0.9803$ para la respuesta en frecuencia de la medición promedio del sensor propuesto. También, se aprecia la diferencia con el resultado de la simulación, vemos que en este caso la pendiente corresponde a 6.1 MHz/10°.

$$f_r = -0.0061x + 2.2644 \quad (4.3.1)$$

donde x corresponde a la posición angular.

Mientras, en las figuras 4.12, 4.13 y la tabla 4.3 se muestran los resultados de para la prueba de reproducibilidad; tanto para el análisis ANOVA como para la comprobación en el principio de funcionamiento del sensor, respectivamente.

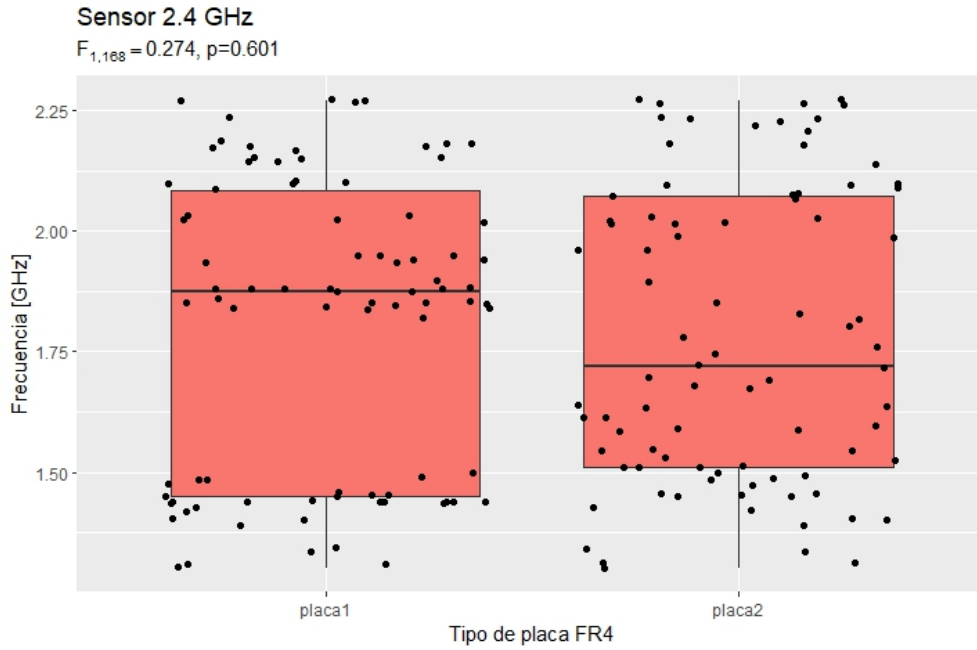
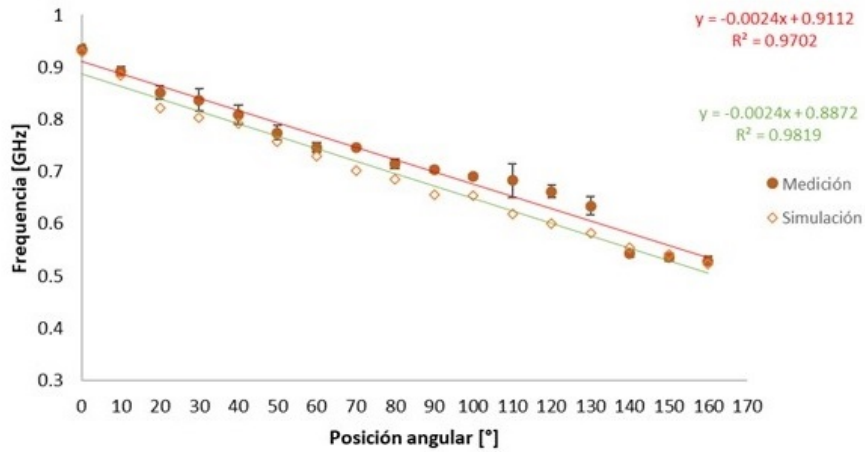


Figura 4.12: Análisis ANOVA para evaluar la reproducibilidad del sensor propuesto.

