



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

**Facultad de Ingeniería
y Ciencias**
Ingeniería Electrónica

Desarrollo de un sensor de humedad de suelo de bajo
costo para aplicaciones en el sector agrícola colombiano

David Alejandro Dorado Garay
Luis Alejandro Enríquez Balcázar

Director

Dr. Luis Eduardo Tobón

17 de julio de 2025

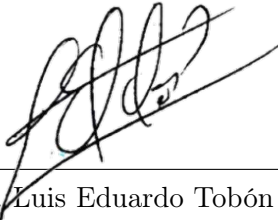
Nota de Aceptación

Aprobado por el Comité de Trabajo de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana para optar al título de Ingeniero Electrónico.

Dr. Hernán Camilo Rocha Niño
Decano Facultad de Ingeniería y Ciencias



Dr. Luis Eduardo Tobón
Director Carrera Ingeniería Electrónica



Dr. Luis Eduardo Tobón
Director Trabajo de Grado

Santiago de Cali, 17 de julio de 2025

Señores
Pontificia Universidad Javeriana – Cali
Dr. Hernán Camilo Rocha Niño
Decano
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Ciudad

Cordial Saludo.

Por medio de la presente nos permitimos presentarle el Trabajo de Grado titulado “Desarrollo de un sensor de humedad de suelo de bajo costo para aplicaciones en el sector agrícola colombiano”.

Esperamos que este trabajo reúna todos los requisitos académicos, cumpla el propósito para el cual fue creado y sirva de apoyo para futuros proyectos relacionados con la materia.

Atentamente,

David A. Dorado

David Alejandro Dorado Garay

Luis Alejandro Enríquez

Luis Alejandro Enríquez Balcázar

Santiago de Cali, 17 de julio de 2025

Señores

Pontificia Universidad Javeriana – Cali

Dr. Hernán Camilo Rocha Niño

Decano

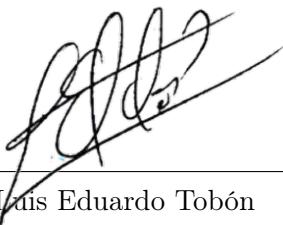
Facultad de Ingeniería y Ciencias

Ciudad

Cordial Saludo.

Certifico que el presente Trabajo de Grado titulado “Desarrollo de un sensor de humedad de suelo de bajo costo para aplicaciones en el sector agrícola colombiano”, realizado por David Alejandro Dorado Garay y Luis Alejandro Enríquez Balcázar, estudiantes de Ingeniería Electrónica, se encuentra terminado y puede ser presentado para su sustentación.

Atentamente,



Dr. Luis Eduardo Tobón
Director Trabajo de Grado

Agradecimientos

David Alejandro Dorado:

Agradezco profundamente a todas las personas que hicieron posible la culminación de este trabajo de grado.

En primer lugar, a mi mamá y mi abuela, por ser el pilar fundamental de mi vida. Gracias por su amor incondicional, sus palabras de aliento y su apoyo constante en cada paso de este camino. Este logro también es de ustedes. A mi director Luis Eduardo Tobón, por su orientación, paciencia y enseñanzas durante el desarrollo del proyecto. Agradezco también a la Universidad Javeriana de Cali, y al personal del Centro de Automatización de Procesos y laboratorios de suelos y electrónica que brindaron soporte técnico y académico durante el proceso.

Finalmente, gracias a Dios y la vida por permitirme llegar hasta aquí con salud, perseverancia y ganas de seguir aprendiendo.

Luis Alejandro Enríquez:

Agradezco primeramente a Dios, quien me brindó salud y la oportunidad de estudiar para la consecución de logros tales como el presente proyecto.

Además, a las personas más importantes en mi vida, como mi mamá y mi papá, quienes siempre han mostrado un apoyo incondicional hacia mí y con su amor me han motivado siempre a alcanzar grandes metas. Adicionalmente, a todos mis profesores que se esmeraron en garantizar un excelente aprendizaje de mi parte, a mi director de tesis y carrera, Luis Eduardo Tobón, por ser una guía y mentor a lo largo de mi carrera académica. Agradezco también a la Universidad Javeriana de Cali a sus profesores y colaboradores que desempeñan su trabajo en áreas afín con la electrónica quienes fueron los encargados de mi formación técnica y profesional.

Finalmente a mi compañero de tesis, y mejor amigo, David Alejandro Dorado, quien me acompañó en toda la carrera y me brinda su constante apoyo.

Glosario

Símbolos

- C Capacitancia de un condensador plano, en faradios (F).
- ε_r Permitividad relativa del medio, variable con la humedad.
- S_{11} Parámetro de dispersión que representa la cantidad de señal reflejada en el puerto 1.
- \propto Símbolo que indica que una magnitud es proporcional a otra.
- σ Conductividad eléctrica: medida que describe la capacidad de un material para conducir electricidad.

Acrónimos y Abreviaturas

- IEEE* The Institute of Electrical and Electronic Engineers
- IoT* Internet of Things
- FAO Food and Agriculture Organization
- AP Agricultura de Precisión
- PUJ Pontificia Universidad Javeriana
- CAP Centro de Automatización de Procesos
- HFSS High Frequency Simulation Software
- TDR Time Domain Reflectometry
- FDR Frequency Domain Reflectometry
- VNA Vector Network Analyzer

Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo de un sensor de humedad de bajo costo para aplicaciones agrícolas, con el propósito de ofrecer una solución funcional que permita integrar la medición de esta variable en sistemas de monitoreo para agricultura de precisión en Colombia, ya que el sector está en crecimiento y la falta de dispositivos de medición de variables a bajo costo es evidente. La necesidad de optimizar el uso del agua y mejorar la toma de decisiones en el cultivo motivó la creación de un dispositivo accesible, adaptable a diferentes condiciones de suelo y útil en zonas rurales con recursos limitados.

El proyecto se apoyó en una metodología basada en el proceso de diseño en ingeniería, que permitió avanzar de manera iterativa desde la etapa conceptual hasta la validación experimental. Se realizaron simulaciones electromagnéticas del modelo en 3D del sensor para entender y predecir su comportamiento frente a diferentes niveles de humedad de suelo, y posteriormente se construyó un prototipo físico utilizando materiales de bajo costo y de fácil disponibilidad comercial. La validación se llevó a cabo en condiciones de laboratorio, empleando un analizador de redes vectoriales para registrar la respuesta en frecuencia del dispositivo frente a distintas condiciones de humedad.

Los resultados demostraron una relación coherente entre los niveles de humedad y el desplazamiento en la frecuencia de resonancia del sensor, tanto en simulaciones como en pruebas reales, con un error cuadrático medio aceptable en el modelo de ajuste. Además, se evidenció que el prototipo conserva características favorables para su uso en campo, lo que respalda su potencial implementación en futuros sistemas de agricultura de precisión. La experiencia también permitió identificar mejoras futuras en términos de encapsulado, robustez y alineación con normativas técnicas aplicables.

Palabras Clave: Agricultura de precisión, permitividad eléctrica, reflexión, dominio de frecuencia, resonancia.

Abstract

The current document presents the development of a low-cost soil moisture sensor for agricultural applications, aiming to offer a functional solution for integrating moisture measurement into precision agriculture monitoring systems in Colombia given that the agricultural sector is growing, and there is a clear lack of affordable devices for environmental variable monitoring. The need to optimize water usage and improve decision-making in crop management motivated the creation of an accessible device, adaptable to different soil conditions and suitable for rural areas with limited resources.

The project was based on a methodology grounded in the engineering design process, which allowed iterative progress from the conceptual stage to experimental validation. Electromagnetic simulations of the 3D model of the sensor were carried out to understand and predict its behavior under varying soil moisture levels, followed by the construction of a physical prototype using low-cost and commercially available materials. Validation was conducted under laboratory conditions using a vector network analyzer to record the device's frequency response under different moisture levels.

The results showed a consistent relationship between soil moisture levels and the shift in the sensor's resonance frequency, both in simulations and experimental tests, with an acceptable mean squared error in the polynomial fitting model. Additionally, the prototype demonstrated favorable characteristics for field deployment, supporting its potential integration into future precision agriculture systems. The experience also highlighted areas for future improvement, such as encapsulation, mechanical robustness, and alignment with applicable technical standards.

Keywords: Precision agriculture, electric permittivity, reflection, frequency domain, resonance.

Índice general

1. Introducción	1
2. Planteamiento del Problema	3
3. Justificación	5
4. Objetivos	9
4.1. Objetivo General	9
4.2. Objetivos Específicos	9
5. Marco de Referencia	11
5.1. Áreas Temáticas	11
5.2. Marco Teórico	11
5.2.1. Normatividad en el dominio del problema	13
5.2.2. Limitaciones medioambientales	14
5.2.3. Limitaciones sociales y económicas	15
5.2.4. Limitaciones políticas	15
5.3. Trabajos Relacionados	16
6. Materiales y Métodos	19
6.1. Metodología	19
6.2. Requerimientos del dispositivo	22
6.3. Proceso de diseño y desarrollo	23
6.3.1. Selección del principio de funcionamiento	23
6.3.2. Electrodo	26
6.3.3. Análisis del número de electrodos	28
6.3.4. Análisis de materiales	29
6.4. Simulación	31
6.5. Fabricación del prototipo y pruebas experimentales	40
6.5.1. Normas y estándares técnicos en el dominio del problema	49
7. Resultados y Discusión	51
7.0.1. Resultados de simulación	51
7.0.2. Resultados del prototipo físico	61
7.0.3. Ajuste polinomial para el patrón identificado	70
7.0.4. Validación de costo y fabricación del prototipo:	76
8. Conclusiones	79

9. Trabajos futuros	81
10. Anexos	83
Anexos	83
Anexo 1 – Manual de Usuario	83
Bibliografía	89

Índice de figuras

3.1. Variables más medidas en un proceso productivo en Colombia [1]	7
6.1. Diagrama de flujo de proceso de diseño en ingeniería.	19
6.2. Matriz de prioridad de parámetros	24
6.3. Matriz de comparación de principios vs parámetros	25
6.4. Matriz de selección de principio de funcionamiento	26
6.5. Electrodo tipo estaca. Tomado de: [2]	27
6.6. Electrodo tipo sonda. Tomado de: [3]	27
6.7. Electrodo tipo plaza. Tomado de: [4]	28
6.8. Tipos de electrodos	28
6.9. Matriz de comparación de materiales	30
6.10. Diagrama de flujo: procedimiento de simulación.	32
6.11. Construcción del sensor en simulación.	33
6.12. Representación del suelo en Ansys.	33
6.13. Representación del aire en Ansys.	34
6.14. Frontera (perfect E) en los electrodos.	35
6.15. Representación de las mallas en Ansys.	36
6.16. Representación del <i>lumped port</i> en simulación.	37
6.17. Barrido en frecuencia (<i>setup solution</i>)	38
6.18. Herramientas para análisis de simulación.	39
6.19. Configuración de parámetros S en Ansys.	39
6.20. Estacas de prototipo funcional	41
6.21. Orificios señalados en las estacas del sensor	41
6.22. Prensa de palanca del CAP.	42
6.23. Circuito de acople.	43
6.24. Sierra caladora usada para cortar el circuito.	43
6.25. Sensor ensamblado.	44
6.26. Sensor ensamblado después del corte.	45
6.27. Agua destilada usada en las pruebas.	46
6.28. Muestra de suelo utilizada después del secado.	46
6.29. Módulo de calibración ZN-Z135.	48
6.30. Analizador de redes vectoriales de la PUJ.	49
7.1. Resultado de simulación en tierra seca.	53
7.2. Resultados de simulación al 10 % de humedad	54
7.3. Resultados de simulación al 30 % de humedad	55
7.4. Resultado de simulación al 50 % de humedad.	56

7.5. Resultado de simulación al 70 % de humedad.	58
7.6. Consolidado de resultados de simulación.	60
7.7. Datos obtenidos para tierra seca.	62
7.8. Datos obtenidos para tierra con 10 % de humedad. (Parámetro S_{11})	63
7.9. Datos obtenidos para tierra con 30 % de humedad.	64
7.10. Datos obtenidos para tierra con 50 % de humedad.	65
7.11. Datos obtenidos para tierra con 70 % de humedad.	66
7.12. Consolidado de resultados de la experimentación	67
7.13. Acercamiento	69
7.14. Polinomio de aproximación	70
7.15. Ajuste polinomial no lineal de la frecuencia de resonancia.	73
7.16. Modelo equivalente de línea de transmisión con parámetros distribuidos en los electrodos del sensor.	75
10.1. Adaptador utilizado para conectar el sensor al VNA.	85
10.2. Balanza utilizada en pruebas experimentales.	86
10.3. CNC utilizado para perforar las estacas.	86
10.4. Empack (material utilizado para sostener estacas del sensor).	87
10.5. Esmeril del CAP (utilizado para dar forma a las varillas).	87
10.6. Conexión del sensor al VNA.	88

Índice de cuadros

6.1. Comparación de principios de sensores de humedad del suelo	24
6.2. Comparativa de sensores según el número de electrodos	29
6.3. Pesos de la muestra de suelo brindada por el laboratorio y contenido de humedad añadido con agua destilada.	47
7.1. Valores de permitividad relativa y conductividad según la humedad del suelo.	52
7.2. Frecuencia de resonancia observada según el porcentaje de humedad	72
7.3. Costos estimados de los componentes del sensor de humedad	77

Introducción

Históricamente Colombia es un país que ha destacado por su gran producción agrícola, esto gracias a su clima variado y rica geografía, lo que ha permitido el cultivo de productos como café, arroz, la producción de frutas tropicales como el banano y maracuyá, entre otras, que han posicionado nuestra nación dentro del mercado agrícola internacional. Por esta razón, con el fin de mantener la competitividad y ser capaz de afrontar la demanda global ha tenido la necesidad de adoptar nuevas técnicas de cultivo, lo que incluye la sofisticación de la maquinaria y los procedimientos que usan en el campo.

No obstante, pese a este creciente esfuerzo por incorporar mejoras en el sector agrícola colombiano, siguen existiendo problemáticas que afectan día a día la capacidad de producción, siendo una de las más relevantes el desperdicio de alimentos, cuya cifra en Colombia asciende al 34 % según establece la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) [5]. Por este motivo, cobra relevancia ahondar sobre una de las raíces del problema, tal es, el insuficiente control que se tiene sobre las variables que se consideran clave para el correcto desarrollo de los cultivos, entre ellas se sitúan, el pH, el nivel de materia orgánica y la principalmente tratada en este documento la **humedad**. De esta manera, con la mira de cumplir con los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible), en especial, con los números 2 y 12 “Hambre cero” y “Producción y consumo responsables”, respectivamente. [6], se presenta como una necesidad proponer y ejecutar planes y tecnologías que ayuden a mitigar el impacto negativo en el agro.

Así, con respecto a la integración de tecnologías en el campo y en las tierras de Colombia, el concepto de *Agricultura de Precisión* ha cobrado mayor relevancia, esto con el fin de optimizar el uso del agua y mejorar la eficiencia de los recursos en cultivos. Sin embargo, actualmente los sistemas de detección y sensores comerciales presentan altos costos, poca adaptabilidad a entornos variables y su disponibilidad en el contexto colombiano es limitada. Bajo esta perspectiva y considerando los puntos anteriormente expuestos, se plantea como objetivo diseñar un sensor de humedad económico, adaptable y validado mediante simulaciones y pruebas físicas, que responda a las condiciones reales del campo agrícola colombiano.

En aras de cumplir con dicho objetivo general, es necesario proponer una metodología que incluya un proceso iterativo enfocado en tres tareas principales: diseño, simulación y validación. Para las cuales, se presentan como una subdivisión, objetivos específicos que comprenden diversas etapas: una fase de investigación para entender las bases teóricas y los principios físicos que condicionan el funcionamiento de este tipo de sensores; la comparación de estos principios y selección del más eficiente para aplicarlo en el dispositivo de este proyecto; la implementación de simulaciones en distintos niveles de humedad; luego, la identificación de un patrón y la propuesta de modelos matemáticos polinomiales que permitan relacionar la humedad con una magnitud física capaz de

ser detectada por el dispositivo, la comparación de resultados con mediciones experimentales y la validación del cumplimiento de normativas técnicas para garantizar la seguridad, calidad y sostenibilidad ambiental. Todo lo anterior haciendo uso de software especializado como *ANSYS Electronics* y posteriormente pruebas en laboratorio con un prototipo funcional.

Por último, cabe destacar la disposición del presente documento, el cual está organizado de la siguiente manera: en los capítulos 2 y 3 se presentan los antecedentes, el planteamiento del problema y la justificación de este proyecto de grado; en el Capítulo 4 el objetivo general y los objetivos específicos del proyecto; en el Capítulo 5 el marco teórico y conceptual que sustenta el diseño; en el Capítulo 6 se describe la metodología seguida, explicando cada parte del proceso de diseño, simulaciones y construcción del prototipo; en el Capítulo 7 se detallan los resultados de simulación y experimentación, incluyendo análisis matemáticos y normativos; finalmente, en los Capítulos 8 y 9 se exponen las conclusiones, recomendaciones y posibles líneas de trabajo futuro.

Planteamiento del Problema

En principio, para definir el contexto del problema es necesario definir el concepto central sobre el cual se trabajará, se puede definir a la Agricultura de Precisión (AP) como “un proceso en el que se utiliza información y tecnología para la recopilación de datos espacio-temporales de alta resolución sobre las condiciones atmosféricas y del suelo de las tierras agrícolas.” [7] Teniendo esto en cuenta, se puede decir que una tecnología que interviene en las técnicas de la AP es la IoT “Internet of Things”, que a través de un modelo de múltiples capas permite desarrollar aplicaciones para el cuidado del agro. Así, una de las capas que constituye dicho modelo es la de *sensing*, que contiene todos aquellos dispositivos que son capaces de medir variables importantes en el contexto rural, así como temperatura, pH, **humedad**, entre otras.

Agregando a lo anterior, para dar relevancia al tema es preciso citar la FAO “Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura”, que ha realizado pronósticos y predicciones, encontrando que para lograr alimentar a más de las 9 000 millones de personas que poblarán la tierra para el 2050, será necesario aumentar la producción de alimentos en un 60 %. Sin embargo, en el sector agrícola, el uso excesivo de fertilizantes está afectando variables de la tierra, como la acidez, y por lo tanto, la producción de algunos tipos de alimentos como el café, cuyo pH debe oscilar dentro del rango de 5.0 y 5.5. Por otro lado, según el Banco Mundial, en promedio, el 70 % del agua que se extrae en el mundo es utilizada en la agricultura, gran parte de esta cifra es malgastada a causa de no utilizar los sistemas de riego más adecuados en función del cultivo, además de no monitorear el nivel de humedad en la tierra para aplicar el riego cuando en realidad es necesario.

Por esta razón nace la necesidad de diseñar sensores de humedad con características como bajo costo, toma eficiente de la variable, otorgamiento de una salida digital para procesamiento y posibilidad de integración a sistemas de comunicación inalámbrica como redes LoRa (Low Power Wide Area), que se caracterizan por su bajo consumo de potencia y capacidad de conexión en un área amplia. Todo lo anterior con el fin de responder a las tendencias y necesidades del sector en el contexto colombiano [8].

No obstante, la medición de las variables del suelo sugiere altos costos debido a que los materiales deben ser resistentes a los cambios ambientales de la zona del cultivo, por ejemplo, para la humedad, en el mercado se ofrecen dispositivos con distintos principios de funcionamiento, los más asequibles son aquellos que miden la conductividad eléctrica, sin embargo, su vida útil puede llegar a ser de unos pocos días. Por otro lado, los sensores más resistentes son los que infieren la humedad a partir de la permitividad eléctrica, que pueden ser implementados físicamente y tomar datos por un tiempo prolongado. Actualmente, el desarrollo de estos sensores apunta en camino de la impresión por inyección de tinta, es decir, basados en grafeno, con lo que pueden lograr alta sensibilidad y baja histéresis [9].

Finalmente, es relevante reincidir en la importancia que tiene para el sector agrícola la medición de variables que afectan directamente la calidad de los cultivos. Se hace hincapié en la necesidad de investigación sobre el diseño de sensores de humedad que puedan ser implementados dentro del sector rural colombiano de modo que se pueda ofrecer una solución al campesino común y por ende se brinde una mayor eficiencia en los procesos de producción, lo que elevaría la calidad de los alimentos colombianos.

Justificación

Según [7], la agricultura de precisión se basa en la recopilación y análisis de datos detallados del entorno agrícola. Considerando esta premisa, es esencial contar con sensores que permitan monitorear variables clave como la humedad del suelo. La información analizada en los sistemas de AP consiste principalmente en variables que permitan conocer la calidad del cultivo y su entorno, tales como humedad, para tener cuenta del requerimiento de agua de una especie de planta, pH, para saber los cambios de acidez en los suelos, o incluso luz absorbida y reflejada en hojas, donde la finalidad es conocer la producción de clorofila para inferir el bienestar de un cultivo completo.

En ese orden de ideas y considerando que desde la Pontificia Universidad Javeriana de Cali que investiga en conjunto con el instituto Ómicas, se busca desarrollar sistemas integrados basados en sensores, que faciliten las labores del agricultor colombiano para sus tareas de producción de alimentos con el fin de atender a los objetivos de desarrollo sostenible como hambre cero y producción sostenible. A esto se suma que Colombia es un país consumidor masivo de productos electrónicos, más aún de sensores dada la carencia de una industria propia que se encargue de la producción de los mismos para su uso y desarrollo en las tierras y cultivos del agro nacional, como se expone en [1]. Es así como se pretende atender a la necesidad de diseño y producción de un sensor de humedad de bajo costo que pueda ser integrado dentro de una red de producción de cultivos colombianos como caña y arroz, que son productos por excelencia tratados desde Ómicas.

Ahora bien, con el tratamiento de la presente necesidad se busca motivar la creación de sensores desde la producción colombiana, un aspecto que sería clave para potenciar el crecimiento de la industria nacional en este ámbito. Asimismo, se presenta como una propuesta positiva el hecho de repensar los sensores que actualmente se encuentran en el mercado, que pese a tener un buen desempeño pueden resultar costosos para las fincas de cultivo promedio en Colombia, como ejemplo de ello se tiene el EM500-SMTC [10], un sensor para la agricultura que provee la compañía de soluciones IoT Milesight, cuyo precio se eleva hasta los 630 euros aproximadamente, costo que no se adapta a la economía del agricultor colombiano promedio. Adicionalmente, este módulo tiene la capacidad de medir temperatura y conductividad eléctrica, que pese a que son variables también importantes, se puede deducir que no se realiza un foco específico para la medición de la humedad, un aspecto que junto a la reducción del costo, se quiere lograr desde el proyecto planteado en este documento.

Adicionalmente, este proyecto podría aportar al fortalecimiento del sector agrícola colombiano al ofrecer una herramienta tecnológica que favorezca el uso racional y eficiente del agua en cultivos. Un sensor de humedad capaz de integrarse a una red de AP permitiría mejorar la eficiencia en la producción agrícola, minimizando el desperdicio de recursos hídricos y facilitando el monitoreo del ciclo de riego. Esto contribuiría a cultivos más saludables y sostenibles, alineándose con estándares

de calidad y beneficiando tanto a los productores como a los consumidores. Se puede añadir como otro factor positivo, el hecho de la tecnificación de los cultivos, ya que se lleva la tecnología a un campo donde los procesos, en su mayoría, suelen realizarse de manera manual, lo que favorece la automatización además de la inclusión social y tecnológica de la población en zonas rurales, cuyo trabajo se ve impulsado por la implementación de nuevas técnicas de producción. Finalmente, en materia investigativa el desarrollo de un sensor, particularmente de humedad, enriquece a la PUJ de modo que se hace un avance en conocimientos de diseño, agricultura y tecnología, aspectos que resultan de interés para este tipo de instituciones y otras como Ómicas e incluso los mismos ingenios y fincas de cultivo involucradas.

Colombia demanda especialmente productos electrónicos primarios como los sensores, diferentes empresas requieren medir variables en sus procesos de control y producción, pues los sensores son el elemento principal en un sistema de lazo cerrado. Sin embargo, no hay una industria sensórica que supla las necesidades de las empresas productivas y los agricultores nacionales. En un estudio realizado por estudiantes de la Universidad Nacional de Colombia, se cuestionó a 1173 empresas de los sectores C, D y E de la Clasificación Internacional Industrial Uniforme (CIIU) sobre los sensores utilizados, las variables más importantes, y los proveedores que ofrecen los sensores más adecuados [1].

