

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y
AUTOMÁTICA INDUSTRIAL



UNIVERSITAS
Miguel Hernández

"VALIDACIÓN Y MEJORA DE UN
SISTEMA DE MEDIDA DE LA
PERMITIVIDAD COMPLEJA EN BANDA
ANCHA A FRECUENCIAS DE
MICROONDAS BASADO EN SONDA
COAXIAL DE BAJO COSTE"

TRABAJO FIN DE GRADO

Diciembre -2024

AUTOR: Raúl Moreno Merín

DIRECTORA: Julia Arias Rodríguez

AGRADECIMIENTOS¹

En primer lugar, me gustaría agradecer todo la dedicación y el tiempo que ha invertido mi tutora Julia en mí, pudiendo aprender muchísimo de esta experiencia. Sin ella no hubiese sido posible.

A mis padres y a mi hermano, por el apoyo constante y por la paciencia que han tenido acompañándome durante estos años.

Por último, quería dedicar sobre todo este trabajo final de grado a mis abuelas y, especialmente a mi abuelo, que seguro que está muy orgulloso y lo prometido es deuda.



¹ Este trabajo ha sido posible gracias al respaldo financiero parcial del proyecto I+D+i PID2022-139783OB-I00, financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por “FEDER Una manera de hacer Europa”. Además, contó con el respaldo parcial de la Conselleria de Educació, Universitats y Empleo a través del proyecto CIAICO/2022/068

RESUMEN

Este trabajo de fin de grado (TFG) aborda el diseño, validación y mejora de un sistema económico para la medida de la permitividad compleja de diferentes materiales. Este sistema utiliza una sonda coaxial con conector SMA, de bajo coste, y un analizador de redes vectorial (VNA) controlado por una aplicación desarrollada en Python.

El trabajo se centra en caracterizar líquidos de referencia, soluciones salinas y tejidos biológicos, seleccionados por su relevancia en aplicaciones biomédicas, industriales y de telecomunicaciones, en los que la medida de la permitividad compleja tiene relevancia práctica. Esta propiedad describe la interacción de los materiales con campos eléctricos a diferentes frecuencias, considerando su capacidad de almacenamiento energético (parte real) y las pérdidas disipadas en forma de calor (parte imaginaria).

La validación del sistema se llevó a cabo mediante la comparación de medidas experimentales con valores teóricos y resultados obtenidos con una sonda comercial de Keysight, reconocida como estándar en los ámbitos científico e industrial.

La sonda SMA fue sometida a calibración y pruebas con diversos modelos teóricos (como el modelo capacitivo, de radiación y de línea virtual) para interpretar los datos y mejorar la precisión de las medidas.

Los resultados demostraron que la sonda SMA, a pesar de ser una solución de bajo coste, logra una precisión aceptable para los materiales analizados en el rango de 10 MHz a 10 GHz, lo que ofrece una alternativa accesible frente a equipos comerciales costosos para su uso en contextos preliminares, abriendo además nuevas posibilidades para laboratorios con recursos limitados.

Entre las aportaciones clave del proyecto, destaca la migración del software a una versión más avanzada de Python, permitiendo una implementación de una interfaz gráfica más intuitiva, que automatiza el control del VNA y el procesamiento de datos.

Finalmente, el trabajo concluye con propuestas para mejorar el sistema, como el diseño de sondas con mejores prestaciones en alta frecuencia y la consideración de otros modelos de procesamiento de datos.



ABSTRACT

This final degree project addresses the design, validation, and improvement of a cost-effective system for measuring the complex permittivity of various materials. The system employs a low-cost coaxial probe with an SMA connector and a vector network analyzer (VNA) controlled by a Python-based application.

The work focuses on characterizing reference polar liquids, saline solutions, and biological tissues, selected for their relevance in biomedical, industrial, and telecommunications applications, where the measurement of complex permittivity has practical significance. This property describes the interaction of materials with electric fields at different frequencies, considering their energy storage capacity (real part) and energy dissipated as heat (imaginary part).

The system was validated by comparing experimental measurements with theoretical values and results obtained using a commercial Keysight probe, recognized as a standard in scientific and industrial fields.

The SMA probe was calibrated and tested with various theoretical models (such as the capacitive, radiation, and virtual line models) to interpret data and improve measurement accuracy.

Results demonstrated that the SMA probe, despite being a low-cost solution, achieves acceptable accuracy for the analyzed materials in the range of 10 MHz to 10 GHz. This provides an accessible alternative to expensive commercial equipment for preliminary applications, opening new possibilities for laboratories with limited resources.

Key contributions of the project include upgrading the software to a more advanced Python version, enabling the implementation of a more intuitive graphical interface that automates VNA control and data processing.

Finally, the work concludes with proposals to enhance the system, such as designing probes with higher frequency performance and considering other data processing models.

ÍNDICE

RESUMEN	5
ABSTRACT	7
ÍNDICE	9
ÍNDICE DE FIGURAS	11
ÍNDICE DE TABLAS	15
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	17
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	19
1.1 CONTEXTUALIZACIÓN.....	20
1.2 IMPORTANCIA DE LA MEDIDA DE LA PERMITIVIDAD	21
1.3 OBJETIVOS.....	22
1.4 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	22
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	25
2.1 CONCEPTOS GENERALES	25
2.2 MECANISMOS DE POLARIZACIÓN.....	28
2.2.1 Relación de Debye.....	32
2.2.2 Líquidos de referencia	35
2.3 SONDA COAXIAL DE EXTREMO ABIERTO	36
CAPÍTULO 3 MATERIALES Y MÉTODOS	41
3.1 SISTEMA EXPERIMENTAL CON SONDA SMA	41
3.1.1 Descripción.....	41
3.1.2 Calibración	44
3.1.3 Modelos de la permitividad	46
3.1.4 Herramientas de programación.....	50
3.2 SISTEMA EXPERIMENTAL DE SONDA COMERCIAL.....	52
3.2.1 Descripción.....	53
3.2.2 Calibración	54
3.2.3 Software de medida	56

CAPÍTULO 4 DESARROLLO DE LA APLICACIÓN EN PYTHON.....	61
4.1 REQUISITOS DEL SISTEMA Y LIBRERÍAS A INSTALAR.....	62
4.2 INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO	65
4.3 PROGRAMACIÓN DEL CÓDIGO	66
4.3.1 Script Measure_Option.py.....	66
4.3.2 Configuración del VNA	72
4.3.3 Script Functions.py.....	77
4.3.4 Script Demo_Option.py.....	82
4.3.5 Script CapModel.py.....	86
4.3.6 Script VLMMModel.py	87
4.3.7 Script AntModel.py	88
 CAPÍTULO 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	 91
5.1 LÍQUIDOS DE REFERENCIA POLARES	92
5.2 SOLUCIONES SALINAS	98
5.3 TEJIDOS BIOLÓGICOS	100
5.4 REPRODUCIBILIDAD	105
 CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	 109
ANEXOS	111
A.1 GUÍA DE USUARIO DE LA APP	111
A.1.1 Instalación.....	111
A.1.2 Manual de usuario	113
A.2 ARTÍCULO URSI.....	121
 BIBLIOGRAFÍA	 127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Condensador de placas paralelas DC.....	26
Figura 2. (a) Condensador de placas paralelas en AC. (b) Diagrama vectorial para la definición de la tangente de pérdidas.....	27
Figura 3. Tipos de Polarización en función de la frecuencia	29
Figura 4. Comportamiento molecular polar a campo eléctrico.....	30
Figura 5. (a) Polarización membrana celular. (b) Redistribución de iones debido a la polarización interfacial generada por campo eléctrico	31
Figura 6. Respuesta en frecuencia de mecanismos de polarización en dieléctricos.	32
Figura 7. Relajación de Debye del agua pura a 30°C	33
Figura 8. Estructura de cable coaxial.....	38
Figura 9. (a) Sección transversal de una línea coaxial. (b) Líneas de campo eléctrico y magnético dentro de una línea coaxial.....	39
Figura 10. Sistema experimental propuesto para la sonda basada en conector SMA.....	42
Figura 11. PicoVNA 106 de Pico Technology	42
Figura 12. Conector de panel R124510000 de Radiall.....	43
Figura 13. Conector radiall usado como sonda.....	43
Figura 14. Foto de la medida de las soluciones salinas	44
Figura 15. Calibración SOL y bloque de cortocircuito para sonda SMA. [Gas24a].....	45
Figura 16. Circuito capacitivo equivalente en el plano A-A'	47
Figura 17. Modelo equivalente para el modelo de radiación	48
Figura 18. Modelo línea virtual.....	49
Figura 19. (a) VNA Keysight P9371B. (b) Kit de calibración ZV-Z135 (3.5 mm, 50 ohmios, 0 a 15 GHz)	53
Figura 20. Plataforma móvil.....	54
Figura 21. Sistema de medida Keysight con el bloque de cortocircuito posicionado.	55
Figura 22. Corto de calibración.....	55
Figura 23. Extracto de las características de la sonda Slim Probe usada con la Suite de Medida de Materiales de Keysight. [Keye].....	57
Figura 24. Resultados permitividad con software Keysight	59
Figura 25. Diagrama de flujo de la aplicación de Python	62
Figura 26. Interfaz del programa.....	65

- Figura 27. Parte real (panel superior) y parte imaginaria (panel inferior) de la permitividad medida de (a) etanol, (b) metanol, (c) propan-1-ol, (d) acetona y (e) propan-2-ol. Los resultados de la medida con sonda SMA se muestran en línea continua de color rosa, azul y verde correspondiendo a los modelos capacitivo, de radiación y de línea virtual, respectivamente. En línea continua negra se muestra el valor teórico según [Gre12]. En línea discontinua se muestran los resultados obtenidos con sonda Keysight y su suite de medida..... 95
- Figura 28. Error en la parte real (panel superior) y parte imaginaria (panel inferior) de la permitividad medida de (a) etanol, (b) metanol, (c) propan-1-ol, (d) acetona y (e) propan-2-ol. Los resultados de la medida con sonda SMA se muestran en línea continua de color rosa, azul y verde correspondiendo a los modelos capacitivo, de radiación y de línea virtual, respectivamente. En línea discontinua se muestran los resultados obtenidos con sonda Keysight y su suite de medida..... 96
- Figura 29. Resultados obtenidos con la sonda Slim-Probe (SP) de Keysight. Parte real (panel superior) y parte imaginaria (panel inferior) de la permitividad medida de (a) etanol, (b) metanol, (c) propan-1-ol, (d) acetona y (e) propan-2-ol. Los resultados procesados con los modelos capacitivo, de radiación y de línea virtual muestran en línea continua de color rosa, azul y verde, respectivamente. En línea continua negra se muestra el valor teórico según ref [Gre12]. En línea discontinua se muestran los resultados obtenidos con sonda Keysight y su suite de medida. 97
- Figura 30. Variación de ϵ' (arriba), ϵ'' (medio) y σ (abajo) en función de la frecuencia para distintas concentraciones de NaCl (% m/v). Comparativa entre los resultados de la sonda comercial con su software dedicado (Slim Probe – Measurement Suite), la sonda comercial con la versión DEMO de este proyecto (Slim Probe- DEMO Capacitive Model) y la sonda de bajo coste (SMA Probe- DEMO Capacitive Model)..... 99
- Figura 31. Evolución de los parámetros ajustados a la ecuación de Cole-Cole extendida: (a) ϵ_s , (b) σ , (c) τ , y (d) ϵ_∞ , en función de la concentración de NaCl. Se incluye la comparación entre las sondas Slim Probe y SMA..... 100
- Figura 32. Parte real (panel superior) y parte imaginaria (panel inferior) de la permitividad medida de (a) clara y (b) yema de huevo, (c) hígado, (d) piel, (e) lomo y (f) tocino de cerdo. Los resultados de la medida con sonda SMA se muestran en línea continua de color rosa, azul y verde correspondiendo a los modelos capacitivo, de radiación y de línea virtual, respectivamente. En línea discontinua se muestran los

	resultados obtenidos con sonda Keysight y su suite de medida. En línea continua naranja se muestra el valor recogido en la base de datos de IT'IS Foundation para los tejidos homólogos humanos [Itis].	102
Figura 33.	Dispersión espacial de la parte real (panel superior) y parte imaginaria (panel inferior) de la permitividad medida de (a) clara y (b) yema de huevo, (c) hígado, (d) piel, (e) lomo y (f) tocino de cerdo. Los resultados de la medida con sonda SMA se muestran en línea continua de color rosa, azul y verde correspondiendo a los modelos capacitivo, de radiación y de línea virtual, respectivamente. En línea discontinua se muestran los resultados obtenidos con sonda Keysight y su suite de medida.	103
Figura 34.	Resultados obtenidos con la sonda Slim-Probe (SP) de Keysight. Parte real (panel superior) y parte imaginaria (panel inferior) de la permitividad medida de (a) clara y (b) yema de huevo, (c) hígado, (d) piel, (e) lomo y (f) tocino de cerdo. Los resultados procesados con los modelos capacitivo, de radiación y de línea virtual se muestran en línea continua de color rosa, azul y verde, respectivamente. En línea discontinua se muestran los resultados obtenidos con sonda Keysight y su suite de medida.	104
Figura 35.	Comparación de los resultados de aplicar el modelo capacitivo a las medidas de las tres sondas SMA fabricadas para el etanol, metanol, propan-2-ol y acetona.	106
Figura 36.	Comparación de los resultados de aplicar el modelo de radiación a las medidas de las tres sondas SMA fabricadas para el etanol, metanol, propan-2-ol y acetona.	106
Figura 37.	Comparación de los resultados de aplicar el modelo de línea virtual a las medidas de las tres sondas SMA fabricadas para el etanol, metanol, propan-2-ol y acetona.	107
Figura 38.	Reproducibilidad de las medidas de permitividad compleja para diferentes líquidos de referencia (etanol, metanol, propan-2-ol y acetona) obtenidas con tres sondas SMA de bajo coste. La gráfica muestra la máxima desviación normalizada ($\Delta\epsilon'/ \epsilon $ y $\Delta\epsilon''/ \epsilon $) respecto al valor promedio, representada en función de la frecuencia para los tres modelos empleados: capacitivo (Cap), de radiación (Rad) y de línea virtual (ViL). Las líneas continuas corresponden a ($\Delta\epsilon'/ \epsilon $) y las líneas punteadas a la parte imaginaria ($\Delta\epsilon''/ \epsilon $).	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Herramientas empleadas para nuestro software.....	52
Tabla 2. Requisitos y librerías a instalar.....	63
Tabla 3. Clasificación y medidas realizadas por tipo de material	92



LISTA DE ACRÓNIMOS

EMWLab: Laboratorio de Microondas de Elche

GUI: Interfaz gráfica de usuario

MUT: Material Under Test

RF: Radiofrecuencia

SMA: SubMiniature version A

SOL: Short-Open-Load

TE: Transversal Eléctrico

TEM: Modo Transversal Electromagnético

TM: Transversal Maganético

VNA: Vector Network Analyzer



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Los materiales electromagnéticos desarrollan un papel crucial hoy en día, la ciencia se enfoca en entender su comportamiento para su posterior desarrollo en el mundo tecnológico. Este estudio se centra en la interacción entre los materiales y las ondas electromagnéticas, uno de los principales objetivos es el análisis de un sistema de medida de la permitividad compleja de líquidos y semisólidos desarrollado en un trabajo previo [Gas24a]. El sistema está basado en una sonda coaxial realizada con un conector SMA² de bajo coste conectado a un analizador de redes vectorial (VNA, *Vector Network Analyzer*) controlado por ordenador. Para la validación del sistema, se realizan medidas en varias sustancias (líquidos de referencia, soluciones salinas y materiales biológicos) usando tanto este sistema como un sistema comercial de uso científico.

Para entender bien el comportamiento de materiales con la interacción de ondas electromagnéticas cabe destacar dos propiedades clave que son la permitividad y la permeabilidad magnética. En este estudio, nos enfocaremos exclusivamente en la medida de la permitividad compleja en líquidos polares de referencia, soluciones salinas acuosas y materiales biológicos dentro del rango de frecuencias de microondas. Este aspecto es particularmente relevante no solo para el estudio en ámbito biomédico, sino también para una variedad de aplicaciones tecnológicas como diseño de líneas de transmisión, diseño de componentes pasivos como condensadores y diseño de sensores, ya que la permitividad puede utilizarse para medir la humedad, la temperatura y otras propiedades de los materiales.

Además, las comunicaciones por microondas, que son críticas en los sectores militar, industrial y civil, exigen un conocimiento detallado de las propiedades electromagnéticas para el diseño de materiales especializados, como los absorbentes de radar y otras estructuras destinadas a manipular ondas electromagnéticas. En un escenario donde la velocidad de procesamiento de los dispositivos electrónicos se está acercando a

² SMA: *SubMiniature version A*

las frecuencias de microondas, el análisis de las propiedades electrónicas de los materiales se convierte en una necesidad imperativa. Un conocimiento preciso y detallado de las propiedades de transporte eléctrico y de las propiedades constitutivas de los materiales es crucial para el desarrollo eficiente y avanzado de componentes electrónicos y circuitos de alta frecuencia [Che04].

En este capítulo introductorio, se proporciona un resumen general del proyecto, destacando la importancia de la medida de la permitividad y la comparación de nuestra sonda SMA de bajo coste con una sonda comercial.

1.1 CONTEXTUALIZACIÓN

El Grado en Ingeniería Electrónica y Automática Industrial está diseñado para proporcionar a los estudiantes una serie de conocimientos especializados en las áreas de electrónica y automatización industrial. En el presente trabajo se aborda una necesidad específica en el ámbito de la ingeniería biomédica, donde la aplicación de técnicas de instrumentación electrónica y la automatización desarrollan un papel fundamental. La medida automatizada de la permitividad mediante una sonda coaxial no solo requiere el dominio de conocimientos adquiridos durante el Grado, sino que también constituye el reto de aplicar estos conocimientos en situaciones prácticas y desafiantes. Por ejemplo, cabe mencionar que para el diseño de la interfaz gráfica con Python para el control del VNA y la extracción de datos de manera automatizada, es necesario haber adquirido habilidades en programación y la capacidad de diseñar soluciones innovadoras en el ámbito de la electrónica y automática industrial.

Este trabajo se ha llevado a cabo dentro de las líneas de trabajo del grupo EMWLab (Laboratorio de Microondas de Elche), perteneciente al Instituto Universitario de Investigación en Ingeniería. La finalidad del EMWLab es el diseño, la simulación, la fabricación y la medida y caracterización de dispositivos y sistemas de microondas. Entre sus líneas de investigación se encuentran la caracterización dieléctrica de materiales y el diseño e implementación de sistemas de imagen médica basados en microondas para la detección temprana de tumores entre otros [Bla22a], [Bla22b].

Este proyecto por lo tanto no solo busca aportar al progreso de la investigación en ingeniería biomédica, sino que también aspira a ser un reflejo concreto de la formación integral ofrecida por el Grado en Ingeniería Electrónica y Automática Industrial de la UMH al vincular de manera estrecha la investigación avanzada con los principios educativos del Grado.

1.2 IMPORTANCIA DE LA MEDIDA DE LA PERMITIVIDAD

La medida de la permitividad en el rango de frecuencias de microondas es crucial en varias aplicaciones, especialmente en el ámbito de la ingeniería biomédica [Kuč16], [Dir17].

En el campo de la medicina, es fundamental para la caracterización de tejidos biológicos, lo que permite detectar las diferencias en la respuesta dieléctrica de diversos tipos de tejidos, esenciales para diagnósticos y tratamientos. Por ejemplo, en la detección del cáncer de mama mediante técnicas de imagen por microondas, las variaciones en la permitividad entre tejidos sanos y tumorales pueden ser identificadas, lo que facilita la detección temprana de tumores malignos [Sem05], [Kuw13].

Además, las propiedades dieléctricas de los tejidos son cruciales en estudios de dosimetría y en la planificación de tratamientos de ablación por microondas, donde se busca destruir tejido tumoral de forma controlada. Han explorado cómo estas propiedades afectan a la dosimetría en aplicaciones médicas, subrayando la importancia de la permitividad en la precisión de estos tratamientos [Laz07].

La comprensión de la permitividad es también fundamental para el diseño y la optimización de dispositivos médicos, como resonadores magnéticos y equipos de imagen basados en microondas [Bla22a,b].

En la industria alimentaria, la medida de la permitividad en el rango de microondas es útil para el control de calidad y la seguridad de los productos. Por ejemplo, la determinación del contenido de humedad en los alimentos se puede realizar mediante la medida de la permitividad, ya que esta propiedad está directamente relacionada con la cantidad de agua presente en el material [Adm21]. También hay diferentes estudios de como la permitividad de los alimentos influye en los procesos de microondas, como el calentamiento y la pasteurización, y su impacto en la calidad del producto [Liu11].

En resumen, la medida de la permitividad en el rango de microondas es una herramienta esencial que impulsa avances en múltiples áreas. En medicina y biología, permite diagnósticos más precisos y tratamientos innovadores, además de facilitar una mejor comprensión de cómo los tejidos responden a las ondas electromagnéticas. En la industria alimentaria, garantiza la calidad y seguridad de los productos mediante un control minucioso de sus propiedades y procesos. Esta propiedad física resulta clave en campos que abarcan desde la ciencia de materiales hasta la ingeniería, ya que permite desarrollar nuevos materiales, optimizar procesos industriales y encontrar soluciones

eficientes en áreas diversas. En definitiva, la capacidad de analizar y entender la permitividad abre puertas a innovaciones fundamentales y contribuye al progreso en una amplia gama de aplicaciones.

1.3 OBJETIVOS

El siguiente estudio tiene como objetivo evaluar y mejorar un sistema de medida de la permitividad compleja de líquidos y semisólidos desarrollado en un trabajo previo [Gas24a]. El sistema está basado en una sonda coaxial realizada con un conector SMA de bajo coste conectado a un puerto de un VNA controlado por ordenador. Para la validación del sistema, se realizaron medidas en varias sustancias (líquidos de referencia, soluciones salinas y materiales biológicos) usando tanto este sistema como un sistema comercial de uso científico con el fin de contrastar los resultados. Para alcanzar este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Migrar la versión 2.7 de Python a la 3.10.2 con la finalidad de ampliar las capacidades del programa para el cálculo de la permitividad a partir de medidas con otro tipo de sondas. También, incluir la dependencia con la temperatura de referencia de la ϵ^* .
2. Desarrollar e implementar una interfaz gráfica (GUI) en Python para el control del VNA y mejorar en el tratamiento y extracción de datos.
3. Evaluar la precisión y viabilidad del sistema automatizado de medida mediante pruebas en líquidos de referencia con propiedades dieléctricas conocidas, así como en materiales biológicos y soluciones salinas, con el fin de contrastar los resultados obtenidos con Slim-probe.
4. Documentar y analizar los resultados obtenidos.

1.4 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La memoria se organiza en 8 capítulos. Después de este capítulo de introducción, el resto de capítulos se enfocan a aspectos específicos del proyecto:

- Capítulo 2: Fundamentos teóricos. Se detallan conceptos teóricos fundamentales como concepto de permitividad, mecanismos de polarización, expresiones analíticas, técnicas de medida a frecuencias de microondas e importancia de los líquidos de referencia.
- Capítulo 3: Materiales y métodos. Se explica el diseño del sistema experimental, los modelos aplicados para la obtención de la constante dieléctrica, los sistemas

experimentales utilizados para realizar las medidas y las herramientas de programación a utilizar.

- Capítulo 4: Desarrollo de la aplicación en Python. Este capítulo se centra en la programación de la aplicación, interfaz gráfica de usuario y los algoritmos elegidos para la obtención de la permitividad.
- Capítulo 5: Resultados y discusión. Se exponen los resultados obtenidos a través de pruebas experimentales en líquidos polares de referencia, en soluciones salinas y en tejidos/materiales biológicos comparando los dos tipos de sonda experimentales.
- Capítulo 6: Conclusiones y líneas futuras. Se resumen las conclusiones derivadas del trabajo, destacando las limitaciones identificadas y las fuentes de error. Se proponen mejoras para futuras investigaciones y desarrollo del sistema, considerando posibles ampliaciones y aplicaciones.
- Anexos: Se incluyen la guía de instalación y el manual de usuario de la aplicación desarrollada. También se incluye el artículo presentado en el XXXIX Simposio Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI 2024).
- Bibliografía: Se presenta una lista detallada de las fuentes referenciadas a lo largo del trabajo.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo, se abordarán los conceptos esenciales relacionados con la permitividad compleja, siguiendo el enfoque detallado en la obra de Matsushita [Mat24]. Este recurso nos proporciona una base elemental para entender los principios electromagnéticos que influyen en las propiedades eléctricas destacando la importancia de estas a la hora de determinar su comportamiento frente a campos eléctricos. Estas propiedades pueden agruparse de manera amplia en dos categorías: conductores y aislantes. Aunque en este estudio nos centraremos más en los materiales aislantes.

2.1 CONCEPTOS GENERALES

En los materiales conductores las cargas eléctricas se mueven libremente cuando se aplica un campo eléctrico, lo que permite una conducción eficiente y las cargas dentro de él se reubican rápidamente hasta que el campo eléctrico sea nulo.

En cambio, en los materiales aislantes las cargas están firmemente ancladas en sus posiciones y no tienen la libertad de moverse. Al no tener cargas móviles significa que no hay flujo neto de carga a través del material cuando aplicamos un campo eléctrico.

Un tipo particular de aislante es el material dieléctrico ya que estos son esenciales en la electrónica debido a su capacidad para almacenar energía en un campo eléctrico. Aunque no permiten el movimiento libre de cargas, tienen la capacidad de polarizarse cuando se encuentran bajo la influencia de un campo eléctrico aplicado. Esta polarización ocurre porque las cargas positivas dentro del material tienden a desplazarse ligeramente en la dirección del campo, mientras que las cargas negativas se mueven en la dirección opuesta. Este desplazamiento de cargas, aunque pequeño, genera un campo eléctrico interno que se opone parcialmente al campo eléctrico externo, lo que reduce la intensidad del campo eléctrico dentro del material.

Este comportamiento de los dieléctricos se puede cuantificar mediante la permitividad relativa o constante dieléctrica, denotada como ϵ_r . La permitividad relativa es un factor

que indica cómo se reduce el campo eléctrico en un material en comparación con el campo en el vacío, que tiene una permitividad (ϵ_0) de 8.85×10^{-12} F/m. La constante dieléctrica es un parámetro crítico porque refleja la capacidad del material para almacenar energía eléctrica, cuanto mayor sea ϵ_r , más eficazmente el material puede almacenar energía bajo un campo eléctrico.