Posición [°]	$t_{student}$	\bar{f}_r [GHz]	σ [GHz]	CV
0	0.0597	0.9347	0.0094	0.80 %
10	0.8046	0.8925	0.0081	2.19 %
20	0.6480	0.8510	0.0134	1.78 %
30	0.7692	0.8370	0.0207	1.70 %
40	0.5816	0.8081	0.0185	2.30 %
50	0.7642	0.7741	0.0135	2.71 %
60	0.6932	0.7460	0.0100	1.93 %
70	0.3739	0.7460	0.0044	2.75 %
80	0.2794	0.7148	0.0087	4.75 %
90	0.0577	0.7040	0.0059	5.48 %
100	0.1878	0.6900	0.0044	2.73 %
110	0.1469	0.6830	0.0325	4.21 %
120	0.5121	0.6620	0.0124	4.75 %
130	0.4296	0.6339	0.0176	5.60 %
140	0.7606	0.5430	0.0066	2.15 %
150	0.0779	0.5360	0.0072	1.28 %
160	0.2798	0.5290	0.0086	2.15 %

Tabla 4.3: Resultados para la prueba de repetibilidad en sensor con $f_o = 1GHz$.



**Análisis de dispersión y correlación
Sensor 1 GHz**

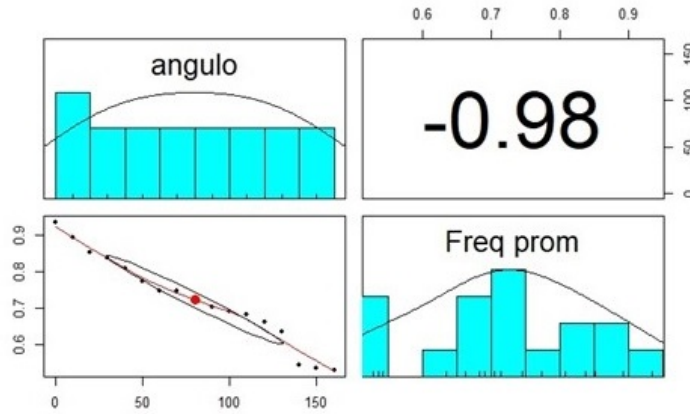


Figura 4.13: Resultados prueba de repetibilidad sensor 1GHz, con RSME = 0.0343.

Finalmente, la tabla 4.4 revela las mediciones de las posiciones angulares obtenidas mediante la ecuación que define al sensor (i.e. la ecuación característica):

$$\theta [^\circ] = -161.61(f_r) + 367.52 \tag{4.3.2}$$

Posición [°]	$\bar{\theta}$ [°]	σ [°]	p	t
0	-0.88	3.095	0.2205	-1.4506
30	30.16	6.467	0.7513	0.32323
120	116.88	13.017	0.3198	-1.0314
160	160.72	4.734	0.4639	0.75299

Tabla 4.4: Valores para la evaluación del posicionamiento angular con ecuación característica.

CAPÍTULO 5

Discusiones

La configuración definitiva del sensor representa una adaptación en términos de diseño, funcionamiento y comportamiento que aprovecha las capacidades de la tecnología de microondas basados en los resonadores planares de microcinta, circulares (también llamados anillos resonadores), en circuito abierto, corto circuito, y de los sensores de desplazamiento (lineal y angular). Sus dimensiones son pequeñas, abarcando un área de tan solo 6.13 cm^2 para aquellos desarrollados a una f_r de 2.4 GHz y 27.60 cm^2 para los fabricados con $f_r = 1 \text{ GHz}$, así como un rango dinámico mayor a 90° . Lo que facilita su adaptación en diversas áreas de la salud estructural tal como su conexión al IoT.

A juzgar por los resultados de la simulación, se puede anticipar sólidamente que el sensor exhibirá un comportamiento lineal con una sensibilidad cercana a $0.6 \text{ MHz}/^\circ$, equiparable a los hallazgos reportados en la literatura. Encima, el sensor propuesto denota una divergencia en la frecuencia de resonancia del estator de tan solo 27 MHz entre los resultados medidos y simulados.