Como se puede ver en la Figura 3.1, la humedad está entre las siete variables de mayor interés para las empresas, debido a que cerca de 30 entidades la ponen como la variable más importante en sus procesos productivos. Dentro de este mismo estudio, se pregunta a las empresas sobre sus proveedores de dispositivos de medida, donde 18 compañías distribuidoras fueron identificadas, siendo Siemens (empresa alemana) la más demandada con diferencia sobre sus competidoras. Siendo así, los usuarios potenciales identificados son las empresas productivas del país, los pequeños o medianos agricultores interesados en la implementación de sistemas de AP para el uso eficiente del recurso hídrico, y los ingenios de caña de azúcar presentes en el valle geográfico del río Cauca, entre los que se encuentran el ingenio Carmelita, Incauca, La Cabaña, Manuelita, entre otros; en adición, los institutos de investigación y universidades están interesados en el desarrollo de sensores en el país, pues es necesario reducir los elevados costos que supone adquirir un sensor de larga vida útil, alta precisión y adaptabilidad a diferentes entornos sin afectar las medidas, siguiendo las tendencias expuestas por Karanassios [8], razón por la cual son también posibles usuarios entidades como Ómicas, Cenicaña, Fedearroz, entre otros.

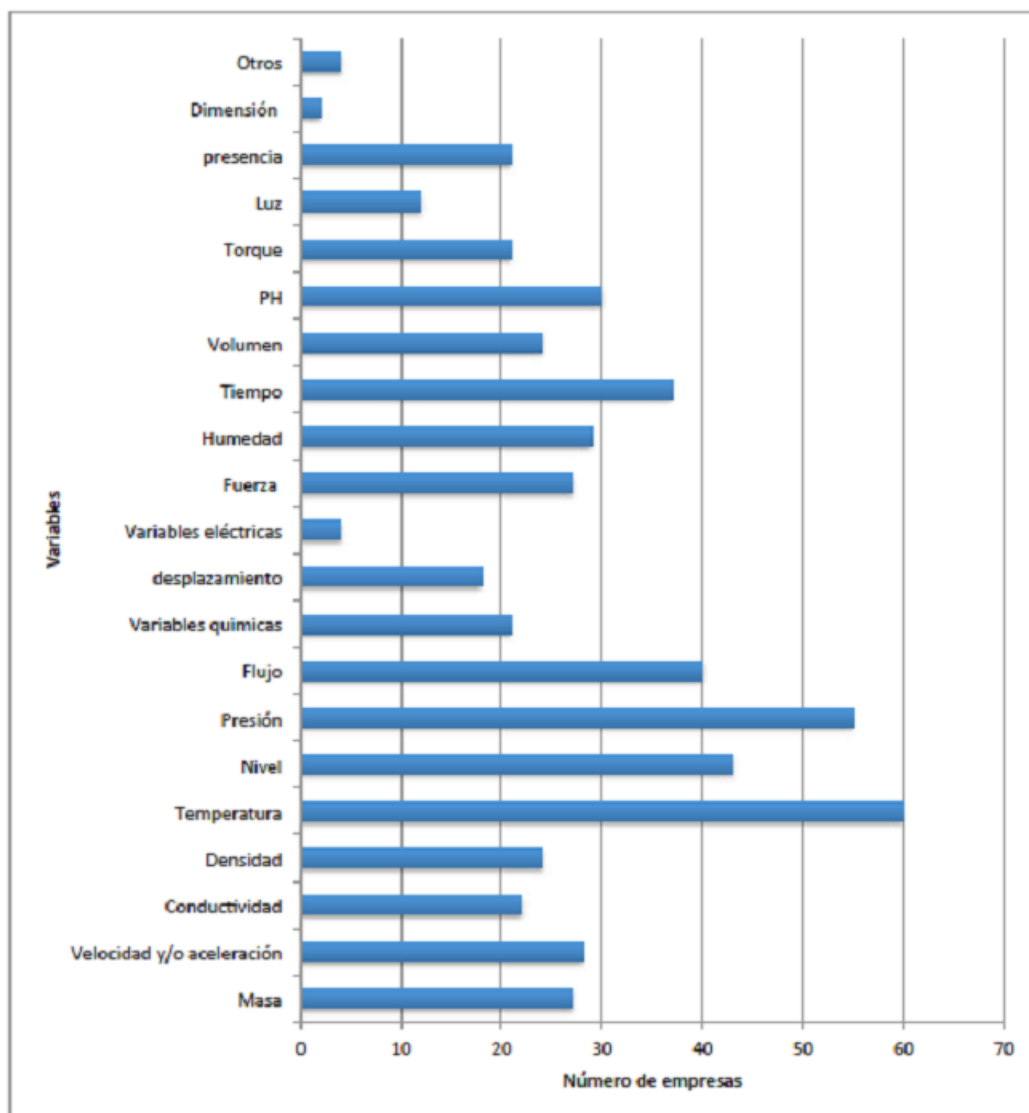


Figura 3.1: Variables más medidas en un proceso productivo en Colombia [1]

Objetivos

4.1. Objetivo General

Desarrollar un sensor de humedad de suelo de bajo costo para su uso en aplicaciones del sector agrícola colombiano.

4.2. Objetivos Específicos

- Analizar los principios físicos necesarios para la medición de la humedad en el suelo.
- Diseñar un prototipo funcional del sensor, basado en los principios físicos establecidos a partir del análisis.
- Establecer simulaciones y pruebas en software de alta confiabilidad para la evaluación del diseño.
- Desarrollar un prototipo funcional del sensor diseñado.
- Determinar el desempeño del prototipo del sensor de humedad desarrollado, a partir del análisis comparativo entre los resultados obtenidos por simulación y los resultados experimentales.

Marco de Referencia

5.1. Áreas Temáticas

- Instrumentation and measurement - Electric variables - Capacitance
- Instrumentation and measurement - Electric variables - Permittivity
- Instrumentation and measurement - Measurement - Antenna measurements
- Instrumentation and measurement - Measurement - Electromagnetic measurements - Electromagnetic modeling
- Instrumentation and measurement - Measurement - Electromagnetic measurements
- Instrumentation and measurement - Measurement - Frequency measurement - Frequency-domain analysis
- Instrumentation and measurement - Measurement - Soil measurements
- Systems engineering and theory - Modeling - Simulation - Computer simulation
- Industry applications - Industries - Agriculture - Precision agriculture

Cabe señalar que muchas de las áreas previamente mencionadas se articulan de forma integral para abordar tanto el diseño físico del sensor como su integración en sistemas tecnológicos orientados al monitoreo agrícola y a la gestión eficiente de recursos hídricos en el campo.

5.2. Marco Teórico

El presente marco teórico recoge los principales fundamentos que sustentan el desarrollo de un sensor de humedad para aplicaciones en AP. Se abordan conceptos relacionados con la propagación de ondas electromagnéticas en medios dieléctricos, las tecnologías utilizadas en sensores de humedad, su evolución hacia dispositivos inalámbricos inteligentes, y el contexto actual de la industria de sensores en Colombia. Estos elementos permiten comprender tanto el diseño como la validación experimental del dispositivo propuesto. En este caso, se iniciará explorando conceptos clave que se tratan a lo largo del proyecto:

- **Humedad:** La humedad se define como una propiedad que mide el contenido de agua presente en un medio, ya sea gaseoso, líquido o sólido. Esta cantidad, puede variar según las condiciones del ambiente como precipitaciones, proximidad al nivel del mar, temperatura del aire, entre otros factores. En ese orden de ideas, todo lugar que contenga alguna fuente o recurso hídrico que pueda evaporarse estará relacionado con la humedad [11].

Teniendo esto en cuenta, se puede diferenciar entre dos formas de medir la humedad:

- **Humedad relativa:** Se define como la capacidad del aire para almacenar agua, dicha capacidad depende del punto de saturación. La humedad relativa se puede calcular como el cociente entre la cantidad de vapor presente en la atmósfera, dividido la máxima cantidad que podría contener multiplicado por cien para ser expresada como porcentaje para diferentes aplicaciones como las ligadas a la agricultura.
- **Humedad absoluta:** Hace referencia a la cantidad de materia de vapor de agua presente en un volumen de aire antes de condensarse. Esta medida se expresa en gramos por metro cúbico generalmente.

Por otro lado, otro concepto importante a entender, es la permitividad eléctrica.

- **Permitividad eléctrica:** La permitividad eléctrica es una propiedad que describe cómo un material responde a un campo eléctrico aplicado. La permitividad eléctrica compleja ε tiene la forma de la ecuación 5.1:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (5.1)$$

Donde ε' es la parte real que representa la capacidad del material para almacenar carga eléctrica, y $j\varepsilon''$ es la parte imaginaria asociada con la pérdida de energía debido a la absorción de la señal electromagnética.

En materiales porosos como el suelo, la presencia de agua aumenta la permitividad debido a las propiedades dieléctricas del agua, lo que permite utilizar esta propiedad para la medición de la humedad [9].

Medida de Humedad en Suelo: El monitoreo de la humedad del suelo es fundamental en diversas aplicaciones, especialmente en la agricultura de precisión, ya que permite optimizar el uso del recurso hídrico, mejorar la eficiencia del riego y aumentar la productividad de los cultivos. Existen múltiples técnicas para medir la humedad del suelo, entre las que se destacan los métodos gravimétricos, tensiométricos, resistivos, capacitivos y los basados en reflectometría en el dominio del tiempo y la frecuencia (TDR y FDR respectivamente, por sus siglas en inglés) [12], [13].

Principio de Funcionamiento del Sensor Capacitivo: El sensor capacitivo de humedad del suelo opera sobre la base del cambio de la permitividad eléctrica del medio circundante. El agua posee una permitividad elevada (aproximadamente 80), mientras que el suelo seco tiene valores mucho menores. Cuando el contenido de humedad aumenta, la capacitancia del

sistema también lo hace, lo cual puede medirse y correlacionarse con el porcentaje de agua en el suelo [14]. La capacitancia C de un condensador plano está dada por la ecuación 5.2:

$$C = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A}{d} \quad (5.2)$$

Donde ε_r es la permitividad relativa del medio (variable con la humedad), ε_0 es la permitividad del vacío, A es el área de las placas, y d es la distancia entre ellas. Al variar ε_r , la capacitancia también varía, permitiendo estimar la humedad del suelo [15].

Simulación Electromagnética con ANSYS HFSS: Para predecir y analizar el comportamiento del sensor, se emplean herramientas de simulación electromagnética como ANSYS HFSS. Este software permite modelar estructuras 3D y resolver las ecuaciones de Maxwell mediante el método de elementos finitos (FEM), facilitando el análisis de parámetros como la impedancia, la resonancia, y la respuesta en frecuencia [16].

En este proyecto, se realizaron barridos en frecuencia para obtener la respuesta de magnitud en dB, observando cómo esta se ve afectada al cambiar la permitividad eléctrica del entorno simulado (representando distintos niveles de humedad).

Instrumentación: Analizador Vectorial de Redes (VNA): El Analizador Vectorial de Redes (VNA) es una herramienta clave en la caracterización de sensores que trabajan en RF y microondas. Este dispositivo permite medir parámetros S (*scattering parameters*), particularmente S_{11} en este caso, para evaluar la cantidad de energía reflejada por el sensor en función de la frecuencia [17].

La precisión de las mediciones depende en gran medida de una calibración adecuada del equipo, realizada mediante estándares de referencia como Open, Short y Load, utilizando kits como el ZN-Z135 de Rohde & Schwarz [18].

El desarrollo de sensores de humedad para suelos destinados al agro colombiano se enmarca en un contexto multidisciplinario que involucra aspectos técnicos, normativos, medioambientales, sociales, económicos y políticos. Para su desarrollo, es esencial comprender las normativas vigentes en el ámbito de la tecnología agrícola, así como las limitaciones y desafíos asociados con el entorno local.

5.2.1. Normatividad en el dominio del problema

El desarrollo y la implementación de tecnologías en el ámbito agrícola en Colombia están sujetos a una serie de regulaciones y normativas que buscan asegurar la calidad, sostenibilidad y seguridad de los sistemas que se emplean en el sector. Entre las principales normativas que deben considerarse se encuentran las siguientes:

- **Normas ISO y IEC:** Las normas internacionales, como las ISO 9001 [19] (calidad) y las IEC 61010 [20] (seguridad de los instrumentos eléctricos), son esenciales para garantizar que los sensores de humedad para suelo sean precisos, fiables y seguros. Además, en el contexto

de la maquinaria y equipos electrónicos aplicados al sector agrícola, la normativa ISO 11783 define una arquitectura de red de comunicación basada en el protocolo CAN (Controller Area Network), diseñada para garantizar la interoperabilidad entre distintos dispositivos dentro de vehículos agrícolas [21]. Por su parte, la norma ISO 25119 establece los requisitos de seguridad funcional para los sistemas electrónicos de control utilizados en maquinaria agrícola, forestal y equipos similares, promoviendo el desarrollo de soluciones tecnológicas confiables y seguras en entornos exigentes [22]. La adaptación de estas normativas al contexto colombiano es fundamental para asegurar que los productos tecnológicos cumplan con los estándares internacionales y nacionales.

- **Normatividad ambiental:** Colombia ha implementado diversas leyes para proteger el medio ambiente y promover prácticas agrícolas sostenibles. La Ley 99 de 1993 establece el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y la Política Nacional de Agricultura Sostenible [23], que incluyen directrices sobre el uso eficiente de los recursos hídricos, la conservación del suelo y el manejo de residuos. Además, la Ley 1876 de 2017 establece el marco normativo para el Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria (SNIA) en Colombia, promoviendo la articulación entre investigación, asistencia técnica y formación para el desarrollo rural. Esta ley resalta la importancia de incorporar tecnologías apropiadas en el sector agropecuario, orientadas a mejorar la productividad, sostenibilidad y adaptación al cambio climático, lo cual respalda la pertinencia del desarrollo de sensores tecnológicos como el propuesto en este trabajo [24]. Estas normativas son clave para garantizar que el sensor de humedad se alinee con las prácticas de conservación de agua en el agro colombiano.
- **Regulación sobre tecnología agrícola:** El Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) y la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) regulan el uso de tecnologías en el sector agrícola [25]. Cualquier dispositivo o tecnología que se implemente en el agro debe cumplir con los requisitos legales de sostenibilidad, lo cual incluye las regulaciones sobre la eficiencia en el uso de recursos naturales como el agua.
- **Regulación de dispositivos electrónicos:** La norma NTC 5001 [26] regula los equipos electrónicos en Colombia, abarcando aspectos como seguridad eléctrica y compatibilidad electromagnética. Es fundamental que el sensor de humedad para suelo cumpla con estas normativas para evitar impactos negativos en la salud de los usuarios y en el entorno.

5.2.2. Limitaciones medioambientales

Colombia tiene una gran diversidad climática y ecológica, lo que representa un desafío para la implementación de tecnologías agrícolas que puedan operar de manera eficiente en todo el territorio. Las principales limitaciones medioambientales incluyen:

- **Condiciones climáticas variables:** El clima en Colombia varía significativamente de una región a otra, lo que genera desafíos para la medición precisa de la humedad en el suelo. En algunas zonas, como los Andes, se presentan grandes variaciones en la temperatura y

las precipitaciones, lo que puede afectar la fiabilidad del sensor de humedad. Además, las temporadas de sequía y lluvias intensas pueden alterar los valores de humedad en el suelo de manera impredecible.

- **Tipos de suelos:** Colombia tiene una amplia variedad de tipos de suelo, desde suelos arcillosos hasta suelos arenosos, que influyen en la retención de agua. Estos factores deben ser considerados al desarrollar un sensor de humedad que sea capaz de adaptarse a las diversas condiciones del suelo colombiano.
- **Contaminación del agua:** En algunas regiones del país, el agua utilizada para la agricultura está contaminada por pesticidas, metales pesados o residuos industriales, lo que puede influir en la precisión de los sensores de humedad si no se gestionan adecuadamente.

5.2.3. Limitaciones sociales y económicas

En Colombia, la implementación de nuevas tecnologías en el sector agrícola enfrenta diversas barreras sociales y económicas. Estas limitaciones pueden impactar tanto el desarrollo como la adopción de sensores de humedad para suelos:

- **Acceso a tecnología:** Las zonas rurales de Colombia, especialmente en regiones como la Amazonía, la Guajira o el Chocó, presentan limitaciones en cuanto al acceso a tecnologías avanzadas debido a la falta de infraestructura de telecomunicaciones y a la baja conectividad a internet. Esto puede dificultar la transmisión de datos obtenidos por sensores de humedad, lo que limita el uso de tecnologías basadas en la nube o en redes de sensores inalámbricos.
- **Costos de implementación:** La adquisición e implementación de tecnologías avanzadas como sensores de humedad pueden ser costosas para los pequeños y medianos productores, quienes constituyen una parte significativa de la población agrícola colombiana. Es necesario desarrollar soluciones que sean accesibles económicamente, considerando que muchos agricultores enfrentan problemas de financiación y carecen de incentivos para invertir en tecnología de punta.
- **Falta de capacitación:** En muchas regiones, los agricultores no cuentan con la formación adecuada en el uso de nuevas tecnologías. Esto dificulta la adopción de sistemas de monitoreo basados en sensores, ya que el personal técnico debe ser capacitado para operar, mantener y gestionar estos dispositivos de manera eficiente.

5.2.4. Limitaciones políticas

Las limitaciones políticas también juegan un papel importante en el desarrollo y la implementación de tecnologías agrícolas en Colombia. Algunas de las principales son:

- **Política agrícola:** Aunque el gobierno colombiano ha implementado políticas para la fomento de la agricultura sostenible y la gestión eficiente del agua, los esfuerzos no siempre son

coherentes o suficientemente eficaces a nivel local. La falta de una política nacional robusta para la promoción de tecnologías innovadoras puede dificultar la adopción de tecnologías como los sensores de humedad.

- **Inseguridad jurídica:** En algunas regiones rurales de Colombia, la inseguridad jurídica relacionada con la propiedad de la tierra y los recursos naturales limita la inversión en tecnologías a largo plazo.

5.3. Trabajos Relacionados

- **Monitoring moisture of soil using low cost homemade Soil moisture sensor and Arduino UNO:** El artículo trata sobre el desarrollo de un sensor de humedad del suelo de bajo costo. Los autores presentan un método para fabricar un sensor de humedad del suelo que permite estimar el contenido de humedad en el suelo y, por lo tanto, proporcionar información sobre la cantidad de agua requerida. El sensor se fabrica utilizando materiales de bajo costo y fácilmente disponibles. El principio de funcionamiento se basa en la medición de la resistencia eléctrica del suelo, que varía con el contenido de humedad. Primero se calibra y luego se prueba en diferentes tipos de suelo para verificar su precisión y confiabilidad.

Los resultados muestran que el sensor desarrollado puede monitorear eficazmente la humedad del suelo y proporcionar información útil para la gestión del riego. Además, el bajo costo y la simplicidad de fabricación hacen que este sensor sea una opción atractiva para aplicaciones agrícolas y de jardinería [27].

- **Development of a low Cost Soil Moisture Sensor:** En el trabajo de Tomar y Patidar (2019), se presenta el desarrollo de un sensor de humedad del suelo de bajo costo basado en el principio de medición capacitiva. Los autores señalan que el sensor diseñado ofrece ventajas de bajo costo y alta sensibilidad en comparación con otros métodos de medición de humedad del suelo. El artículo describe cómo se realizó el análisis de la respuesta en corriente alterna y corriente continua del sensor a lo largo del rango de frecuencias de 100 Hz a 1 MHz, observando que la permitividad eléctrica del suelo varía directamente proporcional al contenido de humedad. Los hallazgos de este trabajo sugieren que este tipo de sensores capacitivos de bajo costo podrían ser útiles para aplicaciones en hidrología, agricultura y meteorología que requieren monitoreo de humedad del suelo [28].
- **Screen-printed graphene-carbon ink based disposable humidity sensor with wireless communication:** Este estudio publicado en la conferencia internacional IEEE sobre electrónica de semiconductores, profundiza en un sensor de humedad de tipo capacitivo basado en grafeno impreso. El principio para detectar la humedad y el diseño para inyección de tinta. Se logra establecer la estabilidad del sensor, su relación con la temperatura y la importancia del grafeno, lo cual es un aspecto relevante debido a la estrecha

relación del proyecto con el instituto Ómicas donde ya se emplean técnicas similares [29].

- **Design and Evaluation of a Capacitive Sensor for Real Time Monitoring of Gravimetric Moisture Content in Soil:** Este trata el desarrollo y evaluación de un sensor capacitivo para el monitoreo en tiempo real del contenido de humedad gravimétrica en el suelo. El sensor fue diseñado y probado con dos terminales, y utiliza un circuito estable de multi-vibrador para medir la capacitancia entre los dos terminales cuando se inserta en el suelo. El sistema usa un microcontrolador para medir, calcular y guardar el contenido volumétrico de humedad del suelo en una tarjeta SD. Los resultados validan la aplicabilidad efectiva del sensor desarrollado para la medición del contenido volumétrico de humedad del suelo. El artículo no entra en detalles específicos sobre cómo se desarrolló el sensor, pero proporciona una descripción general de su diseño y funcionamiento [30].

Materiales y Métodos

6.1. Metodología

El desarrollo del sensor de humedad siguió un enfoque estructurado basado en el proceso de diseño en ingeniería, mostrado en la figura 6.1, que garantiza una metodología iterativa para la optimización del diseño a soluciones en problemas de ingeniería, evaluando alternativas y validando la solución a través de pruebas y ajustes en caso de necesitarlos.

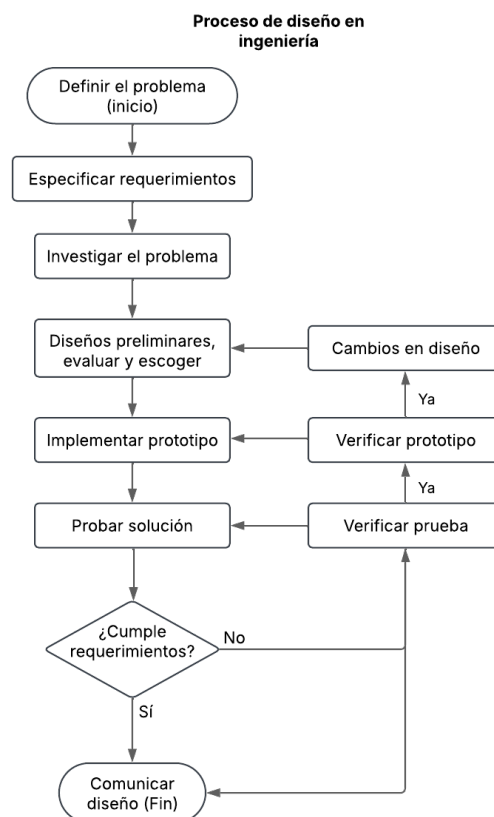


Figura 6.1: Diagrama de flujo de proceso de diseño en ingeniería.

A continuación se hace una descripción de cada parte del proceso que se ha expuesto en el diagrama:

1. **Definición del problema:** Se identifica la necesidad de desarrollar una solución para abordar la problemática en cuestión, esto se presenta a detalle en el capítulo 3 (justificación) donde se analizan los factores claves. Además, se establece el alcance del proyecto en la parte final de este y en los objetivos.
2. **Especificación de requerimientos:** Aquí se definen las características y condiciones que debe cumplir la solución, basándose en la investigación y en las necesidades identificadas. Se explora a fondo en la siguiente sección de este capítulo.
3. **Investigación del problema:** Se revisa la literatura y analizan estudios previos para comprender mejor los principios involucrados, las estrategias existentes para abordar el problema y las mejores prácticas en el desarrollo de soluciones similares, teniendo en cuenta el contexto de finalidad de medición de humedad en el suelo.
4. **Desarrollo de diseño preliminares:** Se plantean múltiples enfoques para el diseño de la solución, que son evaluados en términos de viabilidad técnica y teniendo en cuenta que se cumplan los requerimientos establecidos.
5. **Evaluación y selección del diseño:** En esta parte se analizan las ventajas y desventajas de cada posible modelo alternativo para la solución, seleccionando el que más se alinea a los requerimientos para su implementación. Además, se inicia el proceso de simulación para evaluar si el diseño propuesto funciona técnicamente y es capaz de medir la humedad.
6. **Implementación del prototipo:** Posterior al proceso de simulación, se procede a la fabricación y ensamblaje del sistema.
7. **Pruebas y verificación:** En esta etapa se realizan las pruebas experimentales del prototipo para evaluar su desempeño, recopilando datos de su comportamiento en condiciones reales y analizándolos.
8. **Iteración y optimización:** En caso de detectar fallos operativos, oportunidades de mejora o desviaciones con respecto a los requerimientos, se realizan ajustes en el diseño para repetir la fase de verificación hasta obtener una solución optimizada.
9. **Validación final y documentación:** Una vez que la solución cumple con los criterios de desempeño establecidos, se documenta el proceso y los resultados, asegurando la reproducibilidad y fundamentación técnica del desarrollo.

Asimismo, para cumplir con esta metodología de solución de problemas en ingeniería, se establecen las siguientes tareas de acuerdo a cada objetivo:

- **O.1.** Analizar los principios físicos necesarios para la medición de la humedad en el suelo.
 - **T.1.1** Clasificar los principios físicos utilizados en sensores de humedad presentes en el mercado actual.