Un ejemplo práctico de este fenómeno se observa en un condensador de placas paralelas [Keya]. Si se coloca una fuente de voltaje DC (Figura 1). Cuando se aplica una diferencia de potencial (voltaje) a través de un condensador, la capacidad de almacenamiento de carga es mayor si entre las placas se encuentra un material dieléctrico, en lugar de un vacío. Esta capacidad, denotada como C , está directamente relacionada con la constante dieléctrica del material, y se puede expresar matemáticamente como:

$$C = \frac{A\epsilon_0\epsilon_r}{t}$$

En esta ecuación, A representa el área de las placas del condensador, t es la distancia entre las placas, y ϵ_r es la parte real de la permitividad relativa del material dieléctrico.

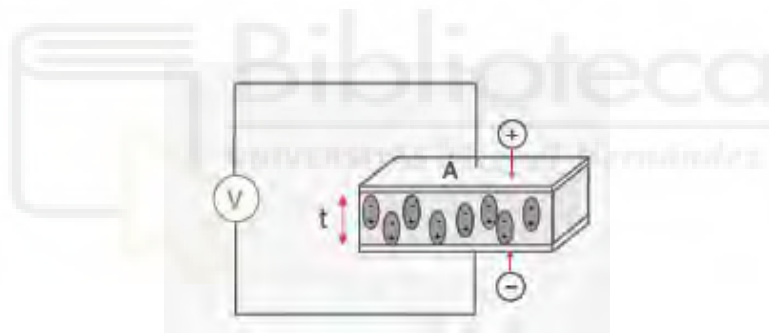


Figura 1. Condensador de placas paralelas DC

El material dieléctrico aumenta la capacidad de almacenamiento del condensador al neutralizar las cargas en los electrodos, que normalmente contribuirían al campo externo. Si se coloca una fuente de voltaje sinusoidal de corriente alterna (AC) a través del mismo condensador (Figura 2(a)), la corriente resultante está relacionada con la constante dieléctrica y compuesta por una corriente de carga I_C y una corriente de pérdida I_L . Las pérdidas en el material se pueden representar como una conductancia G en paralelo con un condensador C .

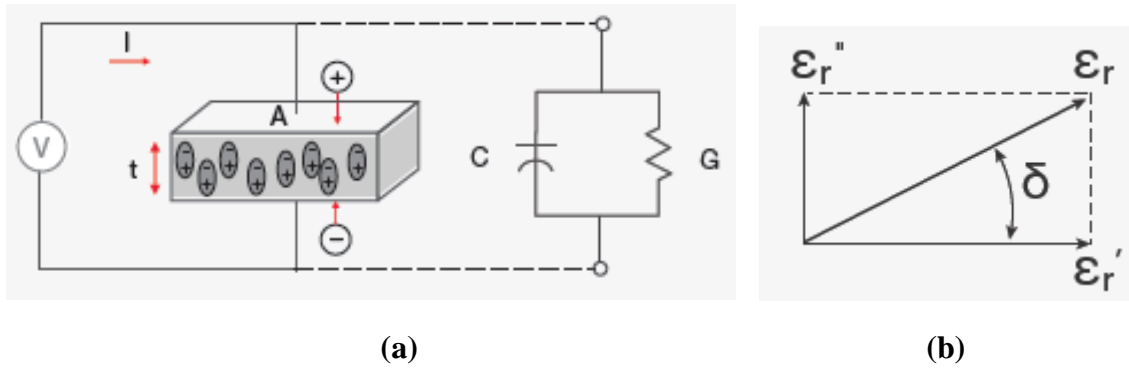


Figura 2. (a) Condensador de placas paralelas en AC. (b) Diagrama vectorial para la definición de la tangente de pérdidas

$$I = I_c + I_l = V(j\omega C + G) = V\left(j\omega \frac{A}{t} \epsilon_0 \epsilon_r + G\right) \quad (2.1)$$

A partir de (2.1) se puede definir la constante dieléctrica compleja ϵ^* tal que $I = Vj\omega \frac{A}{t} \epsilon^*$ por lo que a partir de ahora escribiremos esta cantidad compleja como:

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.2)$$

Podemos expresar la conductancia G como:

$$G = \omega \frac{A}{t} \epsilon_0 \epsilon''$$

La permitividad (relativa) compleja ϵ^* consta, pues, de una parte real ϵ' (habitualmente referida como constante dieléctrica del material, (ϵ_r) y una parte imaginaria, ϵ'' . La parte real es una medida de cuánta energía de un campo eléctrico externo se almacena en un material. A la parte imaginaria de la permitividad se le llama factor de pérdida.

Si representamos en un diagrama vectorial (Figura 2(b)) la parte real e imaginaria veremos que tienen un desfase de 90 grados. La suma vectorial forma un ángulo δ con el eje real. La pérdida relativa de un material es la relación entre la energía perdida y la energía almacenada. Por lo que la tangente de pérdidas se define como:

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2.3)$$

Describir un material en términos de su admitancia $Y = j\omega C + G$, como hemos hecho hasta ahora, destaca su capacidad para transportar corriente. Alternativamente, podríamos enfatizar su capacidad para restringir el flujo de corriente al considerar su impedancia, $Z=1/Y$. En ese caso, podríamos usar la conductividad medida σ para expresar la conductancia G del conductor de área A y longitud t de la Figura 2(a) como:

$$G = \frac{A}{t} \sigma \quad (2.4)$$

Y la expresión (2.1) se escribirá como:

$$I = V \left(j\omega \frac{A}{t} \varepsilon_0 \varepsilon_r + \frac{A}{t} \sigma \right) \quad (2.5)$$

Por lo que podemos definir la conductividad compleja σ^* como:

$$\sigma^* = \sigma + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (2.6)$$

De la misma forma, podemos reescribir la expresión ε^* como:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - \frac{j\sigma}{\omega \varepsilon_0} \quad (2.7)$$

Por tanto, podemos relacionar la permitividad compleja relativa y la conductividad compleja las mediante:

$$\sigma^* = j\omega \varepsilon_0 \varepsilon^* \quad (2.8)$$

2.2 MECANISMOS DE POLARIZACIÓN

Cuando las cargas positivas y negativas dentro de un material se separan bajo la influencia de un campo eléctrico externo, se genera un dipolo eléctrico [Che24]. Mientras que en materiales conductores las cargas se desplazan libremente, en los dieléctricos, aunque las cargas no pueden moverse libremente, pueden alinearse parcialmente con un campo aplicado. Este fenómeno se conoce como polarización, que genera una permitividad característica que mide la capacidad del material para responder a este campo. El mecanismo de polarización ocurre porque los dipolos eléctricos dentro del material se alinean en la dirección del campo eléctrico aplicado, lo que induce una polarización macroscópica. Esta polarización se cuantifica a través de la permitividad (relativa) ε^* que determina cuánta energía del campo eléctrico se almacena en el material (parte real) y también las pérdidas por la incapacidad de los dipolos para seguir al campo alternante (parte imaginaria). La relación entre la permitividad y la polarización se expresa como:

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 (\varepsilon^* - 1) \mathbf{E} \quad (2.9)$$

donde \mathbf{P} es la densidad de polarización y \mathbf{E} es el campo eléctrico.

La polarización (y, por tanto, la permitividad) es dependiente de la frecuencia y a esta variación se le denomina dispersión. Dependiendo de la estructura molecular del material y de la frecuencia del campo aplicado, diferentes tipos de polarización pueden manifestarse: polarización electrónica, polarización iónica, polarización atómica y polarización dipolar [Fel05].

Como se muestra cualitativamente en la Figura 3, cada mecanismo de polarización tiene una "frecuencia de corte" característica. A medida que la frecuencia aumenta, los mecanismos más lentos dejan de ser significativos, mientras que los más rápidos dominan la respuesta dieléctrica del material. En general, se asocia un efecto de relajación con la polarización dipolar y resonancias con la polarización electrónica o atómica.

Polarización Electrónica Este tipo de polarización se produce cuando un campo eléctrico externo desplaza las nubes electrónicas respecto a los núcleos atómicos en cada átomo del material. Dado que los electrones son mucho más ligeros que los núcleos, responden rápidamente a los cambios en el campo, lo que permite que la polarización electrónica sea casi instantánea. Este mecanismo de polarización es predominante a frecuencias altas, como en el rango óptico, donde la rapidez con la que los electrones siguen las fluctuaciones del campo eléctrico es significativa.

Polarización Atómica En este caso, el campo eléctrico aplicado causa el desplazamiento de los átomos o grupos de átomos dentro de las moléculas. A diferencia de la polarización electrónica, la respuesta de los átomos es más lenta debido a su mayor masa comparativa. Este tipo de polarización se vuelve relevante a frecuencias más bajas, donde el movimiento relativo de los átomos o grupos atómicos contribuye a la permitividad del material.

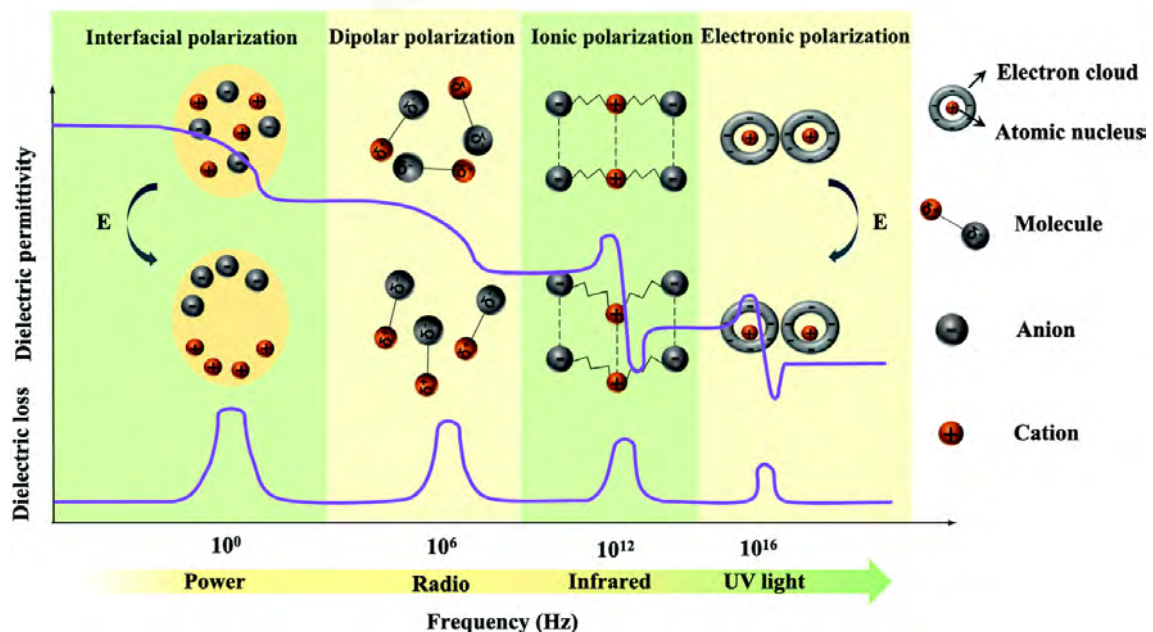


Figura 3. Tipos de Polarización en función de la frecuencia

Polarización de Dipolar (orientacional o rotacional): En materiales que contienen dipolos permanentes, el campo eléctrico tiende a alinear estos dipolos en la dirección del campo, como se ilustra en la Figura 4. Sin embargo, la rotación de los dipolos es contrarrestada por el movimiento térmico de las moléculas, lo que significa que la polarización de orientación depende en gran medida de la frecuencia del campo eléctrico aplicado y de la temperatura.

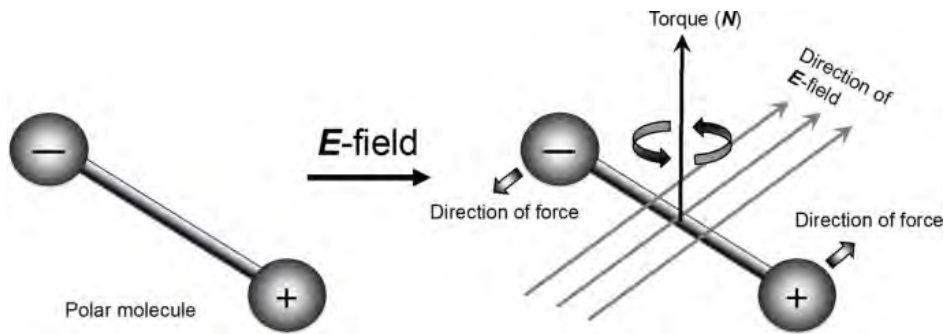


Figura 4. Comportamiento molecular polar a campo eléctrico

Para aplicaciones que involucran microondas, la polarización dipolar puede ser particularmente relevante. Este fenómeno es común en moléculas como el agua y ciertos polímeros. Sin embargo, debido a la inercia rotacional y a la viscosidad del material, los dipolos no logran seguir completamente el campo aplicado y además se producen fricciones que dan lugar a pérdidas dieléctricas representada por la parte imaginaria de la permitividad.

En tejidos biológicos es la polarización predominante debida a las moléculas libres de agua presentes en el tejido entre 100 MHz hasta algunos GHz y da lugar a la llamada dispersión gamma [Cas98]. La relajación de la polarización del agua pura ocurre alrededor de 20 GHz a temperatura ambiente, pero en tejidos biológicos, la interacción con otras moléculas y la estructura de los tejidos puede desplazar ligeramente este rango.

Polarización de carga espacial (interfacial). La polarización de carga espacial ocurre en interfaces entre materiales dieléctricos con diferentes propiedades eléctricas, generando una acumulación de carga en la interfaz. En las interfaces, las cargas se redistribuyen, generando una polarización adicional que contribuye a la respuesta dieléctrica del material y es responsable de la polarización a muy baja frecuencia.

Este mecanismo está presente en tejidos biológicos, donde se denomina polarización Maxwell-Wagner, que explica la acumulación de carga en las interfaces membranosas debido a las diferencias de conductividad y permitividad entre el interior y

el exterior de las células (Figura 5). La frecuencia típica en la que se manifiesta este fenómeno se da en el rango de 100 Hz a algunos MHz. [Cas98]

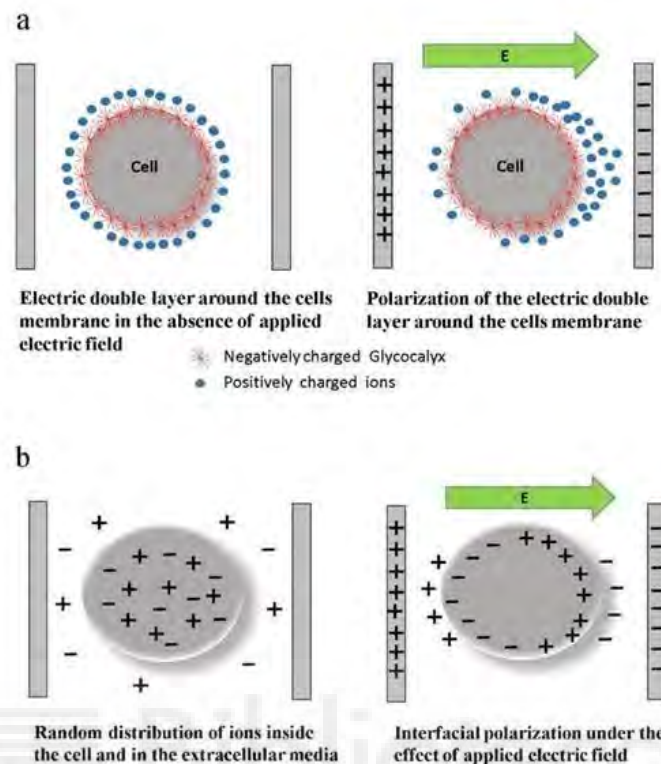


Figura 5. (a) Polarización membrana celular. (b) Redistribución de iones debido a la polarización interfacial generada por campo eléctrico

Por último, otro mecanismo que contribuye a la respuesta eléctrica de los materiales bajo un campo eléctrico aplicado es la conducción de cargas. La conducción de cargas disipa energía en forma de calor (pérdidas resistivas).

En el caso de los tejidos biológicos, estas cargas son iones tales como Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^- , etc. La **conducción iónica** contribuye significativamente a la permitividad compleja de los tejidos biológicos, especialmente a la parte imaginaria que está relacionada con las pérdidas dieléctricas. La conducción de iones en los fluidos extracelulares e intracelulares genera una resistencia eléctrica, lo que produce pérdidas de energía cuando un campo eléctrico alterno interactúa con el tejido. La polarización Maxwell-Wagner y la conducción iónica están interrelacionadas. Las interfaces entre las membranas celulares y los fluidos intercelulares o extracelulares, con propiedades eléctricas muy diferentes, contribuyen a una acumulación de carga y una conducción iónica en la respuesta dieléctrica del tejido. Este efecto es relevante especialmente a frecuencias bajas y medias (hasta 100 MHz).

La Figura 6 muestra de manera cualitativa un comportamiento típico de la permitividad en función de la frecuencia resaltando los diferentes mecanismos de polarización por encima de la frecuencia de 1 kHz donde, además, se representa la contribución del mecanismo de conducción iónica que tiene impacto en la parte imaginaria.

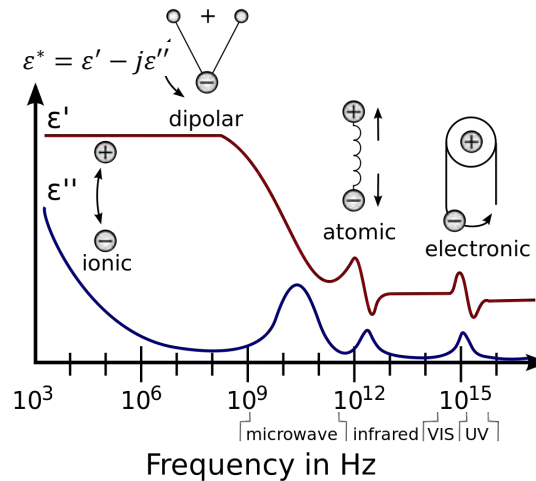


Figura 6. Respuesta en frecuencia de mecanismos de polarización en dieléctricos.

2.2.1 Relación de Debye

La relación de Debye describe el comportamiento de la polarización dipolar en materiales en función de la frecuencia del campo eléctrico aplicado. Fue desarrollada por Peter Debye y se utiliza para modelar cómo los dipolos eléctricos, como las moléculas polares, responden a un campo alterno [Deb29]. Este modelo es particularmente relevante para entender la polarización dipolar en sistemas como soluciones líquidas, materiales dieléctricos y tejidos biológicos.

Los materiales biológicos, debido a su compleja estructura y alto contenido de agua, presentan un comportamiento dieléctrico que varía con la frecuencia. Este comportamiento está influenciado por varios factores, incluyendo la presencia de moléculas polares como el agua, la estructura celular y la conductividad iónica. En el rango de frecuencias de microondas, los materiales biológicos exhiben una dispersión dieléctrica, que puede ser modelada por la ecuación de Debye. Este modelo supone que los dipolos eléctricos se alinean con el campo eléctrico aplicado, pero con un retraso temporal debido a la fricción interna o la interacción con su entorno. Este retraso introduce un tiempo de relajación característico (τ).

La permitividad compleja según el modelo de Debye está dada por:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (2.10)$$

En ella, ε_s es la permitividad estática, ε_∞ es la permitividad en el límite de altas frecuencias (frecuencia infinita), y τ es el tiempo de relajación. En la Figura 7 se muestra la relajación de Debye del agua pura a 30°C.

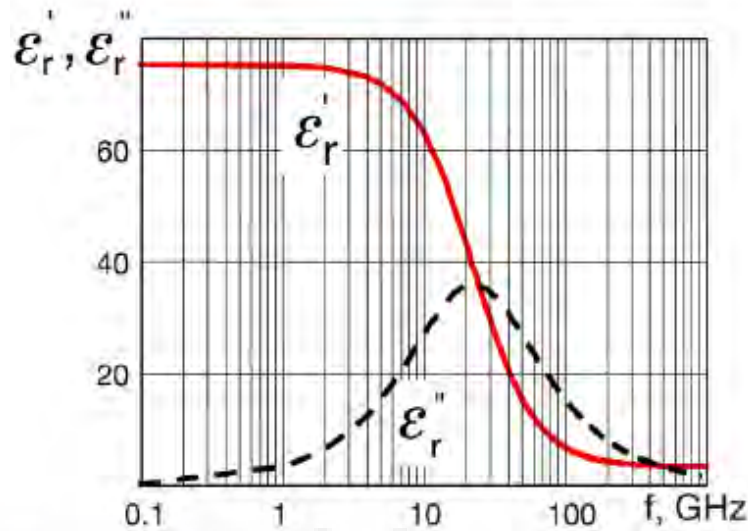


Figura 7. Relajación de Debye del agua pura a 30°C

Aunque el modelo de Debye es útil, es idealizado y supone una única constante de tiempo τ para todos los dipolos. En sistemas reales, como tejidos biológicos o materiales complejos, existen múltiples tiempos de relajación. Tampoco incluye efectos de conducción iónica y polarización interfacial, presentes en algunos de los materiales que se analizan en el presente trabajo. Para materiales más complejos, se utilizan extensiones del modelo, como, por ejemplo, el modelo de Cole-Cole [Col41]. La ecuación de Cole-Cole generaliza el modelo de Debye introduciendo el parámetro α , que ajusta el comportamiento del sistema para reflejar una distribución de tiempos de relajación en lugar de un solo tiempo característico:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}} \quad (2.11)$$

Esto es útil para describir materiales más complejos donde la respuesta dieléctrica no sigue una relajación exponencial simple, sino que involucra múltiples procesos con diferentes tiempos de relajación. Cuando $\alpha = 0$, la ecuación de Cole-Cole se convierte en la ecuación de Debye. Ambos modelos asumen la aproximación de dieléctrico perfecto. Si éste no lo fuera, existiendo corrientes de conducción para $\omega = 0$, es necesario añadir al

modelo el efecto de la conductividad estática de cargas, σ_i , quedando la expresión Cole-Cole extendida con el término de conductividad iónica como:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}} - \frac{j\sigma_i}{\varepsilon_0\omega} \quad (2.12)$$

La expresión (2.12) se puede dividir en tres partes significativas:

El primer término ε_∞ describe la respuesta del material a frecuencias muy altas. En este rango, los dipolos no tienen tiempo para seguir el campo, y el material parece "inactivo" o no polarizable. Este término es la permitividad residual a frecuencias extremadamente altas.

El segundo término es el de la relajación dieléctrica, que describe cómo la polarización del material cambia con la frecuencia. A frecuencias bajas, el material se polariza completamente (permitividad alta, ε_s), pero a frecuencias más altas, la polarización disminuye porque los dipolos no pueden seguir el campo alterno rápidamente (permitividad cercana a ε_∞).

Por último, el tercer término representa la conductividad iónica y es particularmente relevante a bajas frecuencias, donde el movimiento de los iones contribuye de manera significativa a la respuesta dieléctrica del material. A estas frecuencias, los iones tienen suficiente tiempo para desplazarse en respuesta al campo eléctrico, generando una corriente de conducción. Este movimiento iónico implica una pérdida de energía en forma de calor, conocido como efecto Joule. Este fenómeno se debe a la fricción interna que experimentan los iones al desplazarse dentro del material, lo que produce una disipación de energía y contribuye a las pérdidas totales en la respuesta dieléctrica del sistema.

Si realizamos un breve análisis del comportamiento en función de la frecuencia, tanto a frecuencias bajas, intermedias y altas tenemos que a frecuencias bajas, los dipolos en el material tienen tiempo suficiente para alinearse con el campo eléctrico, esto significa que el material está totalmente polarizado y la permitividad está dominada por ε_s por lo que en este caso el material presenta una alta capacidad de almacenar energía (permitividad alta) y también grandes pérdidas debido a la conductividad iónica.

A frecuencias intermedias el material está dominado por el término de relajación dieléctrica, en esta región comienza haber un retraso en la polarización, pero aún responde de manera significativa. En este rango de frecuencias las pérdidas dieléctricas son más pronunciadas, ya que la fase entre la polarización y el campo aplicado está más desfasada.

A frecuencias altas, los dipolos no pueden seguir el campo alterno debido a la rápida fluctuación. En consecuencia, la polarización es pequeña y la permitividad se aproxima a ϵ_{∞} . En este caso el material se comporta de manera similar a un aislante perfecto, con una baja capacidad de polarización y bajas pérdidas.

2.2.2 Líquidos de referencia

Los líquidos de referencia juegan un papel fundamental en la caracterización de tejidos biológicos ya que se requieren materiales de referencia para calibrar y probar los instrumentos que se utilizan para la medida de la constante dieléctrica. Los líquidos puros son materiales de referencia especialmente buenos, ya que son completamente uniformes y homogéneos (a diferencia de muchos materiales sólidos), y si son de pureza suficiente sus propiedades varían insignificadamente de una muestra a otra [Gre12]. En este contexto, se han identificado varios líquidos de referencia con constantes dieléctricas conocidas y bien documentadas.

El agua pura es uno de los líquidos de referencia más utilizados debido a su alta polaridad y su amplio uso en la caracterización de materiales biológicos, ya que está presente en gran parte de los tejidos.

La caracterización de líquidos de referencia para medidas dieléctricas ha sido abordada en diversos estudios, empleando modelos como Debye, double-Debye, Cole-Cole, Davison-Cole, entre otros, para describir las propiedades de líquidos polares. Un ejemplo representativo es el informe de Gregory & Clarke "Tables of the complex permittivity of dielectric reference liquids at frequencies up to 5 GHz" [Gre12], del cual hemos sacado la información de cómo se comportan nuestros líquidos de referencia. Este informe proporciona tablas detalladas de la permitividad compleja de diversos líquidos de referencia a frecuencias de hasta 5 GHz, ofreciendo datos cruciales para la validación y calibración de técnicas de medida dieléctrica.

El metanol y el etanol son líquidos de referencia ampliamente utilizados en la caracterización dieléctrica de tejidos biológicos, especialmente en el rango de las microondas. A bajas frecuencias, el metanol exhibe una permitividad dieléctrica cercana a 35, mientras que el etanol presenta un valor aproximado de 28. Estos valores los convierten en opciones adecuadas para la caracterización en frecuencias moderadas, ya que ofrecen medidas consistentes y reproducibles. No obstante, al trabajar con estos líquidos, es crucial tener en cuenta su volatilidad y posibles riesgos para la salud debido a su toxicidad.