La tabla 3.2 brinda una apila base para la discusión de varios aspectos, comenzando por la prueba de repetibilidad. Ésta demostró valores de $p_t \gg \alpha$. Así, se infiere que en cada posición angular, las medias de las muestras no presentan diferencias estadísticamente significativas, lo que implica que el sensor tiene la capacidad para producir mediciones consistentes cuando se mide el mismo ángulo en condiciones similares.

Además, considerando que la desviación estándar se encuentra entre 0.0064 GHz y 0.1371 GHz, se evidencia la proximidad notable de los datos adquiridos al promedio de las mediciones.

Finalmente, tomando como referencia que el porcentaje máximo del coeficiente de variación se puede considerar bajo ($CV = 6,57\% < 10\%$) es posible afirmar que la variabilidad de los datos para cada posición angular es pequeña en relación con su media; es decir, no existe evidencia significativa para señalar al tiempo como un factor que afecte la funcionalidad del sensor.

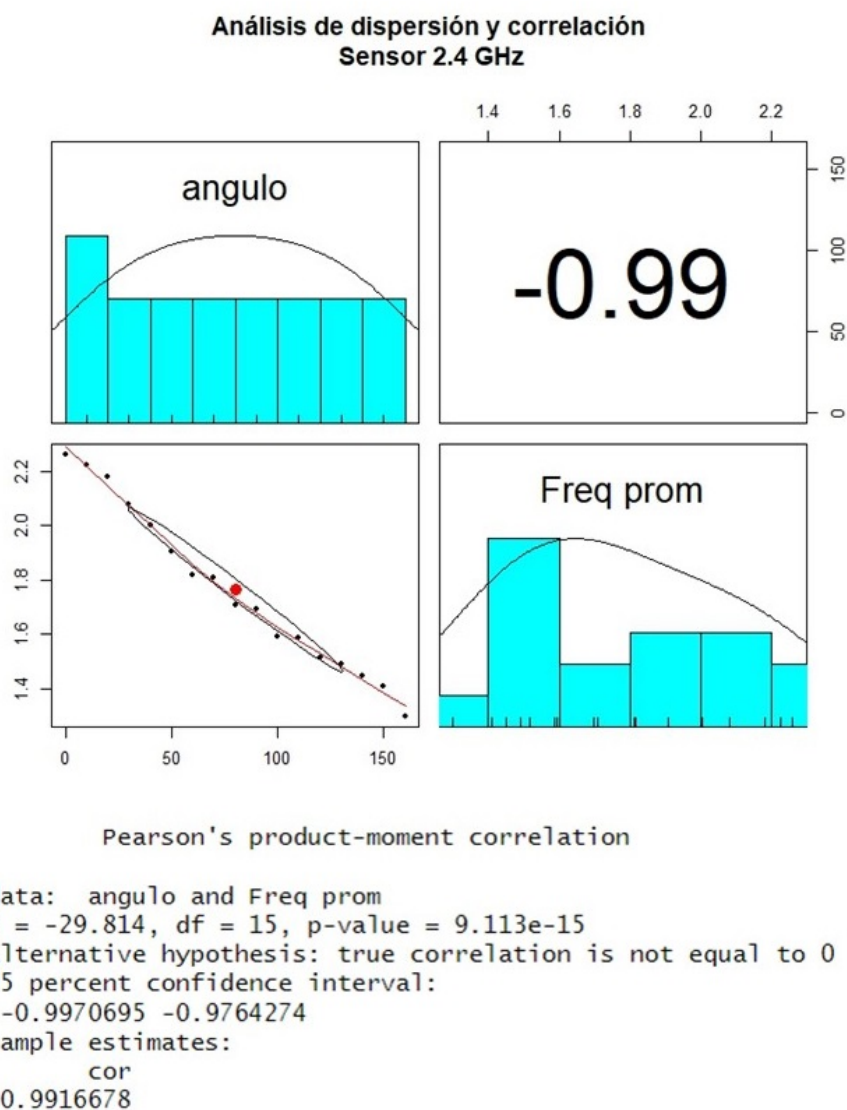


Figura 5.1: Análisis de dispersión y correlación del sensor propuesto.