- **T.1.2** Indagar en diferentes fuentes sobre los principios de funcionamiento clasificados.
- **T.1.3** Seleccionar el principio de funcionamiento más adecuado para cumplir con los parámetros de diseño.
- **O.2.** Diseñar un prototipo funcional del sensor, basado en los principios físicos establecidos a partir del análisis.
 - **T.2.1** Diseñar el circuito y la configuración del sistema de medición, teniendo en cuenta costos y eficiencia.
 - **T.2.2** Determinar los materiales y componentes electrónicos para la construcción del sensor.
 - **T.2.3** Definir la estructura mecánica del sensor y su integración con el sistema electrónico.
 - **T.2.4** Elaborar el esquema de conexión y señal de salida del sensor.
- **O.3.** Establecer simulaciones y pruebas en software de alta confiabilidad para la evaluación del diseño.
 - **T.3.1** Jerarquizar los parámetros principales a evaluar durante las pruebas en simulación.
 - **T.3.2** Seleccionar las pruebas que se van a realizar sobre el diseño presentado para determinar el cumplimiento de los parámetros de diseño.
 - **T.3.3** Analizar los resultados de las pruebas.
 - **T.3.4** Determinar el desempeño de la simulación y el diseño en base a los resultados.
- **O.4.** Desarrollar un prototipo funcional del sensor diseñado.
 - **T.4.1** Selección de materiales y componentes: Elegir los materiales dieléctricos, electrodos y otros elementos necesarios para la fabricación del sensor.
 - **T.4.2** Fabricación del sensor: Ensamblar el prototipo del sensor según el diseño propuesto, con base en los resultados de las simulaciones previas.
 - **T.4.3** Integración de conexiones eléctricas: Implementar las conexiones eléctricas necesarias para la alimentación y medición de señales.
- **O.5.** Determinar el desempeño del prototipo del sensor de humedad desarrollado, a partir del análisis comparativo entre los resultados obtenidos por simulación y los resultados experimentales.
 - **T.5.1** Procesar y graficar los resultados de la simulación y los experimentales.
 - **T.5.2** Comparar las curvas obtenidas en ambos casos, analizando las diferencias entre simulación y experimento.
 - **T.5.3** Evaluar el comportamiento del sensor en diferentes niveles de humedad.

Con base en la metodología planteada, es momento de establecer los requerimientos de la solución.

6.2. Requerimientos del dispositivo

El objetivo principal de la solución es obtener una medida de la humedad en un porcentaje, para esto se entiende que el porcentaje de humedad se refiere a la cantidad de agua presente en un material en comparación con su peso total o peso seco. En suelos, este será proporcional a la cantidad de agua retenida en los poros del mismo.

Ahora bien, para garantizar la viabilidad del sensor y cumplir con el objetivo principal de este proyecto, su fabricación debe ser sencilla y de bajo costo sin comprometer la calidad de las mediciones. Se deben emplear materiales accesibles y procesos de manufactura convencionales para facilitar su replicación. Cabe resaltar que el sensor debe ser fácilmente integrable en sistemas electrónicos de adquisición de datos y monitoreo ambiental. Su diseño debe optimizar el consumo energético y garantizar estabilidad en diversas condiciones de uso.

Los requerimientos se pueden dividir en dos categorías. En primer lugar, los funcionales, que están directamente relacionados con el desempeño del dispositivo, los que permiten y buscan establecer condiciones en su función principal. A continuación, se enumeran los principales aspectos de este tipo que fueron considerados:

1. **Capacidad de detección de humedad:** El sensor debe ser capaz de medir variaciones en la humedad del suelo.
2. **Reproducibilidad de resultados:** Las mediciones deben ser consistentes al repetir pruebas bajo condiciones similares.
3. **Compatibilidad con sistemas electrónicos:** El sensor debe generar una señal de salida que pueda ser procesada fácilmente por sistemas electrónicos externos, facilitando su integración con plataformas de adquisición de datos.
4. **Estabilidad de la señal:** El sensor debe mantener un comportamiento estable frente a perturbaciones menores en el entorno de prueba.
5. **Resistencia a condiciones ambientales:** El sensor debe mantener su funcionalidad en condiciones de humedad extrema y variaciones de temperatura sin degradación de su desempeño.
6. **Alimentación y consumo de energía:** Se debe optimizar el consumo energético para permitir su uso en sistemas autónomos de monitoreo, considerando su posible implementación a gran escala.
7. **Respuesta en el rango de frecuencias establecido:** La medición debe realizarse en el rango de frecuencias definido en la simulación y validado en la implementación física.

Por otro lado, los requerimientos no funcionales no afectan directamente la capacidad de medición del sensor, pero sí su fabricación, accesibilidad o facilidad de implementación. Estos son:

1. **Bajo costo de materiales de fabricación:** Los materiales y componentes deben ser accesibles y de bajo costo, permitiendo una fabricación económica sin comprometer la calidad.
2. **Facilidad de manufactura:** El diseño debe permitir una fabricación sencilla mediante procesos estándar como el grabado de PCB y ensamblaje de conectores.
3. **Disponibilidad de materiales:** Los materiales empleados, deben estar fácilmente disponibles en el mercado.
4. **Simplicidad en la conexión eléctrica:** La interfaz con la fuente de señal debe ser estable y permitir una conexión segura con el sistema de medición.

Estos requerimientos establecen las bases para el diseño y desarrollo del sensor, asegurando que cumpla con los estándares de precisión, viabilidad económica y facilidad de implementación en aplicaciones reales.

6.3. Proceso de diseño y desarrollo

6.3.1. Selección del principio de funcionamiento

Como medida dentro del proceso de diseño es necesario hacer énfasis en el principio de funcionamiento del sensor, ya que de este depende el método por el cual se van a adquirir los datos que posteriormente serán usados en una etapa de procesamiento y así caracterizar la humedad del suelo. De este modo, se contó con los métodos más frecuentemente usados en el mercado actual:

- **Resistivo:** Mide la resistencia eléctrica entre dos electrodos en el suelo, que disminuye al aumentar el contenido de agua.
- **Capacitivo:** Mide la permitividad eléctrica del suelo que varía con el contenido de agua.
- **TDR (Time Domain Reflectometry):** Mide el tiempo que tarda un pulso electromagnético en viajar a lo largo de una sonda en el suelo, variando con la humedad.
- **FDR (Frequency Domain Reflectometry):** Similar al TDR pero mide el cambio de frecuencia de una señal en el suelo, indicando el contenido de agua.
- **Higrómetro térmico:** Mide el cambio de temperatura cuando se aplica un impulso de corriente en el suelo.

Aparte de su principio de funcionamiento, es necesario hacer un análisis en base a las ventajas y desventajas de cada método presentadas en el cuadro 6.1, esto para estimar aquel que resulta más pertinente para el diseño del prototipo. No obstante, es de gran importancia recalcar que dentro de la industria hay sensores que se basan no solamente en uno de los métodos, sino en

la combinación de ellos, esto con el fin de garantizar una medida más precisa del valor de la humedad.

Principio	Ventajas	Desventajas
Resistivo	Bajo costo, bajo consumo de energía, fácil de usar.	Sensible a la temperatura y a la salinidad del suelo.
Capacitivo	Fácil de implementar, económico.	Su vida útil se reduce por la corrosión en suelos húmedos.
TDR	Alta precisión, no destructivo, confiable en varios tipos de suelo.	Costo elevado, requiere equipo especializado.
FDR	Alta precisión, menos costoso que TDR.	Puede requerir calibración frecuente.
Higrómetro térmico	Bajo costo, bajo mantenimiento.	Sensible a la temperatura ambiental.

Cuadro 6.1: Comparación de principios de sensores de humedad del suelo

Teniendo en cuenta los principios más comunes utilizados en la agroindustria, se procedió a realizar una matriz de selección que permitiera determinar el principio (o los principios) a implementar para el desarrollo del sensor, para ello se realizó la matriz mostrada en la figura 6.2, que permitió determinar la prioridad de un parámetro sobre otro.

Parámetro	Bajo costo de fabricación y componentes	Facilidad de integración con sistemas electrónicos externos	Precisión y exactitud	Area de medición	Vida útil	Complejidad de instalación	Estabilidad y replicabilidad de las mediciones	Capacidad de operar en un rango de frecuencias	TOTAL	IMPORTANCIA
Bajo costo de fabricación y componentes	1	0	1	1	1	1	1	1	6	0.21
Facilidad de integración con sistemas electrónicos externos	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0.04
Precisión y exactitud	1	1	1	1	1	1	1	1	7	0.25
Area de medición	0	1	0	1	0	1	1	1	4	0.14
Vida útil	0	1	0	1	1	1	1	1	5	0.18
Complejidad de instalación	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0.04
Estabilidad y replicabilidad de las mediciones	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0.04
Capacidad de operar en un rango de frecuencias	0	1	0	0	0	1	1	1	3	0.11
									28.0	1.00

Figura 6.2: Matriz de prioridad de parámetros

De acuerdo con la figura 6.2 se halló que los parámetros con mayor relevancia fueron Precisión y exactitud, Bajo costo de fabricación y componentes y Vida útil, en el orden jerárquico presentado.

Por otro lado, considerando que los sensores que usan un determinado principio de funcionamiento comparten características similares, se procedió a diferenciar (dependiendo del principio) en qué medida se satisface cada uno de los parámetros expuestos en la figura 6.2 otorgando una puntuación del 1 al 10, siendo 10 el mayor grado de cumplimiento del parámetro y 1 el menor. Los resultados fueron plasmados en la figura 6.3

Parámetro	Tipo de sensor				
	Resistivo	Capacitivo	TDR	FDR	Higrómetro térmico
Bajo costo de fabricación y componentes	9	7	3	4	6
Facilidad de integración con sistemas electrónicos externos	8	8	5	6	5
Precisión y exactitud	4	7	9	8	5
Area de medición	3	6	8	7	4
Vida útil	3	8	9	8	5
Complejidad de instalación	4	5	3	4	4
Estabilidad y replicabilidad de las mediciones	4	8	9	8	5
Capacidad de operar en un rango de frecuencias	3	7	9	9	3
Total	38	56	55	54	37

Figura 6.3: Matriz de comparación de principios vs parámetros

Finalmente después de conocer la jerarquía de los parámetros y la medida en que cada tipo de sensor los cumple, se computó en la figura 6.4 el ponderado global que cuantifica la relación parámetro-tipo de sensor, nuevamente, en una escala del 1 al 10.

Parámetro/Tipo de sensor	Puntuación con PRIORIDAD				
	Resistivo	Capacitivo	TDR	FDR	Higrómetro térmico
Bajo costo de fabricación y componentes	1.93	1.50	0.64	0.86	1.29
Facilidad de integración con sistemas electrónicos externos	0.29	0.29	0.18	0.21	0.18
Precisión y exactitud	1.00	1.75	2.25	2.00	1.25
Area de medición	0.43	0.86	1.14	1.00	0.57
Vida útil	0.54	1.43	1.61	1.43	0.89
Complejidad de instalación	0.14	0.18	0.11	0.14	0.14
Estabilidad y replicabilidad de las mediciones	0.14	0.29	0.32	0.29	0.18
Capacidad de operar en un rango de frecuencias	0.32	0.75	0.96	0.96	0.32
Total	4.79	7.04	7.21	6.89	4.82

Figura 6.4: Matriz de selección de principio de funcionamiento

Donde se puede evidenciar que los principios basados en la medida capacitiva, el TDR y FDR fueron aquellos con mayor puntuación. Esto provee una visión más clara para el diseño del sensor que con el fin de cumplir con los objetivos propuestos se debe basar en alguno de estos 3 principios o incluso en la combinación de ellos para la medición de la humedad en el suelo.

6.3.2. Electrodo

Uno de los aspectos más relevantes a considerar dentro del proceso de diseño es la elección de la forma de los electrodos, precisamente porque son estos los objetos que están en contacto directo con el suelo húmedo y deben cumplir con las características necesarias para que puedan ser insertados en el mismo, captar el cambio en la capacitancia y funcionar en un período de tiempo prolongado.

De esta forma, se presentan a continuación los tipos de electrodos que comunmente se usan en el mercado agroindustrial, se describen y posteriormente se sintetiza la información en la figura 6.8 sus principales características:

1. **Electrodo tipo Estaca:** Es un electrodo de forma alargada, con una punta afilada que permite ser insertado fácilmente en el suelo. Como se puede ver en la figura 6.5.



Figura 6.5: Electrodo tipo estaca. Tomado de: [2]



Figura 6.6: Electrodo tipo sonda. Tomado de: [3]

2. **Electrodo tipo Sonda:** Es un electrodo más compacto y delgado, diseñado para insertarse en el suelo a diferentes profundidades. Permite realizar mediciones precisas de la humedad en varios puntos del suelo. Como se puede ver en la figura 6.6.
3. **Electrodo tipo Placa:** Este electrodo tiene una forma plana y generalmente se coloca en contacto directo con el suelo. Su área de contacto es más amplia, lo que le da una buena sensibilidad a la humedad en capas superficiales. Se puede ver en la figura 6.7.

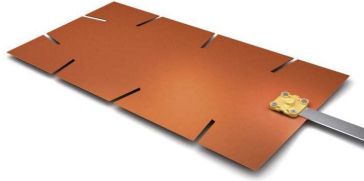


Figura 6.7: Electrodo tipo plaza. Tomado de: [4]

Tipo de electrodo	Ventajas	Desventajas	Uso común (Tipo de suelo)	Precio	Durabilidad
Electrodo tipo Estaca	Fácil instalación, buena penetración en el suelo	Difícil de retirar en suelos duros, posible compactación del suelo alrededor	Suelos compactos, arcillosos o duros	Bajo (~5-10 USD)	Alta (5-10 años)
Electrodo tipo Sonda	Compacto, permite mediciones precisas en múltiples puntos	Menor penetración en suelos muy duros, requiere calibración	Suelos heterogéneos, arena, suelos húmedos	Moderado (~20-50 USD)	Alta (5-8 años)
Electrodo tipo Placa	Amplia área de contacto, buena sensibilidad en capas superficiales	No es efectivo en suelos profundos	Suelos arenosos o suelos superficiales	Moderado (~15-30 USD)	Moderada (3-5 años)

Figura 6.8: Tipos de electrodos

Analizando la información sintetizada en la tabla de la figura 6.8, es posible observar cómo se destaca el electrodo tipo estaca para la aplicación la cual se pretende usar, esto gracias a su facilidad de instalación, siendo este uno de los parámetros considerados en fases de diseño anteriores. Más aún, es importante remarcar el tipo de suelo para el cual es apto, siendo aquellos arcillosos que es una característica común del suelo agrícola, esto junto con el precio más bajo dentro de las comparaciones y la mayor durabilidad lo hace el principal candidato para su implementación.

6.3.3. Análisis del número de electrodos

La medición de la humedad del suelo puede realizarse mediante diferentes principios físicos y configuraciones electrónicas. Uno de los aspectos fundamentales en el diseño de sensores de bajo costo es el número de electrodos que se utilizan para realizar la medición. En este apartado se analizan las configuraciones más comunes: uno, dos y tres electrodos, resaltando sus ventajas, desventajas y aplicaciones típicas.

a. Sensores de un electrodo: Este tipo de sensor se basa en la interacción entre un electrodo y el medio circundante, utilizando el entorno como referencia eléctrica. Es común en diseños capacitivos básicos o en configuraciones simplificadas donde se prioriza el bajo costo y la facilidad de implementación.

b. Sensores de dos electrodos: La configuración de dos electrodos es la más común en sensores resistivos y algunos sensores capacitivos. Se mide la impedancia del suelo entre dos puntos metálicos, lo cual se correlaciona con el contenido de agua presente.

c. Sensores de tres electrodos: Los sensores de tres electrodos son utilizados en configuraciones avanzadas, especialmente cuando se desea realizar una separación entre la excitación eléctrica y la medición del potencial, como ocurre en sensores electroquímicos o sistemas de medición por impedancia compleja.

El cuadro 6.2 muestra la comparación en la que se contrastan aspectos que son claves en el diseño del sensor de humedad:

Característica	1 Electrodo	2 Electrodos	3 Electrodos
Costo	Muy bajo	Bajo	Medio-alto
Precisión	Baja	Media	Alta
Complejidad de diseño	Muy baja	Baja	Alta
Aplicaciones	Educativa, básica	Agro convencional	Investigación, precisión

Cuadro 6.2: Comparativa de sensores según el número de electrodos

De este modo, dados los requerimientos con los cuales debe cumplir el sistema, así como su función principal y el campo en el que ha de ser usado, se propone el uso de dos electrodos, que presenta las características más balanceadas para el propósito del proyecto. Se destaca su bajo costo y la capacidad para medir la humedad en el suelo para el agro en aplicaciones comunes, convirtiéndose en la mejor alternativa para el diseño del sensor.

6.3.4. Análisis de materiales

En consecuencia a los criterios de diseño, y teniendo en cuenta lo recorrido en la parte de investigación de este proyecto, el sensor a desarrollar ha de contar con dos electrodos metálicos dispuestos paralelamente, con el objetivo de crear una estructura capacitiva que permita la interacción del campo electromagnético con el medio, en este caso, el suelo.

La disposición física de los electrodos paralelamente favorece la uniformidad del campo eléctrico generado entre ambos, es decir que ante una perturbación producida por el material entre ellos, habrá relación directa con la permitividad eléctrica, y se podrá notar apropiadamente. Esta configuración también facilita la caracterización electromagnética del entorno, ya que

la cantidad de líneas de campo que atraviesan el suelo dependerá de la separación entre los electrodos y su geometría.

En efecto, es necesario escoger un material conveniente para la fabricación de los electrodos, para esto se debe tener en cuenta que el material cumpla con los siguientes requisitos:

- Alta conductividad eléctrica (o uniformidad del campo eléctrico).
- Resistencia a la corrosión.
- Bajo costo.

A partir de esto, se comparan en la figura 6.9 los materiales con mayor frecuencia de uso en la fabricación de electrodos:

- Cobre.
- Acero inoxidable.
- Aluminio.
- Aleaciones de Níquel.

Material	Costo	Corrosión (mm/año approx.)	Conductividad eléctrica en %IACS	Uniformidad del campo eléctrico	Comentarios adicionales
Cobre	Medio	0.02 - 0.2	100% (referencia)	Excelente debido a su alta conductividad	Se forma una pátina que reduce su conductividad, pero es excelente inicialmente.
Acero inoxidable	Bajo - Medio	0.001 - 0.01	2 - 10%	Adecuada para la mayoría de sensores	Buena resistencia en ambientes húmedos, aunque menos uniforme que el cobre.
Aluminio	Bajo	0.01 - 0.05	61 - 65%	Buena, ligeramente inferior a la del cobre	Ligero y fácil de manipular, buena uniformidad.
Aleaciones de Níquel	Alto	0.001 - 0.01	12 - 22%	Buena, comparable al aluminio	Alta resistencia a la corrosión, pero de alto costo.

Figura 6.9: Matriz de comparación de materiales

En primer lugar, el cobre es conocido por su excelente conductividad, lo que puede mejorar la sensibilidad del sensor. Sin embargo, se oxida fácilmente en presencia de humedad, formando una pátina que con el tiempo puede afectar la conductividad y la precisión de las mediciones.

En segundo lugar, el acero inoxidable es altamente resistente a la oxidación y a la corrosión, lo que lo hace ideal para aplicaciones en ambientes húmedos y en contacto directo con el suelo, su robustez mecánica garantiza una larga vida útil del sensor y posee propiedades conductivas adecuadas para la formación de campos eléctricos uniformes.

Luego, el aluminio al ser liviano facilita la manipulación e instalación de los sensores, pero en suelos con niveles de pH extremo puede corroerse. Por último, las aleaciones de níquel ofrecen resistencia en ambientes corrosivos y su conductividad es buena, pero suelen ser más costosos, lo que incrementa el costo de fabricación del sensor.

Al comparar estas evidencias, el acero inoxidable se destaca como la opción más equilibrada para la fabricación de los electrodos. Su capacidad para mantener la integridad estructural y funcional en condiciones ambientales adversas lo convierte en una elección óptima para aplicaciones agrícolas y de monitoreo ambiental.

6.4. Simulación

Atendiendo a estas consideraciones, es necesario empezar un proceso de simulación para comprobar que el dispositivo pueda captar la permitividad eléctrica del medio. En este caso, el proceso de simulación se llevó a cabo utilizando Ansys Electronics en su versión 2024 R2 para estudiantes, una herramienta ampliamente reconocida para el diseño y análisis de sistemas electromagnéticos. Este software fue seleccionado debido a su capacidad para modelar con precisión la interacción de ondas electromagnéticas con materiales dieléctricos, permitiendo obtener resultados precisos de diferentes parámetros con gráficos, modelado 3D y respuesta en frecuencia ante perturbaciones en el medio, además de ser gratuito para uso en proyectos estudiantiles.

Ansys Electronics proporciona un entorno de simulación basado en el método de los elementos finitos, el cual permite resolver las ecuaciones de Maxwell en geometrías complejas y con diferentes condiciones de entorno, siendo ideal para la evaluación del comportamiento electromagnético del sensor propuesto.

Para llevar a cabo la simulación del sensor de humedad, se siguió un proceso estructurado basado en metodologías de simulación computacional, como se muestra en la Figura 6.10. Este flujo de trabajo permite garantizar que la simulación sea precisa y confiable, asegurando que los parámetros y condiciones físicas sean correctamente definidos.

En primer lugar, se construyen los electrodos, formando dos varillas de forma cilíndrica, a las que se une un pequeño cono del mismo material en una de sus bases (para hacer la forma de estaca), y en la otra, se pega una porción de este mismo material para unirlo al otro electrodo, que tendrá exactamente las mismas dimensiones y serán separados por una distancia de 5 cm, como se puede ver en la figura 6.11.

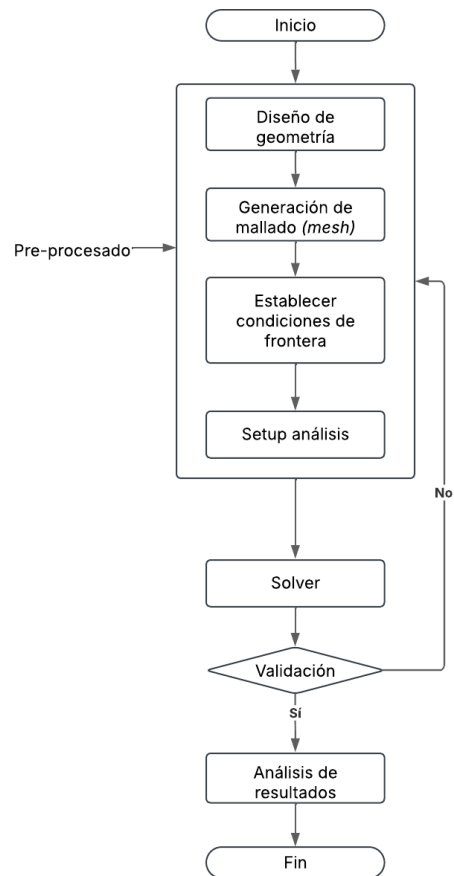


Figura 6.10: Diagrama de flujo: procedimiento de simulación.

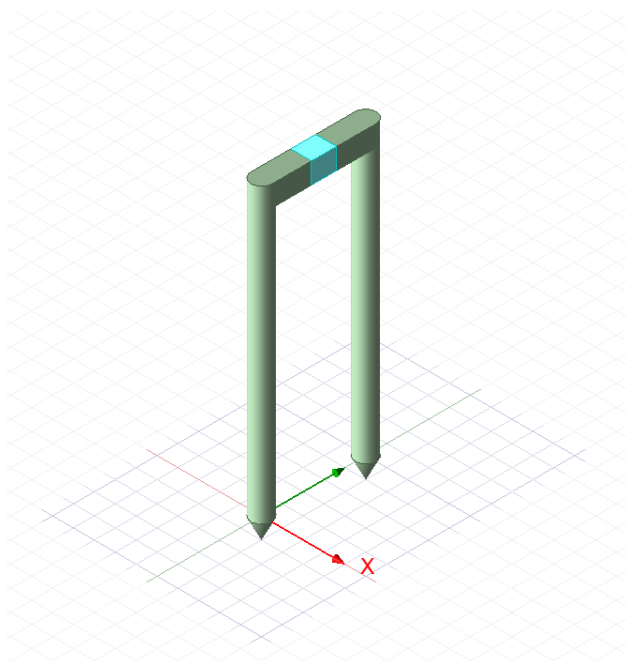


Figura 6.11: Construcción del sensor en simulación.

Una vez creada la estructura del sensor, es necesario simular el entorno en el que esté será probado y utilizado, con la finalidad de realizar mediciones en un entorno con condiciones lo más aproximadas posibles al ambiente real del sensor físico que será desarrollado. Para esto, se crean dos bloques amplios que cubren al sensor, el primero es un bloque que tendrá las características del suelo, donde se puede configurar su permitividad relativa y su conductividad volumétrica, que cambian su valor según el contenido de humedad en la tierra, este bloque se crea con la herramienta Draw Box, de Ansys, y se puede ver en la figura 6.12.