Por otro lado, la acetona es otro líquido de referencia útil, especialmente en rangos de frecuencias milimétricas. Aunque es eficaz para estos propósitos, su uso debe manejarse con precaución, ya que puede ser higroscópica (absorber humedad del ambiente) y también puede dañar ciertos materiales. En este contexto, la estabilidad del entorno de trabajo es fundamental para obtener medidas precisas.

El tolueno, un compuesto orgánico, se emplea en algunas aplicaciones de caracterización de tejidos biológicos, aunque su permitividad dieléctrica es considerablemente más baja, rondando entre 2.38 y 2.4 a frecuencias de 1 GHz. Esta característica lo hace ideal para estudios en frecuencias más altas que las típicamente usadas con agua y otros líquidos comunes. Sin embargo, su toxicidad y la posibilidad de dañar ciertos equipos o materiales limitan su uso. Es recomendable evaluar cuidadosamente sus propiedades y riesgos antes de incorporarlo a cualquier experimento. Además, como con la acetona, la manipulación del tolueno requiere medidas de seguridad rigurosas debido a su potencial de causar efectos adversos.

Por lo que la selección adecuada de líquidos de referencia en la caracterización de tejidos biológicos desempeña un papel crucial para asegurar medidas precisas y trazables de las propiedades dieléctricas [Gre02], aunque debemos de tener precauciones ya que la contaminación de los líquidos puede alterar sus propiedades y la absorción de agua, especialmente en líquidos higroscópicos como la acetona, puede introducir variaciones significativas. Otro factor a tener en cuenta en las propiedades dieléctricas es la temperatura ya que esta puede afectar también de manera significativa.

2.3 SONDA COAXIAL DE EXTREMO ABIERTO

La sonda coaxial de extremo abierto es la que hemos utilizado para nuestro trabajo. El objetivo es poner el extremo abierto de la sonda coaxial en contacto con la muestra bajo prueba (MUT).

El método se basa en el estudio del campo eléctrico marginal en el extremo abierto de la línea coaxial y su transformación provocada por el dieléctrico en contacto con el extremo abierto. Por lo tanto, el MUT funciona como una carga para el extremo abierto de la línea coaxial. La sonda está conectada a un VNA que envía una señal al material y mide la onda reflejada. A partir de esta medida se determina entonces el coeficiente de reflexión en la apertura de la sonda, que depende intrínsecamente de la permitividad compleja del material. Es importante destacar que este método de medida se limita a la

medida de la permitividad y no se extiende a la permeabilidad, porque solo se mide la reflexión.

Existen varios modelos simples para la obtención de la permitividad a partir del coeficiente de reflexión [Ber96]. Este coeficiente incluye tanto la amplitud como la fase de la onda reflejada en comparación con la onda incidente y es equiparable en este contexto al parámetro de dispersión (*scattering*) S_{11} . Respecto los parámetros de dispersión tenemos una descripción detallada en la referencia [Poz12].

El uso de este tipo de sonda es una opción adecuada, ya que el método de medida que emplea es ampliamente utilizado para líquidos y semisólidos. Sin embargo, en el caso de sólidos con superficies rugosas, pueden formarse espacios de aire, lo cual podría afectar la precisión de la medida. Además, esta sonda es especialmente adecuada para la medida de tejidos biológicos, ya que permite realizar el proceso de manera no destructiva, manteniendo el tejido inalterado y sin daños durante el procedimiento [Mak24].

Esta sonda coaxial es un tipo de línea de transmisión ampliamente utilizado, cuyo diseño consta de un conductor central rodeado por un material dieléctrico y un conductor externo, permite que las ondas se propaguen de manera eficiente a lo largo de la estructura. Las propiedades de una línea de transmisión dependen de su geometría y de las características dieléctricas del material que la compone, especialmente de su permeabilidad y permitividad. Entre los parámetros más importantes de una línea de transmisión están los siguientes:

Impedancia característica (Z_0): Representa la relación entre los campos eléctrico y magnético en una onda electromagnética propagándose a lo largo de la línea.

$$Z_0 = \sqrt{E/H}$$

Esta impedancia se define también como la relación entre las amplitudes de la onda de voltaje y corriente, y es fundamental para asegurar la transferencia de energía sin pérdidas debido a desajustes de impedancia.

Atenuación (α): Se refiere a la pérdida de potencia por unidad de longitud, que puede originarse en la resistencia del conductor, las pérdidas en el dieléctrico o la radiación electromagnética.

Constante de fase (β): Describe el avance de fase de la onda por unidad de longitud y está relacionada directamente con la velocidad a la cual se propaga la onda en la línea.

Velocidad de Propagación (v_p): Indica la velocidad a la cual se desplaza una onda a lo largo de la línea. Está vinculada a la constante de fase.

Constante de propagación compleja (γ): Describe las variaciones espaciales y de fase de una onda electromagnética a lo largo de la línea de transmisión. Esta constante es una magnitud compleja que se expresa como $\gamma = \alpha + j\beta$.

Una línea coaxial es una estructura de transmisión compuesta por un conductor central rodeado por un material dieléctrico y un conductor externo que actúa como blindaje. Un cable coaxial típico se observa en la Figura 8.



Figura 8. Estructura de cable coaxial

Estos tipos de cable suelen constar de 4 capas:

- Conductor central: el encargado de transmitir la señal y generalmente está hecho de cobre.
- Aislante dieléctrico: el encargado de separar el conductor central del blindaje exterior, ayudando a reducir las pérdidas de energía.
- Blindaje: suele ser una malla metálica trenzada, a veces acompañado de una lámina metálica. Su función es evitar que las señales emitidas desde el conductor central interfieran con otros equipos electrónicos cercanos y proteger la señal de interferencias electromagnéticas.
- Cubierta exterior: Generalmente hecha de PVC, proporciona una protección física al cable.

El dieléctrico que separa los conductores suele tener bajas pérdidas, con una permitividad que varía entre valores cercanos a la del vacío ϵ_0 , según el material. En aplicaciones de radiofrecuencia, y hasta unos pocos GHz, la propagación ocurre principalmente en el modo transversal electromagnético (TEM), donde los campos

eléctrico y magnético son perpendiculares entre sí y también a la dirección de propagación, como muestra la Figura 9(b). Sin embargo, al superar cierta frecuencia de corte, pueden aparecer modos adicionales, como el modo transversal eléctrico (TE) o transversal magnético (TM), típicos de guías de onda huecas. Esto es generalmente indeseado, ya que múltiples modos con distintas velocidades de fase pueden interferir entre sí. Además, la frecuencia de corte está inversamente relacionada con el diámetro del conductor externo.

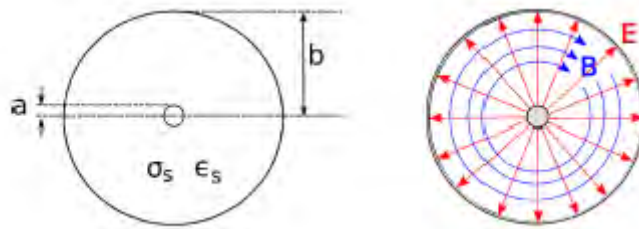


Figura 9. (a) Sección transversal de una línea coaxial. (b) Líneas de campo eléctrico y magnético dentro de una línea coaxial.

Esta configuración geométrica unida a un dieléctrico de bajas pérdidas confiere a la línea una impedancia característica que se puede obtener como:

$$Z_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu^*}{\epsilon_0 \epsilon^*}} \ln \frac{b}{a} \quad (2.13)$$

Donde, b es el radio interno del conductor externo y a es el radio del núcleo. Si se tiene en cuenta que $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ y $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$, la expresión (2.13) se puede reescribir como:

$$Z_0 = \frac{60\Omega}{\sqrt{\epsilon^*}} \ln \frac{b}{a} \quad (2.14)$$

La mayoría de los cables coaxiales para aplicaciones de RF y microondas tienen una impedancia característica de 50Ω .

De manera análoga, la velocidad de la propagación en la línea coaxial se puede expresar como:

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon^*}} \quad (2.15)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío. La constante de propagación compleja se relaciona con la permitividad del dieléctrico según:

$$\gamma = j \frac{\omega \sqrt{\epsilon^*}}{c} \quad (2.16)$$

Los cables coaxiales pueden adoptar diferentes terminaciones, dependiendo de la frecuencia para la que están destinados a funcionar (BNC, SMA, N, 2.4 mm, etc) y éstas tienen la misma impedancia característica que el cable. Asimismo, las transiciones entre diferentes conectores coaxiales permiten conectar sistemas que utilizan conectores distintos, como SMA a BNC, N a 2.4 mm, etc. Entre ellas, podemos encontrar las transiciones coaxiales a PCB (Placa de Circuito Impreso): conectan un cable coaxial a un circuito impreso mediante soldadura (*solder tip*) o estructuras de lanzamiento (*launch structures*). Se diseñan para minimizar las pérdidas por desadaptación en la transición. Este tipo de transición es especialmente interesante para la realización de una sonda coaxial de extremo abierto, como se verá en el próximo capítulo.



CAPÍTULO 3

MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo describe los dos sistemas experimentales de medida de permitividad compleja utilizados en este trabajo, ambos basados en sondas coaxiales. El primer sistema experimental se basa en una sonda coaxial de bajo coste con conector SMA, que permite realizar medidas accesibles de manera económica. El segundo sistema emplea una sonda comercial de alta precisión, optimizada para aplicaciones avanzadas de investigación.

3.1 SISTEMA EXPERIMENTAL CON SONDA SMA

El sistema experimental basado en una sonda coaxial SMA de bajo coste ha sido desarrollado como una alternativa económica para medir la permitividad compleja líquidos o semisólidos. Esta sonda SMA se conecta a un VNA, permitiendo la medida precisa del coeficiente de reflexión de la muestra en contacto en un rango limitado de frecuencia (nominalmente, 18 GHz, correspondiente a la frecuencia límite del conector utilizado). El objetivo principal de esta configuración es ofrecer un método accesible para laboratorios con recursos limitados, donde el equipo comercial de alta gama podría no estar disponible. Esta sonda representa una solución viable para investigaciones preliminares o experimentos en los que se busca evaluar materiales de manera rápida y con una inversión mínima.

Para la implementación de la sección experimental de este sistema, se ha tomado como referencia un trabajo previo de “Automatización en la medida de la permitividad de materiales biológicos en microondas mediante sonda coaxial” [Gas24a].

3.1.1 Descripción

En la Figura 10 se muestra el set-up experimental que consta de una sonda coaxial de extremo abierto que se conecta a un VNA de dos puertos (modelo PicoVNA 106 de Pico Technology) que ofrece un rango de frecuencias de 300 kHz a 6 GHz [Pic24]. El puerto 1 del VNA se conecta al resto del sistema de medida mediante un cable coaxial de 60 cm

(modelo TA336, Pico Technology) de alta calidad, de construcción robusta y flexible y conectores de acero inoxidable N(m)-SMA(m).

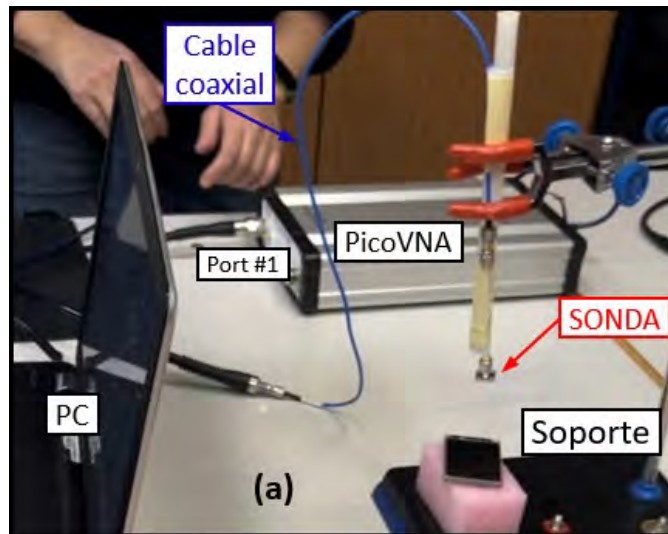


Figura 10. Sistema experimental propuesto para la sonda basada en conector SMA

Para extender la longitud del cable hasta el soporte donde se fija la sonda se emplea, primero, otro cable coaxial de 24 pulgadas más flexible que el anterior, con conectores SMA(m)-SMA(m) (modelo FL086-24SM+ de Mini-Circuits). Después, para el último tramo de línea coaxial, que va fijado al soporte metálico vertical, se emplea un cable corto de 4 pulgadas (modelo FL086-4KM+ de de Mini-Circuits). Para empalmar unos cables con otros se emplean transiciones SMA(f)-SMA(f). Finalmente, al último cable coaxial se le acopla la sonda coaxial.



Figura 11. PicoVNA 106 de Pico Technology

La sonda SMA está basada en un conector de panel modelo R124510000 de Radiall (Figura 12), que se utiliza como la sonda principal del sistema. A este conector, se le ha seccionado el pin central o lengüeta y se ha limado hasta dejarlo lo más plano posible al

nivel del plano de la montura cuadrada, como se puede apreciar en la Figura 13. El radio del conductor central es $a = 0.64$ mm y el radio interno del conductor externo es $b = 4.05$ mm mils.

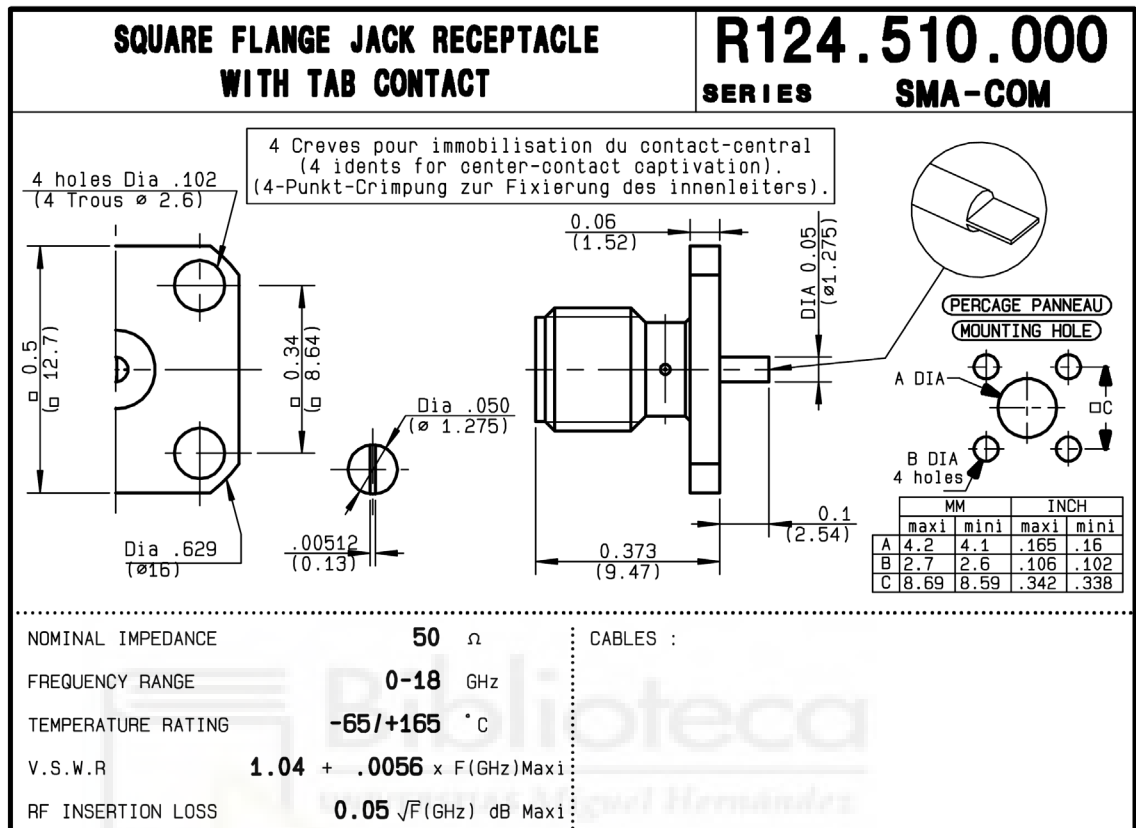


Figura 12. Conector de panel R124510000 de Radiall.



Figura 13. Conector radiall usado como sonda

Para conectar todos los conectores SMA se ha usado una llave dinamométrica (con un par de torsión de 0.9 N·m) en conjunto con una llave fija multiapertura.

Para garantizar la estabilidad de la sonda y evitar movimientos durante la colocación de las muestras, el cable coaxial de 4 pulgadas al que está conectada se ha asegurado mediante cinta a un soporte cilíndrico de plástico, como se muestra en la Figura 14. Este soporte se mantiene en posición vertical mediante unas tenazas que, a su vez, pueden ajustarse verticalmente a lo largo de una varilla metálica conectada al soporte.

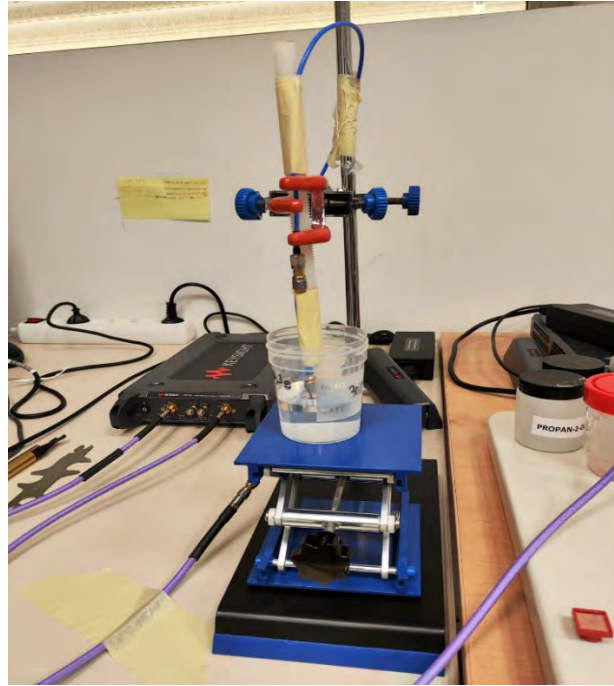


Figura 14. Foto de la medida de las soluciones salinas

La limpieza y desinfección de la sonda después de cada medida se ha llevado a cabo utilizando alcohol isopropílico. Esto previene la contaminación entre diferentes materiales.

El control del VNA se lleva a cabo mediante una aplicación realizada en Python, aunque la calibración SOL (*Short-Open-Load*) se debe hacer desde el software del VNA (PicoVNA 5).

Para medir una muestra de material, ésta se posiciona verticalmente hasta tocar el extremo abierto de la sonda, asegurando que toda la apertura está en contacto con la muestra. En el caso de una muestra líquida, tan sólo hay que sumergir la sonda lo suficiente como para que cubra la montura cuadrada (Figura 14). En el caso de muestras sólidas con cierta elasticidad, se debe presionar ligeramente la sonda contra la superficie de la muestra. En el caso de muestras que presenten varias texturas, distintos tejidos o membranas se ha de tener la precaución de colocar el extremo de la sonda en una zona lo más homogénea posible o promediar las medidas posicionando la sonda en distintas posiciones.

3.1.2 Calibración

La calibración es una parte esencial de cualquier medida con un analizador de redes, ya que permite eliminar errores sistemáticos como la reflexión, la pérdida en los cables, conectores, adaptadores y componentes del sistema [Keyb].

Se recomienda encender el VNA una hora antes y aplicar un proceso de calibración sistemático y con cierta precisión. En este trabajo hemos aplicado un procedimiento estándar, para medidas de un solo puerto, la calibración SOL. Estos estándares son conocidos y se usan para corregir los errores en las medidas que toman como referencia el plano de calibración donde se han situado los estándares SOL. Utilizamos el kit de calibración SOLT-STD-F SF000522 de Pico Technologies, que posee todos los estándares necesarios con conectores SMA(f) y realizamos las medidas necesarias para trasladar el plano de calibración hasta el conector SMA, como se muestra en la Figura 15.



Figura 15. Calibración SOL y bloque de cortocircuito para sonda SMA. [Gas24a]

Realizar este proceso de calibración con el software es bastante sencillo, ya que la opción de *calibration* va indicando los pasos a realizar por este orden:

1. *Short* (Cortocircuito): Se conecta el estándar de cortocircuito al puerto de referencia del VNA y se mide la respuesta del cortocircuito. Este estándar refleja toda la señal con un cambio de fase de 180° . Es decir, presenta teóricamente un $S_{11}=-1$.
2. *Open* (Circuito Abierto): Se conecta el estándar de circuito abierto al puerto de referencia y se mide la respuesta del circuito abierto. Este estándar refleja toda la señal sin cambio de fase. Es decir, presenta teóricamente un $S_{11}=1$.
3. *Load* (Carga): Se conecta una carga de 50Ω al puerto de referencia y se mide la respuesta de la carga de 50Ω . Este estándar no refleja señal, al presentar una adaptación de impedancia perfecta. Es decir, presenta teóricamente un $S_{11}=0$.

Es conveniente realizar una extensión de puertos, para evitar errores en nuestras medidas.

Una vez realizado estos se guarda el archivo de calibración que es el que utilizaremos en nuestra aplicación Python.

Después de la calibración SOL, los parámetros medidos S_{11} están referidos al plano de calibración del VNA (como se muestra en la Figura 15). A este coeficiente de reflexión le corresponde una la admitancia de carga, que incluye la propagación en la sonda y la reflexión en la interfaz sonda-medio. Con el objetivo de llevar el plano de referencia de las medidas al plano de apertura de la sonda, se llevan a cabo dos medidas con la sonda conectada en su lugar: una medida en aire (*Air*) y otra medida con la apertura en cortocircuito (*Short*). Este proceso se describe en detalle en la referencia [Gas24a].

La forma de obtener la permitividad a partir de la admitancia obtenida después del procedimiento de calibración anterior, dependerá del modelo empleado. En este trabajo se han seguido tres modelos distintos, que se presentan en la Sección 3.1.3. En cualquier caso, siempre es necesario hacer al menos una medida sobre un material de referencia del cual se disponga con fiabilidad de su permitividad compleja. En este trabajo se ha usado un líquido de referencia polar (agua destilada). Se sumerge la sonda en agua destilada y se mide su respuesta. De este estándar se conoce su permitividad, que se modela según la relación de Debye de la Ec. (2.10) dependiendo de la temperatura $temp$ [°C] con [Kaa89]

$$\begin{aligned}\epsilon_s &= 10^{1.94404 - 1.991 \cdot 10^{-3} \cdot temp}, & \epsilon_\infty &= 5.77 - 0.0274 \cdot temp \\ \tau &= 3.745 \cdot 10^{-15} (1 + 7 \cdot 10^{-5} \cdot (temp + 273.15 - 300.65)^2) \cdot e^{\frac{2295.7}{temp + 273.15}}\end{aligned}$$

La admitancia de este estándar dependerá del modelo que se emplee.

3.1.3 Modelos de la permitividad

Para la adquisición y procesamiento de datos, se desarrolló un software en Python que permite controlar el VNA y realizar los cálculos de permitividad compleja a partir de los datos de S_{11} . Este software incluye tres modelos de análisis: modelo capacitivo, modelo de radiación y modelo de línea virtual, que se aplican en función de las características de la muestra y de la precisión requerida en la medida. Como hemos indicado con anterioridad medimos el coeficiente de reflexión S_{11} de una señal electromagnética en la apertura de la sonda. El campo electromagnético que viaja por la línea de transmisión coaxial encontrará una discontinuidad en la interfaz sonda-muestra y la onda se reflejará parcialmente.

Como se explica en un estudio de Komarov [Kom16], el modo principal incidente de campo transversal eléctrico y magnético (TEM), generado por el analizador de red, se propaga a lo largo de la guía de ondas. En las proximidades de la apertura, la onda TEM se distorsiona y el vector del campo eléctrico comienza a ganar una componente perpendicular al plano de la apertura. La energía de la onda incidente se irradia parcialmente al espacio dieléctrico y se refleja parcialmente de nuevo a la guía de ondas coaxial. Esta serie de algoritmos de inversión, soluciones matemáticas y computacionales las podemos encontrar en el artículo que hemos mencionado de Komarov. Sin embargo, nosotros sólo nos centraremos en los tres modelos mencionados.

Modelo Capacitivo

El circuito equivalente para este modelo se presenta en la Figura 16. Se modela la carga como el paralelo de dos condensadores $C_0\varepsilon^*$ y C_f . El modelo está descrito en [Ath82]. El coeficiente de reflexión (Γ^*) en la apertura de la sonda AA' se obtiene al considerar la admitancia compleja del circuito equivalente:

$$\Gamma^* = \frac{1 - j\omega Z_0(C_0\varepsilon^* + C_f)}{1 + j\omega Z_0(C_0\varepsilon^* + C_f)} \quad (3.1)$$

Donde Z_0 es la impedancia de referencia de la medida. Se puede obtener pues ε^* como:

$$\varepsilon^* = \frac{1 - \Gamma^*}{j\omega Z_0 C_0(1 + \Gamma^*)} - \frac{C_f}{C_0} \quad (3.2)$$

Para determinar las cantidades desconocidas C_0 y C_f que se necesitan para usar la Ec. (3.2), se usa la medida Γ^* en un material de referencia de permitividad ε^* bien conocida.

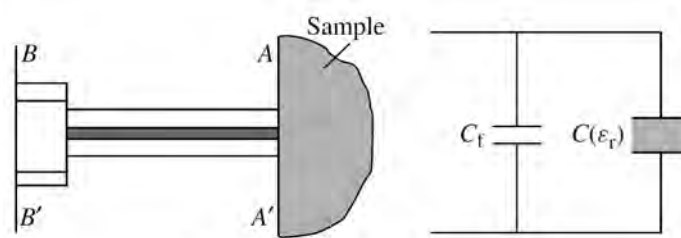


Figura 16. Circuito capacitivo equivalente en el plano A-A'

El procedimiento anterior falla cuando se ha realizado la calibración corto-aire mencionada. Se puede razonar que incluir en ese caso una capacidad C_f que no dependa de la muestra no es coherente con el hecho de haber llevado la referencia de la medida al plano de apertura de la sonda. Sin usar la calibración corto-aire, se puede aplicar el siguiente algoritmo para la estimación de la permitividad del material bajo prueba ε_{MUT}^*

usando los parámetros S medidos para el corto, el aire y la referencia tras la calibración SOL:

$$\varepsilon_{MUT}^* = \frac{(S_{11}^{MUT} - S_{11}^{air})(S_{11}^{ref} - S_{11}^{short})}{(S_{11}^{MUT} - S_{11}^{short})(S_{11}^{ref} - S_{11}^{air})} \varepsilon_{ref}^* - \frac{(S_{11}^{MUT} - S_{11}^{ref})(S_{11}^{air} - S_{11}^{short})}{(S_{11}^{MUT} - S_{11}^{short})(S_{11}^{ref} - S_{11}^{air})} \quad (3.3)$$

donde S_{11}^{short} , S_{11}^{air} , S_{11}^{ref} y S_{11}^{MUT} son los parámetros medidos para el corto, aire, referencia y material de prueba, respectivamente, tras la calibración SOL, y ε_{ref}^* es la permitividad relativa del material de referencia, que se supone conocida.