El resultado de la figura 5.1 denota una correlación negativa cercana a 1, esto sugiere una fuerte relación lineal entre las variables. De igual manera, el resultado del RSME resalta que el modelo de regresión es altamente preciso en la predicción de los datos medidos a partir de los datos

simulados. Por ende, es posible establecer que el sensor es confiable a la hora de realizar predicciones exactas y precisas.

Tras realizar un ajuste de regresión lineal, la figura 4.9 reafirma el comportamiento del sensor previsto en la simulación. Más aun, dado el valor de R^2 se sugiere una relación lineal consistente entre las variables y un ajuste robusto del modelo a los datos.

Con base en el valor de p obtenido para la comparación de los sensores desarrollados con diferentes placas (i.e., $p_{ANOVA} = 0.601$), no se encontró evidencia de diferencias significativas entre las medias de ambas muestras. Y en vista de que el comportamiento resultante del sensor diseñado a 1 GHz cumple de manera similar las condiciones aplicadas al sensor propuesto (véase las figuras 4.12 y 4.13, respectivamente), entonces se establece que el sensor tiene la capacidad de obtener mediciones consistentes bajo diferentes condiciones. Igualmente, se sugiere que el principio de funcionamiento del sensor es constante independientemente de la frecuencias de operación y/o las dimensiones a las que se desee fabricar. Brindado la posibilidad de adaptarse a las diversas especificaciones según la(s) aplicación(nes) en la que se desee implementar.

La tabla 5.1 presenta una comparación más nítida y específica entre los resultados obtenidos experimentalmente y aquellos simulados para los sensores desarrollados en sus diversas frecuencias de operación. Contemplando los criterios de sensibilidad, linealidad, exactitud y precisión, y también de sus dimensiones. Proporcionando así una visión más completa y detallada de la concordancia entre los datos medidos y simulados.

<i>Frecuencia de operación</i>	<i>2.4 GHz</i>	<i>2.4 GHz</i>	<i>1 GHz</i>	1 GHz
Tipo de datos	Simulación	Medición	Simulación	Medición
Sensibilidad	6 MHz/10°	6.1 MHz/10°	2.4 MHz/10°	2.4 MHz/10°
Linealidad (R^2)	0.9793	0.9803	0.9819	0.9702
Exactitud (Corr)	-0.9896	-0.9916	-0.9909	-0.9849
Precisión (RMSE)	N/A	0.0497	N/A	0.0343
Área total (cm^2)	6.12	6.13	27.6	27.6

Tabla 5.1: Tabla comparativa entre criterios simulados y medidos.

Los resultados de las evaluaciones del posicionamiento angular, detallados en la Tabla 4.4, revelan valores de p mayores que α . De este modo, se deduce que, según la ecuación característica, el sensor demuestra una capacidad adecuada para medir con precisión el posicionamiento angular.

A su vez, está se puede adecuar para medir el desplazamiento angular $\Delta\theta$ (ec. 5.0.1) y con ello detectar la dirección del giro.

$$\Delta\theta = \theta_f - \theta_0 \quad (5.0.1)$$

donde θ_0 y θ_f corresponden a las mediciones de las posiciones angulares inicial y final, respectivamente.

Además, si θ_0 se iguala a la posición de referencia establecida por el sensor; i.e.,

$$\theta_0 = \theta_{ref} = 0^\circ \quad (5.0.2)$$

$$\Rightarrow \Delta\theta = \theta_f - 0^\circ \quad (5.0.3)$$

$$\therefore \Delta\theta = \theta_f \Leftrightarrow \theta_0 = \theta_{ref} \quad (5.0.4)$$

Más aun, considerando un sistema de medición más robusto¹ es posible medir la velocidad angular ω .

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (5.0.5)$$

donde Δt es la diferencia entre el instante de tiempo final (t_f) y el instante de tiempo inicial (t_i).

¹Es decir, un sistema integral y automatizado. Diseñado para liberar al usuario de la necesidad de adquirir cada parámetro por separado. Simplificando el proceso y con ello mitigar posibles errores de operador asociados.