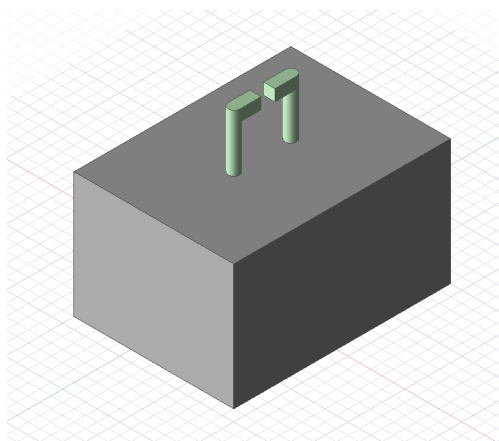


Figura 6.12: Representación del suelo en Ansys.

Por otro lado, se crea un segundo bloque del mismo tamaño que simule el aire en el ambiente colocado en la parte superior al suelo, como se puede observar en la figura 6.13, este tiene asignada una permitividad relativa de 1 y una conductividad volumétrica de cero, cabe resaltar que se oculta visualmente el suelo para mejor visualización en esta imagen. A su vez, se puede ver una pequeña región azul en la figura 6.11, con el objetivo de introducir la señal de entrada a los electrodos.

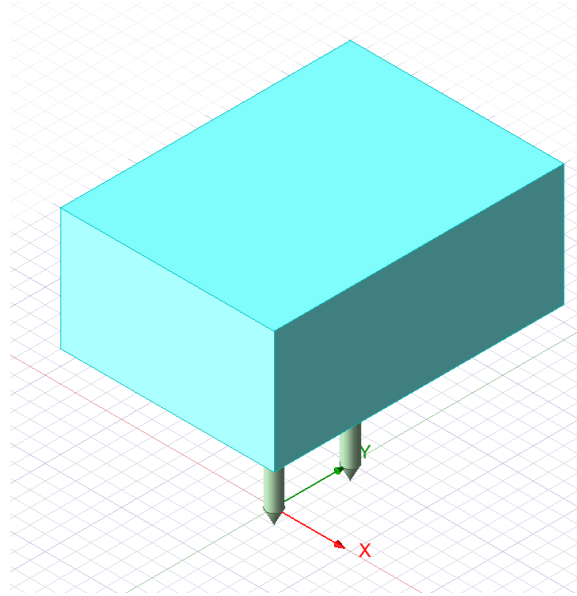


Figura 6.13: Representación del aire en Ansys.

En este proceso de simulación, se asignaron diferentes propiedades dieléctricas al suelo con base en su contenido de humedad. Para ello, se utilizaron valores de permitividad relativa ϵ_r y conductividad σ obtenidos de referencias experimentales y literatura especializada en sensores de humedad para suelos. Se estableció un rango de variación de humedad desde suelo seco (0%) hasta condiciones de saturación (70%), incrementando en intervalos de 5%.

Los valores específicos utilizados en la simulación se detallan en la una tabla en el siguiente capítulo. Estos parámetros permitieron evaluar el comportamiento del sensor en distintas condiciones ambientales y verificar su respuesta en términos de la variación de los parámetros S obtenidos en el análisis de dispersión.

Además, en la simulación se incluyó una caja de aire alrededor del modelo, que cumple la función de representar el medio infinito en el que opera el sensor en condiciones reales. La caja de aire se configuró con una permitividad relativa de $\epsilon_r=1$ y una conductividad $\sigma=0$ S/m, asegurando que no interfiriera con la propagación de la señal. Esta caja también se utilizó como límite de radiación, aplicando condiciones de frontera de tipo radiación o PML (Perfectly Matched Layer) para minimizar reflexiones en los bordes del dominio simulado.

Sin embargo, para introducir la señal de entrada, primero hay que configurar las fronteras en todos los elementos de simulación. En primer lugar se aplica la propiedad de Perfect E (conductor perfecto) en los electrodos, asumiendo que su resistividad es cero y que los campos eléctricos no penetran en ellos. En la realidad, aunque los metales tienen cierta resistencia, su conductividad es lo suficientemente alta para que esta aproximación sea válida en muchas simulaciones electromagnéticas, esto simplifica el cálculo y reduce los tiempos de simulación, ya que no es necesario resolver ecuaciones dentro del volumen del material conductor. Al modelarlos como Perfect E, se garantiza que las ondas electromagnéticas se reflejen completamente en su superficie, como ocurriría con un material altamente conductor en la práctica. La frontera se puede apreciar en la figura 6.14, como una capa color azul que rodea los modelos 3D.

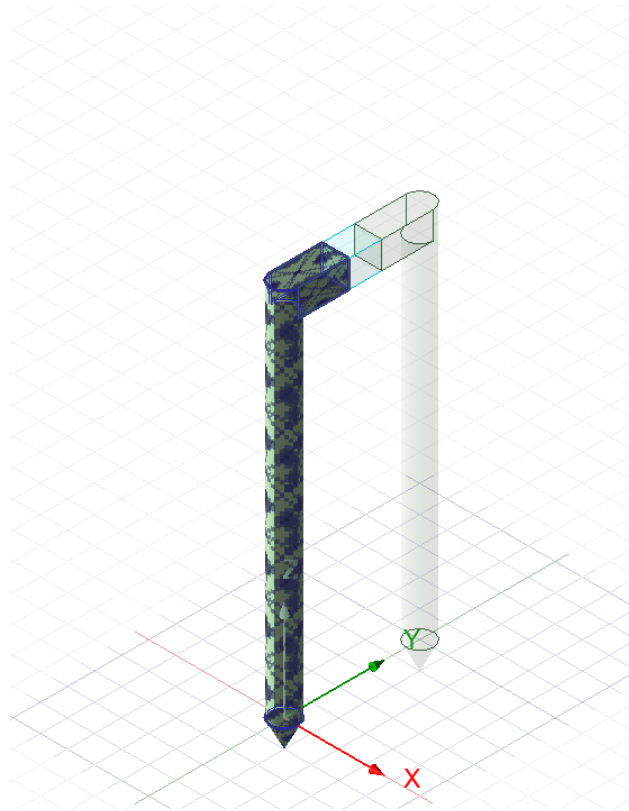


Figura 6.14: Frontera (perfect E) en los electrodos.

Adicionalmente, en cada una de las caras de los bloques de suelo y aire, se creó un mallado (*mesh*), que es una cuadrícula generada para dividir geometrías complejas en Ansys, fundamental para poder procesar los cálculos y tener resultados precisos, en este caso de los campos electromagnéticos y la interacción de las ondas con el medio. La representación de este mallado se puede ver en la figura 6.15 en la parte superior, donde una de las caras del aire está

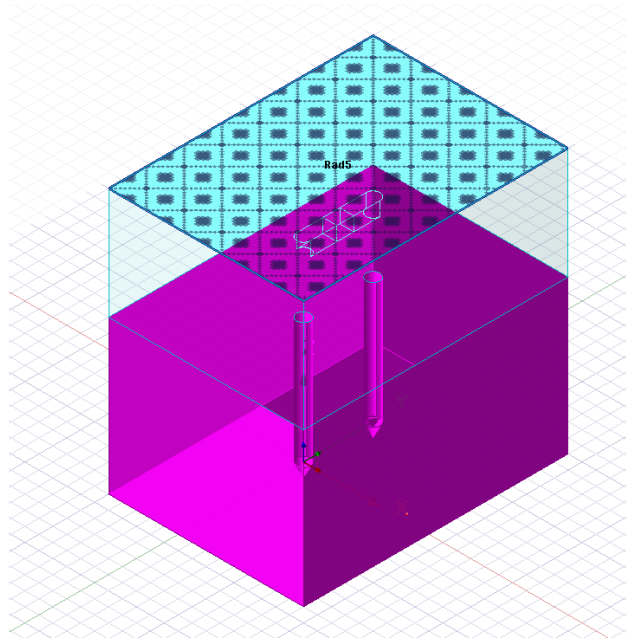


Figura 6.15: Representación de las mallas en Ansys.

sombreada en azul. Es necesario subrayar que se aplica en las 6 caras tanto del espacio del suelo, como del aire.

Posteriormente, se crea una excitación en el bloque de aire que está entre los dos electrodos, utilizando un *lumped port*, un tipo de puerto de excitación utilizado en Ansys Electronics para modelar fuentes de señal en circuitos de RF y microondas. En este caso se utilizó para alimentar el sistema con una señal de radiofrecuencia y analizar la respuesta del sensor con el parámetro S_{11} . El *lumped port* es la región sobreada en color rojo en la figura 6.16.

Seguidamente, se establecen las propiedades de la simulación dentro del módulo *Driven Solution Setup* de Ansys, que son los parámetros clave para realizar análisis del funcionamiento del sistema y para garantizar la convergencia y precisión de los resultados, en este caso, se seleccionó un barrido en frecuencia de solución desde 0.05 GHz hasta 1GHz, usando 401 puntos, lo que significa que el análisis se enfocará en este rango dentro del espectro electromagnético. El tipo de barrido seleccionado es *Interpolating*, lo que significa que el software calculará soluciones en algunas frecuencias clave y utilizará interpolación matemática para estimar el comportamiento en las demás. Esto reduce el tiempo de simulación en comparación con un barrido directo (*Discrete Sweep*), donde cada frecuencia se resolvería de manera independiente, aumentando significativamente la carga computacional. En la figura 6.17, se aprecian los detalles y cómo se establecen estos parámetros en Ansys.

De este modo, se ejecuta la simulación, para esto, en primer lugar se usa *Validation check* para verificar la configuración del modelo antes de ejecutar la simulación. Su propósito es

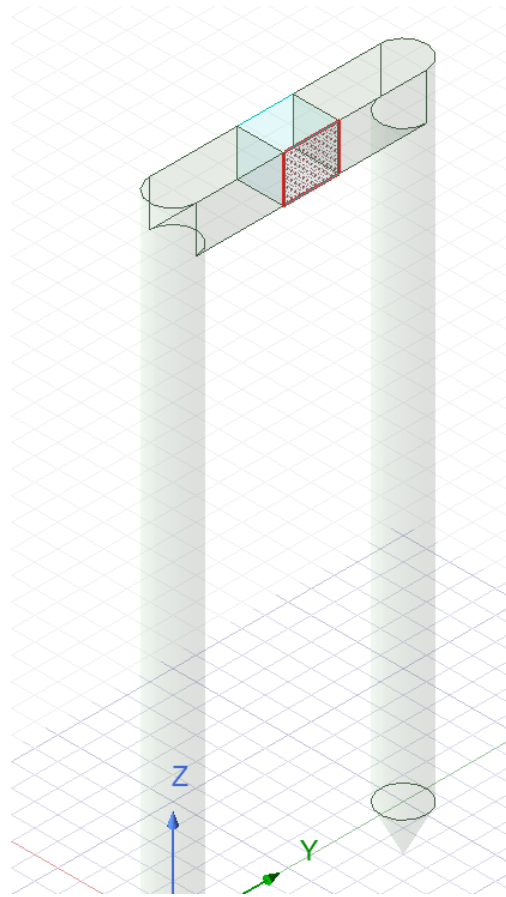


Figura 6.16: Representación del *lumped port* en simulación.

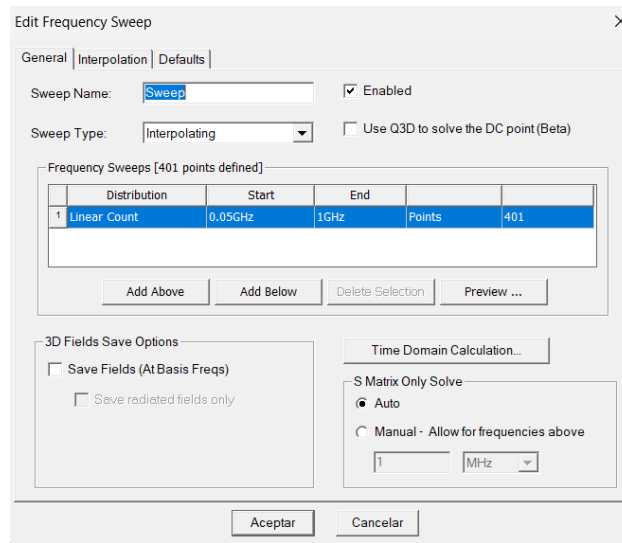


Figura 6.17: Barrido en frecuencia (*setup solution*)

identificar posibles errores o inconsistencias en la definición del problema electromagnético. Entre esto, revisa la geometría, condiciones de frontera y validación del mallado. Luego, la opción *Analyze All* se utiliza para ejecutar la simulación de todos los análisis definidos en el proyecto, permite calcular todas las configuraciones de solución establecidas en el *Driven Solution Setup* de manera automática y, en caso de que todo esté establecido correctamente, se generan los resultados en la parte izquierda del proyecto HFSS, como se puede ver en la figura 6.18.

Además, aquí mismo se puede generar el gráfico que se desea observar, haciendo clic derecho en *Results*, se despliega la opción *Create Terminal Solution Data Report*, donde se puede elegir entre distintos tipos de gráficos, en este caso, se genera un gráfico rectangular, y se elige crear un reporte de los parámetros S, como se puede ver en la figura 6.19.

De esta forma, se finaliza el proceso de simulación y se dispone de los resultados necesarios para su análisis en el siguiente capítulo. Durante este proceso, se realizaron ajustes y mejoras en la configuración a partir de la retroalimentación recibida por el director del proyecto. Inicialmente, se había planteado un barrido en frecuencia desde 1 GHz hasta 5 GHz; sin embargo, se determinó que estas frecuencias eran demasiado altas para la aplicación específica del sensor, por lo que se ajustó el rango a un intervalo más adecuado. Además, se optimizaron los criterios de convergencia para garantizar resultados más precisos sin comprometer el tiempo de simulación, y se realizaron ajustes en la malla para mejorar la resolución en las zonas críticas del modelo. Estos cambios permitieron obtener datos más representativos del comportamiento del sensor en condiciones reales y brindaron una mejor base para la comparación con las pruebas experimentales.

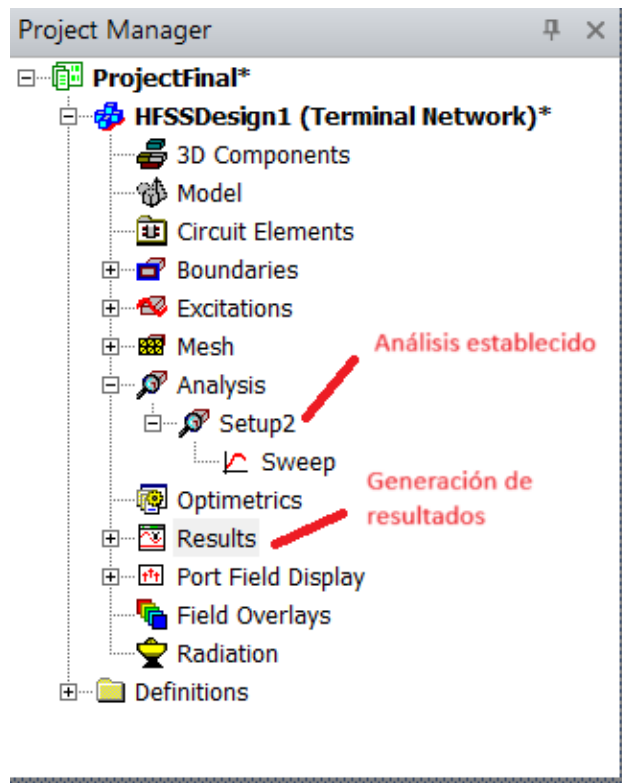


Figura 6.18: Herramientas para análisis de simulación.

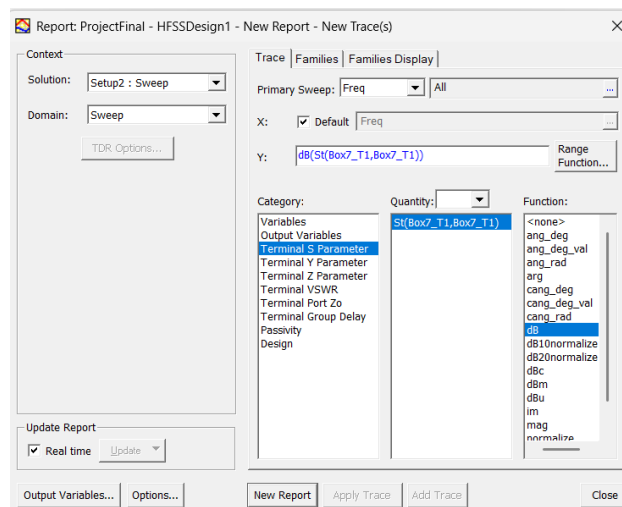


Figura 6.19: Configuración de parámetros S en Ansys.

6.5. Fabricación del prototipo y pruebas experimentales

Una vez finalizado el proceso de simulación y validación del diseño, se procedió con la fabricación del prototipo del sensor de humedad. Esta etapa es crucial, ya que permite contrastar el diseño planteado teóricamente y los resultados simulados con mediciones experimentales en condiciones reales. La fabricación del prototipo implicó la selección de materiales adecuados, la implementación del diseño optimizado y la integración de los componentes necesarios para su funcionamiento. Además, se consideraron aspectos como la viabilidad de manufactura, costos de producción y facilidad de ensamblaje. En esta subsección, se detallarán los pasos seguidos en la construcción del prototipo, así como las herramientas y técnicas empleadas para su fabricación.

En primer lugar, se buscó replicar el diseño geométrico utilizado en la simulación de Ansys, lo que implicaba la adquisición de varillas de acero inoxidable con un diámetro de 5 mm. Para ello, se exploraron distintas tiendas y comercios en Cali en busca del material adecuado. Sin embargo, no fue posible encontrar acero inoxidable con un diámetro tan pequeño, por lo que se optó por una aleación de acero que presentara propiedades mecánicas y eléctricas similares. Una vez obtenidas las varillas, se procedió a su corte y preparación, generando diferentes muestras con las dimensiones necesarias para el prototipo, eligiendo finalmente un largo de 10 centímetros, cortados con una segueta.

Posteriormente, se les dio la forma requerida de estaca para su integración, asegurando que coincidieran con el diseño optimizado en la etapa de simulación. Para darles esta forma, fue necesario hacer uso del esmeril de banco del CAP (Centro de Automatización de Procesos) de la PUJ, de manera manual, aproximando una forma cónica con una altura de medio centímetro en uno de los lados de las varillas, respetando los protocolos y normas de seguridad de este laboratorio.

Como se puede ver en la 6.20, la forma de las estacas resulta ser similar a los modelos de simulación mostrados en la subsección anterior de este capítulo.

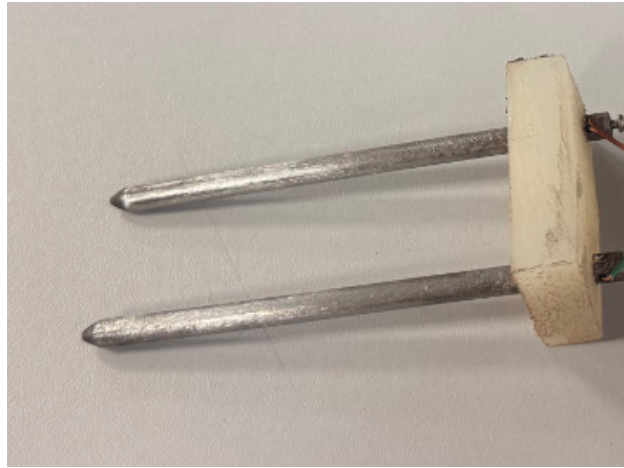


Figura 6.20: Estacas de prototipo funcional

Una vez obtenida la geometría final de los electrodos, se procedió a definir el método de conexión con la fuente de señal de entrada. Para ello, se consultó con el director del proyecto con el fin de evaluar la alternativa más viable. Como resultado, se optó por la perforación de dos orificios en la parte superior de las estacas: el primero, ubicado en la sección lateral, con el propósito de insertar un cable conductor de corto alcance para no afectar la señal de RF; y el segundo, en la base cilíndrica, donde se realizó un mecanizado de rosca interna mediante el uso de un machuelo, permitiendo así la fijación del cable mediante un sistema de atornillado, mejorando la estabilidad mecánica y la confiabilidad del contacto eléctrico. Estos se señalan en la figura 6.21, donde se puede ver el orificio de la sección lateral, donde está insertado un cable, y el orificio en la parte superior, donde está enroscado un tornillo para fijarlo.



Figura 6.21: Orificios señalados en las estacas del sensor

Con el modelo físico planteado, se requiere la construcción de una base que permita fijar los

electrodos, asegurando la separación establecida en el proceso de simulación en Ansys. Para ello, se consultó con el director del CAP, Simón Plata, quien sugirió emplear un fragmento de material empack sobrante del laboratorio. Siguiendo esta recomendación, se procedió a realizar cortes manuales en el material seleccionado, obteniendo una cara con una altura aproximada de 9 cm, cortada también con la segueta.

Posteriormente, utilizando un taladro y una broca de diámetro ligeramente inferior al radio de las estacas, se realizaron dos perforaciones con una separación de aproximadamente 5 cm. Una vez efectuadas las perforaciones en la base, se insertaron los electrodos a través de ellas y se ajustaron a la altura requerida con el apoyo de la prensa manual del CAP, mostrada en la figura 6.22.



Figura 6.22: Prensa de palanca del CAP.

En este punto, ya está la estructura lista y es necesario diseñar un circuito de acople que permita la conexión de la señal de entrada a los electrodos. Para ello, se implementó un circuito en PCB que recibirá la señal a través de un conector SMA hembra para borde recto de PCB. Además, se incorporó una impedancia de acople de 50Ω , la cual está conectada a un balún, un dispositivo diseñado para transformar líneas de transmisión desequilibradas en líneas equilibradas y viceversa.

Este circuito de acople facilitó la conexión física con los electrodos mediante el uso de borneras, garantizando una mayor estabilidad en la conexión. El diseño se realizó usando KiCad y está presentado en la figura 6.23. Para calcular las dimensiones físicas de esta línea de transmisión (ancho y largo), se utilizó una herramienta virtual de cálculo de líneas microstrip, en la cual se ingresaron los siguientes parámetros técnicos: Tipo de sustrato FR2, Altura dieléctrica (h) de 1.5 mm, Constante dieléctrica (r): 4.2, Espesor del cobre (t) de $35 \mu\text{m}$, Impedancia deseada de 50Ω . De lo que resultó un ancho de pista aproximado de 2.8mm.

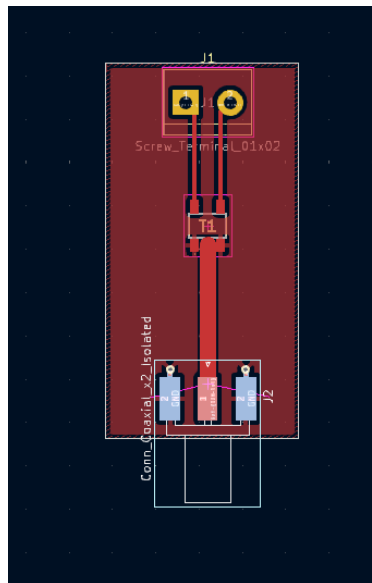


Figura 6.23: Circuito de acople.

El circuito fue impreso en el instituto OMICAS de la PUJ, utilizando la impresora de grafeno para marcar las pistas del circuito sobre el material FR2. Se generaron varios moldes del diseño y posteriormente fueron cortados en el CAP con una sierra caladora de Dremel Moto-Saw para obtener las dimensiones adecuadas, mostrada en la figura 6.24.



Figura 6.24: Sierra caladora usada para cortar el circuito.

Luego, se llevó a cabo el proceso de ataque químico con cloruro férrico, aplicándolo con un pincel para remover la capa superficial del material y revelar las líneas de transmisión y las

conexiones, se juntaron las piezas con fracciones pequeñas de cable dando como resultado el prototipo físico del sensor, mostrado en la figura 6.25.

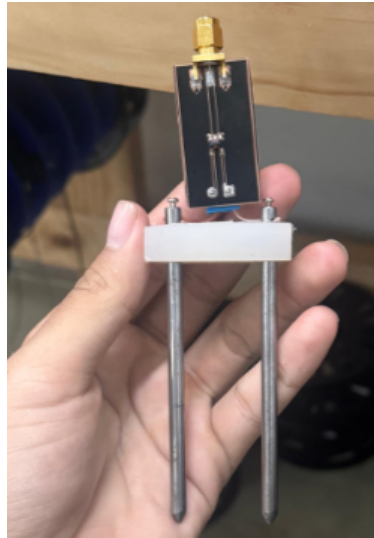


Figura 6.25: Sensor ensamblado.