Modelo de radiación

La sonda coaxial puede tratarse como una fuente de radiación con el modelo equivalente la Figura 17. El condensador C_1 está predominantemente determinado por la estructura de la sonda coaxial y permanece independiente del material sometido a prueba. A su vez, el material en estudio puede ser representado mediante un condensador $\varepsilon_r C_2$ (aquí $\varepsilon_r = \varepsilon^*$) y una resistencia R ($R = 1/G$) conectada en paralelo a los condensadores [Bra81], estando ésta principalmente vinculada a la radiación proveniente de la apertura coaxial. Por lo tanto, la admitancia normalizada se expresa como

$$Y_L = j\omega C_1 + j\omega \varepsilon^* C_2 + G(\omega, \varepsilon^*) \quad (3.4)$$

Se ha demostrado que, para una antena infinitesimal, la conductancia de radiación se puede expresar como [Bur80] [Des62]:

$$G(\omega, \varepsilon^*) = \varepsilon^{*\frac{5}{2}} G(\omega, \varepsilon_0) \quad (3.5)$$

De las Ecs. (3.4) y (3.5) se obtiene:

$$Y_L = j\omega C_1 + j\omega \varepsilon^* C_2 + \varepsilon^{*\frac{5}{2}} G(\omega, \varepsilon_0) \quad (3.6)$$

La ecuación (3.6) se puede expresar como:

$$Y_L = K_1 + K_2 \varepsilon^* + K_3 \varepsilon^{*\frac{5}{2}} G \quad (3.7)$$

Los factores K_1 , K_2 y K_3 generalmente son cantidades complejas. Para determinar estos tres factores, es necesario realizar calibraciones utilizando tres medios con valores de permitividad conocidos.

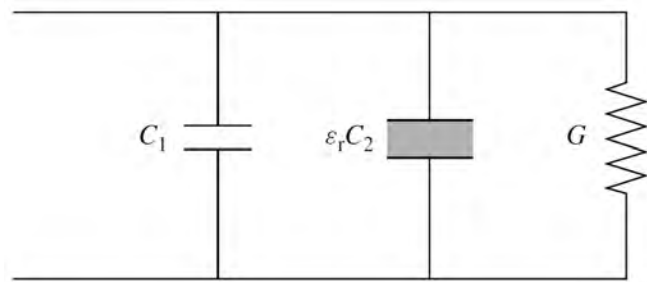


Figura 17. Modelo equivalente para el modelo de radiación

En el presente trabajo, se prescinde de C_1 porque se asume que llevando el plano de calibración a la apertura C_1 no tiene sentido, por lo que quedan dos incógnitas, C_2 y G . Se puede usar, por tanto, solo un material de referencia con valores de permitividad conocidos.

Modelo de línea virtual

Cuando una sonda coaxial de extremo abierto se pone en contacto con una muestra dieléctrica, el campo de dispersión en el extremo de la sonda puede modelarse como un tramo de línea de transmisión equivalente [Gha89]. Como se muestra en la Figura 18, en este modelo, la línea de transmisión consta de un segmento de línea física con longitud D y un segmento de línea virtual con longitud L que modela el medio dieléctrico.

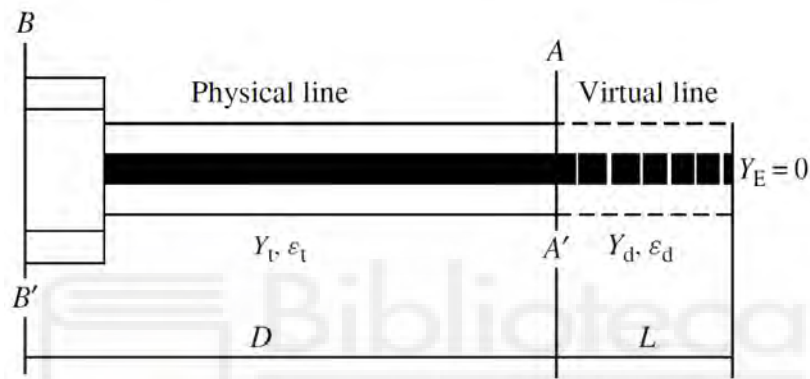


Figura 18. Modelo línea virtual

La admitancia compleja en el plano A – A' plano viene dada por:

$$Y_L = Y_d \frac{Y_E + Y_d \tanh \gamma_d L}{Y_d + Y_E \tanh \gamma_d L} \quad (3.8)$$

Donde Y_L es la admitancia de la línea de transmisión virtual, Y_d es la admitancia característica de la línea de transmisión virtual, Y_E es la admitancia de terminación de la línea de transmisión virtual, y γ_d es la constante de propagación compleja de la línea virtual. Dado que, en este modelo, la línea virtual está terminada por un circuito abierto ($Y_E = 0$), la ecuación (3.8) se simplifica a:

$$Y_L = Y_d \tanh \gamma_d L \quad (3.9)$$

La admitancia característica Y_d de la línea virtual puede expresarse en función de los parámetros físicos de la línea de transmisión coaxial virtual de acuerdo a la Ec. (2.14):

$$Y_d \approx \frac{\sqrt{\epsilon_d}}{60 \Omega \ln \frac{b}{a}} \quad (3.10)$$

donde a y b son los diámetros interno y externo de la sonda coaxial, respectivamente. La constante de propagación compleja de la línea virtual se relaciona con la permitividad del medio ϵ_d usando la Ec. (2.16):

$$\gamma_d = j \frac{\omega \sqrt{\epsilon_d}}{c} \quad (3.11)$$

Para extraer la permitividad ϵ_d de las Ecs. (3.09)-(3.11) a partir de la medida de la admitancia de la apertura de la sonda, es necesario conocer la longitud de la línea virtual. Para ellos, se realiza una medida sobre un material de referencia de permitividad bien conocida.

3.1.4 Herramientas de programación

Para la automatización de las medidas y el control remoto del VNA, se disponía de partida de una aplicación en Python que permitía interactuar con el VNA y gestionar las medidas desarrollado en un trabajo previo [Gas24a]. Por este motivo, en las primeras etapas del proyecto, se empleaba la versión picoVNA2 de SDK³ de 32 bits proporcionada por el fabricante del picoVNA 106 (única compatible con el firmware del equipo) que limitaba la compatibilidad del sistema a entornos de 32 bits. Esto obligó a utilizar Python 2.7 de 32 bits para la comunicación entre el VNA y el PC, ya que la compatibilidad con Python 3 y entornos de 64 bits no era viable. Como consecuencia, el desarrollo de la interfaz gráfica se vio limitado, dado que se requería una versión anterior de PySimpleGUI compatible con Python 2.7. Esta restricción resultó en una interfaz rudimentaria con funcionalidades limitadas.

La adquisición de una actualización del firmware del equipo abrió la posibilidad de usar el SDK de picoVNA5 de 64 bits, y representó un cambio significativo, permitiendo migrar a Python 3.10.2 de 64 bits y hacer uso de una versión avanzada de PySimpleGUI. Esta versión facilitó la creación de una interfaz gráfica más completa e intuitiva y mejoró la estabilidad en la comunicación con el VNA.

Con la transición a Python 3 y la adopción de una arquitectura de 64 bits, se implementaron varias mejoras significativas:

- Comunicación optimizada: El cambio a Python 3 de 64 bits mejoró la velocidad y estabilidad de la comunicación entre el VNA y el ordenador, permitiendo una transferencia de datos más eficiente.

³ SDK: *Software Development Kit*

- Interfaz gráfica mejorada: con una versión mejorada de PySimpleGUI, se ha desarrollado una GUI más versátil y simple con opciones de personalización que permite a los usuarios configurar medidas fácilmente, ver resultados en gráficos y administrar el almacenamiento de datos de una manera sencilla.
- Integración completa de librerías científicas: Aunque NumPy y SciPy ya eran compatibles con Python 2.7, la transición a Python 3 facilitó una integración más robusta y moderna, especialmente útil para mantener la aplicación actualizada y compatible con otras librerías en crecimiento.
- Actualización del editor de código: En este trabajo, se ha optado por seguir usando Visual Studio Code (VS Code). Es un editor de texto para código optimizado compatible con operaciones de desarrollo como depuración, ejecución de tareas y control de versiones. Su objetivo es proporcionar justo las herramientas que un desarrollador necesita para un ciclo rápido de creación de código y depuración, como es nuestro caso. A diferencia del IDE Visual Studio, no se necesita mucho espacio para descargar VS Code (unos 200 MB de espacio en disco) y es gratuito. El cambio a Python 3 de 64 bits también ha supuesto poder actualizar la versión de VS Code, posibilitando así ampliar la fecha de soporte de la aplicación.

Todas las funciones del programa están comentadas de manera detallada en el capítulo 4 “Desarrollo de la aplicación en Python”. De manera resumida, la aplicación automatiza los procesos de medida de permitividad compleja, permitiendo al usuario:

- Control del VNA: Configurar y ejecutar medidas de forma automatizada, ajustando parámetros como el rango de frecuencias, número de puntos, tipo de sonda, etc.
- Procesamiento de datos en tiempo real: Calcular la permitividad compleja a partir de los parámetros S_{11} obtenidos en la interfaz sonda-muestra, utilizando diferentes modelos teóricos.
- Visualización de Resultados: Visualizar en los dos gráficos la parte real e imaginaria de la permitividad en función de la frecuencia, permitiendo el guardado de dichos datos en archivos de texto.

En el desarrollo de la aplicación se ha utilizado ChatGPT versión 3.5 como apoyo en la implementación de algunas secciones de código en Python. En particular, fue útil para resolver problemas puntuales, estructurar funciones y proponer mejoras. No obstante,

cada sugerencia propuesta fue revisada, probada y, en casi todos los casos modificada para adaptarse a lo requerido por el proyecto. Es decir, al utilizar esta herramienta siempre se asumieron sus propuestas como una base inicial, revisando cada línea para asegurar su correcto funcionamiento en el contexto de este trabajo. Esto incluyó ejecutar pruebas de depuración de código para verificar adecuadamente que las soluciones fueran correctas, integrándose adecuadamente en la estructura del programa principal.

En la Tabla 1 se resumen las herramientas empleadas en la actualización del software de medida:

Tabla 1. Herramientas empleadas para nuestro software

Herramienta	Versión	Descripción
Python	3.10.2 (64 bits)	Lenguaje de programación principal de la aplicación.
Visual Studio Code	1.91.1	Editor de texto utilizado para facilitar la programación y el control de dependencias.
SDK de PicoVNA5	5.2.5	Librerías de SDK necesarias para conectar el VNA Pico a través de USB y controlarlo desde Python.
ChatGPT	Versión 3.5	Herramienta de soporte utilizada para estructurar funciones, resolver problemas puntuales y optimizar el código en Python.

3.2 SISTEMA EXPERIMENTAL DE SONDA COMERCIAL

El sistema experimental basado en una sonda comercial de Keysight representa un enfoque de alta precisión para la caracterización dieléctrica, utilizando equipamiento optimizado para aplicaciones de investigación avanzadas. A diferencia de la sonda SMA, esta sonda de alta gama permite una mayor precisión y estabilidad en un rango extendido de frecuencias, alcanzando hasta los 50 GHz. Su diseño es especialmente útil para estudios detallados en los que la precisión de la medida es crítica, como en la evaluación de tejidos biológicos y en investigaciones que requieren una alta fiabilidad de datos. Este sistema, al ser una referencia industrial, no solo facilita la obtención de datos comparables y reproducibles, sino que también permite validar los resultados obtenidos con el sistema experimental de bajo coste.

3.2.1 Descripción

Los componentes principales de este sistema son:

1. **Analizadores vectoriales de redes de la serie Streamline P9371A o P9374B [Keyc,d]:** Estos equipos compactos (Figura 19(a)) permiten la generación y análisis de señales en un rango de frecuencias que varía entre 300 kHz y 6.5 GHz (P9371A) o entre 9 kHz y 20 GHz (P9374B). Están diseñado para aplicaciones de alta precisión y carecen de pantalla propia, por lo que requieren control mediante ordenador. En este caso, la conexión se realiza a través de un puerto USB. Para esto, se emplea el software *Keysight Connection Expert* y el programa de análisis *Network Analyzer*, que posibilita la configuración del dispositivo y la gestión de las medidas de los parámetros S. El sistema captura los parámetros S en función de la frecuencia. Estos valores se procesan posteriormente para calcular las propiedades dieléctricas del material analizado.



Figura 19. (a) VNA Keysight P9371B. (b) Kit de calibración ZV-Z135 (3.5 mm, 50 ohmios, 0 a 15 GHz)

2. **Sonda Slim de Keysight (N1501A):** Se trata de una sonda coaxial de 50 Ω de extremo abierto está diseñada para la caracterización dieléctrica de materiales. Ofrece un rango de temperaturas operativas de -40 $^{\circ}\text{C}$ a $+200$ $^{\circ}\text{C}$, permitiendo su uso en aplicaciones térmicas y dieléctricas simultáneamente. Esta sonda es adecuada para medidas precisas de la parte real y de la parte imaginaria de la permitividad relativa. Las dimensiones de la sonda son equivalentes a la de un cable coaxial RG-405 [Mea16]: diámetro del conductor interno $\varnothing_i = 0.57$ mm,

diámetro interno del conductor externo $\varnothing_o = 1.68$ mm. Según el fabricante, la sonda tiene un error estimado del ± 10 % cuando se usa con su Suite de Medida.

3. **Plataforma Móvil para Posicionamiento de la Sonda:** Incluye un mecanismo ajustable que facilita la colocación precisa de la muestra bajo la sonda (Figura 20). Este elemento mejora la reproducibilidad de las medidas, al garantizar que la muestra esté en una posición fija y óptima para la adquisición de datos.

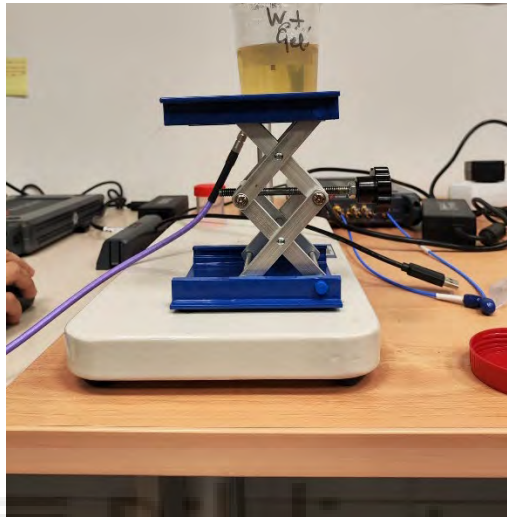


Figura 20. Plataforma móvil

3.2.2 Calibración

Para la calibración SOL del VNA se empleó el kit de calibración ZV-Z135 (Figura 19(b)) que cubre un rango de 0 a 15 GHz.

Para asegurar la precisión de las medidas, debemos de seleccionar los estándares más comunes, aunque esto puede variar dependiendo del tipo de sonda, en nuestro caso son:

- Open: Dejar la sonda en el aire (sin contacto con el material).
- Short: Conectar el estándar de corto al puerto de la sonda.
- Load: Conectar el estándar de carga al puerto de la sonda.

Como hemos dicho con anterioridad hay que tener en cuenta que hay errores en las medidas, hasta en la propia calibración por lo que se intentará reducir en la medida de lo posible, por ejemplo, con la función de actualización de calibración electrónica automatizada recalibra el sistema automáticamente, en segundos, justo antes de realizar cada medida, por lo que se elimina la inestabilidad del cable y los errores del sistema en gran medida.

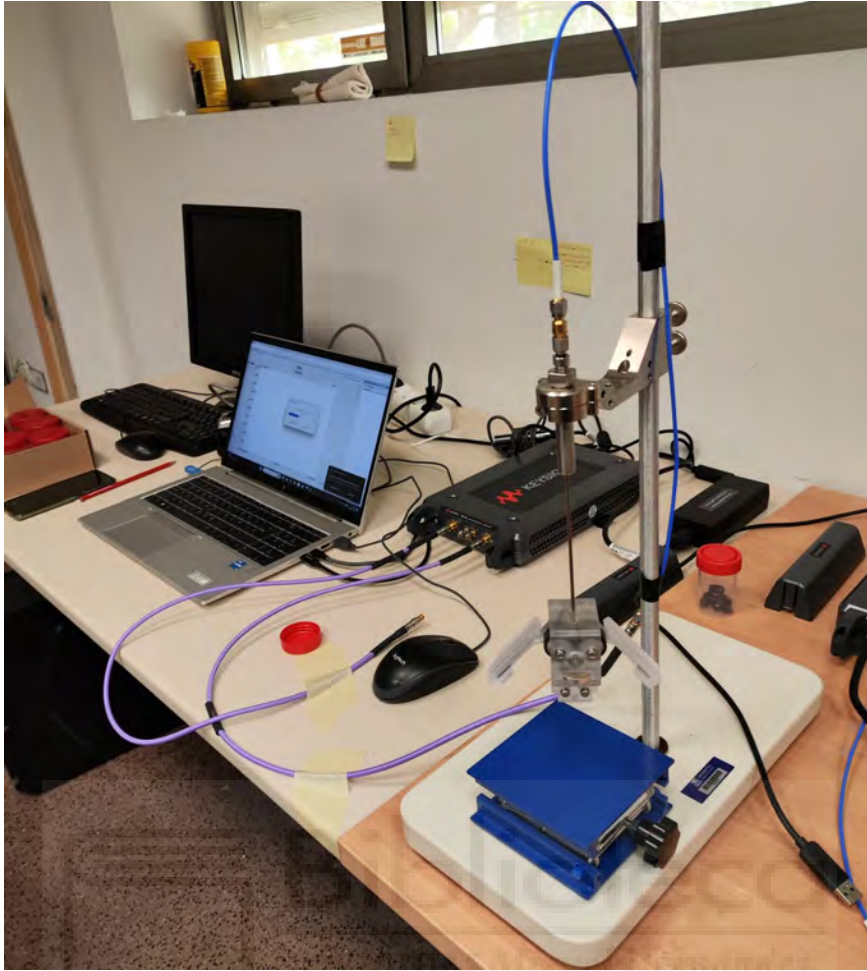


Figura 21. Sistema de medida Keysight con el bloque de cortocircuito posicionado.



Figura 22. Corto de calibración

La sonda también incluye un estándar de corto (Figura 22). Además, utilizamos líquidos de referencia, como el agua, cuyo comportamiento conocido nos permite verificar la correcta calibración del sistema. Entre cada medida, es recomendable realizar una comprobación rápida midiendo el aire para asegurar el buen funcionamiento del equipo. Es esencial realizar una limpieza meticulosa y desinfección de la sonda después de cada

medida para prevenir la contaminación entre diferentes materiales. Para ello, utilizamos alcohol isopropílico.

3.2.3 Software de medida

El sistema con sonda comercial Keysight cuenta con un software avanzado para la medida de la permitividad compleja: *Materials Measurement Suite, with Option 004 coaxial Probe Method*. Esta *suite* permite automatizar la medida de la permitividad usando uno de los tres tipos de sonda coaxial que comercializa Keysight en conjunción con un analizador de redes Keysight compatible, como lo son el P9371A y el P9374B. Este software permite controlar la adquisición de datos desde el VNA y, en combinación con las rutinas de calibración, asegura una buena precisión y reproducibilidad de los resultados obtenidos.

La suite de medida ofrece una serie de funcionalidades avanzadas que optimizan la captura de datos y el análisis de los parámetros dieléctricos. Entre las principales funciones se destacan:

1. **Calibración y ajuste automático:** El software tiene la posibilidad de realizar un ajuste automatizado de los parámetros de calibración antes de cada medida mediante una función de recalibración continua (para cual se requiere de un módulo Ecal de calibración electrónica conectado entre la sonda y el VNA). Esto reduce significativamente las inestabilidades del sistema y los errores de medida debidos a la degradación del contacto en los cables o la variación de la sonda. En el presente proyecto se ha prescindido de dicha funcionalidad, calibrando con los estándares mecánicos (abierto, corto y carga) antes de conectar la sonda.
2. **Adquisición multimedida y promedio de datos:** El software permite realizar múltiples adquisiciones de una misma medida y promediarlas, lo que minimiza el efecto de variaciones en las lecturas individuales y aumenta la confiabilidad de los resultados. Esta función es especialmente útil cuando se trabaja con muestras que pueden presentar fluctuaciones debido a propiedades inestables o heterogéneas.

Table 5. Probe Characteristics

	Performance Probe	Slim Form Probe	High Temperature Probe
Frequency Range (nominal)	500 MHz to 50 GHz	500 MHz to 50 GHz	200 MHz to 20 GHz with network analyzer
	Maximum limited by MUT properties $f_{max} < \frac{ 285-125j }{\sqrt{ \epsilon_r^* }} \text{ GHz}$ where j indicates a complex value	Maximum limited by MUT properties $f_{max} < \frac{ 285-125j }{\sqrt{ \epsilon_r^* }} \text{ GHz}$ where j indicates a complex value	10 MHz to 3 GHz with E4991A/E4991B Impedance analyzer with option 10. Maximum limited by MUT properties $< \frac{100 \text{ GHz}}{\sqrt{ \epsilon_r^* }}$
Temperature range	-40 to +200 °C	0 to +125 °C	-40 to +200 °C
Temperature slew rate	< 10 degrees/minute	< 10 degrees/minute	< 10 degrees/minute
Immersable length (approximate)	140 mm	200 mm	35 mm
Connector	2.4 mm male	2.4 mm male	3.5 mm male
Repeatability and resolution	Two to four times better than accuracy	Two to four times better than accuracy	Two to four times better than accuracy
Material Under Test (assumptions)	Material is "infinite" in size, non-magnetic ($\mu^* = 1$), isotropic (uniform orientation), and homogeneous (uniform composition) ² . Solids have a single, smooth, flat ³ surface with gap-free contact at the probe face.	Liquid or soft semi-solid. Material is "infinite" in size, non-magnetic ($\mu^* = 1$), isotropic (uniform orientation), and homogeneous (uniform composition) ² .	Material is "infinite" in size, non-magnetic ($\mu^* = 1$), isotropic (uniform orientation), and homogeneous (uniform composition) ² . Solids have a single, smooth, flat ³ surface with gap-free contact at the probe face.
Sample size (requirements)	Minimum 5 mm insertion and 1 mm around tip of probe	Minimum 5 mm insertion and 5 mm around tip of probe	Diameter: > 20 mm Thickness: $\frac{20}{\sqrt{ \epsilon_r^* }} \text{ mm}$ Granule size ⁴ : < 0.3 mm
Expected Value (requirements)	Maximum recommended $\epsilon_r' < 100$ Minimum recommended loss tangent > 0.05 Not recommended for low loss (loss tangent < 0.5) materials with $\epsilon_r' > 5$	Maximum recommended $\epsilon_r' < 100$ Minimum recommended loss tangent > 0.05 Not recommended for low loss (loss tangent < 0.5) materials with $\epsilon_r' > 5$	Maximum recommended $\epsilon_r' < 100$ Minimum recommended loss tangent > 0.05 Not recommended for low loss (loss tangent < 0.5) materials with $\epsilon_r' > 5$
Accuracy (typical) ¹	Dielectric constant, $\epsilon_r' = \epsilon_r'$ $\pm 0.05 \epsilon_r^* \cdot \epsilon_r'' = \epsilon_r''$ $\pm 0.05 \epsilon_r^* $	Dielectric constant, $\epsilon_r' = \epsilon_r'$ $\pm 0.1 \epsilon_r^* \cdot \epsilon_r'' = \epsilon_r''$ $\pm 0.1 \epsilon_r^* $	Dielectric constant, $\epsilon_r' = \epsilon_r'$ $\pm 0.05 \epsilon_r^* \cdot \epsilon_r'' = \epsilon_r''$ $\pm 0.05 \epsilon_r^* $

1. Practical frequency range, accuracy and resolution depend on properties of the MUT. Value indicates typical accuracy at 23 ± 3 °C, not including effects of probe contact and cable flexure.
2. If the material is not homogeneous, the result is an average value weighted by the intensity of the E-field, which is highest at the center conductor of the probe tip.
3. Sample must be as flat as the probe face, which is lapped to ± 100 μ inches.
4. Measurement repeatability for granular materials is dependent on density variation.

Figura 23. Extracto de las características de la sonda Slim Probe usada con la Suite de Medida de Materiales de Keysight. [Keye]

3. **Visualización en tiempo real:** Durante el proceso de medida, el software genera gráficos en tiempo real de la parte real (ϵ') y la parte imaginaria (ϵ'') de la permitividad relativa. Esta visualización inmediata permite al usuario evaluar la calidad de la medida y hacer ajustes en tiempo real en caso de observar inconsistencias en los datos.
4. **Configuración personalizada de frecuencia y resolución:** La interfaz permite seleccionar un rango de frecuencia específico, adecuado para las características dieléctricas del material bajo prueba. Además, se puede ajustar la resolución en frecuencia, definiendo el número de puntos de medida dentro del rango seleccionado, lo que facilita la caracterización de los materiales en zonas de frecuencia donde se espera una alta variabilidad en la respuesta dieléctrica.
5. **Almacenamiento y exportación de datos:** Los resultados obtenidos pueden ser guardados en diferentes formatos de archivo (por ejemplo, .csv, .xls), permitiendo su análisis posterior y facilitando la integración de los datos en otros software de procesamiento y visualización. Esta función es esencial para documentar los resultados y compartir los datos de forma eficiente.

Como se muestra en la Figura 23, en las características del fabricante, éste indica que la exactitud típica de la medida de la permitividad es, tanto para la parte real como para la imaginaria, del $\pm 10\%$ del módulo de la permitividad compleja. También indica que no es adecuada para medir por debajo de 500 MHz.