Después de una exhaustiva revisión de los aspectos considerados anteriormente, dirigiremos nuestra atención a la comparación del presente trabajo con algunas investigaciones previamente documentadas en la literatura. Al analizar las características, criterios y parámetros compartidos por otros autores en sus trabajos, la tabla comparativa 5.2 abordará criterios básicos y generales, tales como el tipo de sensor (referido, en este contexto, al tipo de tecnología en el cual se basa su funcionamiento), los parámetros de medición, la sensibilidad (expresada en $\text{Hz}/^\circ$), la linealidad, el rango dinámico y la presencia o ausencia de detección de giro.

Trabajo	Tipo de sensor	Parámetros de medición	Sensibilidad	Linealidad	Rango dinámico	Dirección de giro	Otro
[8]	CSSRR	$f_r, S_{21} $	3.18 MHz/°	[30°-60°]	0° - 90°	×	Proximidad, Adaptabilidad
[20]	CSRR	$f_r, S_{21} , S_{11} $	5 MHz/°	[0°-70°]	0°-90°	×	
[5]	MCSRR	/	4.3° de	/	0°-±350°	×	Selector de f
[46]	CSRR	/	1.22 MHz/°	[0°-±180°]	0°-360°	✓	f_c , No. de cerros
[7]	ML	/	1.24 MHz/°	[0°-20°] L_{rej}	0° - 180°	✓	f_c y otros
[9]	SRR y CSRR	$f_r, S_{11} $	0.32 dB/°	[14.4° - 57.6°]	0°-90°	✓	Cto. de retroalimentación activa
[10]	SRR	/	0.63	[0°-360°]	0°-360°	✓	Tamaño del sensor
[47]	NSRR	/	28 MHz/°	×	0°-40°	✓	Resolución, Inalámbrico
[48]	CSRR con RF-35	/	1.65 MHz/°	[30°-60°]	0°-90°	✓	Selector de f
Este trabajo	MR	f_r, S_{11}	0.61 MHz/°	[0°-160°]	0° - 160°	✓	Posicionamiento y velocidad angular

(/) = No especifica.

Tabla 5.2: Tabla comparativa

CAPÍTULO 6

Conclusiones

6.1. Conclusiones generales

En este trabajo se diseñó, modeló, fabricó y caracterizó un sensor de microondas empleando tecnología de microcinta, el cual demostró ser capaz de identificar el posicionamiento angular. Dando pie a oportunidades significativas en el campo de la goniometría, extendiéndose a otras aplicaciones, incluyendo aquellas en entornos industriales y en el ámbito de la salud estructural..

Para lograr este propósito, se diseñó y creó un sensor que no solo cumple con los estándares de rendimiento requeridos, sino que también permite una comparación sustancial con los referentes existentes en la literatura sobre el desarrollo de sensores de rotación, validando así su eficacia y precisión.

Asimismo, la implementación de un diseño que favorezca la frecuencia de operación dentro de la banda ICM, se ha abordado con éxito. Dando una f_c en 2.4 GHz, lo que contribuye a un diseño compacto.

El sensor fue caracterizado con éxito mediante un análisis estadístico detallado de las mediciones realizadas con el VNA. Esto proporciona una comprensión profunda de su desempeño en diferentes condiciones y escenarios, respaldando la validez de los resultados obtenidos.

La adopción del principio de funcionamiento de los resonadores de microcinta ha permitido desarrollar un sensor con comportamiento lineal, asegurando la consistencia y confiabilidad de las mediciones realizadas. Encima, al aplicar el proceso de litografía casera e incorporar elementos

que reducen los costos de desarrollo, fue posible cumplir con la visión de hacerlo accesible y fácil de fabricar. Esto no solo mejora la viabilidad económica del proyecto, sino que también amplía su potencial impacto y adopción.

De manera similar, el diseño generado presenta características que lo hacen idóneo para su implementación en la goniometría. Por ejemplo un rango dinámico lineal de 0° a 160° , detección de giro, mediciones adicionales (desplazamiento y velocidad angular), sensibilidad de $0.61\text{MHz}/^\circ$, la implementación de una línea de alimentación que facilitara su conexión al IoT, entre otros.

En conclusión, estos logros no solo cumplen con los objetivos individuales establecidos, sino que también posicionan al sensor como una contribución valiosa y prometedora en el campo de la medición de posicionamiento angular. Su desarrollo trasciende las aplicaciones exclusivas de la goniometría, abriendo la posibilidad hacia un potencial impacto en diversos campos.