Tal como se observa en la figura 6.23, inicialmente, el diseño incluía un balún en la parte central del circuito para transformar la línea de transmisión desequilibrada a una equilibrada. Sin embargo, tras realizar pruebas con el sistema ensamblado de la figura 6.25, se observó que el balún no cumplía su función de manera efectiva, afectando la calidad de la señal. Por esta razón, se tomó la decisión de removerlo y modificar la conexión para hacerla directa a los electrodos, asegurando una mejor adaptación de impedancias y una menor pérdida de señal, para realizar el corte después de retirar el balún, también se usó la sierra caladora mostrada previamente. Después de realizar este corte el prototipo resultante se puede ver en la figura 6.26.

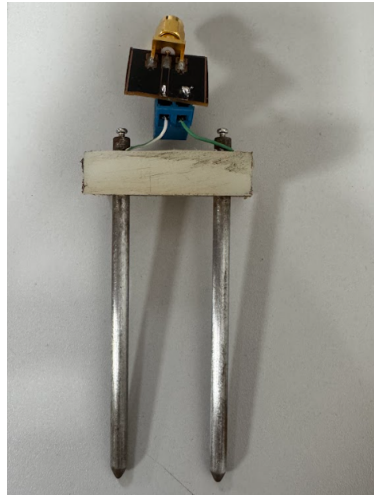


Figura 6.26: Sensor ensamblado después del corte.

Con el prototipo fabricado y ensamblado, se procedió a la fase de pruebas utilizando el analizador de redes vectoriales de la PUJ. Para garantizar la precisión y reproducibilidad de las mediciones, se siguen las normativas establecidas para la determinación del contenido de humedad en suelos en laboratorio. Estas normativas fueron explicadas previamente en el laboratorio de suelos de la universidad, donde se nos brindó una muestra representativa de suelo aplicable al estudio. Se nos indicó que, para obtener valores de referencia confiables, la muestra debía someterse a un proceso de secado en horno durante 24 horas, con el fin de eliminar completamente la humedad residual y contar con un punto de referencia de suelo seco. Además, se recomendó usar agua destilada como medio para humidificar el suelo en condiciones controladas. La elección del agua destilada se debió a su pureza química, ya que al no contener sales minerales ni otras impurezas, permite mantener constante la permitividad dieléctrica del líquido añadido, evitando interferencias en la respuesta del sensor que podrían derivarse del uso de agua potable o natural. Esto garantizó que las variaciones observadas en la respuesta electromagnética del sensor estuvieran directamente asociadas al contenido de humedad del suelo, y no a efectos adicionales causados por la conductividad o composición del agua empleada. El agua destilada fue conseguida también en el laboratorio de suelos y se puede ver en la figura 6.27.

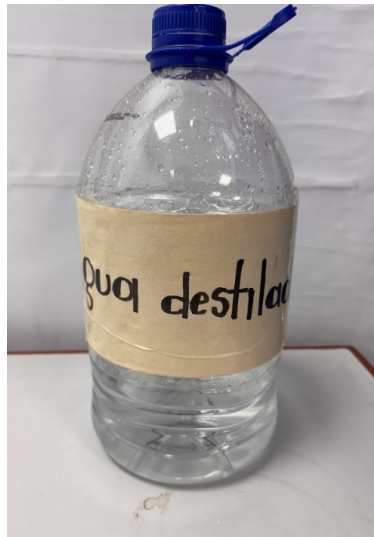


Figura 6.27: Agua destilada usada en las pruebas.

Asimismo, la porción de suelo para pruebas que fue brindada por el laboratorio de suelos y sometida al proceso de secado en el horno, se puede ver en la figura 6.28.



Figura 6.28: Muestra de suelo utilizada después del secado.

Posteriormente, se pesó la muestra y se calcularon los distintos porcentajes de humedad a partir de su masa inicial. Cabe aclarar que estas pruebas solo se realizaron para este tipo de suelo, pero se espera poder trabajar con otro tipo de materiales en el futuro.

Peso tierra (g)	Peso neto del agua (g)	Porcentaje de humedad (%)
230,0	11,8	5,1304
241,8	12,4	10,5217
254,2	12,3	15,8696
266,5	11,1	20,6957
277,6	12,1	25,9565
289,7	11,5	30,9565
301,2	11,9	36,1304
313,1	12,1	41,3913
325,2	10,3	45,8696
335,5	11,4	50,8261
346,9	11,7	55,9130
358,6	10,2	60,3478
368,8	10,8	65,0435
379,6	12,3	70,3913
391,9	13,7	76,3478

Cuadro 6.3: Pesos de la muestra de suelo brindada por el laboratorio y contenido de humedad añadido con agua destilada.

En el cuadro 6.3 se presentan los valores registrados durante las pruebas experimentales realizadas con el prototipo físico del sensor. Para cada ensayo, se tomó una muestra de suelo seco y se le fue añadiendo agua destilada en diferentes cantidades, con el fin de incrementar progresivamente su contenido de humedad. Se registraron el peso de la muestra de tierra seca y el peso neto del agua añadida, calculando posteriormente el porcentaje de humedad como la razón entre el peso del agua y el peso seco del suelo, expresada en porcentaje.

Este procedimiento permitió simular condiciones crecientes de humedad del suelo, desde valores bajos cercanos al 5% hasta niveles altos por encima del 75%. El uso de agua destilada, como se mencionó anteriormente, garantizó que las variaciones en la respuesta del sensor estuvieran asociadas exclusivamente al contenido de humedad y no a efectos adicionales derivados de impurezas. Cada una de estas condiciones fue registrada cuidadosamente para realizar las mediciones con el analizador de redes vectoriales, permitiendo así una comparación precisa con los resultados obtenidos en la simulación.

Durante las pruebas, se analizó el espectro de respuesta del sensor en decibeles (dB) mediante el analizador de redes vectoriales, asegurando que las mediciones cumplieran con los procedimientos y estándares establecidos en el laboratorio. Antes de iniciar la adquisición de datos, se llevó a cabo un proceso de calibración del equipo utilizando el kit de calibración R&S® ZN-Z135, con el objetivo de minimizar errores y garantizar la precisión de las mediciones, este es mostrado en la figura 6.29.



Figura 6.29: Módulo de calibración ZN-Z135.

Este kit compacto integra los estándares de calibración *Open*, *Short* y *Match* en una sola unidad, facilitando su manejo y asegurando que el conjunto completo de estándares esté siempre disponible [31]. El estándar *Open* representa un circuito abierto (alta impedancia) y permite al equipo registrar la respuesta sin carga. El estándar *Short* representa un cortocircuito (baja impedancia), útil para caracterizar la reflexión máxima. El estándar *Load* (también conocido como *Match*) proporciona una carga de 50Ω , ideal para registrar la respuesta sin reflexión. Cada uno de estos estándares fue conectado al puerto de medición siguiendo las instrucciones del software del equipo, asegurando la correcta compensación de errores sistemáticos como pérdidas por acoplamiento, errores de directividad y desadaptaciones. El procedimiento de calibración incluyó la conexión sucesiva de cada uno de estos estándares al puerto de medición del analizador, siguiendo las indicaciones del fabricante para garantizar la precisión de las mediciones [18]. La correcta ejecución de este proceso es esencial para compensar errores sistemáticos y asegurar la fiabilidad de los resultados obtenidos con el sensor.

El analizador vectorial usado, es parte del equipo de la PUJ, mostrado en la figura 6.30.



Figura 6.30: Analizador de redes vectoriales de la PUJ.

Una vez completado el proceso de calibración del analizador vectorial de redes, se procedió a conectar el sensor capacitivo al equipo de medición. A medida que se fue incrementando el contenido de humedad en la muestra de suelo —como se muestra en el Cuadro 6.3—, el sensor fue sumergido cuidadosamente en cada una de las muestras para garantizar un contacto adecuado con el medio. Después de cada inmersión, se realizó la medición correspondiente con el analizador vectorial, registrando los parámetros necesarios para el análisis posterior. Este procedimiento se repitió de forma sistemática en cada nivel de humedad, permitiendo así obtener una curva de respuesta experimental del sensor frente a distintas condiciones de contenido de agua en el suelo. Gracias a la preparación previa y a la consistencia en la metodología, fue posible asegurar la reproducibilidad y confiabilidad de los resultados obtenidos. Finalmente, los datos obtenidos fueron exportados en formato CSV, para después ser procesados y graficados en MatLab, con el fin de realizar un análisis detallado y comparativo de la respuesta del sensor en función del contenido de humedad del suelo.

6.5.1. Normas y estándares técnicos en el dominio del problema

Adicionalmente, es importante destacar que durante el diseño y la construcción del sensor de humedad para aplicaciones agrícolas, se procuró el cumplimiento de normativas técnicas tanto nacionales como internacionales, garantizando así su viabilidad, calidad y seguridad en entornos reales de uso. Desde una perspectiva de protección ambiental y del usuario, se consideraron los requisitos de la Ley 1876 de 2017 [24], que regula el desarrollo de tecnologías para el agro en Colombia, así como la Ley 99 de 1993 [23], que establece los principios de sostenibilidad y protección ambiental aplicables a proyectos tecnológicos que interactúan directamente

con el medio ambiente. Estas disposiciones aseguran que el dispositivo no represente riesgos químicos, eléctricos ni mecánicos durante el proceso de medición y uso en campo.

Asimismo, el diseño del encapsulado y los materiales empleados fueron seleccionados bajo los lineamientos de la norma internacional ISO 11783 [21] (redes electrónicas en maquinaria agrícola), así como de la ISO 25119 [22], relacionada con la seguridad funcional en sistemas eléctricos y electrónicos para maquinaria agrícola.

En cuanto a la resistencia ambiental, se consideró como referencia el estándar IP68 [27], el cual establece que un dispositivo debe estar completamente protegido contra la entrada de polvo y ser capaz de soportar inmersiones prolongadas en agua. Aunque el prototipo aún no ha sido sometido a ensayos formales para validar el cumplimiento de este estándar, dicho criterio se tuvo en cuenta durante el diseño del encapsulado y en la selección de materiales, como un objetivo deseable para garantizar el desempeño del sensor en entornos húmedos y variables como los agrícolas. Se plantea como una mejora futura la implementación de pruebas específicas para verificar el cumplimiento de esta norma y avanzar hacia una certificación ambiental del dispositivo.

También se tuvo en cuenta la norma IEC 61010 [15], que establece requisitos de seguridad para equipos eléctricos de medida, control y uso en laboratorio, como referente para garantizar la protección del usuario durante la operación del dispositivo. Desde el enfoque de calidad, se consideraron los lineamientos de la ISO 9001 [14], especialmente en lo relacionado con la mejora continua, la gestión de riesgos y el enfoque basado en procesos. Asimismo, se revisó la NTC 5001:2008 [21], que trata sobre la calidad de la potencia eléctrica, como una guía para prevenir interferencias cuando el sensor se integre a sistemas más amplios de monitoreo. Cabe aclarar que estas normativas no fueron implementadas ni validadas formalmente en el prototipo, pero surgieron como hallazgos importantes durante el proceso de investigación y en el desarrollo del marco teórico, convirtiéndose en referentes clave para plantear futuras mejoras del dispositivo que apunten hacia una eventual certificación técnica y un uso seguro y eficiente en entornos agrícolas reales.

Resultados y Discusión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la simulación y de las pruebas experimentales realizadas con el prototipo del sensor de humedad. El análisis de estos resultados permite evaluar el desempeño del diseño propuesto y su coherencia con las expectativas teóricas y simuladas.

Para garantizar un análisis estructurado y replicable, se estableció un plan de pruebas, el cual define la metodología empleada para evaluar el sensor en diferentes condiciones. En primer lugar, se detallan los resultados obtenidos en la simulación electromagnética del sensor en Ansys HFSS, en la que se analizó el comportamiento del sistema en función de la permitividad y conductividad del suelo. Posteriormente, se presentan los resultados experimentales obtenidos con el prototipo físico, utilizando un analizador vectorial de redes para evaluar la respuesta en el dominio de la frecuencia con distintos niveles de humedad en el suelo.

Entonces se estructura de la siguiente forma:

- En primer lugar, la simulación del sensor con distintos valores de humedad en el suelo, evaluando el impacto en los parámetros S.
- En segundo lugar, la fabricación del prototipo y su evaluación con muestras de suelo de humedad controlada, siguiendo las normativas de medición establecidas en laboratorio.
- Por último, la comparación de los resultados experimentales con las predicciones de la simulación.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada una de estas etapas.

7.0.1. Resultados de simulación

En primer lugar, para analizar el desempeño del sensor, se realizaron simulaciones variando la humedad del suelo en un rango de 0% a 70%, utilizando los valores de permitividad relativa y conductividad listados en el cuadro 7.1, basados en lo expuesto en [9].

Humedad (%)	ϵ_r	σ (S/m)
0	3.5	0.0001
5	4.2	0.001
10	6.0	0.005
15	10.0	0.01
20	15.5	0.02
25	21.0	0.03
30	27.5	0.05
35	34.0	0.08
40	41.0	0.12
45	48.5	0.18
50	55.0	0.25
55	60.0	0.35
60	65.0	0.45
65	70.0	0.55
70	75.0	0.65

Cuadro 7.1: Valores de permitividad relativa y conductividad según la humedad del suelo.

A partir de estos valores, se llevó a cabo un barrido de frecuencia de 0.05 GHz a 1 GHz para cada nivel de humedad, con el fin de observar cómo varía la atenuación y el comportamiento del sensor en diferentes condiciones del suelo. Se analizaron los parámetros S, en especial S_{11} , para evaluar los cambios en la impedancia y la transmisión de la señal.

Primero, se obtienen los valores para graficarlos con cada porcentaje de humedad correspondiente.

Siendo así, para el primer valor, donde el porcentaje de humedad es cero (para una tierra totalmente seca), se obtiene la curva de la figura 7.1 que muestra la magnitud del parámetro S_{11} en función de la frecuencia.

Sobre este gráfico se pueden hacer varias observaciones clave. En primer lugar, se pueden ver unos puntos mínimos de reflexión, porque se identifican varios valles pronunciados en la curva, indicando algunas frecuencias en las que ocurre una mayor absorción o acoplamiento de la señal en el material (en este caso suelo). Los mínimos más destacados son cerca a 0.1 GHz y 0.35 GHz.

Además, en bajas frecuencias (entre 0.05 GHz y 0.1 GHz) el valor de S_{11} desciende hasta aproximadamente -12 dB, lo que sugiere una buena transferencia de energía a la estructura en ese punto. Mientras que en frecuencias más altas (mayores a 0.7 GHz), la magnitud de S_{11} tiende a valores cercanos a -2 dB, lo que indica una mayor reflexión de la señal. En cuanto a la tendencia general, a medida que la frecuencia aumenta, el comportamiento es más oscilatorio, con picos y valles que reflejan la interacción de la onda con el suelo. De este modo, se espera que a medida que la humedad aumente, los valles se desplacen y se modifique la profundidad

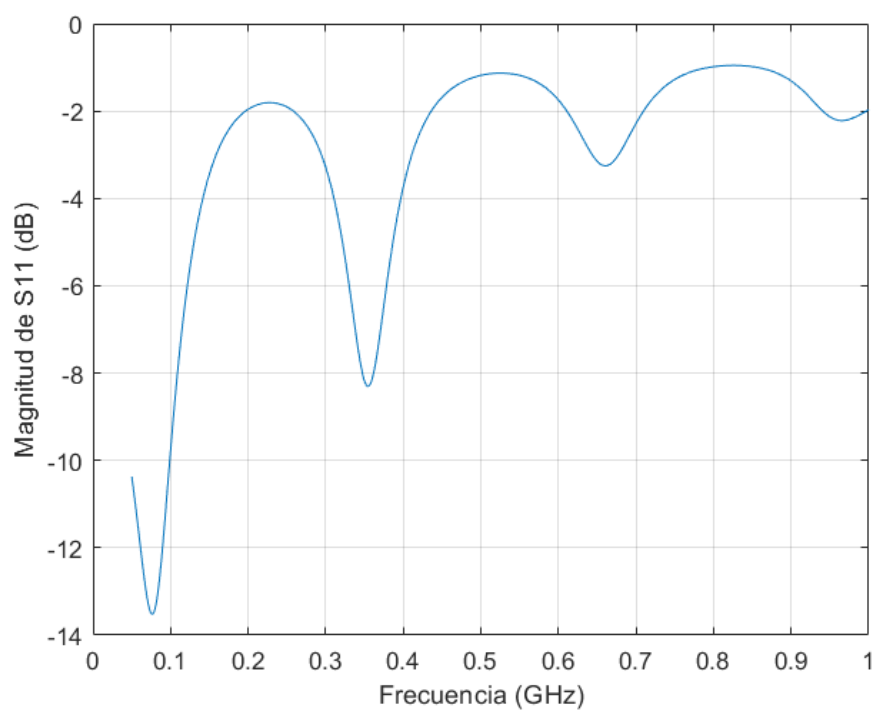


Figura 7.1: Resultado de simulación en tierra seca.

de los mínimos.

Para un mejor entendimiento de la evolución de la respuesta en frecuencia con respecto a la humedad, se presentará el gráfico consolidado con todas las curvas obtenidas en la simulación más adelante. Sin embargo, para no extender innecesariamente el análisis, se han seleccionado casos representativos que muestran de manera clara las tendencias más relevantes.

En esta sección se analizarán solo cinco casos clave, comenzando con el de suelo seco (presentado anteriormente), seguido con el caso de humedad baja (10%), mostrado en la Figura 7.2.

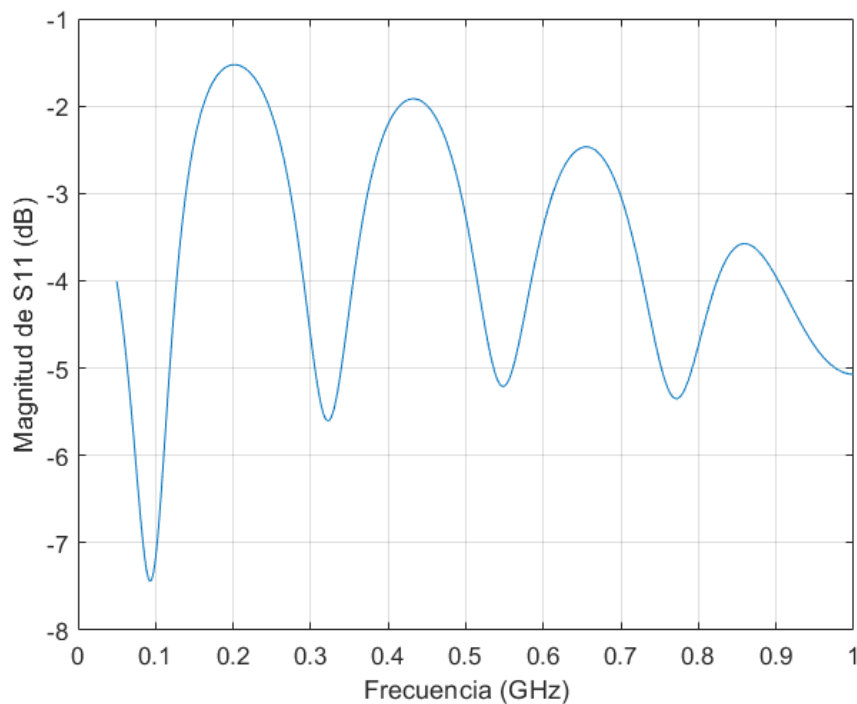


Figura 7.2: Resultados de simulación al 10% de humedad

Comparando este resultado con el caso de tierra seca, se pueden identificar las siguientes diferencias clave: En primer lugar, se evidencia un desplazamiento de los mínimos de reflexión, ya que con 10% de humedad, se observa un ligero corrimiento de estos mínimos hacia frecuencias más bajas, además de que están en valores más altos en magnitud (dB), el primer mínimo que inicialmente estaba más cercano de 0.35 GHz, ahora se puede ver más a la izquierda (cercano a 0.3GHz), luego, el mínimo que en el primer gráfico estaba en aproximadamente 0.65 GHz, ahora está en 0.55 GHz, y el último, que estaba anteriormente entre 0.9 GHz y 1GHz, ahora está entre 0.7 GHz y 0.8 GHz; lo que indica una variación en las propiedades dieléctricas del medio.

Además, en tierra seca, algunos valles alcanzan valores de reflexión más profundos, mientras que con 10 % de humedad, la magnitud de S_{11} se incrementa en la mayoría de las frecuencias, lo que sugiere una mayor disipación y menor eficiencia en la transmisión de la señal reflejada. Se observa que, con el aumento de la humedad, la curva de S_{11} tiende a suavizarse en ciertas regiones, lo que podría atribuirse a la influencia de la permitividad eléctrica del suelo con mayor contenido de agua.

Estos cambios son consistentes con el comportamiento esperado de un medio con mayor contenido de agua, ya que la permitividad eléctrica del suelo aumenta con la humedad, afectando directamente la propagación y reflexión de las ondas electromagnéticas.

En ese orden de ideas, la siguiente gráfica a analizar, es la respuesta con un suelo de humedad al 30 %, mostrada en la figura 7.3.

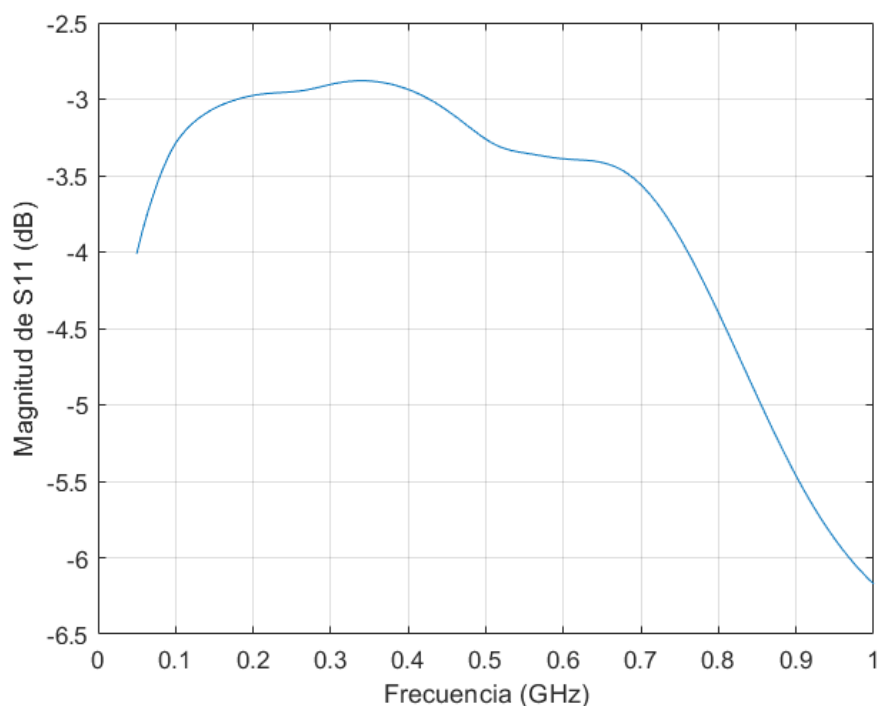


Figura 7.3: Resultados de simulación al 30 % de humedad

Comparando este resultado con los casos de tierra seca y 10 % de humedad, se observan cambios significativos en la curva. En primer lugar, se puede notar mayor atenuación y reducción en la profundidad de los mínimos de reflexión del parámetro S_{11} , lo que indica que la señal reflejada tiene menos intensidad en comparación con los casos anteriores. A su vez, esto sugiere que una mayor cantidad de energía se está disipando en el medio, lo que concuerda con el aumento de la constante dieléctrica del suelo con la humedad.

Al exponer este gráfico, el cambio más notorio es la pérdida de la estructura de resonancia; mientras que en los casos de tierra seca y 10% de humedad se observaban mínimos bien definidos en ciertas frecuencias, en el caso de 30% de humedad, la respuesta se suaviza considerablemente y los picos característicos prácticamente desaparecen. Esto indica de nuevo que la señal reflejada se está dispersando más en el medio, reduciendo la selectividad en frecuencia.

El incremento en la humedad está generando una mayor absorción de la señal, afectando su propagación y reflejo. A partir de este punto, sería interesante analizar si este comportamiento continúa a medida que la humedad sigue aumentando, particularmente en niveles más altos, como los que se exponen a continuación.