El proceso de medida con el software de Keysight sigue unos pasos sistemáticos que garantizan la obtención de datos consistentes:

1. **Selección de muestra y configuración inicial:** Una vez conectada la sonda, el usuario configura el rango de frecuencias y selecciona el modo de medida. Esto incluye el ajuste de los parámetros de adquisición y la selección de estándares de calibración específicos. En nuestro caso estos son aire, cortocircuito y agua. Asimismo, hay que introducir el valor de la temperatura a la que está el agua.
2. **Calibración:** El software solicita al usuario realizar la medida de cada uno de los tres estándares de modo secuencial y almacena dicha calibración para ser aplicada a las medidas posteriores mediante algún tipo de algoritmo.
3. **Adquisición y visualización de datos:** Se posiciona la sonda dentro de la muestra a medir y se realiza la toma de datos única o multimedida con promediado. Durante la medida, el software muestra en pantalla los valores de ϵ' (y/o ϵ'') en

función de la frecuencia (Figura 24). El usuario puede observar las curvas en tiempo real y hacer ajustes, si es necesario, antes de guardar los datos finales.

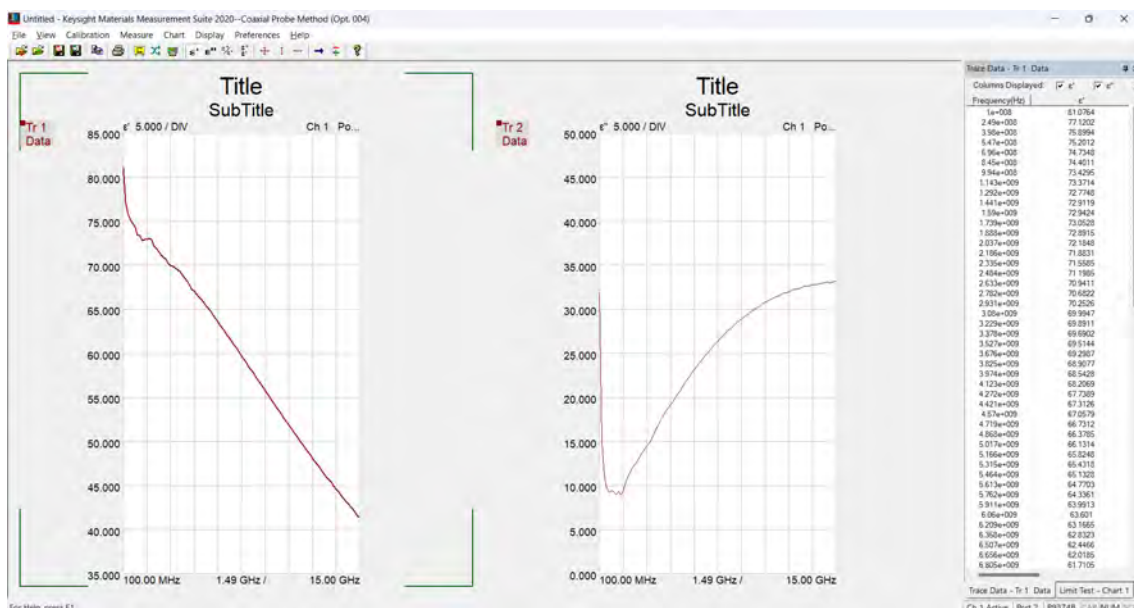


Figura 24. Resultados permitividad con software Keysight

4. **Almacenamiento y procesamiento posterior:** Una vez completada la medida, los datos de permitividad se pueden almacenar en el formato deseado. Esto permite una revisión posterior de los resultados y facilita el análisis detallado de la respuesta dieléctrica en cada frecuencia medida. Asimismo, se pueden almacenar los datos de parámetros S en formato Touchstone, lo que permitirá analizarlos mediante otros modelos como, por ejemplo, los implementados en el programa de medida de la sonda SMA de bajo coste.
5. **Limpieza de la sonda:** Se extrae la sonda de la muestra y se limpia cuidadosamente con alcohol isopropílico para proceder a la siguiente medida.

CAPÍTULO 4

DESARROLLO DE LA APLICACIÓN EN PYTHON

La aplicación en Python desarrollada realiza varias funciones, como controlar el analizador de redes para la toma automatizada de parámetros S y el cálculo de la permitividad compleja aplicando los tres algoritmos explicados en el apartado 3.1.3 “Software de medida de la permitividad”. Cabe recordar que nuestro programa no dispone de la función de calibración SOL, lo cual nos obliga a utilizar la aplicación de medida del PicoVNA 106 para realizar este paso con antelación.

La Figura 25 muestra el diagrama de flujo de la aplicación. Ésta comienza configurando los elementos del entorno. Existen dos modos principales: el modo de demostración (“Demo”) y el de medida (“Measure”). En el modo Demo, se emplean datos de parámetros S existentes, mientras que, en el modo de Medida, se lleva a cabo una adquisición de datos en tiempo real utilizando el VNA.

En el modo de Medida, el usuario tiene que cargar un archivo de calibración SOL previamente guardado mediante el software del picoVNA. Una vez establecida la calibración, el usuario inicia el proceso de medida. Se deben medir los parámetros S (específicamente, sólo el parámetro S_{11}) en el rango de frecuencias definido, de la sonda al aire, la sonda en cortocircuito y la sonda en agua pura. Por último, se deben medir los parámetros S de la sonda en contacto con el MUT. Los cuatro archivos de parámetros S medidos se procesan mediante tres algoritmos de modelado (capacitivo, de radiación y de línea virtual) que permiten obtener los valores de la permitividad compleja del material. Este paso es fundamental para convertir los datos crudos de S_{11} en valores de permitividad. Los resultados calculados de componentes real e imaginaria de la permitividad en función de la frecuencia se muestran en sendos gráficos. La aplicación ofrece la opción de guardar estos datos para un análisis posterior o documentación.

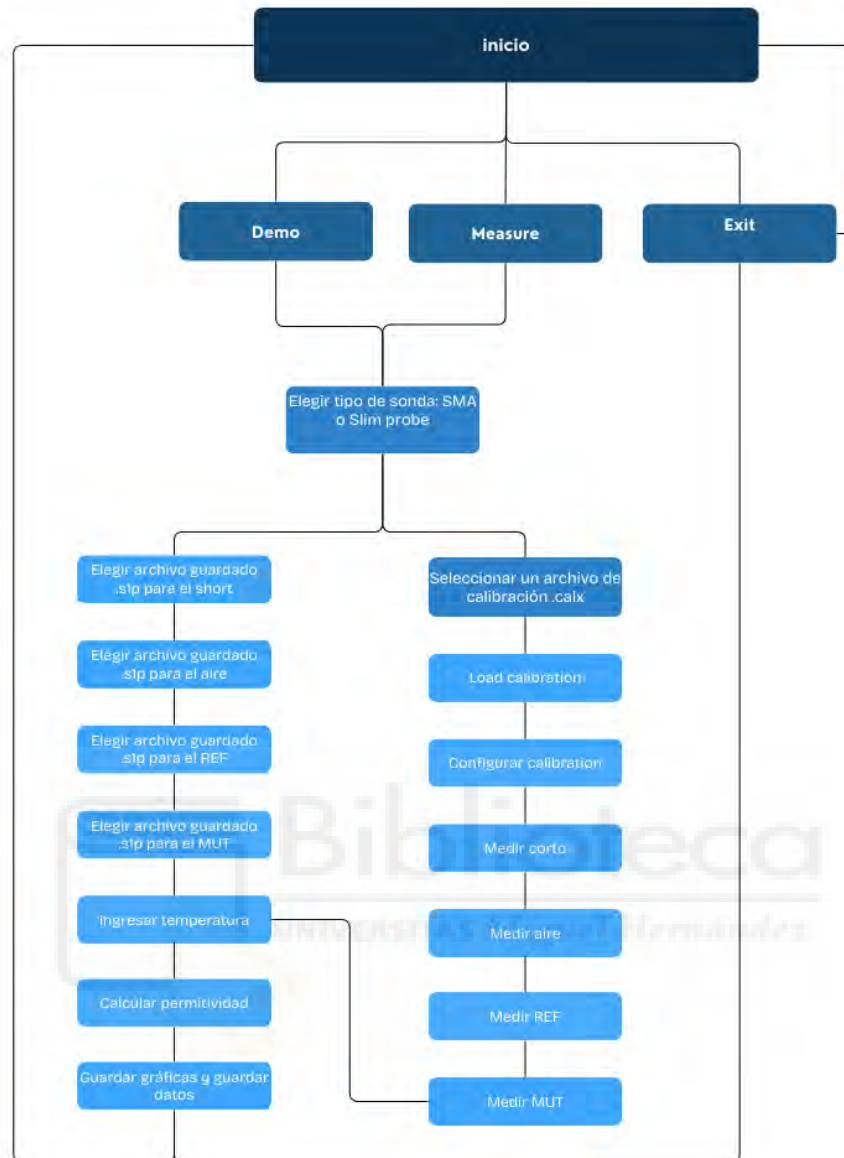


Figura 25. Diagrama de flujo de la aplicación de Python

Por el contrario, al seleccionar el modo Demo, la aplicación no requiere la configuración del hardware ni la conexión con el VNA. Esta opción está diseñada para simular el proceso, por lo que se inicia directamente sin los pasos de configuración de calibración. En lugar de ejecutar la calibración y medida con el VNA, la aplicación carga cuatro archivos Touchstone de parámetros S_{11} previamente guardados en el sistema. Tres de estos archivos deben representar resultados de medidas de los parámetros S de corto-aire-agua (para calibración) y el cuarto contiene la medida de un MUT. Esto permite que el usuario experimente el flujo de trabajo completo de la aplicación sin necesidad de realizar una medida real. Además, permite usar la aplicación para medidas con un VNA

distinto al picoVNA 106 o, incluso, para resultados procedentes de un simulador electromagnético. El único requisito es que los archivos tengan formato Touchstone y que el margen de frecuencias y el número de puntos sean los mismos en los cuatro ficheros. Los datos cargados se procesan usando los mismos algoritmos (capacitivo, radiación, línea virtual) que en la medida real. Esta etapa sigue los mismos pasos de cálculo para generar valores de permitividad compleja y mostrar una experiencia de procesamiento idéntica a la de una medida en tiempo real.

4.1 REQUISITOS DEL SISTEMA Y LIBRERÍAS A INSTALAR

A continuación, se presenta una tabla con los requisitos específicos de software y librerías, indicando las versiones y los roles que cumplen en el proyecto. Esto facilita la identificación de los componentes críticos, necesarios para la ejecución de la aplicación y la obtención de resultados confiables.

Tabla 2. Requisitos y librerías a instalar

Componente	Versión	Descripción	Función en el proyecto
Sistema Operativo	Windows 7 a 11 (64 bits)	La aplicación se ha optimizado para sistemas Windows de 64 bits	Proporciona el entorno básico y compatibilidad con el SDK de PicoVNA.
Python	3.10.2 (64 bits)	Versión de 64 bits de Python.	Lenguaje de programación de la aplicación.
PicoVNA SDK	5.2.5 (64 bits)	SDK desarrollado para la conexión y control del VNA.	Controla el VNA y facilita la adquisición de datos de los parámetros S desde Python.
PySimpleGUI	>=4.55.1	Librería para crear interfaces gráficas en Python de manera simple y funcional.	Diseña la GUI, permitiendo que el usuario configure parámetros y visualice resultados.
NumPy	>=1.22.0	Librería de procesamiento numérico de alto rendimiento en Python.	Facilita cálculos matriciales y operaciones necesarias para el procesamiento de datos del VNA.
SciPy	>=1.8.0	Librería científica que incluye herramientas para la resolución de ecuaciones complejas.	Usa funciones como <code>fsolve</code> para resolver ecuaciones no lineales en los cálculos de permitividad.
Matplotlib	>=3.5.0	Librería de visualización en Python.	Genera gráficos de los resultados de permitividad en función de la frecuencia.
os		Librería para interactuar con el sistema operativo	Permite realizar funciones como gestión de archivos y directorios, permitiendo la interacción con el sistema operativo.
vna	0.0.5	Librería que contiene herramientas para controlar el VNA	Nos permite el control y configuración del VNA

Las primeras líneas de código están relacionadas con la instalación de las librerías o paquetes necesarios para la ejecución de la aplicación.

```
import PySimpleGUI as sg
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import os
from scipy.optimize import fsolve
from vna import vna
```

PySimpleGUI: es una biblioteca para crear interfaces gráficas de usuario (GUI) de manera sencilla y rápida en Python..

NumPy (Numerical Python): es una biblioteca fundamental para la computación científica en Python. Proporciona soporte para grandes matrices multidimensionales y matrices, junto con una colección de funciones matemáticas para operar con estos arrays de manera eficiente.

Matplotlib.pyplot as plt: Matplotlib es una librería para la visualización de datos en Python. **pyplot** es un módulo de Matplotlib que proporciona funciones para crear gráficos 2D y visualizaciones de manera similar a MATLAB, usando **plt** como alias.

Scipy.optimize.fsolve: SciPy es una librería que se construye sobre NumPy y proporciona un gran número de algoritmos numéricos y herramientas para trabajar con datos científicos. En el programa es usada para importar **fsolve**, una función específica de gran importancia al resolver ecuaciones no lineales para los modelos Virtual Line y de Antena, encontrando las raíces del sistema de ecuaciones y obteniendo de este modo la permitividad compleja del MUT.

os: proporciona funciones para interactuar con el sistema operativo de manera que se puedan realizar tareas como manipulación de archivos y directorios, gestión de procesos, variables de entorno, entre otros. Es una de las librerías más útiles cuando se trata de manejar elementos del sistema desde Python y viene preinstalada

vna: Este es un paquete o módulo específico, desarrollado por una empresa externa y proporcionado por el fabricante del VNA, que contiene herramientas para manejar y comunicarse con el VNA. Este módulo:

- Controla el hardware del VNA: Envía comandos para iniciar, detener o configurar medidas.

- Adquiere datos de medida: Obtiene los parámetros S (específicamente S 11), necesarios para el cálculo de la permitividad compleja.
- Configura parámetros: Posiblemente permite ajustar el rango de frecuencias, número de puntos de medida, y otros parámetros experimentales.
- En este caso, el paquete VNA permite que la aplicación se comunique con el hardware y realice las medidas necesarias sin tener que programar cada detalle de la comunicación.

4.2 INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO

La interfaz gráfica permite al usuario interactuar con el programa y con las medidas realizadas por el analizador. He desarrollado una única ventana donde podemos utilizar la opción demo o la opción medida, nuestro MAIN lo podremos encontrar en el archivo llamado Measure_Option.py que es donde tenemos el flujo principal de nuestra aplicación.

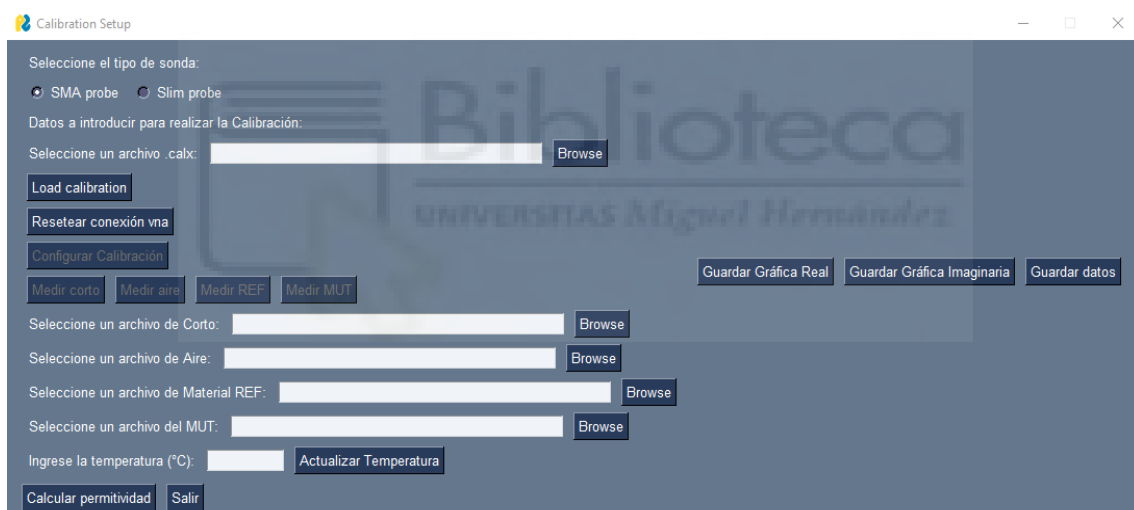


Figura 26. Interfaz del programa

Para la parte demo, se disponen de cuatro botones a los que se pueden añadir archivos .slp correspondientes a corto, aire, material de referencia (en nuestro caso, agua) y MUT. Una vez introducida la temperatura y pulsando el botón para calcular la permitividad, se generarán automáticamente las gráficas y el archivo con los resultados de la permitividad en el rango de frecuencias configurado en la calibración. Estos resultados pueden ser guardados como un archivo .txt. También podemos realizar la parte de “Measure” cargando una calibración realizada con anterioridad, configurando esta y dándole a los botones de medir que directamente aparecerá la dirección en memoria de estos archivos

en la parte “Demo” para calcular la permitividad. Importante destacar que para volver a cargar otra calibración darle a resetear conexión con el VNA.

4.3 PROGRAMACIÓN DEL CÓDIGO

Se ha optado por una programación modular, por lo que hemos dividido la estructura principal en varios scripts, con distintas funciones que explicaremos a continuación. De esta forma puede reutilizarse y optimizarse el código de una forma más sencilla, teniendo menos líneas que dificulten la detección de errores.

Vamos a comenzar comentando la función main que contiene todo el flujo principal de la aplicación que se encuentra en el script Measure_Option.py.

4.3.1 Script Measure_Option.py

```
def main():
    layout = [
        [sg.Column([
            [sg.Text('Seleccione el tipo de sonda:')],
            [sg.Radio('SMA probe', 'PROBE_TYPE', default=True, key='-SMA_PROBE-'), sg.Radio('Slim probe', 'PROBE_TYPE', key='-SLIM_PROBE-')],
            [sg.Text('Datos a introducir para realizar la Calibración:')],
            [sg.Text('Seleccione un archivo .calx:'), sg.Input(key='-FILE5-'), sg.FileBrowse(key='-BROWSE5-')],
            [sg.Button('Load calibration')],
            [sg.Button('Resetear conexión vna', key='-RESET_CONNECTION-')],
            [sg.Button('Configurar Calibración', key='-CONFIG_MANUAL-', disabled=True)], # Botón para configuración manual
            [sg.Button('Medir corto', key='-MEDIR_CORTO-', disabled=True), sg.Button('Medir aire', key='-MEDIR_AIRE-', disabled=True), sg.Button('Medir REF', key='-MEDIR_REF-', disabled=True), sg.Button('Medir MUT', key='-MEDIR_MUT-', disabled=True)],
            [sg.Text('Seleccione un archivo de Corto:'), sg.Input(key='-FILE1-'), sg.FileBrowse(key='-BROWSE1-')],
            [sg.Text('Seleccione un archivo de Aire:'), sg.Input(key='-FILE2-'), sg.FileBrowse(key='-BROWSE2-')],
            [sg.Text('Seleccione un archivo de Material REF:'), sg.Input(key='-FILE3-'), sg.FileBrowse(key='-BROWSE3-')],
            [sg.Text('Seleccione un archivo del MUT:'), sg.Input(key='-FILE4-'), sg.FileBrowse(key='-BROWSE4-')],
            [sg.Text('Ingrese la temperatura (°C):'), sg.Input(key='-TEMP-', size=(10, 1)), sg.Button('Actualizar Temperatura')]
        ]),
        sg.Column([
            [sg.Canvas(key='-CANVAS1-', size=(4, 2))], # Espacio para la primera gráfica
```

```

        [sg.Canvas(key='-CANVAS2-', size=(4, 2))], # Espacio para la
segunda gráfica
        [sg.Button('Guardar Gráfica Real'), sg.Button('Guardar
Gráfica Imaginaria'), sg.Button('Guardar datos')]
    ]],
    [sg.Button('Calcular permitividad'), sg.Button('Salir')]
]

```

Definimos el layout de la ventana utilizando PySimpleGUI (abreviado como sg). Esto especifica cómo se organizarán los elementos en la ventana.

La ventana está dividida en dos columnas principales. La primera columna contiene opciones y botones para la configuración de la calibración y las medidas, mientras que la segunda columna contiene áreas para mostrar gráficas y botones para guardar estas gráficas y datos. Cada control tiene un key que se usa para identificar y manejar eventos.

```

window = sg.Window('Calibration Setup', layout)

```

Creamos una ventana de la aplicación con el título 'Calibration Setup' y el layout definido anteriormente.

```

temp = 21 # Temperatura inicial en grados Celsius
global_vars.taur = calculate_taur(temp)
global_vars.eps_s = calculate_eps_s(temp)
global_vars.eps_inf = calculate_eps_inf(temp)
calibration_loaded = False
calibration_file = ""
instrument = None

file_paths = {
    'corto': '',
    'aire': '',
    'ref': '',
    'mut': ''
}

```

Inicializamos la temperatura a 21 grados Celsius. Calculamos y guardamos las constantes taur, eps_s y eps_inf usando funciones externas calculate_taur, calculate_eps_s y calculate_eps_inf.

También inicializamos las variables calibration_loaded que es para llevar un control de si se ha cargado una calibración, calibration_file donde almacenamos la ruta del archivo de calibración, instrument que mantiene una referencia al instrumento de

medida. Por último, `file_paths` es un diccionario que nos sirve para almacenar las rutas de los archivos que medimos con nuestro programa.

```
#Inicializamos un bucle infinito para gestionar los eventos de la
interfaz de usuario
while True:
    #event.read espera a que ocurra un evento y devuelve el evento y
    los valores
    event, values = window.read()
    #Si cerramos la ventana o le damos al botón salir, se rompe el
    bucle y se elimina la referencia al objeto
    if event == sg.WINDOW_CLOSED or event == 'Salir':
        instrument = None
        break
    #Si el evento es Load Calibration, se selecciona el archivo de
    calibración, nos conectamos al VNA y lo cargamos
    #Si se carga con éxito nuestro archivo de calibración, se
    habilita el botón de configuración manual, si ocurre un error nos muestra
    un mensaje por pantalla
    elif event == 'Load calibration':
        calibration_file = values['-FILE5-']
        if calibration_file:
            try:
                if instrument is None:
                    instrument = conectar_vna()

                    cargar_calibracion(instrument, calibration_file)
                    calibration_loaded = True
                    window['-CONFIG_MANUAL-'].update(disabled=False)
                    sg.popup('calibración cargada con éxito ')
            except Exception as e:
                sg.popup(f"Error al cargar la calibración: {e}")
        else:
            sg.popup('Por favor, seleccione un archivo .calx')

    #Si presionamos el botón de reiniciar conexión, eliminamos la
    referencia al objeto y mostamos un mensaje emergente
    elif event == '-RESET_CONNECTION-':
        if instrument is not None:
            del instrument
            instrument = None
        sg.popup('Conexión reiniciada. Ahora puede cargar una nueva
calibración.')
        calibration_loaded = False
        # Deshabilitamos los botones de medida
        window['-MEDIR_CORTO-'].update(disabled=True)
        window['-MEDIR_AIRE-'].update(disabled=True)
        window['-MEDIR_REF-'].update(disabled=True)
```

```

        window['-MEDIR_MUT-'].update(disabled=True)
        #Si la calibración está cargada y se pulsa el botón de
configuración manual, se configura la calibración y las almacenamos en
nuestra variable global_vars.manual_config
        elif event == '-CONFIG_MANUAL-':
            if calibration_loaded:
                mc = configurar_medicion(instrument)
                if mc is not None:
                    global_vars.manual_config = mc
                    sg.popup('Configuración de calibración manual
completada')

                    # Habilitamos los botones de medida
                    window['-MEDIR_CORTO-'].update(disabled=False)
                    window['-MEDIR_AIRE-'].update(disabled=False)
                    window['-MEDIR_REF-'].update(disabled=False)
                    window['-MEDIR_MUT-'].update(disabled=False)
            else:
                sg.popup('Carga un archivo de calibración primero.')
        #Si presionamos algunos de los botones de medir verificamos si tenemos
el archivo de calibración cargado, de no ser así nos avisa con un mensaje
emergente
        elif event in ('-MEDIR_CORTO-', '-MEDIR_AIRE-', '-MEDIR_REF-', '-
MEDIR_MUT-'):
            if not calibration_loaded:
                sg.popup('Carga un archivo de calibración primero')
            else:
                #Se determina el tipo de medida y se realiza esta, llamando a
la función realizar_medida
                #Si es un archivo MUT, se solicita al usuario que introduzca
nombre y ubicación donde guardar el archivo
                #Si la medida es exitosa se actualiza el diccionario y el
campo correspondiente en la interfaz
                measurement_types = {
                    '-MEDIR_CORTO-': 'corto',
                    '-MEDIR_AIRE-': 'aire',
                    '-MEDIR_REF-': 'ref',
                    '-MEDIR_MUT-': 'mut'
                }
                measurement_type = measurement_types[event]
                try:
                    if measurement_type == 'mut':
                        file_path = sg.popup_get_file('Save MUT
Measurement', save_as=True, no_window=True, file_types=(("S1P Files",
"*.*s1p"),))

                        if file_path:
                            file_path = realizar_medicion(instrument,
global_vars.manual_config, file_path, measurement_type)
                            if file_path:
                                file_paths[measurement_type] = file_path