6.2. Trabajo futuro

En cuanto a las perspectivas futuras de este proyecto, existen varios aspectos clave que podrían ser objeto de consideración y desarrollo. En primer lugar, se podría explorar la posibilidad de desarrollar un sistema de transmisión de datos inalámbrico. Este enfoque tendría el potencial de mejorar la accesibilidad y la flexibilidad del sistema, permitiendo la transmisión eficiente de datos sin la limitación de conexiones físicas, por ejemplo al VNA.

Adicionalmente, un área de desarrollo sugerida conlleva la creación de un sistema de medición más robusto que pueda integrarse de manera efectiva con el IoT. Esta iniciativa abriría la puerta a una mayor conectividad y a la posibilidad de aprovechar las ventajas que ofrece el IoT en términos de monitoreo remoto y acceso a datos en tiempo real.

Otro aspecto importante en la perspectiva de trabajo futuro podría centrarse en la adaptación del sensor para su aplicación específica en la goniometría. Esto implicaría:

- Diseñar una estructura o envoltura para albergar y proteger el sensor, brindando soporte mecánico, aislamiento, basándose en las necesidades y los requisitos específicos de la goniometría.
- Proceder con la validación del sistema de medición que garantice la confiabilidad de las

mediciones y a determinar que el sistema propuesto puede ser un sustituto confiable del estandar de oro; i.e., el goniómetro universal.

Como una posibilidad opcional para futuras investigaciones, se destaca la oportunidad de abordar el aumento del rango dinámico. Este desafío adicional podría explorarse mediante ajustes en la geometría del sensor, la tecnología del rotor y otras consideraciones pertinentes que podrían mejorar significativamente la capacidad del sensor para manejar una gama más amplia de posiciones angulares.

Bibliografía

- [1] E. A. El-Refaay, S. H. Zainud-Deen y H. A. Malhat, “Angular displacement sensor based on planar circular split ring resonator”, en *2020 37th National Radio Science Conference (NRSC)*, IEEE, 2020, págs. 9-15.
- [2] F. Rao, Z. Yu, X. Huang, S. Hu, Y. Jin y H. Yang, “Metamaterial-inspired rotation sensor based on complementary single split-ring resonator (CSSRR)”, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 32, n.º 13, págs. 1664-1674, 2018.
- [3] P. Cheong y K. Wu, “Full-range CSRR-based angular displacement sensing with multi-port interferometric platform”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 69, n.º 11, págs. 4813-4821, 2021.
- [4] J. Naqui, J. Coromina, A. Karami-Horestani, C. Fumeaux y F. Martín, “Angular displacement and velocity sensors based on coplanar waveguides (CPWs) loaded with S-shaped split ring resonators (S-SRR)”, *Sensors*, vol. 15, n.º 5, págs. 9628-9650, 2015.
- [5] A. K. Jha, A. Lamecki, M. Mrozowski y M. Bozzi, “A highly sensitive planar microwave sensor for detecting direction and angle of rotation”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 68, n.º 4, págs. 1598-1609, 2020.
- [6] S. Harnsoongnoen y N. Angkawisittpan, “Angular displacement sensor based on coplanar waveguide (CPWs) loaded with S-shaped golden spiral-tapered split ring resonators (SGS-SRRs)”, *Procedia Computer Science*, vol. 86, págs. 75-78, 2016.
- [7] C.-H. Chio, R. Gómez-García, L. Yang, K.-W. Tam, W.-W. Choi y S.-K. Ho, “An angular-displacement microwave sensor using an unequal-length-bi-path transversal filtering section”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, n.º 2, págs. 715-722, 2019.
- [8] A. K. Jha, A. Lamecki, M. Mrozowski y M. Bozzi, “A microwave sensor with operating band selection to detect rotation and proximity in the rapid prototyping industry”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, n.º 1, págs. 683-693, 2020.