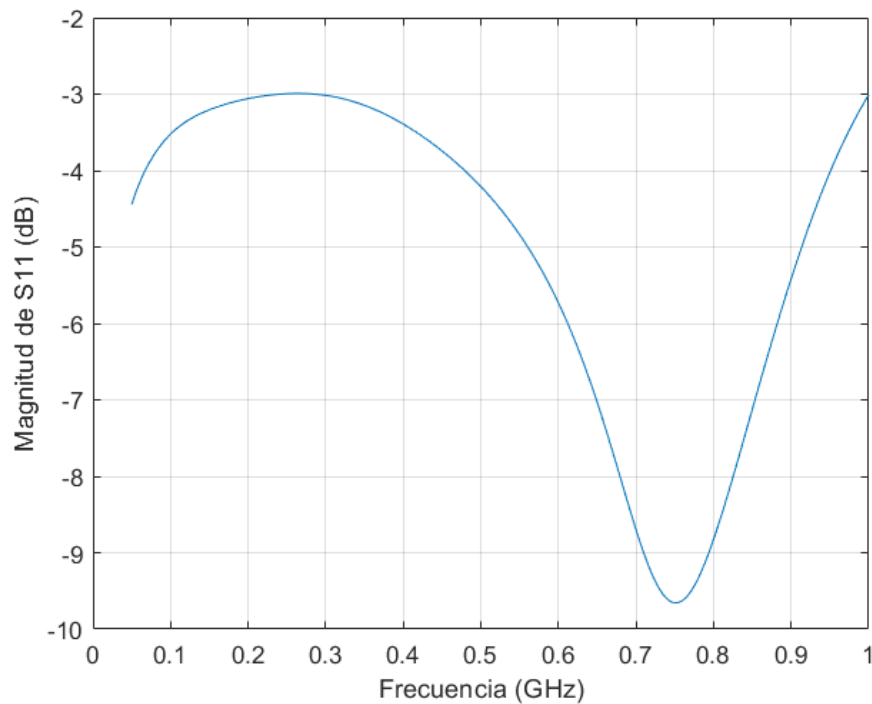


Figura 7.4: Resultado de simulación al 50% de humedad.

En la figura 7.4, se muestra el resultado de la simulación con 50% de humedad, se observa un cambio significativo en la respuesta del sensor en comparación con los niveles de humedad anteriores. La magnitud de S_{11} muestra un comportamiento distinto, con una caída más pronunciada en la región de mayor absorción de señal. En particular, se identifica un punto de mínima reflexión alrededor de los 0.75 GHz, lo que indica una mayor absorción en esa frecuencia. Esta variación sugiere que el aumento de humedad tiene un impacto directo en la respuesta electromagnética del sensor.

Comparando esta simulación con la obtenida al 30% de humedad, se aprecia que la curva

anterior era más uniforme y con una caída más gradual, mientras que en este caso el valle es más marcado. Esto implica que, a medida que el contenido de agua en el medio aumenta, la interacción con la señal se vuelve más intensa, afectando la impedancia del sistema y alterando el parámetro de reflexión S_{11} .

Desde una perspectiva física, estos cambios pueden explicarse por el incremento en la permitividad del medio debido al mayor contenido de agua. La variación en la constante dieléctrica afecta la forma en que la antena del sensor acopla la señal con el entorno, provocando desplazamientos en la frecuencia de resonancia y variaciones en la magnitud de la reflexión. En este caso, la mayor humedad genera un acoplamiento más fuerte en una frecuencia diferente, lo que podría ser clave para calibrar el sensor de acuerdo con los diferentes niveles de humedad en el suelo.

De este modo, en la simulación correspondiente al 50 % de humedad, se evidenció un desplazamiento en la frecuencia de resonancia en comparación con el caso de 30 % de humedad, acompañado de un incremento en la absorción de la señal reflejada. Este comportamiento sugiere que, a medida que la humedad aumenta, las propiedades dieléctricas del medio cambian de manera significativa, afectando la respuesta del sensor. Dado que el suelo con mayor contenido de agua presenta una mayor permitividad, era de esperarse que este patrón continuara en niveles superiores de humedad.

Siguiendo esta misma tendencia, veremos el último caso particular antes de pasar al consolidado, con humedad al 70 %, como se puede observar en la siguiente figura 7.5.

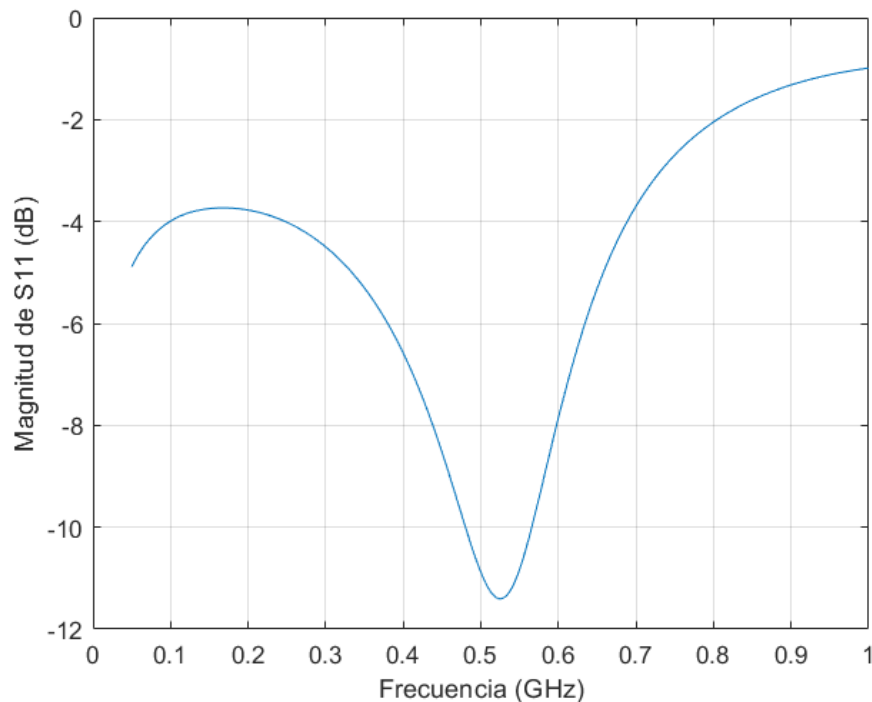


Figura 7.5: Resultado de simulación al 70 % de humedad.

En esta simulación correspondiente al 70 % de humedad, se observa que la curva de magnitud de S_{11} muestra un desplazamiento en la frecuencia de mínima reflexión en comparación con los casos anteriores. En este caso, el punto mínimo se encuentra alrededor de los 0.5 GHz, con un valor cercano a los -11 dB, lo que indica una mayor absorción de la señal en este rango de frecuencia.

En comparación con la simulación al 50 % de humedad, se observa un desplazamiento de la frecuencia de resonancia hacia valores más bajos, lo que podría indicar un incremento en la constante dieléctrica efectiva del medio, posiblemente debido a la mayor presencia de agua. Asimismo, se evidencia una mayor atenuación en esta frecuencia, lo cual sugiere que el sensor podría estar mostrando una mayor sensibilidad conforme aumenta la humedad del suelo. Ambas curvas mantienen una forma similar, lo que sugiere que el comportamiento del sensor en esta región de humedad es relativamente estable.

No obstante, la principal diferencia radica en el desplazamiento del mínimo de reflexión hacia frecuencias más bajas, lo cual puede interpretarse como un efecto del incremento en la permitividad dieléctrica del suelo húmedo. Este comportamiento es coherente con lo que se esperaría teóricamente, aunque se requiere un mayor número de simulaciones y mediciones experimentales para establecer esta tendencia con mayor certeza.

Otro aspecto relevante es que, a diferencia de las simulaciones previas, la recuperación de la

magnitud de S_{11} a valores cercanos a 0 dB ocurre de manera más abrupta después de los 0.6 GHz, indicando que la influencia del medio húmedo sobre el sensor es más notable en el rango de bajas frecuencias. Este comportamiento puede deberse a una mayor conductividad del suelo, lo que provoca una absorción más eficiente de la energía en el acoplamiento de la antena.

En términos generales, la evolución de los resultados hasta ahora sugiere que el sensor tiene una respuesta directamente proporcional al contenido de humedad, con un desplazamiento de la frecuencia de resonancia y un aumento en la absorción conforme la humedad incrementa. Esta información es clave para la calibración del sensor y su aplicación en la estimación de humedad en campo real.

A lo largo de los análisis individuales para cada nivel de humedad, se ha identificado un patrón claro en el comportamiento de la señal reflejada a partir de una humedad media (aproximada del 30%). A medida que la humedad aumenta, la curva mantiene su forma general, pero el punto de mínima reflexión se desplaza progresivamente hacia frecuencias más bajas, incluso pasa lo mismo en humedades menores 30%, pero con más oscilaciones en la respuesta. Este fenómeno sugiere una relación directa entre la permitividad dieléctrica del medio y la frecuencia de resonancia del sensor.

Para comprender de manera más integral este comportamiento, es fundamental consolidar todas las curvas en un mismo gráfico. De esta forma, será posible visualizar cómo evoluciona la absorción de la señal reflejada con el incremento de la humedad y analizar tendencias globales que no serían evidentes en gráficos individuales. Como se ve en la figura 7.6

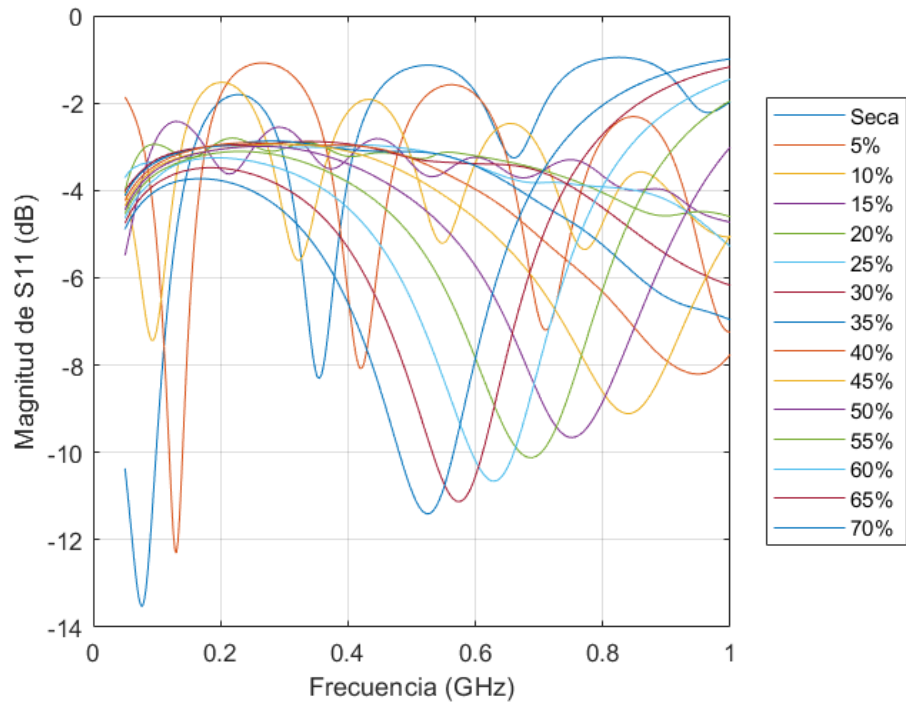


Figura 7.6: Consolidado de resultados de simulación.

Al superponer las curvas correspondientes a diferentes niveles de humedad en un solo gráfico, se hace evidente la tendencia previamente observada en los análisis individuales. La forma de la curva se mantiene prácticamente invariable en todos los casos, con una sola variación significativa: el punto de mínima reflexión de la señal (mínimo de S_{11}) se desplaza hacia frecuencias menores conforme aumenta la humedad. Este desplazamiento indica que el material se vuelve más absorbente a medida que su contenido de agua se incrementa, afectando la frecuencia en la que ocurre la máxima absorción de la señal.

El comportamiento observado puede explicarse desde un punto de vista electromagnético. A medida que la humedad del suelo aumenta, su permitividad dieléctrica también lo hace, alterando la constante de propagación de la onda dentro del medio y modificando la frecuencia en la que se produce el acoplamiento más fuerte con la estructura del sensor. Este fenómeno es de gran relevancia, ya que permite establecer una relación cuantitativa entre la frecuencia de resonancia del sensor y el porcentaje de humedad presente en el suelo, lo que refuerza su potencial como herramienta de medición.

Otro punto importante a destacar es que, aunque la magnitud del coeficiente de reflexión S_{11} varía levemente entre cada curva, el patrón general de absorción se mantiene. Esto sugiere que, en el rango de humedades analizado, el sensor presenta un comportamiento estable y predecible, lo cual es deseable en una aplicación práctica. Sin embargo, para garantizar una

mayor precisión en su calibración, sería útil evaluar si esta tendencia se mantiene en niveles de humedad más extremos, es decir, en condiciones de saturación de agua que no serían realistas y aplicables en el sector agrícola.

En conclusión, el consolidado de curvas permite visualizar claramente la relación entre la frecuencia de absorción de la señal y el contenido de humedad en el medio. Este análisis proporciona información valiosa para la calibración del sensor, permitiendo estimar el nivel de humedad en función del desplazamiento de la frecuencia de mínima reflexión. Además, reafirma la validez de la metodología utilizada en la simulación, facilitando futuras mejoras en el diseño y optimización del sensor.

7.0.2. Resultados del prototipo físico

Después de analizar los resultados obtenidos en la simulación, es fundamental validar estos hallazgos mediante pruebas experimentales con el prototipo físico del sensor. Para ello, se realizaron mediciones utilizando el analizador vectorial de redes de la PUJ, replicando las condiciones establecidas en la simulación y siguiendo las normas y procedimientos estándar para la medición de humedad en suelos.

El objetivo principal de esta fase experimental es comparar la respuesta en frecuencia del sensor real con la obtenida en la simulación, evaluando la correspondencia entre ambos. Se analizarán las curvas obtenidas para distintos niveles de humedad, observando la variación en el parámetro S_{11} y el desplazamiento de la frecuencia de mínima absorción.

En esta parte del capítulo, se presentarán los resultados experimentales obtenidos con el prototipo físico, comparándolos con los resultados de la simulación y discutiendo las posibles diferencias, sus causas y su impacto en la precisión del sensor.

Con respecto al desarrollo de las pruebas sobre el prototipo físico, se realizaron distintas mediciones en campo para probar el funcionamiento del mismo, la forma en que se hicieron las pruebas se pueden ver en la última parte del capítulo anterior. Así, fue posible obtener distintos gráficos para un intervalo de humedad de 0% a 70%, cuyos resultados se muestran a continuación:

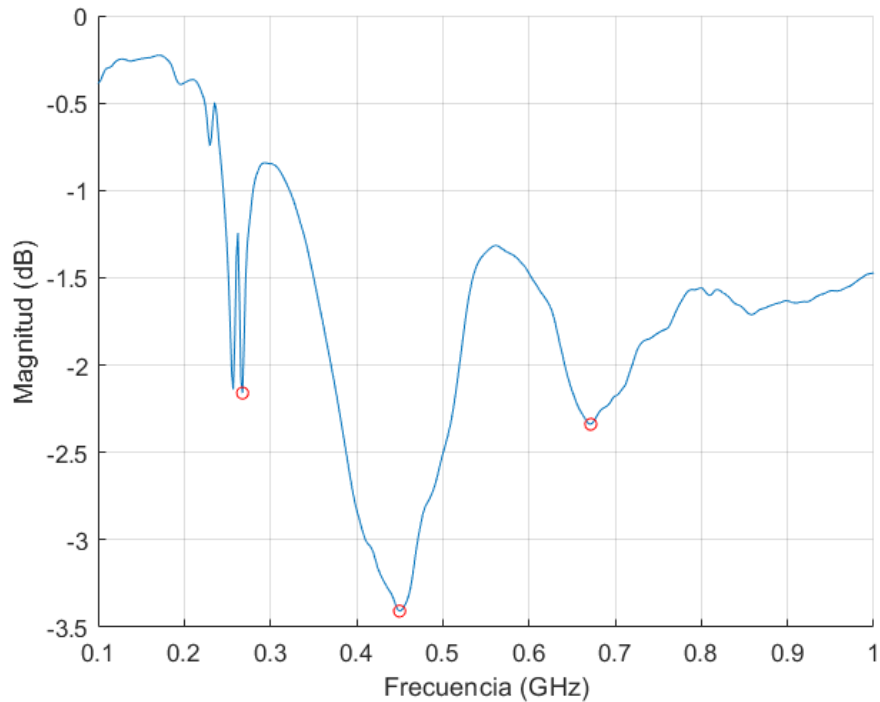


Figura 7.7: Datos obtenidos para tierra seca.

La figura 7.7 correspondiente al 0% de humedad representa la condición base del sensor, en la que el suelo se encuentra completamente seco. En esta condición, la respuesta en frecuencia muestra una curva con una forma bastante estable, en la cual predominan resonancias poco profundas. Se identifican tres puntos notables de caída: uno en torno a los 0,25 GHz con aproximadamente $-2,0$ dB, otro en 0,45 GHz con una magnitud de $-3,3$ dB, y uno más en 0,67 GHz alcanzando los $-2,3$ dB. Estas caídas son relativamente leves, lo que indica una baja absorción de energía y, por lo tanto, una interacción electromagnética limitada entre el sensor y el medio. Este comportamiento es coherente con la baja constante dieléctrica del suelo seco, la cual no genera grandes perturbaciones en el campo electromagnético del sensor. Por tanto, esta curva actúa como referencia fundamental para identificar cambios en la magnitud de la ganancia a medida que se incrementa el contenido de agua en el suelo.

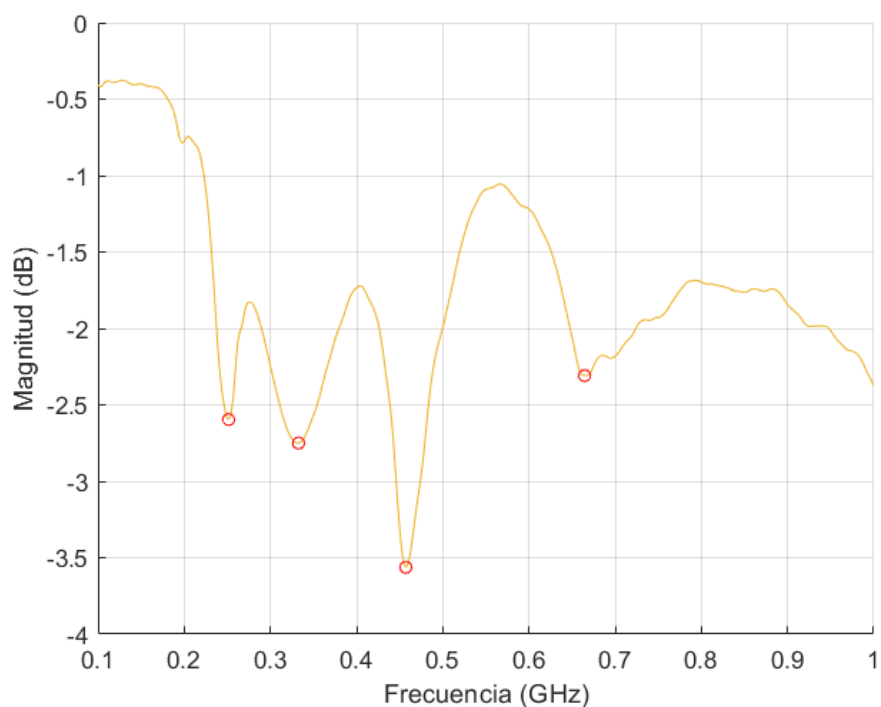


Figura 7.8: Datos obtenidos para tierra con 10% de humedad. (Parámetro S_{11})

Cuando el contenido de humedad se incrementa al 10% como se observa en la figura 7.8, se obtiene una respuesta más activa por parte del sensor. La curva de ganancia presenta un mayor número de resonancias, y las existentes se hacen más pronunciadas. Se observa que el mínimo alrededor de 0,46 GHz se mantiene en posición, pero su magnitud cambia ligeramente siendo aproximadamente $-3,5$ dB, además se presentan picos adicionales en 0,25 GHz, 0,32 GHz y 0,66 GHz, lo que sugiere que el sensor empieza a detectar con mayor sensibilidad los efectos dieléctricos inducidos por el agua en el suelo. En comparación con la curva de 0% de humedad, se nota un claro aumento en la cantidad de resonancias, así como una mayor profundidad en las mismas, lo que implica una interacción más significativa del campo electromagnético con el medio. Este aumento se debe a que la presencia de agua eleva la constante dieléctrica aparente del suelo, generando cambios en la impedancia y modificando las condiciones de resonancia del sistema. La diferencia en la forma entre ambas curvas pone en evidencia la capacidad del sensor para discriminar incluso cantidades pequeñas de humedad, lo cual resulta clave para su aplicación en contextos agrícolas o de monitoreo ambiental.

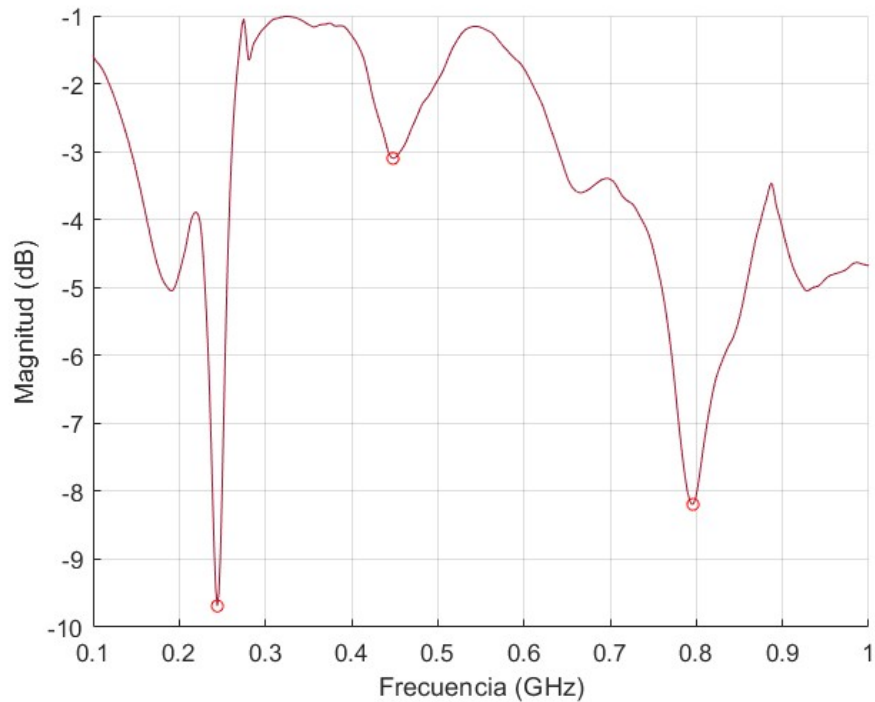


Figura 7.9: Datos obtenidos para tierra con 30 % de humedad.

Para la figura 7.9 referente a 30 % de humedad, el sensor presenta una respuesta aún más compleja, caracterizada por un notable incremento en la cantidad y profundidad de los picos de resonancia. Se observan caídas significativas en 0,24 GHz, alcanzando los $-9,6$ dB, en 0,44 GHz con $-3,1$ dB, y en 0,79 GHz con una absorción de hasta $-8,1$ dB. Estas cifras representan una evolución notable respecto a los niveles de 0 % y 10 % de humedad. Mientras que en las primeras dos condiciones las curvas tenían resonancias menos significativas, a 30 % se incrementa notablemente la dispersión dieléctrica del medio, generando una respuesta electromagnética mucho más rica y variable. Este comportamiento puede atribuirse al aumento considerable en la constante dieléctrica del suelo húmedo, que altera significativamente el acoplamiento entre el sensor y el medio. Además, las nuevas resonancias aparecen en frecuencias distintas, lo cual indica una alteración general del espectro de respuesta del sistema sensor-suelo. Este fenómeno es indicativo no solo de un cambio cuantitativo en la humedad, sino también cualitativo, ya que las propiedades dieléctricas del suelo se ven afectadas de manera no lineal con la adición de agua.

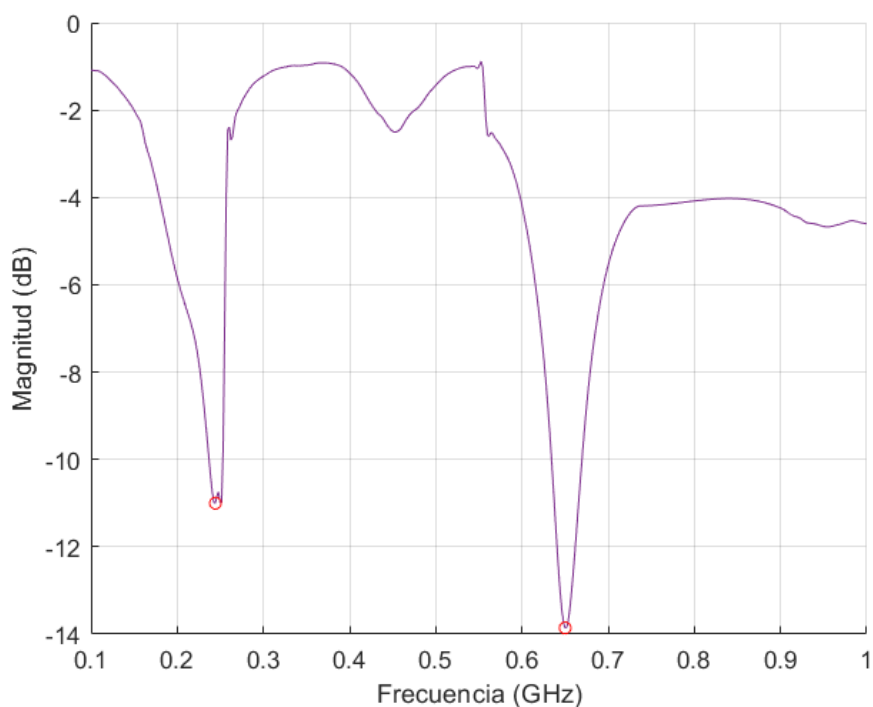


Figura 7.10: Datos obtenidos para tierra con 50 % de humedad.