```

```

        window['-FILE4-'].update(file_path)
    else:
        file_name = f"medicion_{measurement_type}.s1p"
        file_path = realizar_medicion(instrument,
global_vars.manual_config, file_name, measurement_type)
        if file_path:
            file_paths[measurement_type] = file_path
            file_key = f'-FILE{["corto", "aire", "ref",
"mut"].index(measurement_type) + 1}-'
            window[file_key].update(file_path)
        except Exception as e:
            sg.popup(f"Error procesando medidas: {e}")
    #Si ingresamos la temperatura y le damos a actualizar obtenemos
el valor de la temperatura ingresado y calculamos taur, eps_s y eps_inf
    elif event == 'Actualizar Temperatura':
        try:
            temp = float(values['-TEMP-'])
            global_vars.taur = calculate_taur(temp)
            global_vars.eps_s = calculate_eps_s(temp)
            global_vars.eps_inf = calculate_eps_inf(temp)
            sg.popup(f'Temperatura actualizada a {temp}°C.\nNuevos
valores:\ntaur = {global_vars.taur}\neps_s = {global_vars.eps_s}\neps_inf
= {global_vars.eps_inf}')
        except ValueError:
            sg.popup('Por favor, ingrese un valor numérico válido
para la temperatura.')
    #Si presionamos browse para seleccionar nuestros archivos obtenemos el
número del archivo del key y se actualiza el campo correspondiente
    elif event.startswith('-BROWSE'):
        file_num = event.split('-')[-1]
        file_key = f'-FILE{file_num}-'
        file_path = sg.popup_get_file('Seleccione un archivo')
        if file_path:
            window[file_key].update(file_path)
    #Si le damos a calcular la permitividad, se obtiene el tipo de sonda con
la que vamos a hacer nuestras medidas, llamamos a la función para
realizar los cálculos
    #Creamos dos gráficas para mostrar las partes real e imaginaria, estas
se dibujan en los Canvas de la interfaz
    elif event == 'Calcular permitividad':
        try:
            probe_type = 'SMA' if values['-SMA_PROBE-'] else 'Slim'
            col1_mut, array_eps_mut_real_Cmodeldemo,
array_eps_mut_real_ANTmodeldemo, array_eps_mut_real_VLmodeldemo,
array_eps_mut_imag_Cmodeldemo, array_eps_mut_imag_ANTmodeldemo,
array_eps_mut_imag_VLmodeldemo, i_MUT, i_air, i_ref, i_short =
realizar_calculos(values, probe_type)

            fig1, ax1 = plt.subplots()

```

```

        ax1.plot(col1_mut, array_eps_mut_real_Cmodeldemo,
color='magenta', label='Capacitive')
        ax1.plot(col1_mut, array_eps_mut_real_ANTmodeldemo,
color='cyan', label='Antenna')
        ax1.plot(col1_mut, array_eps_mut_real_VLmodeldemo,
color='orange', label='Virtual Line')
        ax1.set_xlabel('Frequency (Hz)')
        ax1.set_ylabel('eps real')
        ax1.set_title('Real part')
        ax1.legend()
        ax1.set_xlim(10000000.0, 6000000000.0)

        fig2, ax2 = plt.subplots()
        ax2.plot(col1_mut, array_eps_mut_imag_Cmodeldemo,
color='magenta', label='Capacitive')
        ax2.plot(col1_mut, array_eps_mut_imag_ANTmodeldemo,
color='cyan', label='Antenna')
        ax2.plot(col1_mut, array_eps_mut_imag_VLmodeldemo,
color='orange', label='Virtual Line')
        ax2.set_xlabel('Frequency (Hz)')
        ax2.set_ylabel('eps imag')
        ax2.set_title('Imaginary part')
        ax2.legend()
        ax2.set_xlim(10000000.0, 6000000000.0)

        draw_figure(window['-CANVAS1-'].TKCanvas, fig1, fig2)
    except Exception as e:
        sg.popup(f"Error in final calculations: {e}")
#Si presionamos botón guardar parte real se solicita al usuario que elija
una ubicación
        elif event == 'Guardar Gráfica Real':
            filename_prefix = sg.popup_get_file('Guardar Gráfica Real',
save_as=True, file_types=(("Archivos PNG", "*.png"),))
            if filename_prefix:
                guardar_grafica_real(fig1, filename_prefix)
#Si presionamos botón guardar parte imaginaria se solicita al usuario que
elija una ubicación
        elif event == 'Guardar Gráfica Imaginaria':
            filename_prefix = sg.popup_get_file('Guardar Gráfica
Imaginaria', save_as=True, file_types=(("Archivos PNG", "*.png"),))
            if filename_prefix:
                guardar_grafica_imaginaria(fig2, filename_prefix)
#Guardamos los datos de la permitividad de los tres modelos donde quiera
el usuario
        elif event == 'Guardar datos':
            filename = sg.popup_get_file('Guardar Datos', save_as=True,
file_types=(("Archivos de texto", "*.txt"),))
            if filename:

```

```
        guardar_datos(i_MUT, filename, col1_mut,
array_eps_mut_real_ANTmodeldemo, array_eps_mut_imag_ANTmodeldemo,
array_eps_mut_real_VLmodeldemo, array_eps_mut_imag_VLmodeldemo,
array_eps_mut_real_Cmodeldemo, array_eps_mut_imag_Cmodeldemo)
#Al finalizar el bucle principal eliminamos la referencia al objeto y por
último cerramos la ventana
    if instrument is not None:
        del instrument

window.close()

if __name__ == '__main__':
    main()
```

4.3.2 Configuración del VNA

Dentro del Script Measure_Option.py tenemos un total de 5 funciones que nos ayudarán a controlar nuestro VNA con funciones del PicoVNA Programmer's Guide.

Comenzamos con la función con la que nos conectamos a nuestro VNA:

```
def conectar_vna():
    #Conectar al VNA y retornar el objeto de instrumento.
    instrument = None
    try:
        instrument = vna.Device.openAny()
    except vna.DeviceNotFoundException as e:
        if input("No VNA found. Do you want to open a simulated demo VNA?
(y/n) ") == "y":
            instrument = vna.Device.openDemo()
        else:
            print("Goodbye!")
            exit()
    return instrument
```

A continuación, tenemos la función con la que cargamos nuestro archivo de calibración:

```
def cargar_calibracion(instrument, calibration_file):#aplicamos la
funcion applyCalibrationFromFile del manual
    #Cargar el archivo de calibración .calx en el VNA.
    try:
        instrument.applyCalibrationFromFile(calibration_file)
        print(f"Calibración cargada desde {calibration_file}")
    except Exception as e:
        print(f"Error al cargar calibración: {e}")
        exit()
```

Función donde configuramos nuestra calibración:

```
def configurar_medicion(instrument, manual_config=None):
    # Configurar la medida del VNA usando la calibración cargada
```



```

info = instrument.getInfo()
print(f"Instrument connected: {info.serial}")

# Obtener los metadatos de la calibración cargada
calInfo = instrument.getMetadataForCurrentCalibration()

# Valores permitidos para el número de puntos
allowed_num_points = [51, 101, 201, 501, 1001, 2001]
#Si se proporciona manual_config se extraen los atributos y se asignan a
variables locales
if manual_config:
    numPoints = manual_config.numPoints
    startFreqHz = manual_config.startFreqHz
    stopFreqHz = manual_config.stopFreqHz
    powerLevelDbm = manual_config.powerLevelDbm
    bandwidthHz = manual_config.bandwidthHz
#Si no se proporciona manual_cofig creamos una interfaz para que el
usuario pueda configurar de manera manual los parámetros de medida
else:
    layout = [
        [sg.Text('Desea configurar manualmente los parámetros de
medida?')],
        [sg.Radio('Sí', 'RADIO1', key='-SI-', default=True),
sg.Radio('No', 'RADIO1', key='-NO-')],
        [sg.Text('Número de puntos:'), sg.Combo(allowed_num_points,
default_value=calInfo.numPoints, key='-NUM_POINTS-')],
        [sg.Text('Frecuencia de inicio (Hz):'),
sg.Input(default_text=calInfo.startFreqHz, key='-START_FREQ-')],
        [sg.Text('Frecuencia de parada (Hz):'),
sg.Input(default_text=calInfo.stopFreqHz, key='-STOP_FREQ-')],
        [sg.Text('Nivel de potencia (dBm):'),
sg.Input(default_text=calInfo.powerLevelDbm, key='-POWER_LEVEL-')],
        [sg.Text('IBW (Hz):'),
sg.Input(default_text=calInfo.bandwidthHz, key='-BANDWIDTH-')],
        [sg.Button('Ok'), sg.Button('Cancelar')]
    ]

    window = sg.Window('Configuración de Medida', layout)
    event, values = window.read()
    window.close()

    if event == 'Cancelar' or event == sg.WINDOW_CLOSED:
        return None
#Si el usuario escoge NO se usa calibración por defecto
if values['-NO-']:
    numPoints = calInfo.numPoints
    startFreqHz = calInfo.startFreqHz
    stopFreqHz = calInfo.stopFreqHz
    powerLevelDbm = calInfo.powerLevelDbm

```

```
        bandwidthHz = calInfo.bandwidthHz
#Si elige SÍ, los valores ingresados en la interfaz se extraen y se
#convierten a los tipos de datos apropiados
    else:
        numPoints = int(values['-NUM_POINTS-'])
        startFreqHz = float(values['-START_FREQ-'])
        stopFreqHz = float(values['-STOP_FREQ-'])
        powerLevelDbm = float(values['-POWER_LEVEL-'])
        bandwidthHz = float(values['-BANDWIDTH-'])

#Validar que las frecuencias estén dentro del rango permitido
    if startFreqHz < calInfo.startFreqHz or startFreqHz >
calInfo.stopFreqHz:
        sg.popup(f"La frecuencia de inicio debe estar entre
{calInfo.startFreqHz} y {calInfo.stopFreqHz}.")
        return None
    if stopFreqHz < calInfo.startFreqHz or stopFreqHz >
calInfo.stopFreqHz:
        sg.popup(f"La frecuencia de parada debe estar entre
{calInfo.startFreqHz} y {calInfo.stopFreqHz}.")
        return None
#Creamos una instancia y realizamos un barrido de frecuencia uniforme a
#la configuración
    mc = vna.MeasurementConfiguration()
    mc.addUniformFrequencySweep(
        numPoints,
        startFreqHz,
        stopFreqHz,
        powerLevelDbm,
        bandwidthHz
    )
    return mc
```

La siguiente función es `measure_with_vna` que básicamente se encarga de configurar el vna y realizar una medida de acuerdo con el tipo especificado:

```
#Recibimos dos parámetros el instrumento y el tipo de medida que se va a
#realizar
def measure_with_vna(instrument, measurement_type):
#Verifica si global_vars tiene un atributo llamado manual_config y si
#este no es None. Si es así, asigna esta configuración a mc.
#Si no existe manual_config, llama a configurar_medicion(instrument) para
#obtener una configuración de medida y la asigna a mc.
    if hasattr(global_vars, 'manual_config') and
global_vars.manual_config is not None:
        mc = global_vars.manual_config
    else:
        mc = configurar_medicion(instrument)
```

```

    if mc is None:
        return None
#Según el tipo de archivo medido, realiza la medida correspondiente y
#guarda el resultado en un archivo, cuya ruta se retorna al final de la
función
    if measurement_type == 'corto':
        print("Realizando medida en corto...")
        file_path = realizar_medicion(instrument, mc, "medicion_corto",
measurement_type)
    elif measurement_type == 'aire':
        print("Realizando medida en aire...")
        file_path = realizar_medicion(instrument, mc, "medicion_aire",
measurement_type)
    elif measurement_type == 'mut':
        print("Realizando medida en MUT...")
        file_path = sg.popup_get_file('Save MUT Measurement',
save_as=True, no_window=True, file_types=(("S1P Files", "*.s1p"),))
        if file_path:
            file_path = realizar_medicion(instrument, mc, file_path,
measurement_type)
    elif measurement_type == 'ref':
        print("Realizando medida en ref...")
        file_path = realizar_medicion(instrument, mc, "medicion_REF",
measurement_type)
    else:
        print(f"Tipo de medida no reconocido: {measurement_type}")
        return None

return file_path

```

Por último, definimos la función `realizar_medicion` que toma cuatro parámetros: `instrument` (el instrumento VNA), `mc` (la configuración de medida), `nombre_medicion` (el nombre del archivo donde se guardarán los resultados) y `measurement_type` (el tipo de medida que se está realizando).

```

def realizar_medicion(instrument, mc, nombre_medicion, measurement_type):
# Realizar la medida y guardar los resultados en un archivo.
#Inicializamos tres listas vacías: resultados_real para almacenar las
magnitudes en dB de S11, resultados_imag para almacenar las fases en
grados de S11, y frecuencias para almacenar las frecuencias de medida.
    #Inicializa una bandera isFirstPoint como True para manejar el primer
punto de la medida.
    sweep = instrument.startMeasurement(mc)
    resultados_real = []
    resultados_imag = []
    frecuencias = []

```

```

    isFirstPoint = True
#Bucle para iterar por todos los puntos de medida, obtiene punto de
medida pt, si es el primer punto imprime mensaje indicando el inicio del
barrido
    while sweep.hasMorePoints():
        pt = sweep.getNextPoint()
        if isFirstPoint:
            print("Trigger event occurred")
            print("----- Sweeping -----")
            isFirstPoint = False
#Almacenamos nuestra frecuencia, y la magnitud y fase de S11 en nuestras
listas
        resultados_real.append(vna.toLogMag(pt.s11))
        resultados_imag.append(vna.toPhaseDeg(pt.s11))
        frecuencias.append(pt.measurementFrequencyHz)

# Asegurar que el nombre del archivo tenga la extensión correcta
    if not nombre_medicion.endswith('.s1p'):
        nombre_medicion += '.s1p'
#Abrimos archivo especificado por nombre_medicion en modo escritura y
escribimos los datos de frecuencia, magnitud y fase en el archivo
    try:
        with open(nombre_medicion, "w") as f:
            f.write(f"! \n! \n# Hz S Db R 50\n! \n")
            formato_linea = "{:<15} {:<30} {:<30}\n"

            for i in range(len(resultados_real)):
                f.write(formato_linea.format(frecuencias[i],
resultados_real[i], resultados_imag[i]))

            print(f"Resultados guardados en {nombre_medicion}")
    except IOError as e:
        sg.popup(f"Error guardando los resultados: {e}")
        return None

# Generar gráficos si el tipo de medida es 'corto'
if measurement_type == 'corto':
    plt.figure(figsize=(12, 8))
    plt.subplot(2, 1, 1)
    plt.plot(frecuencias, resultados_real, marker='o', linestyle='-')
    plt.title('Parte Real de S11')
    plt.xlabel('Frecuencia (Hz)')
    plt.ylabel('Magnitud (dB)')

    plt.subplot(2, 1, 2)
    plt.plot(frecuencias, resultados_imag, marker='o', linestyle='-')
    plt.title('Parte Imaginaria de S11')

```

```
plt.xlabel('Frecuencia (Hz)')
plt.ylabel('Fase (grados)')
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()

return nombre_medicion # Retornar la ruta del archivo generado
```

4.3.3 Script Functions.py

En este script tenemos varias funciones que son llamadas a lo largo de nuestro código.

En primer lugar, importamos las librerías necesarias para su buen funcionamiento:

```
import numpy as np
from scipy.optimize import fsolve
import matplotlib.pyplot as plt
import PySimpleGUI as sg
import global_vars
import os
```

Comenzamos con la función **convert_to_real_imag**, esta función toma tres parámetros: magnitud, angle y formatoparametros. La variable formatoparametros indica el formato en el que se presenta la magnitud y el angle de nuestra función que pueden estar en Db (Decibelios), MA (magnitud y ángulo) y en RI (real e imaginario). El objetivo de esta función es convertir estos parámetros en componentes de números complejos (parte real e imaginaria) para después realizar sus cálculos.

```
def convert_to_real_imag(magnitud, angle, formatoparametros):
    if formatoparametros == 'Db':
        real_linear = 10 ** (magnitud / 20)#Convertir de Db a magnitud
lineal
        real = real_linear * np.cos(np.radians(angle))
        imag = real_linear * np.sin(np.radians(angle))
    elif formatoparametros == 'MA':
        real = magnitud * np.cos(np.radians(angle))
        imag = magnitud * np.sin(np.radians(angle))
    elif formatoparametros == 'RI':
        real = magnitud
        imag = angle
    else:
        raise ValueError(f"Unknown parameter format:
{formatoparametros}")

    return (real, imag) # Devuelve una tupla (real, imag)
```

La función **Leer_fichero** se encarga de leer un archivo de datos, procesar la información contenida en él y de escribir los resultados en un archivo de salida en formato .slp. Tiene varios parámetros de entrada:

1. nombre_archivo : nombre del archivo de entrada que se va a leer,
2. col1,col2 y col3 :son las columnas donde guardaremos nuestra frecuencia y la parte real e imaginaria de los datos procesados
3. nombre_archivo_salida : Nombre del archivo donde se guardarán los datos procesados en formato .slp. Ciertamente es que no es necesario generar un archivo de salida pero es muy útil para ver si ha leído y transformado correctamente los datos de nuestro archivo de entrada.

```
def Leer_fichero(nombre_archivo, col1, col2, col3,
nombre_archivo_salida):
#Esta función verifica si el archivo de entrada existe usando
os.path.isfile(nombre_archivo)
#Si no es así salta un error
    if not os.path.isfile(nombre_archivo):
        raise FileNotFoundError(f"El archivo {nombre_archivo} no existe o
no es un archivo válido")

    cuenta = 0#Variable inicializada para contar las líneas procesadas
    lineas_omitidas = [] # Lista para almacenar líneas omitidas

    try:
        with open(nombre_archivo, 'r') as fich:
            print(f"Leyendo {nombre_archivo}")

            # Leer líneas hasta encontrar la que comienza con '#'
            while True:
                lineainicio = fich.readline().strip()
                if lineainicio.startswith('#'):
                    print(lineainicio) # Mostrar por pantalla la línea
leída
                    break

                # Procesar la línea que comienza con '#' y esta se divide en
parte con la función split
                datos = lineainicio.split()
                if len(datos) < 6:
                    raise ValueError("Formato de encabezado no válido")

                frec = datos[1]
                print(frec)
                parametro = datos[2]
                print(parametro)
```

```

formato_parametros = datos[3]
print(formato_parametros)
resistencia = datos[4]
print(resistencia)
ohms = float(datos[5])
print(ohms)

# Leer y procesar las líneas restantes del archivo
for linea in fich:
    linea = linea.strip()
    if not linea or linea.startswith('!'):
        continue # Saltar líneas vacías o comentarios

    muestras = linea.split()
    if len(muestras) < 3:
        lineas_omitidas.append(linea) # Guardar líneas
malformadas
        continue # Saltar líneas malformadas

    cuenta += 1
    print(f"Línea procesada: {linea}")
    try:
        # Pasamos la frecuencia a Hz
        frecuencia = float(muestras[0])
        if frec == "KHZ":
            frecuencia *= 1e3
        elif frec == "MHZ":
            frecuencia *= 1e6
        elif frec == "GHZ":
            frecuencia *= 1e9

        col1.append(frecuencia)

# Dependiendo del formato de los parámetros se calcula la parte real e
# imaginaria llamando a la función convert_to_real_imag
        if formato_parametros == 'Db':
            magnitud_db = float(muestras[1])
            angulo_imag = float(muestras[2])
            real, imag = convert_to_real_imag(magnitud_db,
angulo_imag, formato_parametros)
            col2.append(real)
            col3.append(imag)
        elif formato_parametros == 'RI':
            real = float(muestras[1])
            imag = float(muestras[2])
            col2.append(real)
            col3.append(imag)
        elif formato_parametros == 'MA':
            magnitud_ma = float(muestras[1])
            angulo_ma = float(muestras[2])

```

```
        real, imag = convert_to_real_imag(magnitud_ma,
angulo_ma, formatoparametros)
        col2.append(real)
        col3.append(imag)
    else:
        raise ValueError(f"Formato de parámetro
desconocido: {formatoparametros}")

except (ValueError, IndexError) as e:
    print(f"Error procesando línea: {linea}. Error:
{str(e)}")
    lineas_omitidas.append(linea) # Guardar líneas
malformadas
    continue # Saltar líneas malformadas o fuera de
índice

except FileNotFoundError as e:
    print(f"Error al abrir el archivo: {e}")
    raise
except Exception as e:
    print(f"Error al procesar el archivo: {e}")
    raise

#Imprimir las columnas después de procesar el archivo
print("Frecuencias (col1): \tParte Real (col2): \tParte Imaginaria
(col3):")
for i in range(len(col1)):
    print(f"{col1[i]:.6e} \t{col2[i]:.6e} \t{col3[i]:.6e}")

# Guardar los datos en un archivo .s1p
try:
    with open(nombre_archivo_salida, 'w') as f:
        # Escribir encabezado del archivo .s1p
        f.write(f"!Archivo generado a partir de {nombre_archivo}\n")
        f.write(f"!Frecuencia\tReal\tImaginario\n")
        f.write(f"# Hz S RI R {omhs}\n")
        for i in range(cuenta):
            f.write(f"{col1[i]:.6e} {col2[i]:.6e} {col3[i]:.6e}\n")

    print(f"Archivo .s1p generado: {nombre_archivo_salida}")
except Exception as e:
    print(f"Error al guardar el archivo de salida: {e}")
    raise

return cuenta
```


Función **guardar_datos**, esta es utilizada para escribir los datos de frecuencia y la permitividad en un archivo de texto una vez pulsado el botón calcular permitividad en la parte DEMO de nuestra interfaz.

```
def guardar_datos(Npoints, nombre_archivo_epsilonmut, frequency,
epsilon_real, epsilon_imag,epsilon_re,epsilon_im,eps_re,eps_im):
    if nombre_archivo_epsilonmut: # Verifica si el nombre del archivo es
válido
        coso = nombre_archivo_epsilonmut + ".txt"

        # Crea un fichero con el nombre guardado en coso y lo abre en
modo escritura 'w'
        with open(coso, 'w') as file:
            file.write("!
Frequency                                     Er_ant
                                     Ei_ant      Er_vl
                                     Ei_vl      Er_cap
                                     Ei_cap\n")

            # Para tantos datos como valores de frecuencia haya, escribe
la línea con la frecuencia, la permitividad relativa real y la imaginaria
            # En este caso escribe lo que contiene línea
            for i in range(0, Npoints):
                linea =
                "%.6f          %.6f          %.6f
                %.6f          %.6f
                %.6f          %.6f \n" %
                (frequency[i], epsilon_real[i], epsilon_imag[i],epsilon_re[i],epsilon_i
m[i],eps_re[i],eps_im[i])
                file.write(linea)
            else:
                print("No se proporcionó un nombre de archivo válido.")
```

Por último, las dos siguientes funciones lo que hacen es guardar las gráficas en formato .png tanto de la parte real como de la parte imaginaria.

```
def guardar_grafica_real(fig, filename_prefix):
    filename = filename_prefix + '_grafica_real.png'
    fig.savefig(filename)

def guardar_grafica_imaginaria(fig, filename_prefix):
    filename = filename_prefix + '_grafica_imaginaria.png'
    fig.savefig(filename)
```

Cabe mencionar que tenemos un script llamado **global_vars.py**, que es como una especie de módulo dedicado solo para almacenar estas variables globales para no tener problemas al acceder desde cualquier script de nuestro programa.

```
taur = None
eps_s = None
eps_inf = None
manual_config = None
```

4.3.4 Script Demo_Option.py

En este script tenemos una serie de funciones relacionadas con la parte demo de nuestra aplicación donde realizamos los cálculos de variables para pasar a nuestros algoritmos y una función que es la que se encarga de dibujar las gráficas.