- [9] Y. Ding, C.-S. Lee, Y. Li, Z.-Q. Wang y G.-F. Li, “An angular displacement sensor-based active feedback open complementary split-ring resonator”, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 31, n.º 9, págs. 1079-1082, 2021.
- [10] A. K. Horestani, Z. Shaterian y F. Martin, “Rotation sensor based on the cross-polarized excitation of split ring resonators (SRRs)”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, n.º 17, págs. 9706-9714, 2020.
- [11] A. Ebrahimi, W. Withayachumnankul, S. F. Al-Sarawi y D. Abbott, “Metamaterial-inspired rotation sensor with wide dynamic range”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, n.º 8, págs. 2609-2614, 2014.
- [12] J. Mata-Contreras, C. Herrojo y F. Martin, “Application of split ring resonator (SRR) loaded transmission lines to the design of angular displacement and velocity sensors for space applications”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, n.º 11, págs. 4450-4460, 2017.
- [13] P. K. Varshney y M. J. Akhtar, “Substrate integrated waveguide derived novel two-way rotation sensor”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, n.º 2, págs. 1519-1526, 2020.
- [14] A. K. Horestani, D. Abbott y C. Fumeaux, “Rotation sensor based on horn-shaped split ring resonator”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, n.º 8, págs. 3014-3015, 2013.
- [15] J. Naqui, F. Martí et al., “Transmission lines loaded with bisymmetric resonators and their application to angular displacement and velocity sensors”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 61, n.º 12, págs. 4700-4713, 2013.
- [16] D. O. de la Federación, “ACUERDO mediante el cual el Pleno del Instituto Federal de Telecomunicaciones emite los Lineamientos generales en relación con lo dispuesto por la fracción I del artículo octavo transitorio del Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de los artículos 6o., 7o., 27, 28, 73, 78, 94 y 105 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en Materia de Telecomunicaciones”, *DF, México. Retrieved March*, vol. 11, pág. 2014, 2014.
- [17] X. S. Bonilla y M. E. R. Pérez, “Surgimiento de la fisioterapia en México a partir de la rehabilitación durante el siglo XX”, *Investigación en educación médica*, vol. 11, n.º 43, págs. 108-120, 2022.
- [18] K. N. O. Nuñez, “Diseño, Modelado y Caracterización de Arreglo de Antenas Microstrip para Aplicaciones del Internet de las Cosas.”, *INAOE, Santa María Tonantzintla, Puebla*, 2019.

- [19] J. Naqui, J. Coromina, F. Martín, A. K. Horestani y C. Fumeaux, “Comparative analysis of split ring resonators (SRR), electric-LC (ELC) resonators, and S-shaped split ring resonators (S-SRR): Potential application to rotation sensors”, en *Proceedings of 2014 Mediterranean Microwave Symposium (MMS2014)*, IEEE, 2014, págs. 1-5.
- [20] P. K. Varshney y M. J. Akhtar, “Substrate integrated waveguide derived novel two-way rotation sensor”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, n.º 2, págs. 1519-1526, 2020.
- [21] J. A. B. Molina, “Metodología de desacople para antenas de parche con aplicación en sistemas de imagenología”, 2012.
- [22] N. M. Shebani, A. E. Mohammed y B. M. Khamoudi, “Design curves of micro strip ring resonator”, en *12th International conference on Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering December*, 2011, págs. 18-20.
- [23] M. Joler, A. N. J. Raj y J. Bartolić, “A Simplified Measurement Configuration for Evaluation of Relative Permittivity Using a Microstrip Ring Resonator with a Variational Method-Based Algorithm”, *Sensors*, vol. 22, n.º 3, pág. 928, 2022.
- [24] D. M. Pozar, *Microwave engineering*. John wiley & sons, 2011.
- [25] S. Xue, K. Jiang, S. Guan, L. Xie, G. Wan y C. Wan, “Long-range displacement meters based on chipped circular patch antenna”, *Sensors*, vol. 20, n.º 17, pág. 4884, 2020.
- [26] A. A. Circuits, *Impedance Transformation*. dirección: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-14/impedance-transformation/>.
- [27] H. How, A. Widom y C. Vittoria, “Lagrangian formulation of a linear microstrip resonator: theory and experiment”, *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, vol. 39, n.º 4, págs. 660-665, 1991.
- [28] T. Itoh, “Analysis of microstrip resonators”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 22, n.º 11, págs. 946-952, 1974.
- [29] C. H. Taboadela, “Goniometría”, *Una herramienta para la evaluación de las incapacidades laborales*. Buenos Aires: Asociart ART, 2007.
- [30] leveFISIO. “Inclinometro”. Copyright © 2023 Levelfisio. (2023), dirección: <https://levelfisio.com/es/diagnostico-y-emergencias/177-inclinometro.html>.
- [31] ADInstruments. “TN1750/ST Goniometer (2 Axis, Hip/Knee with Adapter)”, ADInstruments. (Sin año especificado), dirección: <https://www.adinstruments.com/products/goniometers>.