La figura 7.10 del caso con 50 % de humedad representa una transición hacia un comportamiento resonante más definido, en el que las caídas de ganancia se vuelven más profundas pero también más focalizadas. Se destacan dos caídas principales: una en 0,24 GHz con una magnitud de aproximadamente -11 dB y otra en 0,65 GHz, la más profunda hasta ahora, con una magnitud de $-13,9$ dB. En comparación con los casos anteriores (0 %, 10 % y 30 %), la curva se vuelve más selectiva, presentando menos resonancias pero más intensas. Esta transición indica una evolución en las propiedades dieléctricas del suelo, que empieza a comportarse como un medio más homogéneo en ciertas bandas de frecuencia. Es probable que, a este nivel de saturación, el agua en el suelo comience a formar caminos conductivos más continuos, generando regiones de alta permitividad efectiva que facilitan el acoplamiento electromagnético. Este fenómeno resulta altamente beneficioso desde el punto de vista del diseño del sensor, ya que permite identificar bandas específicas de frecuencia en las que la sensibilidad del sistema es máxima. La comparación con los niveles anteriores resalta no solo el aumento en la intensidad de las caídas, sino también un cambio en el patrón global de resonancia, lo que implica una nueva configuración de interacción entre el sensor y el medio.

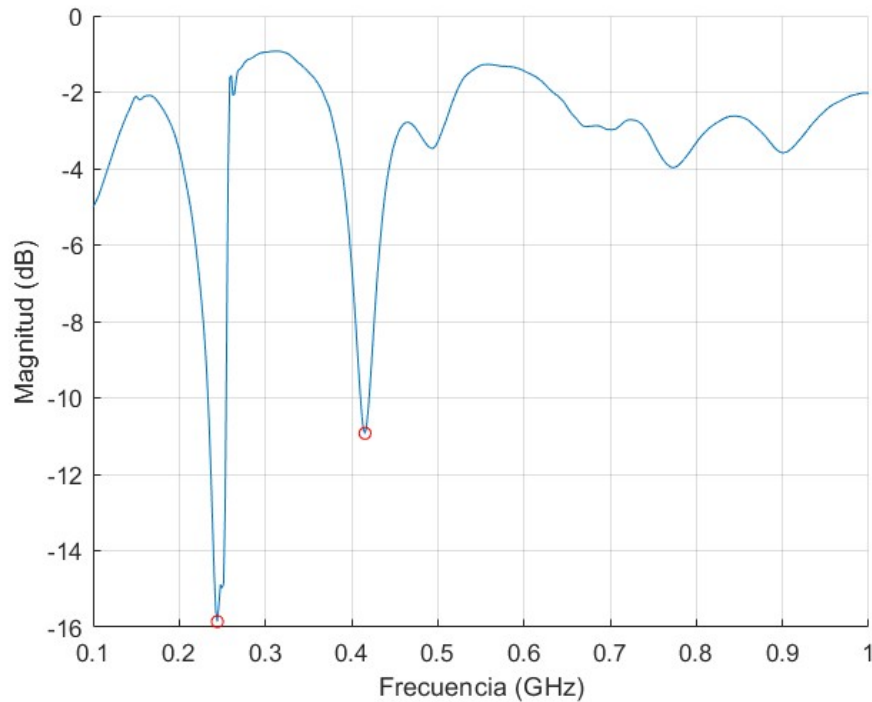


Figura 7.11: Datos obtenidos para tierra con 70 % de humedad.

A medida que el contenido de humedad alcanza el 70 %, como se muestra en la figura 7.11, el sensor experimenta su respuesta más extrema y diferenciada. Se presenta una caída muy pronunciada en 0,25 GHz, con una magnitud de casi $-15,9$ dB, que representa el valor mínimo observado en todo el conjunto de mediciones. Asimismo, se registra otra resonancia fuerte en 0,42 GHz, con una pérdida de $-10,8$ dB, lo que indica un altísimo nivel de absorción de señal. Esta curva muestra resonancias más profundas, estrechas y claramente definidas, en contraste con las respuestas más suaves observadas a 0 % y 10 %, y las más dispersas en 30 %. Comparado con el 50 %, la profundidad de las resonancias es aún mayor, lo que evidencia que el sensor es altamente sensible incluso a niveles de saturación elevados. Este comportamiento sugiere que el suelo, completamente empapado, presenta una distribución dieléctrica prácticamente continua, lo cual genera condiciones ideales para una fuerte interacción electromagnética. Además, se observa un desplazamiento en la frecuencia de los mínimos, lo cual refuerza la hipótesis de que la humedad afecta no sólo la intensidad de la ganancia, sino también el espectro completo de respuesta. Esta evolución progresiva de las curvas a lo largo de los distintos porcentajes de humedad muestra de manera contundente la viabilidad del sensor como herramienta para estimación de humedad en suelos, con un comportamiento consistente y altamente sensible a lo largo de todo el rango de interés.

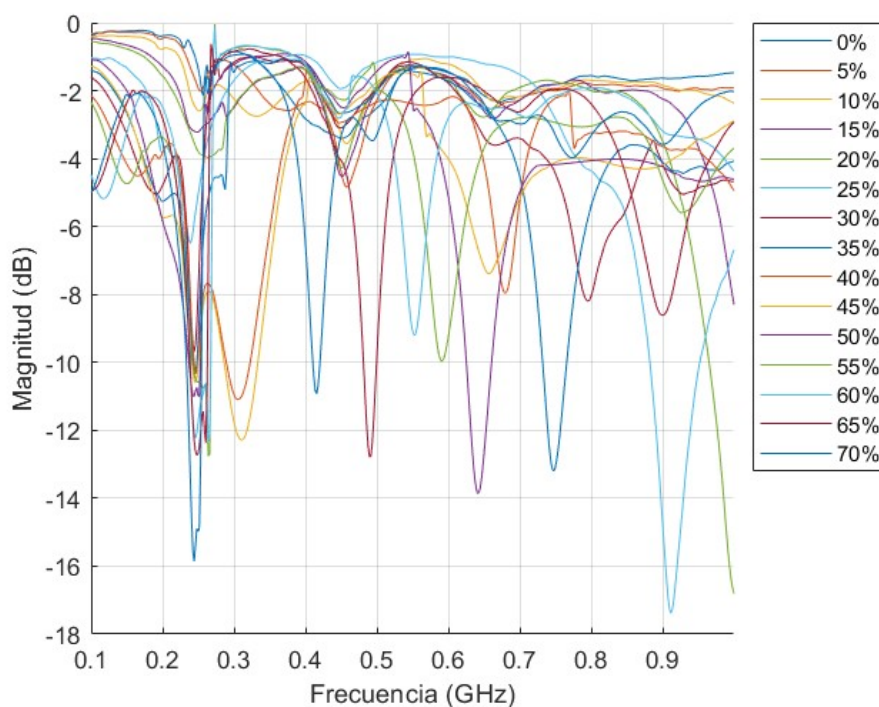


Figura 7.12: Consolidado de resultados de la experimentación

En la figura 7.12 se presenta la curva consolidada de la magnitud de la ganancia (en dB) en función de la frecuencia (en GHz) para un sensor evaluado sobre suelos con contenido de humedad desde 0% hasta 70%, en incrementos del 5%. Este gráfico resume la respuesta del sistema para cada una de las condiciones experimentales y permite observar con claridad la evolución del comportamiento electromagnético del conjunto suelo-sensor a lo largo del espectro de interés.

De forma general, se puede notar que a medida que el porcentaje de humedad aumenta, las curvas presentan resonancias con una profundidad significativamente mayor, especialmente en frecuencias inferiores a 0,6 GHz. Para los niveles bajos de humedad (entre 0% y 15%), las curvas se mantienen relativamente planas, con pérdidas menores a -4 dB, lo que indica una baja interacción dieléctrica entre el sensor y el medio. Sin embargo, a partir del 20%, se empiezan a identificar resonancias más marcadas y consistentes en la zona de 0,23 GHz, 0,48 GHz y 0,67 GHz, lo cual denota un aumento progresivo en la constante dieléctrica efectiva del suelo. Este comportamiento se intensifica aún más entre el 40% y 70% de humedad, donde las curvas presentan caídas pronunciadas que alcanzan hasta los -16 dB, indicando una fuerte absorción de energía electromagnética y por tanto, una alta sensibilidad del sensor ante condiciones de saturación hídrica.

Una característica destacable es el desplazamiento gradual de las frecuencias de mínima ganan-

cia conforme se incrementa la humedad. Este corrimiento hacia frecuencias ligeramente más bajas es evidencia de un cambio en el acoplamiento electromagnético y, en términos prácticos, representa una modificación en la impedancia del medio, la cual es altamente dependiente de la presencia de agua. Tal desplazamiento de las resonancias es útil para el diseño de sistemas de monitoreo, ya que permite seleccionar bandas específicas con mayor sensibilidad para cierto rango de humedad.

Otro patrón importante es la “separación creciente entre las curvas” a medida que se incrementa la humedad. En los primeros tramos (0%–20%) las curvas se superponen en varios sectores, mientras que a partir del 30% la dispersión entre ellas aumenta notablemente, facilitando una mayor discriminación entre niveles de humedad. Esta observación sugiere que el sensor tiene un comportamiento “más sensible y confiable” para valores de humedad media y alta, lo cual puede ser aprovechado para aplicaciones donde se requiera un monitoreo fino de la saturación del suelo, como en riego agrícola inteligente o control de drenaje.

Al aplicar un análisis con mayor nivel de zoom sobre la respuesta espectral del sensor, se identificó una zona de comportamiento particularmente estable alrededor de la frecuencia de 0.253 GHz. Esta frecuencia fue seleccionada debido a que dentro de ese rango se observó una variación clara y progresiva de la magnitud de la señal en función del contenido de humedad, lo cual la convierte en un punto clave para evaluar la sensibilidad del sensor. A partir de este consolidado, fue posible comparar directamente el comportamiento del sensor para todos los niveles de humedad evaluados, se trazó una línea vertical en esta frecuencia específica, permitiendo así realizar el análisis detallado que se presenta en la figura 7.13.

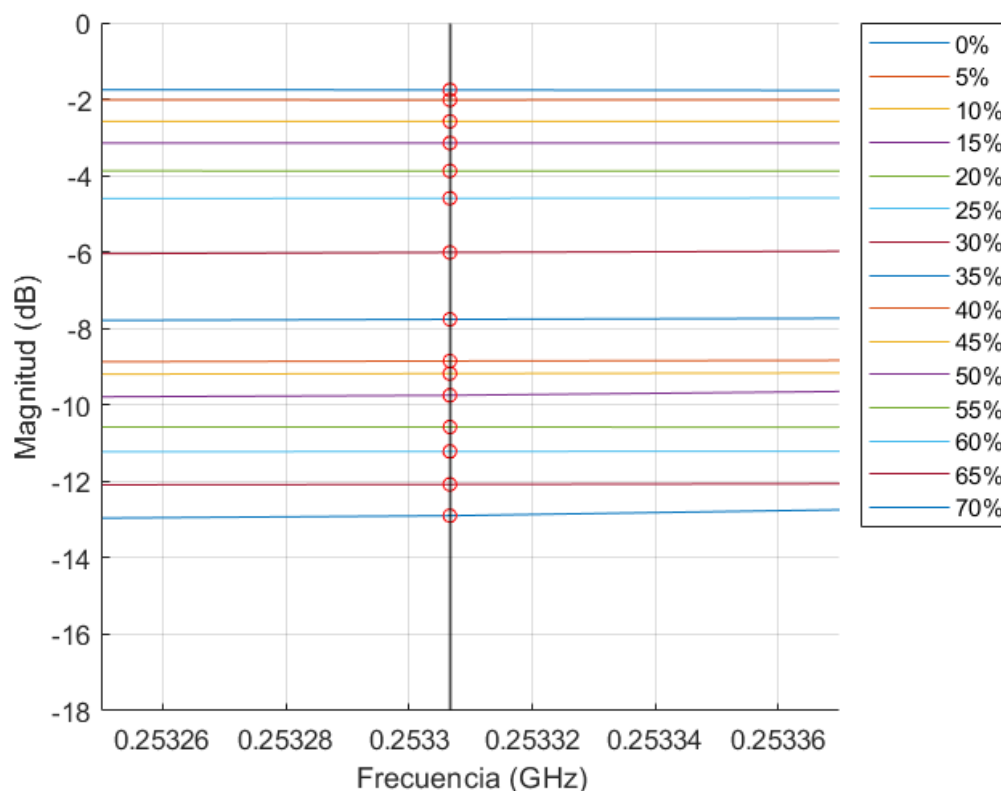


Figura 7.13: Acercamiento

Este gráfico consolidado muestra el comportamiento de la magnitud de la ganancia (en dB) para el sensor físico, a medida que se incrementa el porcentaje de humedad del suelo desde el estado completamente seco hasta un 70% de humedad. En esta frecuencia específica (aproximadamente 0.253 GHz), se puede observar una tendencia clara y coherente con la hipótesis inicial: a mayor contenido de agua en el suelo, mayor es la absorción de la señal electromagnética, lo cual se traduce en una disminución progresiva de la reflexión.

La curva correspondiente a la tierra seca presenta los valores más altos de reflexión, mientras que las curvas de mayor humedad (por ejemplo, 70%) exhiben las menores magnitudes, con diferencias superiores a 10 dB entre extremos. Esta diferencia es significativa y evidencia que el sensor responde con sensibilidad ante variaciones en la humedad.

Además, se puede notar que el comportamiento es relativamente monótono y estable, lo que sugiere una relación consistente entre el nivel de humedad y la atenuación observada, lo cual es deseable para procesos de calibración e implementación futura del sistema. Esto valida tanto el principio físico de operación del sensor como su utilidad práctica en entornos agrícolas o de monitoreo ambiental.

En resumen, el análisis del gráfico consolidado permite concluir que el sensor evaluado exhibe una respuesta altamente dependiente del contenido de humedad del suelo, tanto en la forma de las curvas como en la profundidad de las resonancias. Se identifican bandas de frecuencia críticas entre 0,2 GHz y 0,7 GHz donde se concentra la mayor actividad resonante, lo cual es de especial interés para futuros desarrollos que busquen optimizar el diseño de sensores pasivos de bajo costo para monitoreo ambiental. Finalmente, la progresión clara en la respuesta del sistema a lo largo del espectro y entre niveles de humedad confirma la viabilidad de esta tecnología como herramienta efectiva para la estimación no invasiva de contenido hídrico en suelos.

7.0.3. Ajuste polinomial para el patrón identificado

Después de obtener los gráficos que representan los datos se observó un patrón común que se daba a medida que la humedad aumentaba, como se mencionó anteriormente, se evidenció una caída en la magnitud de la ganancia para cada uno de los conjuntos de datos en la frecuencia de estudio. En la figura 7.14 se graficaron los valores obtenidos en dB (señalados en la figura 7.13) para cada medida de humedad presentada, comparando estos valores con un polinomio que se trazó con ayuda de la herramienta de Matlab para encontrar la función que mejor describiera este comportamiento.

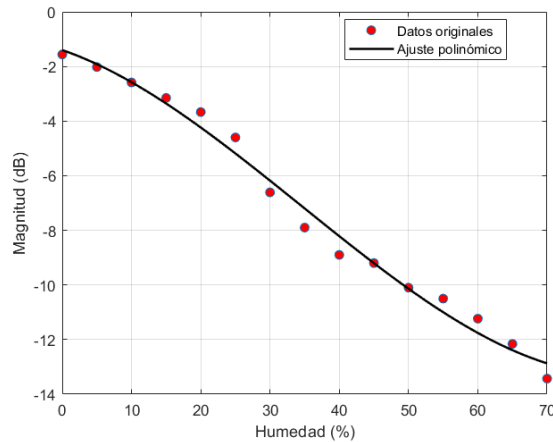


Figura 7.14: Polinomio de aproximación

Dando como resultado la función mostrada en la ecuación 7.1:

$$P(x) = 3,2929 \times 10^{-5}x^3 - 0,0034x^2 - 0,0868x - 1,4008 \quad (7.1)$$

Donde P describe la magnitud del parámetro S_{11} para cualquier valor de humedad x en un intervalo de 0 a 70.

De esta forma, se puede decir que el comportamiento observado en las mediciones de campo muestra una tendencia decreciente en la magnitud de la reflexión conforme aumenta la humedad del suelo. Esto concuerda con la teoría, ya que la constante dieléctrica del suelo incrementa con el contenido de agua, modificando la impedancia del sistema sensor-suelo y disminuyendo la reflexión de la señal. Cabe recordar que para modelar esta relación de forma empírica, se ajustó un polinomio de tercer grado a los datos experimentales, obteniendo una curva que minimiza el error cuadrático medio. Este polinomio, si bien no tiene un significado físico directo en sus coeficientes, sirve como herramienta de calibración para estimar la humedad a partir de mediciones de reflexión, ofreciendo una aproximación precisa y práctica para el sistema propuesto.

Justificación teórica de la relación entre reflexión y humedad

Desde el punto de vista electromagnético, la magnitud de la reflexión observada en un sensor capacitivo depende directamente de la impedancia del medio donde se propagan las ondas, en este caso, el suelo. Esta impedancia se ve afectada por la permitividad eléctrica relativa del suelo (ε_r), la cual varía en función del contenido de humedad.

El coeficiente de reflexión Γ entre dos medios se define como:

$$\Gamma = \frac{Z_{\text{suelo}} - Z_0}{Z_{\text{suelo}} + Z_0} \quad (7.2)$$

donde Z_{suelo} es la impedancia del suelo y Z_0 es la impedancia característica del sistema de medición (usualmente 50Ω).

En sistemas capacitivos, como el sensor desarrollado, la impedancia del medio puede relacionarse inversamente con la raíz cuadrada de la constante dieléctrica:

$$Z_{\text{suelo}} \propto \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (7.3)$$

Por su parte, la constante dieléctrica relativa del suelo es una función creciente de la humedad:

$$\varepsilon_r = f(H) \quad (7.4)$$

donde H representa el contenido de humedad del suelo (ya sea volumétrica o gravimétrica).

Combinando estas relaciones, se establece la siguiente cadena de dependencias:

$$H \uparrow \Rightarrow \varepsilon_r \uparrow \Rightarrow Z_{\text{suelo}} \downarrow \Rightarrow |\Gamma| \downarrow$$

Finalmente, como la magnitud del coeficiente de reflexión se expresa en decibelios (dB), se utiliza la siguiente expresión:

$$|\Gamma|_{\text{dB}} = 20 \log_{10} |\Gamma| \quad (7.5)$$

Esta formulación justifica físicamente que al aumentar la humedad del suelo, se incrementa su permitividad, disminuye su impedancia y, por tanto, se reduce la magnitud de la reflexión registrada por el sensor. Este comportamiento coincide con los datos obtenidos experimentalmente, los cuales fueron ajustados mediante un modelo polinómico que describe de manera empírica esta relación no lineal.

Humedad (%)	Frecuencia de Resonancia
15 %	1.10 GHz
20 %	1.00 GHz
25 %	908 MHz
30 %	797.9 MHz
35 %	750 MHz
40 %	680.7 MHz
45 %	659.1 MHz
50 %	641.08 MHz
55 %	590.5 MHz
60 %	552.7 MHz
65 %	491.3 MHz
70 %	415 MHz

Cuadro 7.2: Frecuencia de resonancia observada según el porcentaje de humedad

Para analizar cómo varía la respuesta del sistema ante cambios en el contenido de humedad del suelo, se realizó un estudio enfocado en el desplazamiento de la frecuencia de resonancia, identificada como el mínimo del parámetro S_{11} en cada simulación. Este valor representa el punto en el cual el sensor presenta la mayor absorción de energía, lo que se interpreta como su condición de resonancia. En el cuadro 7.2 se presentan los valores de frecuencia de resonancia obtenidos para distintos porcentajes de humedad. Se observa una **tendencia decreciente** en dicha frecuencia a medida que la humedad del suelo aumenta. Este comportamiento es consistente con el modelo teórico, ya que el incremento en la humedad genera un aumento en la **permitividad dieléctrica** del medio, lo que provoca un desplazamiento del punto de resonancia hacia frecuencias más bajas.

Con base en los datos obtenidos de frecuencia de resonancia para cada nivel de humedad, se procedió a realizar una aproximación funcional que permitiera describir la relación entre ambos parámetros. Para ello, se utilizó un ajuste polinomial no lineal, como se muestra en la Figura 7.15. En esta gráfica se presentan los puntos experimentales (en rojo) y la curva ajustada (en negro), la cual representa una tendencia decreciente conforme aumenta el porcentaje de humedad.

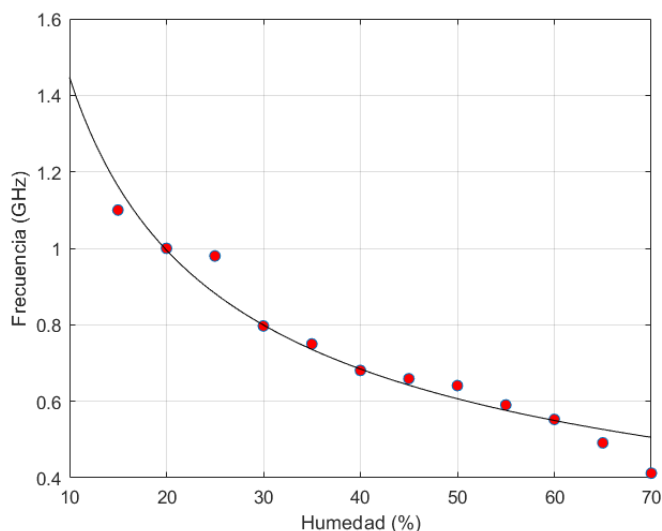


Figura 7.15: Ajuste polinomial no lineal de la frecuencia de resonancia.

Este comportamiento es coherente con la teoría electromagnética aplicada a medios dieléctricos: a medida que el contenido de agua en el suelo aumenta, también lo hace la permitividad del medio, lo cual repercute directamente en un desplazamiento de la frecuencia de resonancia hacia valores más bajos. La curva obtenida permite visualizar con claridad esta relación no lineal, en donde los cambios de frecuencia son más abruptos en los primeros incrementos de humedad (entre el 15 % y el 35 %), y se estabilizan gradualmente a medida que se superan niveles de humedad superiores al 50 %.

La calidad del ajuste fue evaluada mediante el cálculo del error cuadrático medio (ECM), obteniendo un valor de 21.2119 MHz^2 , lo que equivale a un error promedio (RMSE) de aproximadamente 4.6 MHz. Este valor representa menos del 0.5 % del rango total de frecuencias analizado, lo cual indica que el modelo proporciona una representación adecuada del fenómeno y puede ser empleado para futuras tareas de estimación o calibración en entornos agrícolas reales.

Este tipo de modelo es útil no solo para interpretar los resultados obtenidos, sino también como base para diseñar futuras estrategias de predicción o calibración en sistemas de medición de humedad basados en la respuesta en frecuencia.

En el capítulo de trabajos futuros, se propone el uso de esta frecuencia para automatizar la medición de la variable.

Esta frecuencia, una vez identificada, puede ser ingresada en el modelo de ajuste polinomial previamente determinado, permitiendo así la estimación directa del porcentaje de humedad del suelo. Esta integración abre la posibilidad de desarrollar un sistema que realice el procesamiento en tiempo real, mejorando la aplicabilidad práctica del sensor en entornos agrícolas

dinámicos y con variaciones constantes de condiciones.

Con el objetivo de describir cuantitativamente la relación entre la humedad y la frecuencia de resonancia observada experimentalmente, se realizó un ajuste por regresión no lineal utilizando una función de tipo potencia. Este tipo de función permite capturar comportamientos donde una variable decrece o crece rápidamente en función de otra, lo cual es coherente con la tendencia observada en los datos recolectados: a medida que el porcentaje de humedad aumenta, la frecuencia de resonancia disminuye de manera no lineal. La función seleccionada tiene la forma de la ecuación 7.7:

$$f(H) = p_1 \cdot H^{p_2} \quad (7.6)$$

$$f(H) = 0,1 \cdot H^{-1,6} \quad (7.7)$$

Donde H es el porcentaje de humedad y p_1, p_2 son parámetros ajustables, que para la función de la figura 7.15 son 0.1 y -1.6 respectivamente. Esta forma funcional ofrece una representación matemática simple pero eficaz para capturar el comportamiento físico subyacente, facilitando el análisis y la interpretación del fenómeno.