Funciones y librerías a importar:

```
import PySimpleGUI as sg
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import os
from scipy.optimize import fsolve
from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg
from Functions import
Leer_fichero, guardar_datos, guardar_grafica_imaginaria, guardar_grafica_rea
l
from CapModel import CModel_function
from AntModel import AntModel_function
from VLModel import VLModel_function
import global_vars
```

Vamos a explicar en primer lugar la función realizar_calculos:

```
def realizar_calculos(values, probe_type):
    #Cademo = 2.94e-14
    #Cademo=0.00000000000885*2.38*(80-25)*0.001*0.0254 SMA probe
    #Cademo=0.00000000000885*2.38*(1.68-0.57)*0.01 #Slim probe
    #Dependiendo el tipo de sonda con la que realizamos las medidas
    utilizamos una capacitancia u otra, ya que los puertos de las sondas son
    diferentes
    if probe_type == 'SMA':
        Cademo = 0.00000000000885 * 2.38 * (80 - 25) * 0.001 * 0.0254
    else: # Slim probe
        Cademo = 0.00000000000885 * 2.38 * (1.68 - 0.57)/2 * 0.001
    #Inicializamos las variables que vamos a utilizar
    pi = np.pi
    Ytdemo = 0.02
    i_MUT = None
    i_air = None
    i_ref = None
    i_short = None
    col1_short, col2_short, col3_short = [], [], []
```

```

array_Ysdemo, array_S11_shortdemo = [], []

col1_air, col2_air, col3_air = [], [], []
array_Yademo, array_S11_airdemo = [], []

array_Yddemo, array_tanhdemo = [], []

col1_ref, col2_ref, col3_ref = [], [], []
array_Yrefdemo, array_Yref_corrdemo = [], []
array_freq_refdemo, array_S11_refdemo = [], []

col1_mut, col2_mut, col3_mut = [], [], []
array_Ymutdemo, array_Ymut_corrdemo = [], []
array_freq_mutdemo, array_S11_mutdemo = [], []

try:
#Se llama a la función Leer_fichero del script functions y guarda el
número de muestras en la variable i_short para utilizarla de contador en
el resto de cálculos
#Calculamos la admitancia del short,Ysdemo
    i_short = Leer_fichero(values.get('-FILE1-', ''), col1_short,
col2_short, col3_short, 'output_corto.s1p')
    for cont in range(i_short):
        if cont >= len(col2_short) or cont >= len(col3_short):
            continue
        S11_shortdemo = complex(col2_short[cont], col3_short[cont])
        Ysdemo = Ytdemo * (1 - S11_shortdemo) / (1 + S11_shortdemo)
        array_S11_shortdemo.append(S11_shortdemo)
        array_Ysdemo.append(Ysdemo)
except Exception as e:
    print(f"Error al procesar el archivo de corto: {e}")

try:
#Se llama a la función Leer_fichero del script functions y guarda el
número de muestras en la variable i_air para utilizarla de contador en el
resto de cálculos
#Calculamos la admitancia del air,Yademo
    i_air = Leer_fichero(values.get('-FILE2-', ''), col1_air,
col2_air, col3_air, 'output_aire.s1p')
    for cont in range(i_air):
        if cont >= len(col2_air) or cont >= len(col3_air):
            continue
        S11_airdemo = complex(col2_air[cont], col3_air[cont])
        Yademo = Ytdemo * (1 - S11_airdemo) / (1 + S11_airdemo)
        array_S11_airdemo.append(S11_airdemo)
        array_Yademo.append(Yademo)
except Exception as e:
    print(f"Error al procesar el archivo de aire: {e}")

```

```
try:
#Obtener Yd demo, utilizando Ysdemo e Yademo calculadas anteriormente
    for cont in range(i_short):
        Yddemo = np.sqrt(array_Yademo[cont] * array_Ysdemo[cont] + 1j
* 2 * pi * col1_short[cont] * Cademo * (array_Yademo[cont] -
array_Ysdemo[cont]))
        array_Yddemo.append(Yddemo)
#Calcular la tangente hiperbólica de (gamma*D), llamada en este caso
tanhdemo
    for cont in range(i_short):
        tanhdemo = (array_Yddemo[cont] / array_Ysdemo[cont])
        array_tanhdemo.append(tanhdemo)
except Exception as e:
    print(f"Error en los cálculos intermedios: {e}")

try:
#Se llama a la función Leer_fichero del script functions y guarda el
número de muestras en la variable i_air para utilizarla de contador en el
resto de cálculos
#Calculamos la admitancia del referencia, Yrefdemo
    i_ref = Leer_fichero(values.get('-FILE3-', ''), col1_ref,
col2_ref, col3_ref, 'output_ref.s1p')
    for cont in range(i_ref):
        if cont >= len(col2_ref) or cont >= len(col3_ref):
            continue
        S11_refdemo = complex(col2_ref[cont], col3_ref[cont])
        Yrefdemo = Ytdemo * (1 - S11_refdemo) / (1 + S11_refdemo)
        array_freq_refdemo.append(col1_ref[cont])
        array_S11_refdemo.append(S11_refdemo)
        array_Yrefdemo.append(Yrefdemo)
except Exception as e:
    print(f"Error al procesar el archivo de referencia: {e}")

try:
#En este bucle se corrige el valor de la admitancia del material de
referencia para trasladar en plano de referencia. Esto tiene lugar para
todos los valores de la lista array Yref demo:
    for cont in range(i_ref):
        Yref_corrdemo = array_Yddemo[cont] * (array_Yddemo[cont] *
array_tanhdemo[cont] - array_Yrefdemo[cont]) / (array_Yrefdemo[cont] *
array_tanhdemo[cont] - array_Yddemo[cont])
        array_Yref_corrdemo.append(Yref_corrdemo)
#Se llama a la función Leer_fichero del script functions y guarda el
número de muestras en la variable i_air para utilizarla de contador en el
resto de cálculos
#Calculamos la admitancia de nuestra muestra bajo prueba, Ymutdemo
    i_MUT = Leer_fichero(values.get('-FILE4-', ''), col1_mut,
col2_mut, col3_mut, 'output_mut.s1p')
    for cont in range(i_MUT):
```

```

        if cont >= len(col2_mut) or cont >= len(col3_mut):
            continue
        S11_mutdemo = complex(col2_mut[cont], col3_mut[cont])
        Ymutdemo = Ytdemo * (1 - S11_mutdemo) / (1 + S11_mutdemo)
        array_freq_mutdemo.append(col1_mut[cont])
        array_S11_mutdemo.append(S11_mutdemo)
        array_Ymutdemo.append(Ymutdemo)
#En este bucle se corrige el valor de la admitancia del material bajo
prueba (MUT) para trasladar en plano de referencia. Esto tiene lugar para
todos los valores de la lista array Ymut demo:
        for cont in range(i_air):
            Ymut_corrdemo = array_Yddemo[cont] * (array_Yddemo[cont] *
array_tanhdemo[cont] - array_Ymutdemo[cont]) / (array_Ymutdemo[cont] *
array_tanhdemo[cont] - array_Yddemo[cont])
            array_Ymut_corrdemo.append(Ymut_corrdemo)
        except Exception as e:
            print(f"Error al procesar el archivo MUT: {e}")

    try:
#Llamamos a las funciones que contienen nuestro 3 algoritmos a
implementar:
        array_eps_mut_real_Cmodeldemo, array_eps_mut_imag_Cmodeldemo =
CModel_function(i_MUT, array_freq_refdemo, array_S11_shortdemo,
array_S11_airdemo, array_S11_refdemo, array_S11_mutdemo)
        array_eps_mut_real_ANTmodeldemo, array_eps_mut_imag_ANTmodeldemo
= AntModel_function(i_MUT, array_freq_refdemo, array_S11_refdemo,
array_Yref_corrdemo, array_freq_mutdemo, array_S11_mutdemo,
array_Ymut_corrdemo)
        array_eps_mut_real_VLmodeldemo, array_eps_mut_imag_VLmodeldemo =
VLModel_function(i_MUT, array_freq_refdemo, array_S11_refdemo,
array_Yref_corrdemo, array_freq_mutdemo, array_S11_mutdemo,
array_Ymut_corrdemo, probe_type)
        except Exception as e:
            print(f"Error en los cálculos finales del modelo: {e}")

    return col1_mut, array_eps_mut_real_Cmodeldemo,
array_eps_mut_real_ANTmodeldemo, array_eps_mut_real_VLmodeldemo,
array_eps_mut_imag_Cmodeldemo, array_eps_mut_imag_ANTmodeldemo,
array_eps_mut_imag_VLmodeldemo, i_MUT, i_air, i_ref, i_short

```

Las siguientes funciones se encargan de calcular las variables `calculate_taur`, `calculate_eps_s` y `calculate_eps_inf` en función de la temperatura, estas variables serán utilizadas en nuestros algoritmos.

```

def calculate_taur(temp):
    return 0.00000000000000003745 * (1 + 0.00007 * (temp + 273.15 -
300.65)**2) * np.exp(2295.7 / (temp + 273.15))

```

```
def calculate_eps_s(temp):  
    return 10**(1.94404 - 0.001991 * temp)  
  
def calculate_eps_inf(temp):  
    return 5.77 - 0.0274 * temp
```

La función **draw_figure** se encarga de ajustar el tamaño de las dos figuras de Matplotlib y las muestras en un widget canvas de Tkinter. Primero limpiamos cualquier contenido existente en el canvas, luego creamos y empaquetamos las figuras en el canvas asegurando que se muestra una debajo de la otra con un margen entre ellas. Por último devuelve los objetos FigureCanvasTKAgg asociados con las figuras para permitir futuras interacciones si es necesario.

```
def draw_figure(canvas, fig1, fig2):  
    # Ajustar el tamaño de las figuras de Matplotlib  
    fig1.set_size_inches(5, 2.5)  
    fig2.set_size_inches(5, 2.5)  
  
    for widget in canvas.winfo_children():  
        widget.destroy()  
  
    fig_canvas_agg1 = FigureCanvasTkAgg(fig1, canvas)  
    fig_canvas_agg1.draw()  
    fig_canvas_agg1.get_tk_widget().pack(side='top', fill='both',  
expand=1, pady=5)  
  
    fig_canvas_agg2 = FigureCanvasTkAgg(fig2, canvas)  
    fig_canvas_agg2.draw()  
    fig_canvas_agg2.get_tk_widget().pack(side='top', fill='both',  
expand=1, pady=5)  
  
    return fig_canvas_agg1, fig_canvas_agg2
```

4.3.5 Script CapModel.py

Script que realiza los algoritmos del modelo capacitivo para obtener ϵ del MUT

```
import numpy as np  
import global_vars  
def CModel_function(Npoints, array_freq_ref, array_S11_short,  
array_S11_air, array_S11_ref, array_S11_mut):  
    print("Running function in CapModel script.py")  
    #Definimos las constantes que van a usarse para resolver el algoritmo  
y las listas vacías de  $\epsilon$  mut real e imaginario  
    numero = 8.2724e-12j  
    pi = np.pi  
    array_eps_mut_real = []
```

```

array_eps_mut_imag = []

for cont in range(0, Npoints, 1):
    #Se calcula epsilon/permitividad para el material de referencia,
    en formato a+bj
    eps_ref = global_vars.eps_inf + (global_vars.eps_s -
    global_vars.eps_inf) / (1 + (2 * pi * array_freq_ref[cont] *
    global_vars.taur * 1j)**(1))
    #print("epsilon ref vale ", eps_ref)

    gamma_ma = array_S11_mut[cont] - array_S11_air[cont]
    gamma_sr = array_S11_short[cont] - array_S11_ref[cont]
    gamma_ms = array_S11_mut[cont] - array_S11_short[cont]
    gamma_mr = array_S11_mut[cont] - array_S11_ref[cont]
    gamma_as = array_S11_air[cont] - array_S11_short[cont]
    gamma_ra = array_S11_ref[cont] - array_S11_air[cont]

    eps_mut = - gamma_ma * gamma_sr / gamma_ms / gamma_ra * eps_ref
    - gamma_mr * gamma_as / gamma_ms / gamma_ra
    #print("para el capacitivo model eps_mut vale ", eps_mut)

    array_eps_mut_real.append(eps_mut.real)
    array_eps_mut_imag.append(-1 * eps_mut.imag)

    #print("array eps mut real vale ", array_eps_mut_real)

return array_eps_mut_real, array_eps_mut_imag

```

4.3.6 Script VLModel.py

Script que realiza los algoritmos del modelo virtual line para obtener ϵ del mut

```

import numpy as np
from scipy.optimize import fsolve
import global_vars
def VLModel_function(Npoints, array_freq_ref, array_S11_ref,
array_Yref_corr, array_freq_mut, array_S11_mut, array_Ymut_corr,
probe_type):
    print("Running function in VLModel script.py")
    #Definimos las constantes que van a usarse para resolver el algoritmo
    y los arrays a y b, dos listas vacías que van a almacenar lo que devuelva
    fsolve    pi = np.pi
    c = 3e8
    array_a = []
    array_b = []

    for cont in range(Npoints):
        # Calcular epsilon/permitividad para el material de referencia

```

```

    eps_ref = global_vars.eps_inf + (global_vars.eps_s -
global_vars.eps_inf) / (1 + (2 * pi * array_freq_ref[cont] *
global_vars.taur * 1j)**(1))

    # Calcular L, dependiendo si utilizamos sonda SMA o Slim probe
    aplicamos una fórmula u otra
    if probe_type == 'SMA':
        x = array_Yref_corr[cont] / np.sqrt(eps_ref) * (60 *
np.log(80 / 25))
    else: # Slim probe
        x = array_Yref_corr[cont] / np.sqrt(eps_ref) * (60 *
np.log(1.68 / 0.57))

    L_num = np.arctanh(x)
    L_denom = 1j * 2 * pi * array_freq_ref[cont] / c *
np.sqrt(eps_ref)
    L = L_num / L_denom

    # Definir la función a resolver
    def equation_to_solve(z):
        a, b = z
        if probe_type == 'SMA':
            f_VLmodel = array_Ymut_corr[cont] - (np.sqrt(a + b * 1j)
/ (60 * np.log(80 / 25)) * np.tanh(1j * 2 * pi * array_freq_mut[cont] * L
* np.sqrt(a + b * 1j) / c))
        else: # Slim probe
            f_VLmodel = array_Ymut_corr[cont] - (np.sqrt(a + b * 1j)
/ (60 * np.log(1.68 / 0.57)) * np.tanh(1j * 2 * pi * array_freq_mut[cont]
* L * np.sqrt(a + b * 1j) / c))
        return [f_VLmodel.real, f_VLmodel.imag]

    # Suposición inicial para a y b
    initial_guess = (10, -10)

    # Resolver la ecuación no lineal
    sol = fsolve(equation_to_solve, initial_guess)
    a, b = sol

    # Se crean los arrays de a y b utilizando el comando .append
    array_a.append(a)
    array_b.append(-b)

    # Los devuelvo al script principal usando return
    return array_a, array_b

```

4.3.7 Script AntModel.py

Script que realiza los algoritmos del modelo antena line para obtener ϵ del mut


```

import numpy as np
from scipy.optimize import fsolve
import global_vars

def AntModel_function(Npoints, array_freq_ref, array_S11_ref,
array_Yref_corr, array_freq_mut, array_S11_mut, array_Ymut_corr):
    print("Running function in AntModel script.py")

    numero = 8.2724e-12j
    pi = np.pi
    array_Co = []
    array_Go = []
    array_a = []
    array_b = []

    for cont in range(0, Npoints, 1):
        #Se calcula epsilon/permitividad para el material de referencia,
en formato a+bj
        eps_ref = global_vars.eps_inf + (global_vars.eps_s -
global_vars.eps_inf) / (1 + (2 * pi * array_freq_ref[cont] *
global_vars.taur * 1j)**(1))
        #print("epsilon ref vale ", eps_ref)

        eps_ref_raiz5ta = (np.sqrt(eps_ref))**5
        #Calculo Co con la siguiente expresión y me creo un array_Co para
usarlo posteriormente
        Co_num = eps_ref_raiz5ta.real * array_Yref_corr[cont].imag /
eps_ref_raiz5ta.imag - array_Yref_corr[cont].real
        Co_denom = 2 * pi * array_freq_ref[cont] * (eps_ref_raiz5ta.real /
eps_ref_raiz5ta.imag * eps_ref.real + eps_ref.imag)
        Co = Co_num / Co_denom
        #print("Co vale ", Co)
        array_Co.append(Co)

        #Calculo Go con la siguiente expresión y me creo un array_Go para
usarlo posteriormente
        Go_num = array_Yref_corr[cont].imag - 2 * pi *
array_freq_ref[cont] * Co * eps_ref.real
        Go_denom = eps_ref_raiz5ta.imag
        Go = Go_num / Go_denom
        #print("Go vale ", Go)
        array_Go.append(Go)

    # Se define la función a resolver
    def equation_to_solve(z):
        a, b = z
        f_ANTmodel = array_Ymut_corr[cont] - 1j * 2 * pi *
array_freq_mut[cont] * Co * (a + b * 1j) - Go * (np.sqrt(a + b * 1j))**5
        return np.array([f_ANTmodel.real, f_ANTmodel.imag])

```

```
# Suposición inicial para a y b
initial_guess = (10,-10)

# Resuelve la ecuacion no lineal
a, b = fsolve(equation_to_solve, initial_guess)

# Imprime los valores de a y b
#print("a =", a)
#print("b =", b)

#Creo arrays de a y b para devolverlos
array_a.append(a)
array_b.append(-1 * b)

#print("para el Antenna Model eps_mut vale ", array_a, array_b,"j
")

#Los devuelvo al script principal usando return
return array_a, array_b
```



CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este capítulo presenta los resultados obtenidos mediante el sistema experimental desarrollado para la medida de la permitividad compleja de diferentes materiales. Los experimentos se han realizado utilizando dos configuraciones de sonda coaxial: una sonda de bajo coste con conector SMA y una sonda comercial de alta precisión modelo Slim de Keysight. Los datos obtenidos con ambas configuraciones se comparan y analizan en el rango de microondas. Esta comparación se realiza para determinar en qué medida el sistema de bajo coste puede servir como alternativa a la sonda comercial, especialmente en aplicaciones donde se requiere una alta precisión en la medida de las propiedades dieléctricas.

Para estructurar el análisis de los resultados, se han definido tres tipos principales de materiales:

- **Líquidos de Referencia polares:** Se incluyen materiales bien caracterizados como el metanol, etanol, acetona, propan-1-ol y propan-2-ol, cuya respuesta dieléctrica en el rango de microondas es conocida. Estas sustancias permiten validar la precisión de los algoritmos implementados y de los sistemas experimentales al poder contrastar los resultados obtenidos con la sonda SMA y con la sonda Slim frente a los valores teóricos.
- **Soluciones salinas:** Se analiza la respuesta dieléctrica de soluciones con distintas concentraciones de sales disueltas, representativas de materiales con conductividad iónica significativa. Este grupo permite evaluar la capacidad del sistema para manejar materiales con respuestas complejas y pérdidas altas a bajas frecuencias.
- **Tejidos biológicos:** Se miden materiales biológicos caracterizados por su respuesta dieléctrica dispersiva y heterogénea. Este análisis resulta clave para validar la aplicabilidad del sistema experimental en contextos biomédicos.

Cada uno de estos tipos de materiales fue evaluado a través de los modelos de medida implementados (capacitivo, de radiación y de línea virtual), que permiten interpretar el coeficiente de reflexión S_{11} obtenido en la interfaz entre la sonda y la muestra en términos de la permitividad compleja.

La tabla 3 agrupa las principales medidas realizadas y proporciona una visión clara de los resultados obtenidos.

Tabla 3. Clasificación y medidas realizadas por tipo de material

Tipo de material	Materiales medidos	Sonda (VNA)	Rango de frecuencias (GHz)	Procesamiento de Datos	Comparación teórica
Líquidos polares	Metanol Etanol Acetona Propan-1-ol Propan-2-ol	Slim probe (P9374B)	0.01 - 15	Keysight Suite App de Python (3 modelos)	Sí
		SMA#1 probe (P9374B)	0.01 - 15	App de Python (3 modelos)	
		SMA#1, SMA#2, SMA#3 probes (picoVNA) (*)	0.01 - 6		
Soluciones Salinas	Diferentes concentraciones	Slim probe (P9374B)	0.01 - 15	Keysight Suite App de Python (Capacitivo)	
		SMA#1 probe (P9374B)		App de Python (Capacitivo)	
Tejidos Biológicos (**)	Clara de huevo Yema de huevo Hígado de cerdo Músculo de cerdo Piel de cerdo Grasa de cerdo	Slim probe (P9371A)	0.01 - 6.5	Keysight Suite App de Python (3 modelos)	
		SMA#1 probe (picoVNA)	0.01 - 6	App de Python (3 modelos)	

(*) Medidas de reproducibilidad con tres sondas SMA fabricadas de la misma manera.

(**) En tejidos biológicos se realizaron medidas en tres puntos distintos de cada una de las muestras y el resultado final se obtuvo como promedio de las tres medidas.

5.1 LÍQUIDOS DE REFERENCIA POLARES

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos al medir la permitividad compleja de líquidos polares de referencia como etanol, metanol, acetona, propan-1-ol y propan-2-ol. Las medidas de los parámetros S_{11} se llevaron a cabo con la sonda SMA de bajo coste y la sonda Slim-Probe (SP) de Keysight, procesando los datos mediante los tres modelos de cálculo implementados en Python y comparándolos con los valores teóricos y con los resultados obtenidos mediante el software propietario de la Slim Probe, cuyo modelo subyacente no es del todo conocido.

Estos líquidos fueron seleccionados debido a sus propiedades dieléctricas bien documentadas y su comportamiento estable en el rango de microondas. La finalidad de estas pruebas es verificar la precisión del sistema experimental y analizar cómo responden los distintos modelos de medida implementados en el cálculo de la permitividad compleja de materiales con propiedades dipolares en función de la frecuencia. Los resultados obtenidos para cada líquido se recogen en la Figura 27 y se presentan en forma de gráficos de la parte real e imaginaria de la permitividad, a lo largo del rango de frecuencias estudiado. En la Figura 28 se presentan los errores asociados a los resultados de la Figura 27.

Como hemos comentado en el apartado 2.3.2., hemos utilizado líquidos que están documentados en la literatura como líquidos de referencia/trazables. Por lo que haremos la comparación de estos con las medidas de la sonda SMA con los tres algoritmos implementados en la aplicación DEMO (curvas rosa, azul y verde), los valores teóricos de la literatura (curva negra) y los valores medidos con la sonda comercial de Keysight (curva gris discontinua).

Las medidas se realizaron con el VNA P9374B Keysight entre 10 MHz y 15 GHz. Antes de conectar las sondas, se llevaron a cabo las calibraciones SOL para sendos puertos. Una vez conectadas las sondas (sonda SMA al puerto 1 y sonda comercial al puerto 2), se procedió a medir los parámetros S_{11} de los estándares cortocircuito, aire y agua (a temperatura de 23 °C) y de los líquidos polares mencionados. La suite de medida de Keysight realiza algunas operaciones automáticas sobre la calibración del puerto una vez se ha conectado su sonda (básicamente, una extensión de puerto) y, además de proporcionar el valor de la permitividad, también permite guardar los parámetros S que ha usado.

En las Figura 27 y Figura 28 sólo se muestran los resultados hasta 10 GHz porque más allá de esa frecuencia la sonda SMA no da buenos resultados. Se puede observar que el modelo capacitivo y el de línea virtual arrojan valores muy similares en todos los casos hasta 2.5 GHz. Por encima de esta frecuencia, el modelo capacitivo aplicado a la sonda SMA subestima la parte imaginaria de la permitividad, llegando incluso a dar valores negativos.

En la Figura 27(a) muestra el caso del etanol. La parte real muestra una ligera discrepancia entre los valores experimentales y teóricos, especialmente a frecuencias bajas. Este comportamiento puede deberse a variaciones en la calidad de la muestra. Sin embargo, la sonda SMA y la comercial muestran resultados similares. La parte

imaginaria, en cambio, muestra que el modelo de radiación es el más preciso, destacándose a frecuencias superiores a 5 GHz.

En todos los casos, se observa que el modelo de radiación es el que arroja valores más cercanos a los esperados hasta 10 GHz, con un error en torno al 10 % (del valor del módulo de la permitividad), similar al error estimado para la sonda comercial, en consonancia con la información del fabricante.

Cabe destacar que tanto la sonda SMA como la sonda comercial presentan dificultades en la estimación de la parte imaginaria en el caso de la acetona, que exhibe valores muy pequeños. Y además podemos observar de las gráficas que, por debajo de los 500 MHz, la sonda comercial con su suite de medida no es confiable, confirmando las especificaciones del fabricante.

Para explorar la idoneidad de los tres modelos implementados prescindiendo de las limitaciones de la sonda SMA, se procedió a procesar los parámetros S_{11} medidos con la sonda de Keysight usando el modo DEMO de la aplicación desarrollada en Python. Al seleccionar en la aplicación la sonda “Slim Probe”, los algoritmos tienen en cuenta las dimensiones de esta sonda, que se asume equivalente a un cable coaxial RG-405 ($\varnothing_i = 0.57$ mm, $\varnothing_o = 1.68$ mm) [Mea16]. El resultado de este procesado se muestra en la Figura 29 y se comparan con los valores referenciados en [Gre12] para los líquidos considerados. En línea discontinua se incluyen los resultados obtenidos con el software de la sonda Slim-Probe, basados en los mismos parámetros S_{11} .

Se observa que, en general, el modelo capacitivo es el que mejor se ajusta a los resultados de la suite de la sonda y que el modelo de radiación es el que peor se ajusta. Por otro lado, para frecuencias bajas, por debajo de 0.5 GHz, (y dejando aparte el caso del etanol) el procesado de los parámetros S_{11} con nuestra aplicación arroja resultados de la parte real de la permitividad compleja más parecidos a los teóricos que la suite de medida de la sonda. En general, se aprecia que los tres modelos parecen idóneos para procesar los datos de una sonda con las dimensiones y calidad de la Slim Probe. hasta los 15 GHz.

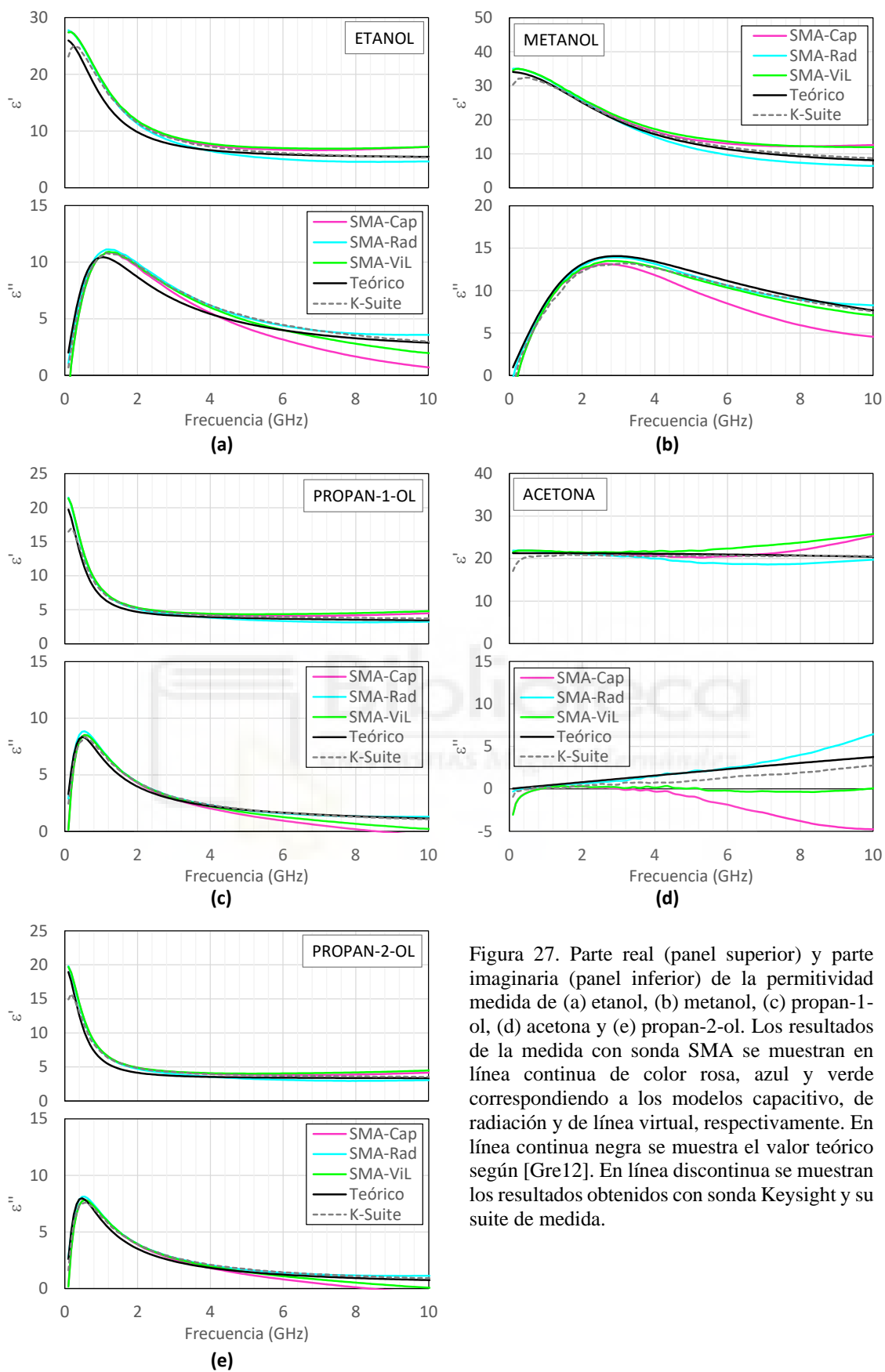


Figura 27. Parte real (panel superior) y parte imaginaria (panel inferior) de la permitividad medida de (a) etanol, (b) metanol, (c) propan-1-ol, (d) acetona y (e) propan-2-ol. Los resultados de la medida con sonda SMA se muestran en línea continua de color rosa, azul y verde correspondiendo a los modelos capacitivo, de radiación y de línea virtual, respectivamente. En línea continua negra se muestra el valor teórico según [Gre12]. En línea discontinua se muestran los resultados obtenidos con sonda Keysight y su suite de medida.