- [32] E. Kramer. “Cómo usar un goniómetro”, WikiHow. (Sin año especificado), dirección: <https://es.wikihow.com/usar-un-goni%C3%B3metro>.
- [33] N. E. Inc. “Biometrics Goniometers and Torsiometers”. Copyright © 1997-2021 NexGen Ergonomics Inc. All rights reserved. Legal and Privacy Information. (2021), dirección: <http://www.nexgenergo.com/ergonomics/biosensors.html>.
- [34] I. LTDA. “GONIOMETRO”. © 2023 Interfísica LTDA. All Rights Reserved. Design By Digital Consulting Plus. (2023), dirección: <https://interfisica.com/web/product/goniometro/>.
- [35] A. P. Marques, *Manual de goniometria*. Editora Manole, 1997.
- [36] H. F. Mueses, “Diferencias entre el Nivel de Significancia alfa y el Valor P”, *Revista Estomatología*, vol. 16, n.º 1, págs. 30-32, 2008.
- [37] B. Barton y J. Peat, *Medical statistics: A guide to SPSS, data analysis and critical appraisal*. John Wiley & Sons, 2014, págs. 52-55, 112-114.
- [38] P. Mishra, U. Singh, C. M. Pandey, P. Mishra y G. Pandey, “Application of student’s t-test, analysis of variance, and covariance”, *Annals of cardiac anaesthesia*, vol. 22, n.º 4, 2019.
- [39] E. Lahura et al., *El coeficiente de correlación y correlaciones espúreas*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Departamento de Economía, 2003, vol. 218.
- [40] J. Dagnino, “Coeficiente de correlación lineal de Pearson”, *Chil Anest*, vol. 43, n.º 1, págs. 150-153, 2014.
- [41] D. D. Wackerly, W. Mendenhall III, R. L. Scheaffer, J. Yescas Milanés et al., *Estadística matemática con aplicaciones*. 2002, págs. 387, 393, 601.
- [42] M. Joler, A. N. J. Raj y J. Bartolić, “A Simplified Measurement Configuration for Evaluation of Relative Permittivity Using a Microstrip Ring Resonator with a Variational Method-Based Algorithm”, *Sensors*, vol. 22, n.º 3, pág. 928, 2022.
- [43] S.-M. Han e Y.-S. Kim, “A strong coupled microstrip ring resonator using linearly tapered feedlines for bandpass filter applications”, en *Proceedings RAWCON 2002. 2002 IEEE Radio and Wireless Conference (Cat. No. 02EX573)*, IEEE, 2002, págs. 79-82.
- [44] J. M. M. Arenas, *Desarrollo de un sistema de medición de grietas basado en un sensor de microondas*, 2022.

- [45] M. Hernandez-Aguila, J.-L. Olvera-Cervantes, A.-E. Perez-Ramos, J.-M. Meza-Arenas y A. Corona-Chavez, “Microwave-sensor-node integrated into a short-range wireless sensor network”, *Scientific Reports*, vol. 13, n.º 1, pág. 2075, 2023.
- [46] C. Teng, C. H. Chio, K. W. Tam y P. Y. Lau, “An angular displacement microwave sensor with 360° dynamic range using multi-mode resonator”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, n.º 3, págs. 2899-2907, 2020.
- [47] A. M. Gargari, B. Ozbey, H. V. Demir et al., “A wireless metamaterial-inspired passive rotation sensor with submilliradian resolution”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, n.º 11, págs. 4482-4490, 2018.
- [48] A. K. Jha, N. Delmonte, A. Lamecki, M. Mrozowski y M. Bozzi, “Design of microwave-based angular displacement sensor”, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 29, n.º 4, págs. 306-308, 2019.