En efecto, el comportamiento del sensor puede relacionarse conceptualmente con la resonancia de un circuito RLC, donde la frecuencia de resonancia está dada por la ecuación 7.8.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7.8)$$

Cabe aclarar que aunque se puede usar el modelo RLC como aproximación conceptual para entender la respuesta resonante del sensor, en términos físicos los electrodos conforman una estructura que se comporta como una línea de transmisión, en la cual los parámetros eléctricos están distribuidos a lo largo de la geometría del sensor. La Figura 7.16 ilustra este concepto. A diferencia de un circuito RLC simple donde la resistencia, la inductancia y la capacitancia se consideran componentes discretos, en este sistema, estos parámetros eléctricos están distribuidos continuamente a lo largo de la longitud de las varillas y a través del medio circundante, que es el suelo.

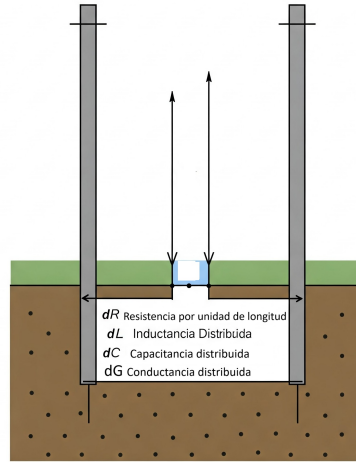


Figura 7.16: Modelo equivalente de línea de transmisión con parámetros distribuidos en los electrodos del sensor.

Al aumentar la humedad del suelo, la constante dieléctrica del medio también se incrementa, lo cual afecta directamente la capacitancia del sistema. Si se asume un aumento efectivo en C , entonces f_r disminuirá, ya que la frecuencia de resonancia es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la capacitancia. Es decir, Cuando el contenido de humedad en el suelo o material medido aumenta, la permitividad dieléctrica del medio también se incrementa. Como la capacitancia es proporcional a esta, entonces:

- A mayor humedad \rightarrow mayor $\varepsilon \rightarrow$ mayor $C \rightarrow$ menor f_r

Esta relación es coherente con el comportamiento registrado experimentalmente y representado en la curva de ajuste, validando así tanto el modelo empírico utilizado como su fundamento físico, porque la fórmula de resonancia se convierte indirectamente en una función decreciente de la humedad, lo cual concuerda perfectamente con el modelo ajustado mostrado en la figura 7.15.

De este modo, si asumimos que la capacitancia varía como una función de la humedad $C = C(H)$, donde H es el porcentaje de humedad, entonces se puede asumir la expresión de la ecuación 7.9

$$f_r(H) = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC(H)}} \propto \frac{1}{\sqrt{C(H)}} \quad (7.9)$$

si $C(H) \propto H^\alpha$, con $\alpha > 0$, entonces $f_r(H) \propto H^{-\alpha/2}$, y esta es exactamente la estructura del modelo de potencia decreciente, mostrado en la ecuación 7.7, con $p_2 < 0$.

En síntesis, el modelo propuesto no solo ajusta los datos experimentales, sino que también tiene un respaldo físico-teórico al considerar un sistema resonante como un circuito RLC.

Esto permite interpretar el cambio de frecuencia como un reflejo del cambio en la constante dieléctrica del medio.

Visto lo anterior, es válido afirmar que los resultados obtenidos con el prototipo físico demostraron una estrecha correspondencia con los datos simulados previamente. Se observó una coherencia significativa en la relación entre la frecuencia de resonancia y los diferentes niveles de humedad medidos, validando tanto el enfoque de diseño como la metodología experimental empleada. Aunque se presentaron algunas desviaciones puntuales, las tendencias generales coincidieron con el modelo matemático propuesto, lo cual respalda la solidez del marco teórico subyacente.

El uso de una función de ajuste tipo potencia permitió capturar con precisión la respuesta no lineal observada, fundamentada en principios físicos relacionados con el comportamiento de un sistema resonante RLC dependiente de la capacitancia. Este proceso de validación no solo confirmó los supuestos teóricos iniciales, sino que también demostró la utilidad del flujo de trabajo de diseño en ingeniería adoptado.

A lo largo del desarrollo, se realizaron ajustes iterativos tanto al diseño como al método de medición, basados en la guía del proceso de diseño en ingeniería, mostrado en la figura 6.1, lo que fortaleció la robustez del sistema final. En definitiva, el cumplimiento de los requerimientos iniciales, junto con la consistencia entre simulación y pruebas reales, permite concluir que la metodología empleada fue adecuada y efectiva para el desarrollo de un sensor funcional, con proyección hacia aplicaciones reales en el monitoreo de humedad en suelos.

Por último, al comparar los resultados obtenidos a través de simulaciones y los recolectados de manera experimental mediante un prototipo físico se puede observar una correspondencia consistente entre ambos enfoques. Aunque es común que haya pequeñas variaciones en la ubicación precisa de los valles de resonancia debido a diferentes factores como tolerancias en los materiales o condiciones ambientales durante las pruebas e incluso simplificaciones en el modelo de simulación; la tendencia observada en ambas situaciones confirma el principio de funcionamiento del sensor y respalda la hipótesis inicial de que la humedad impacta directamente en la constante dieléctrica del medio, alterando así el comportamiento electromagnético del sistema sensor-suelo. En resumen de todo lo anterior expuesto se puede inferir que el diseño funciona correctamente; la simulación resultó ser una herramienta útil para dirigir el proceso de creación y el prototipo responde de forma predecible ante las condiciones de humedad cumpliendo adecuadamente los objetivos establecidos.

7.0.4. Validación de costo y fabricación del prototipo:

Es válido afirmar que el presente trabajo de grado logró cumplir uno de sus objetivos fundamentales: el desarrollo de un sensor de humedad de bajo costo, con materiales de fácil acceso en el mercado local y una construcción sencilla. Cada uno de los componentes seleccionados fue elegido con el propósito de minimizar el valor total sin comprometer la funcionalidad del dispositivo.

Componente	Cantidad usada	Costo unitario (COP)	Costo estimado (COP)
Varillas metálicas	20 cm (de 1 m)	\$20,000 / metro	\$4,000
Sustrato FR4	4x4 cm (de 10x20 cm)	\$20,000 / pieza completa	\$1,600
Conector SMA	1 unidad	\$2,300	\$2,300
Tornillos	2 unidades	\$250 / unidad	\$500
Encapsulado (Empack)	-	Reutilizado	\$0
Total estimado			\$8,400

Cuadro 7.3: Costos estimados de los componentes del sensor de humedad

Tal como se evidencia en el cuadro 7.3, el costo estimado de fabricación del prototipo no supera los \$8,400 pesos colombianos, gracias al uso eficiente de materiales comunes como varillas metálicas, una pequeña sección de FR2, tornillos (cuyo costo es menor al expuesto en la tabla, si se considera en grandes cantidades), un conector SMA y un fragmento de empack reutilizado. Todo el proceso de fabricación se realizó en el CAP de la universidad, utilizando las máquinas y herramientas disponibles. No obstante, las técnicas de manufactura aplicadas —como el corte y taladrado de PCB o el ensamblaje mecánico básico— pueden ser replicadas fácilmente con herramientas convencionales, lo que permite su replicabilidad.

Además, el diseño del sensor es adaptable: puede escalarse, integrarse en una red de sensores, o complementarse con módulos adicionales como un microprocesador para procesamiento local de datos o incluso un detector de envoltorio para facilitar la interpretación de la señal. Aunque estas funcionalidades quedan como proyección para trabajos futuros, se logró desarrollar un sensor funcional, económico y con potencial de integración a sistemas de AP, cumpliendo así con lo propuesto en los objetivos iniciales del proyecto.

Conclusiones

El desarrollo de este trabajo permitió diseñar, simular y validar un sensor de humedad adaptable a redes de sensores, orientado a aplicaciones agrícolas, partiendo desde un enfoque teórico robusto y culminando en la validación mediante un prototipo físico. A continuación, se presentan las principales conclusiones del estudio:

- Se analizaron e identificaron los principios físicos más adecuados para la medición de humedad en suelos agrícolas, optando por el análisis de la respuesta electromagnética en función de la variación dieléctrica del medio. Esto sustentó la elección del diseño del sensor y guió las decisiones tomadas durante el proceso de simulación y prototipado.
- Se diseñó un prototipo funcional usando la metodología del proceso de diseño en ingeniería teniendo en cuenta los principios físicos estudiados en la fase investigativa del proyecto.
- Las simulaciones realizadas en Ansys Electronics mostraron una respuesta coherente ante variaciones del contenido de humedad en el suelo, observándose cambios significativos en la ganancia (en dB) en función de la frecuencia. Las curvas obtenidas para cada nivel de humedad permitieron establecer una correlación clara entre la variación dieléctrica del sustrato y la respuesta del sensor.
- El prototipo físico del sensor fue construido de acuerdo con las especificaciones del diseño simulado, cumpliendo con los requerimientos planteados.
- Las pruebas realizadas con el analizador vectorial de redes evidenciaron un comportamiento similar al observado en las simulaciones, validando la funcionalidad del sensor en condiciones reales. A pesar de algunas diferencias atribuibles a tolerancias de fabricación, efectos no idealizados o interferencias del entorno, se logró una concordancia suficiente para considerar exitoso el desarrollo del sensor.
- Se identificaron dos formas para determinar la humedad con el prototipo desarrollado. La primera, haciendo énfasis en la magnitud del parámetro S_{11} en una frecuencia específica (0.253GHz); y la segunda, analizando el valor de frecuencia de resonancia del circuito. Para ambos métodos se determinó una aproximación con ajuste polinomial que permitió obtener la humedad como función de los parámetros previamente mencionados.
- La metodología adoptada permitió hacer ajustes progresivos en el diseño del sensor, ya que al tener un enfoque iterativo, retroalimentado y flexible, facilitó la validación cruzada entre los resultados de simulación y los del prototipo físico.

Trabajos futuros

Con base en los resultados obtenidos y la experiencia adquirida durante el desarrollo de este trabajo, se presentan a continuación una serie de recomendaciones y posibles líneas de investigación futura que pueden fortalecer y ampliar el alcance del proyecto:

1. **Sistema digital de detección de humedad:** Es necesario la implementación de un sistema electrónico capaz de traducir la respuesta analógica del sensor, ya sea mediante el seguimiento del desplazamiento en la frecuencia de resonancia o los cambios en la magnitud del parámetro S_{11} , en un valor digital representativo del porcentaje de humedad. Este sistema deberá incluir un algoritmo de detección y correlación basado en los modelos obtenidos en este trabajo, así como una interfaz de salida digital, como I2C o SPI, que permita su integración con microcontroladores o sistemas embebidos para su uso en aplicaciones agrícolas de monitoreo en tiempo real.
2. **Adaptación a detector de envolvente:** Se plantea la implementación de técnicas de análisis de señal como el detector de envolvente, con el fin de automatizar y robustecer el proceso de identificación de la frecuencia de resonancia en las respuestas del sensor. Esta técnica, basada en la transformada de Hilbert, permite extraer de manera eficiente la envolvente de la señal S_{11} , facilitando la detección precisa del mínimo correspondiente a la frecuencia característica del sensor ante diferentes niveles de humedad.
3. **Estudio de más tipos de suelos:** Sería pertinente ampliar la investigación incluyendo suelos con diferentes características físicas (arenosos, arcillosos, francos, etc.), ya que la constante dieléctrica del medio puede variar significativamente según su composición, lo cual influye en la respuesta del sensor.
4. **Implementación de sistemas de transmisión inalámbrica:** Dado el enfoque hacia redes de sensores, se recomienda avanzar hacia la integración del sensor con módulos de comunicación inalámbrica como LoRa o ZigBee, permitiendo su uso en sistemas de monitoreo remoto con bajo consumo energético. Esto implica una mayor adaptación del sensor a dispositivos como microcontroladores para la obtención, envío y comunicación de los datos recogidos en campo.
5. **Desarrollo de una interfaz de visualización:** La implementación de una plataforma digital (web o móvil) que permita visualizar en tiempo real los datos recolectados por el sensor sería un gran aporte para facilitar la toma de decisiones en el campo agrícola.

6. **Validación en ambientes controlados y productivos:** Como siguiente paso, se sugiere implementar el sensor en invernaderos, cultivos de prueba o fincas piloto para observar su desempeño en ciclos completos de siembra y cosecha, con el fin de evaluar su impacto real en la eficiencia del riego y la salud del cultivo.
7. **Incorporación de técnicas de aprendizaje automático:** En una etapa más avanzada, se podría considerar la aplicación de modelos de machine learning para predecir niveles de humedad o comportamientos del suelo, alimentados por los datos históricos recolectados por los sensores distribuidos en el campo.

Estas recomendaciones buscan impulsar la continuidad del proyecto, no solo desde el punto de vista técnico, sino también con miras a una futura implementación comercial o académica que contribuya al desarrollo tecnológico del sector agrícola y a una gestión más eficiente de los recursos naturales.

Anexo 1 – Manual de Usuario

Este manual está diseñado para orientar el uso del sensor de humedad capacitivo desarrollado, específicamente en contextos de experimentación de laboratorio. El procedimiento está enfocado en pruebas con agua destilada, utilizando un analizador vectorial de redes (VNA) para la caracterización de la respuesta en frecuencia del sensor.

Equipos y materiales necesarios

- Sensor de humedad capacitivo (prototipo fabricado)
- Analizador vectorial de redes (VNA)
- Kit de calibración para VNA (con estándares: open, short, load)
- Cables coaxiales con conectores SMA
- Agua destilada
- Recipiente no conductor (vidrio o plástico)
- Toallas de papel o paño limpio
- Soporte para fijar el sensor (opcional)

Calibración del VNA

Antes de iniciar cualquier medición, es imprescindible calibrar el VNA para eliminar errores sistemáticos asociados a cables, conectores y condiciones del entorno. La calibración se realiza directamente en el puerto donde se conectará el sensor.

El procedimiento de calibración consta de:

1. Encender el VNA y esperar la estabilización del sistema.
2. Seleccionar el puerto de medición (usualmente el puerto 1).
3. Acceder al menú de calibración del VNA y seleccionar el método de calibración "Open, Short, Load".

4. Conectar cada estándar cuando el equipo lo solicite:
 - Open: Conectar el conector abierto.
 - Short: Conectar el cortocircuito.
 - Load: Conectar la carga adaptada (50 ohm).
5. Al finalizar la calibración, guardar el estado o aplicar la corrección directamente si el equipo lo permite.
6. Verificar la calibración observando un estándar conocido o un cable abierto para asegurar que la referencia es cero.

Conexión del sensor al VNA

Para realizar la conexión se deben seguir los pasos en orden:

1. Conectar el sensor directamente al puerto calibrado del VNA, usando un cable coaxial con conector SMA si es necesario.
2. Asegurarse de que el sensor esté limpio y seco antes de cada medición.
3. Configurar el rango de frecuencia en el VNA. En este caso, se utilizó un rango de 100 MHz a 1.5 GHz, con un número de puntos entre 201 y 401 para buena resolución.
4. Seleccionar la medición del S_{11} (parámetro de reflexión) y visualizar en magnitud y/o fase según sea requerido.

Procedimiento experimental con agua destilada

El experimento consiste en observar cómo varía la respuesta del sensor al ser expuesto a diferentes cantidades de agua destilada, simulando distintos niveles de humedad.

1. Ubicar el sensor sobre una superficie estable o soporte, evitando contacto con superficies metálicas.
2. Tomar una medición inicial sin agua (sensor completamente seco).
3. Aplicar una pequeña cantidad de agua destilada directamente sobre la zona sensible del sensor, asegurando un contacto parcial pero controlado.
4. Registrar la respuesta del VNA para cada aplicación de agua, observando los cambios en la curva de S_{11} .
5. Repetir el proceso aumentando gradualmente la cantidad de agua, dejando que se absorba de manera homogénea en cada paso.
6. Entre mediciones, si se desea regresar a un estado anterior, secar cuidadosamente el sensor con un paño sin residuos.
7. Guardar los datos del VNA en formato .slp o exportar las curvas en formato gráfico (PNG, JPG, CSV, etc.) para análisis posterior.

Observaciones importantes

- No se recomienda sumergir completamente el sensor, ya que esto no representa una condición realista de operación agrícola y puede alterar el encapsulado.
- Se debe evitar el uso de agua con impurezas o conductores, ya que pueden generar falsos positivos o alterar la impedancia del sistema.
- En esta etapa experimental no se incluye procesamiento digital. Para futuras implementaciones se sugiere evaluar el uso de un microcontrolador o la incorporación de un detector de envoltente para facilitar la lectura de la señal en campo.

Consideraciones finales

El sensor fue diseñado para ser una herramienta de bajo costo, fácil construcción y adaptabilidad. Este manual permite replicar las pruebas en un entorno controlado, utilizando instrumentos estándar en laboratorios de ingeniería. Aunque las pruebas aquí descritas utilizan agua destilada, el procedimiento es fácilmente extrapolable a muestras de suelo con humedad real. Para aplicaciones prácticas, se recomienda trabajar en futuras versiones en la integración de una etapa de procesamiento o visualización que permita lecturas directas en campo.

Anexos 2 – Imágenes



Figura 10.1: Adaptador utilizado para conectar el sensor al VNA.



Figura 10.2: Balanza utilizada en pruebas experimentales.



Figura 10.3: CNC utilizado para perforar las estacas.

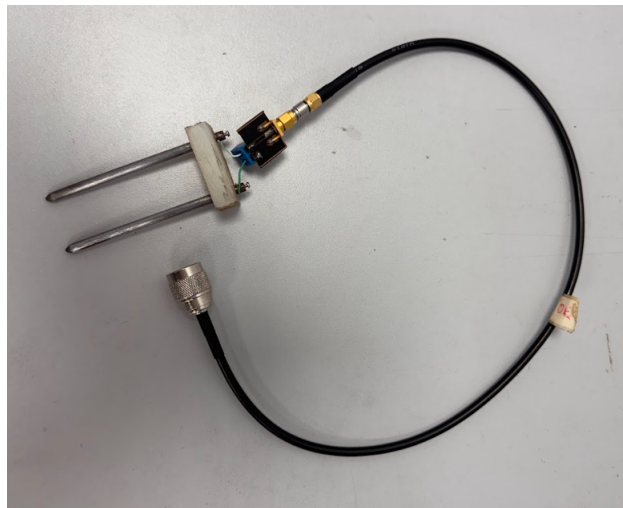


Figura 10.6: Conexión del sensor al VNA.

Bibliografía

- [1] A. N. Vargas and I. J. Jaramillo, “La industria de sensores en colombia,” *Tecnura*, vol. 22, no. 57, pp. 44–54, 2018, [Consultado el 10 de septiembre de 2022].
- [2] XCSHibang, “Piqueta de cobre para protección de tierra,” <https://www.xcshibang.com/es/earthing-protection-copper-electric-ground-stake.html>, [En línea; Accedido: 17-jul-2025].
- [3] Cool Pool, “Sonda o Electrodo pH,” <https://coolpool.es/producto/sonda-o-electrodo-ph/>, [En línea; Accedido: 17-jul-2025].
- [4] Aplicaciones Tecnológicas S.A., “Piqueta de puesta a tierra,” <https://www.directindustry.es/prod/aplicaciones-tecnologicas-sa/product-81767-1983857.html>, [En línea; Accedido: 17-jul-2025].
- [5] FAO, “Food loss estimation: Sdg 12.3.1a data and modelling approach,” FAO Statistics Working Paper Series, Tech. Rep. 23-39, 2023, accessed: 2025-04-11. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4060/cc9173>
- [6] U. Nations, “Sustainable development goals,” 2015, accessed: 2025-04-11. [Online]. Available: <https://sdgs.un.org/goals>
- [7] S. A. Imam, A. Choudhary, and V. K. Sachan, “Design issues for wireless sensor networks and smart humidity sensors for precision agriculture: A review,” in *2015 International Conference on Soft Computing Techniques and Implementations (ICSCTI)*, 2015, pp. 181–187.
- [8] V. Karanassios, “Sensors trends: Smaller, cheaper, smarter, faster and under wireless control,” in *2019 IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems (FLEPS)*, 2019, pp. 1–4.
- [9] G. C. Topp, J. L. Davis, and A. P. Annan, “Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines,” *Water Resources Research*, vol. 17, no. 3, pp. 574–582, June 1980.
- [10] Milesight. (2022) Sensor de humedad del suelo, temperatura y conductividad eléctrica em500-smtc. [Consultado el 12 de septiembre de 2022]. [Online]. Available: <https://www.milesight-iot.com/lorawan/sensor/em500-smtc/>
- [11] H. Lourdes, “El control ambiental en invernaderos: humedad relativa,” *Revista Horticultura*, pp. 1–3, 2008, iSSN: 1132-2950, [Consultado el 27 de septiembre de 2022].
- [12] W. Dorigo, A. Gruber, R. De Jeu, W. Wagner, T. Stacke, A. Loew, C. Albergel, L. Brocca, D. Chung, R. Parinussa, and R. Kidd, “Evaluation of the esa cci soil moisture product using ground-based observations,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 162, pp. 380–395, 2015. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425714002727>

- [13] S. O'Geen, *Soil Water Monitoring: Low-Cost Tools and Methods*. UC Agriculture & Natural Resources, 2008.
- [14] Y. Zhao, T. Zhao, M. Liang, Y. Yu, and Z. Xie, "Design and implementation of a capacitive soil moisture sensor based on lora," *IEEE Sensors Letters*, vol. 6, no. 4, pp. 1–4, Apr. 2022.
- [15] R. Pallas-Areny and J. G. Webster, *Sensors and Signal Conditioning*, 2nd ed. Wiley, 2001.
- [16] Ansys Inc., *HFSS User's Guide*, n.d., <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>.
- [17] D. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed. Wiley, 2011.
- [18] Rohde & Schwarz. (2025) R&S[®] ZN-Z170/-Z135/-Z129/-Z129E Technical Information. [En línea]. Accedido: 9-abr-2025. [Online]. Available: https://www.rohde-schwarz.com/us/manual/r-s-zn-z170-z135-z129-z129e-technical-information-manuals_78701-970306.html
- [19] International Organization for Standardization, "Iso 9001:2015 quality management systems — requirements," ISO Standard, 2015, available at: <https://www.iso.org/standard/62085.html>.
- [20] International Electrotechnical Commission, "Iec 61010-1:2010 safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use — part 1: General requirements," IEC Standard, 2010, available at: <https://webstore.iec.ch/publication/4389>.
- [21] "ISO 11783:2017 tractors and machinery for agriculture and forestry — serial control and communications data network," <https://www.iso.org/standard/75848.html>, International Organization for Standardization, 2017, consultado en abril de 2025.
- [22] "ISO 25119:2018 tractors and machinery for agriculture and forestry — safety-related parts of control systems," <https://www.iso.org/standard/73906.html>, International Organization for Standardization, 2018, consultado en abril de 2025.
- [23] Congreso de Colombia, "Ley 99 de 1993. por la cual se crea el ministerio del medio ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el sistema nacional ambiental (sina), y se dictan otras disposiciones," Diario Oficial No. 41.146, 22 de diciembre de 1993, 1993, disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=2829>.
- [24] "Ley 1876 de 2017: Por la cual se crea el sistema nacional de innovación agropecuaria (snia)," <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=83497>, 2017, consultado en abril de 2025.
- [25] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, "Lineamientos para la implementación de tecnologías sostenibles en el sector agropecuario," <https://www.minagricultura.gov.co>, 2020, consultado el 12 de abril de 2025.

- [26] ICONTEC, “Ntc 5001:2008 - calidad de la potencia eléctrica. límites y metodología de evaluación en punto de conexión común,” Norma Técnica Colombiana, 2008, disponible en: <https://tienda.icontec.org/gp-calidad-de-la-potencia-electrica-limites-y-metodologia-de-evaluacion-en-punto-de-conexion-comun-ntc5001-2008.html>.
- [27] M. S. Kumar, T. R. Chandra, D. P. Kumar, and M. S. Manikandan, “Monitoring moisture of soil using low cost homemade soil moisture sensor and arduino uno,” in *2016 3rd International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, vol. 01, 2016, pp. 1–4.
- [28] M. Tomar and T. Patidar, “Development of a low cost soil moisture sensor,” in *2019 International Conference on Vision Towards Emerging Trends in Communication and Networking (ViTECoN)*, 2019, pp. 1–5.
- [29] A. Beniwal, P. Ganguly, A. K. Aliyana, G. Khandelwal, and R. Dahiya, “Screen-printed graphene-carbon ink based disposable humidity sensor with wireless communication,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 374, p. 132731, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400522013740>
- [30] T. P. D. Pieris and K. V. D. S. Chathuranga, “Design and evaluation of a capacitive sensor for real time monitoring of gravimetric moisture content in soil,” in *2020 5th International Conference on Information Technology Research (ICITR)*, 2020, pp. 1–6.
- [31] Rohde & Schwarz. (2025) R&S® ZN-Z1xx Network Analyzer Calibration Kits Economy. [En línea]. Accedido: 9-abr-2025. [Online]. Available: https://www.rohde-schwarz.com/us/products/test-and-measurement/manual-calibration-and-verification-kits/rs-zn-z1xx-network-analyzer-calibration-kits-economy_63493-747623.html