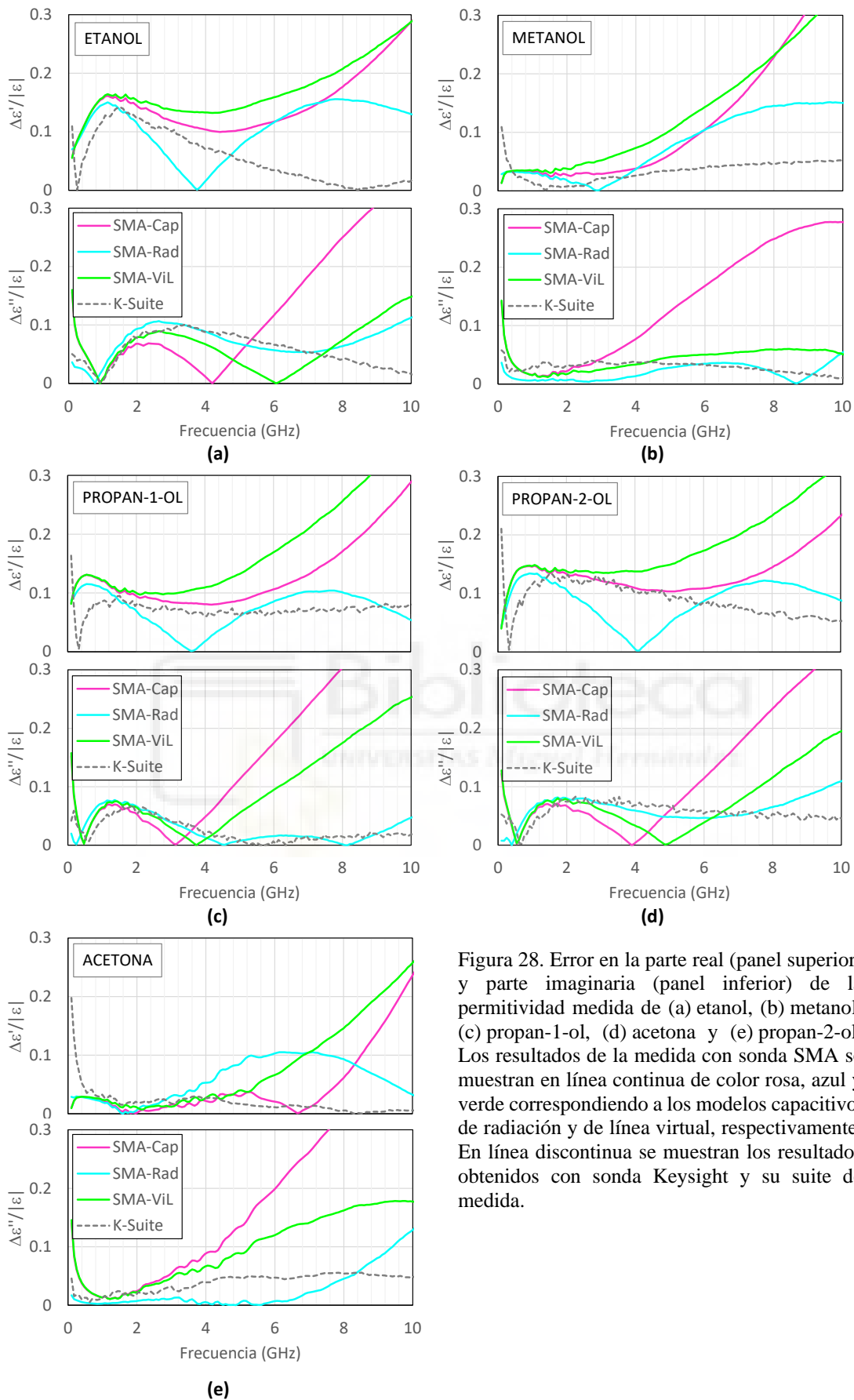


Figura 28. Error en la parte real (panel superior) y parte imaginaria (panel inferior) de la permitividad medida de (a) etanol, (b) metanol, (c) propan-1-ol, (d) acetona y (e) propan-2-ol. Los resultados de la medida con sonda SMA se muestran en línea continua de color rosa, azul y verde correspondiendo a los modelos capacitivo, de radiación y de línea virtual, respectivamente. En línea discontinua se muestran los resultados obtenidos con sonda Keysight y su suite de medida.

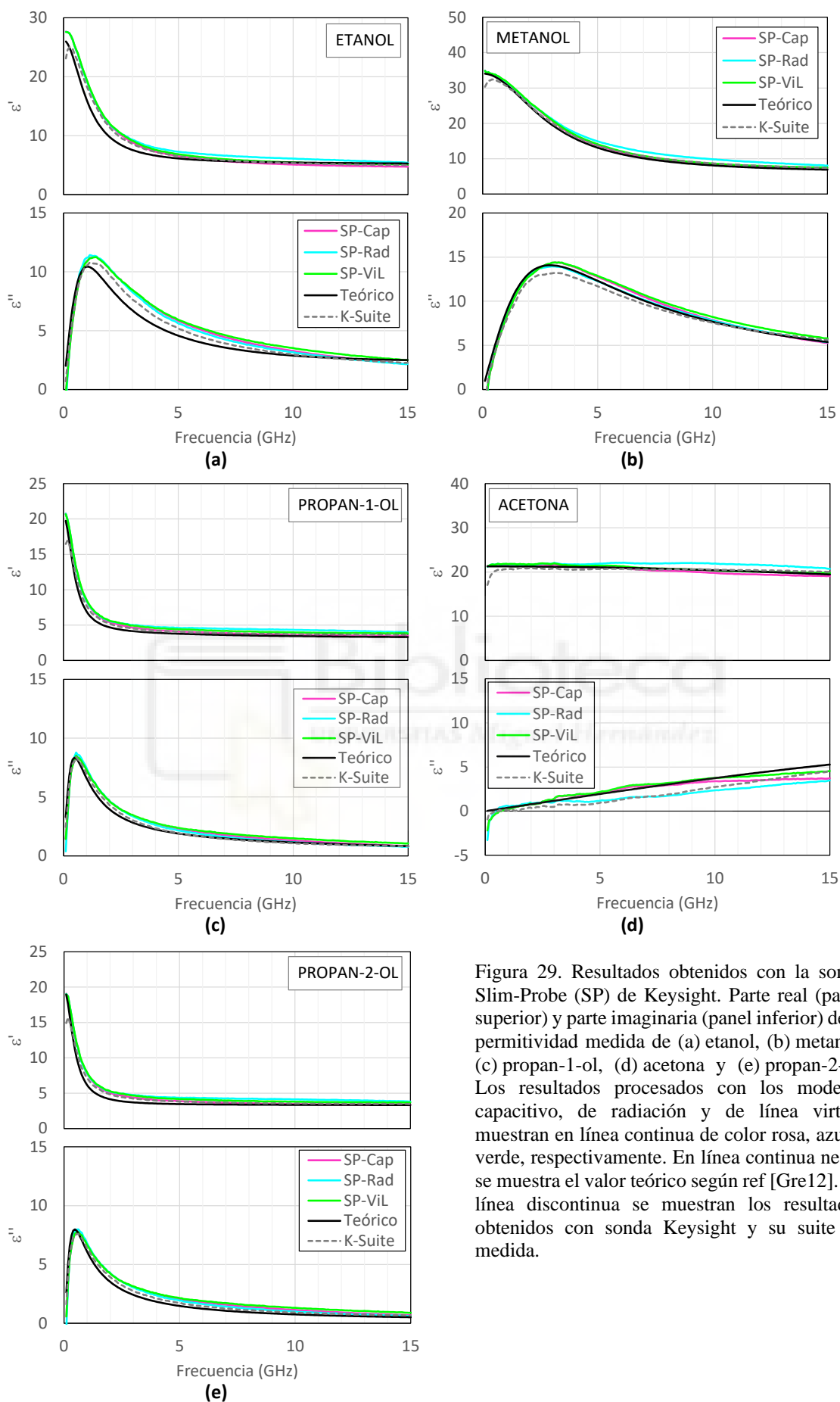


Figura 29. Resultados obtenidos con la sonda Slim-Probe (SP) de Keysight. Parte real (panel superior) y parte imaginaria (panel inferior) de la permitividad medida de (a) etanol, (b) metanol, (c) propan-1-ol, (d) acetona y (e) propan-2-ol. Los resultados procesados con los modelos capacitivo, de radiación y de línea virtual muestran en línea continua de color rosa, azul y verde, respectivamente. En línea continua negra se muestra el valor teórico según ref [Gre12]. En línea discontinua se muestran los resultados obtenidos con sonda Keysight y su suite de medida.

5.2 SOLUCIONES SALINAS

En esta sección, se presentan los resultados de las medidas de permitividad compleja realizadas en soluciones acuosas de cloruro sódico (NaCl) de diferentes concentraciones. Las soluciones salinas son materiales de referencia fundamentales en la caracterización dieléctrica debido a su comportamiento bien definido y a su fuerte dependencia de la concentración iónica, lo cual afecta tanto a la permitividad como la conductividad en el rango de microondas. Estas propiedades los convierten en un excelente banco de pruebas para evaluar la precisión y sensibilidad del sistema de bajo coste (sonda SMA) en comparación con la sonda comercial.

Las medidas se realizaron en el rango de frecuencias de 10 MHz a 15 GHz, utilizando el VNA Keysight P9374B para ambas sondas, de la misma forma que en la sección 2.1. Para el procesamiento de los parámetros S medidos con la sonda Keysight Slim Probe se utilizaron dos procedimientos: el software dedicado (Measurement Suite) y el modelo capacitivo de la aplicación de Python en modo DEMO. Los parámetros S medidos con la sonda SMA de bajo coste fueron procesados únicamente mediante el modelo capacitivo aplicación de Python.

En las gráficas correspondientes a la Figura 30 (parte superior), se observa que la permitividad estática (ϵ') disminuye con el aumento de la concentración de NaCl, mientras que la parte imaginaria (ϵ'') crece debido a la mayor conductividad iónica. El impacto de los iones disueltos en la permitividad dieléctrica del agua no solo afecta, pues, a la parte imaginaria asociada a pérdidas, sino también a la parte real debido a varios mecanismos. Al disolver NaCl en agua, los iones sodio (Na^+) y cloro (Cl^-) interactúan con las moléculas de agua circundantes, formando lo que se conoce como "capas de hidratación". Estas capas restringen parcialmente el movimiento de las moléculas de agua, reduciendo su capacidad para alinearse con el campo eléctrico. Como resultado, la polarización orientacional, que contribuye significativamente a la parte real de la permitividad (ϵ'), disminuye, especialmente a bajas frecuencias.

Entre los principales, está la interacción entre los campos eléctricos generados por los iones y las moléculas de agua, que influye en la orientación y polarización de los dipolos de agua en el campo externo aplicado. Este fenómeno se refleja en estudios teóricos y experimentales que demuestran cómo el aumento de la concentración de iones reduce la capacidad dieléctrica efectiva del medio. [Gav16], [Buc99].

Por otro lado, los iones disueltos aumentan la conductividad eléctrica de la solución, lo que se refleja en un incremento en la parte imaginaria de la permitividad (ϵ''). Esto está directamente relacionado con las pérdidas energéticas debidas a la conducción iónica.

Los resultados procesados con el modelo capacitivo aplicado a la sonda comercial coinciden plenamente con los obtenidos usando el software de Keysight, validando de nuevo la implementación del algoritmo capacitivo. Sin embargo, con la sonda SMA, se detecta una superposición de las curvas para las diferentes concentraciones a frecuencias superiores a 10 GHz. Esto sugiere limitaciones en la resolución del sistema de bajo coste para identificar cambios dieléctricos en este rango de frecuencias.

Las soluciones acuosas de cloruro de sodio pueden ser descritas por la ecuación empírica de Cole-Cole, extendida con el término de conductividad iónica (2.10). Se han ajustado los resultados de la Figura 31 a esta expresión para comprobar el comportamiento. Como se puede observar, la permitividad relativa en estática y el tiempo de relajación se reducen al aumentar la concentración de NaCl. No así el parámetro ϵ_∞ , que permanece constante al valor del agua pura. Se comprueba que la conductividad iónica aumenta casi linealmente con la concentración de sal.

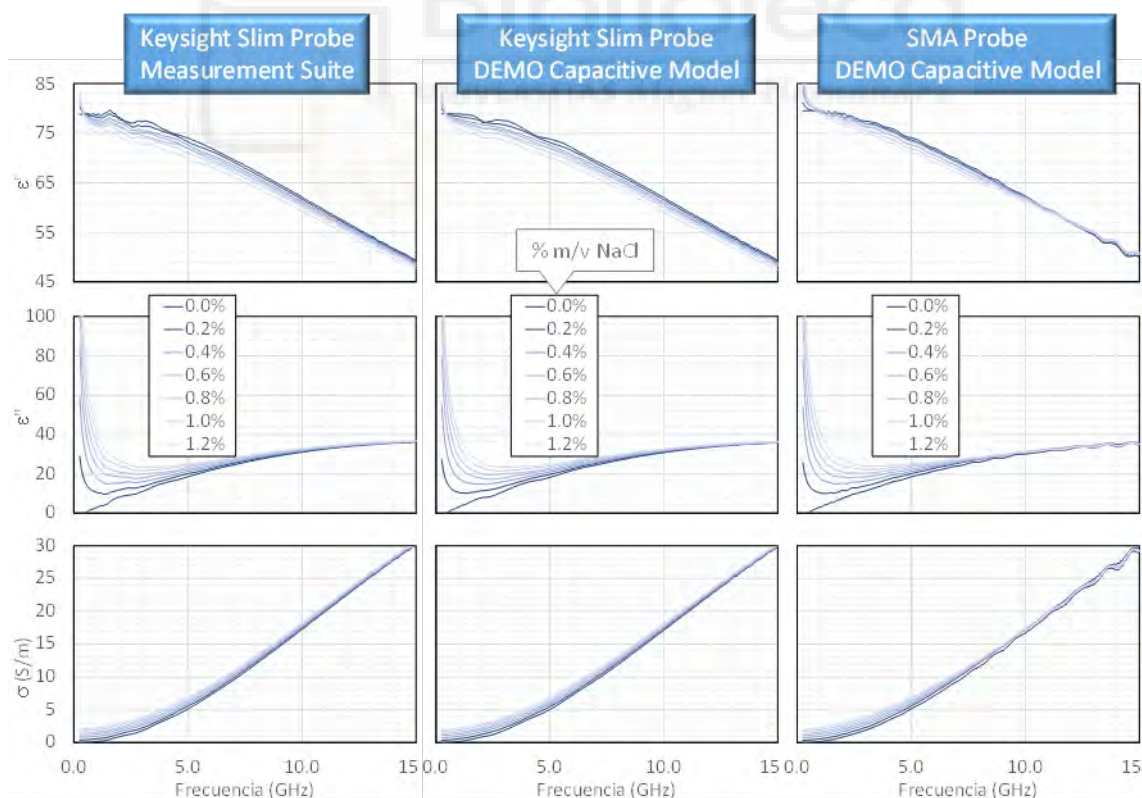


Figura 30. Variación de ϵ' (arriba), ϵ'' (medio) y σ (abajo) en función de la frecuencia para distintas concentraciones de NaCl (% m/v). Comparativa entre los resultados de la sonda comercial con su software dedicado (Slim Probe – Measurement Suite), la sonda comercial con la versión DEMO de este proyecto (Slim Probe- DEMO Capacitive Model) y la sonda de bajo coste (SMA Probe- DEMO Capacitive Model)

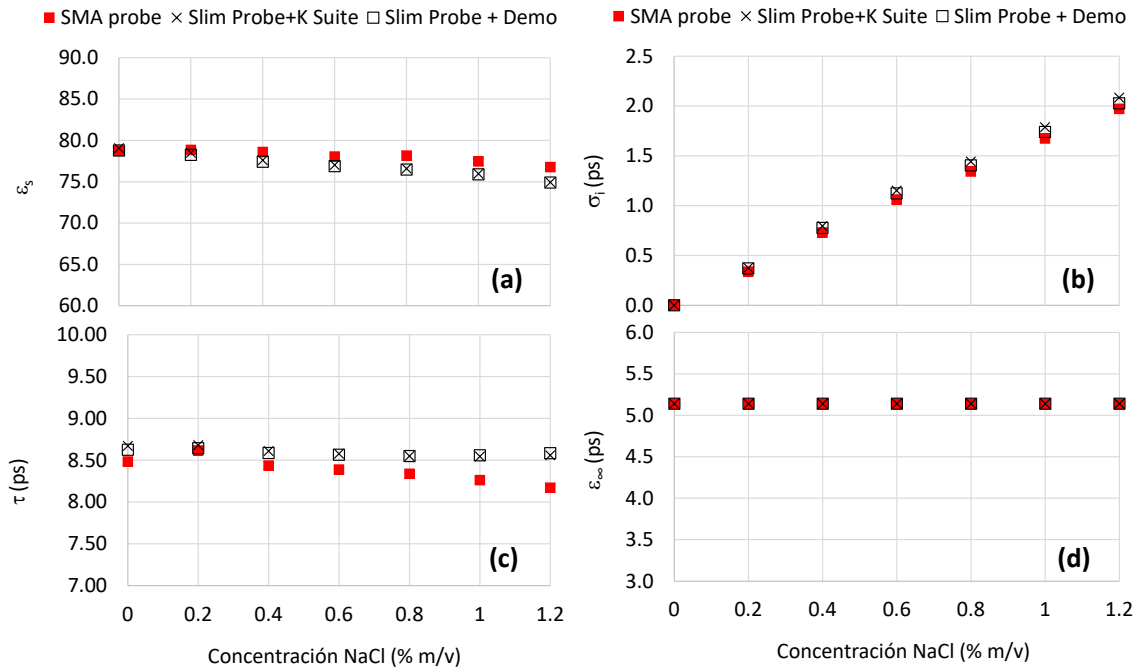


Figura 31. Evolución de los parámetros ajustados a la ecuación de Cole-Cole extendida: (a) ϵ_s , (b) σ_1 , (c) τ , y (d) ϵ_∞ , en función de la concentración de NaCl. Se incluye la comparación entre las sondas Slim Probe y SMA.

5.3 TEJIDOS BIOLÓGICOS

Este apartado analiza los resultados obtenidos al medir la permitividad compleja de diversos tejidos biológicos. Los tejidos biológicos presentan un desafío particular en la caracterización dieléctrica debido a su naturaleza heterogénea, su alto contenido en agua y su sensibilidad a factores como la frecuencia y la temperatura. Estos factores influyen en los mecanismos de polarización y en la conductividad iónica, haciendo que la respuesta dieléctrica de los tejidos varíe significativamente en el rango de microondas.

Para evaluar la efectividad del sistema de bajo coste en comparación con el sistema comercial de Keysight, se aplican nuevamente los tres modelos de medida (capacitivo, de radiación y de línea virtual), analizando cómo cada uno se ajusta a la respuesta compleja de los tejidos. El análisis busca determinar la capacidad de estos modelos para capturar con precisión las propiedades dieléctricas de los tejidos, teniendo en cuenta la variabilidad y las dispersiones características en este tipo de materiales.

Este estudio en tejidos biológicos permite validar el desempeño del sistema experimental en condiciones representativas de aplicaciones biomédicas. Los resultados obtenidos aquí son útiles para entender hasta qué punto el sistema y los modelos aplicados pueden ofrecer una alternativa viable y económica en el estudio de materiales biológicos.

Se realizaron medidas en varios tejidos de origen animal adquiridas en el supermercado. Concretamente se ha medido clara y yema de huevo y varios tejidos porcinos (hígado, piel, lomo y tocino). Para cada una de las muestras y para cada uno de los sistemas, se midió en tres puntos diferentes, presionando ligeramente la sonda contra la superficie de la muestra para asegurar un buen contacto, en la medida de lo posible, libre de gaps de aire. Se aporta también la permitividad de los tejidos humanos homólogos, extraídos de la base de datos de la IT'IS Foundation [Itis].

Las medidas con sonda SMA se llevaron a cabo usando en picoVNA 106 desde 10 MHz hasta 6 GHz. Las medidas con sonda comercial se llevaron a cabo usando el VNA P9374B Keysight desde 10 MHz hasta 6.5 GHz.

Como podemos ver en la Figura 32, los resultados coinciden cualitativamente con los valores de tejidos humanos. Si consideramos las medidas del sistema comercial como referencia, los resultados reflejados en la Figura 32 indican que el modelo de radiación resulta especialmente idóneo para estimar la parte imaginaria de la permitividad, con excepción de la clara de huevo (que es justamente el tejido que mayor permitividad presenta de todos los analizados). En este tejido, son los resultados del modelo capacitivo y de línea virtual los que más se asemejan a los resultados de la sonda comercial.

La precisión de las medidas de permitividad está estrechamente vinculada a la calidad del contacto entre la sonda coaxial y la muestra. Cualquier espacio de aire o imperfección en la interfaz produce una interferencia en el coeficiente de reflexión, lo que introduce errores sistemáticos en los valores de permitividad compleja calculados. Este problema es particularmente notable cuando se mide sobre materiales con superficies rugosas o muestras no homogéneas, donde se recomienda ejercer una ligera presión para optimizar el contacto o considerar el promedio de múltiples medidas en diferentes puntos de la muestra. En la Figura 33 se recogen la dispersión espacial de los resultados de las medidas en tejidos biológicos con respecto al promedio de las tres medidas realizadas para cada uno de ellos. Cabe destacar que, en el caso de la piel de cerdo, las medidas con sonda SMA presentan una dispersión espacial mayor del 15 %. Esto es debido a la dificultad para contactar de manera uniforme la muestra por ser ésta menos blanda que las demás. El valor promedio medido para este tejido es sensiblemente menor al medido por la sonda comercial (Figura 32(d)), posiblemente debido a espacios de aire entre la apertura de la sonda y la piel. En los demás casos, la sonda SMA presenta una dispersión comparable a la sonda comercial o incluso mejor.

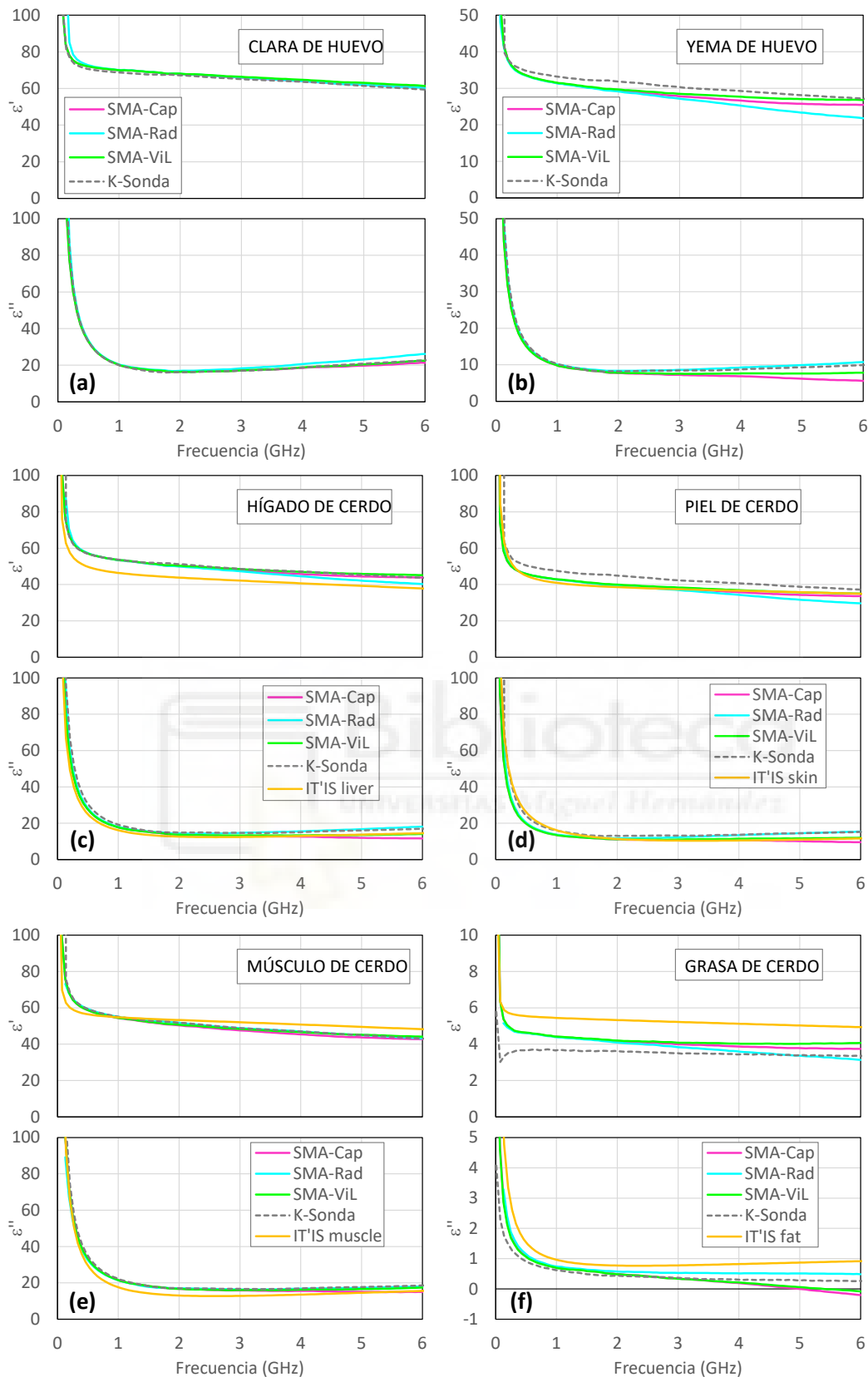


Figura 32. Parte real (panel superior) y parte imaginaria (panel inferior) de la permitividad medida de (a) clara y (b) yema de huevo, (c) hígado, (d) piel, (e) lomo y (f) tocino de cerdo. Los resultados de la medida con sonda SMA se muestran en línea continua de color rosa, azul y verde correspondiendo a los modelos capacitivo, de radiación y de línea virtual, respectivamente. En línea discontinua se muestran los resultados obtenidos con sonda Keysight y su suite de medida. En línea continua naranja se muestra el valor recogido en la base de datos de IT'IS Foundation para los tejidos homólogos humanos [Itis].

DEPENDENCIA DEL PUNTO DE CONTACTO EN LA MUESTRA

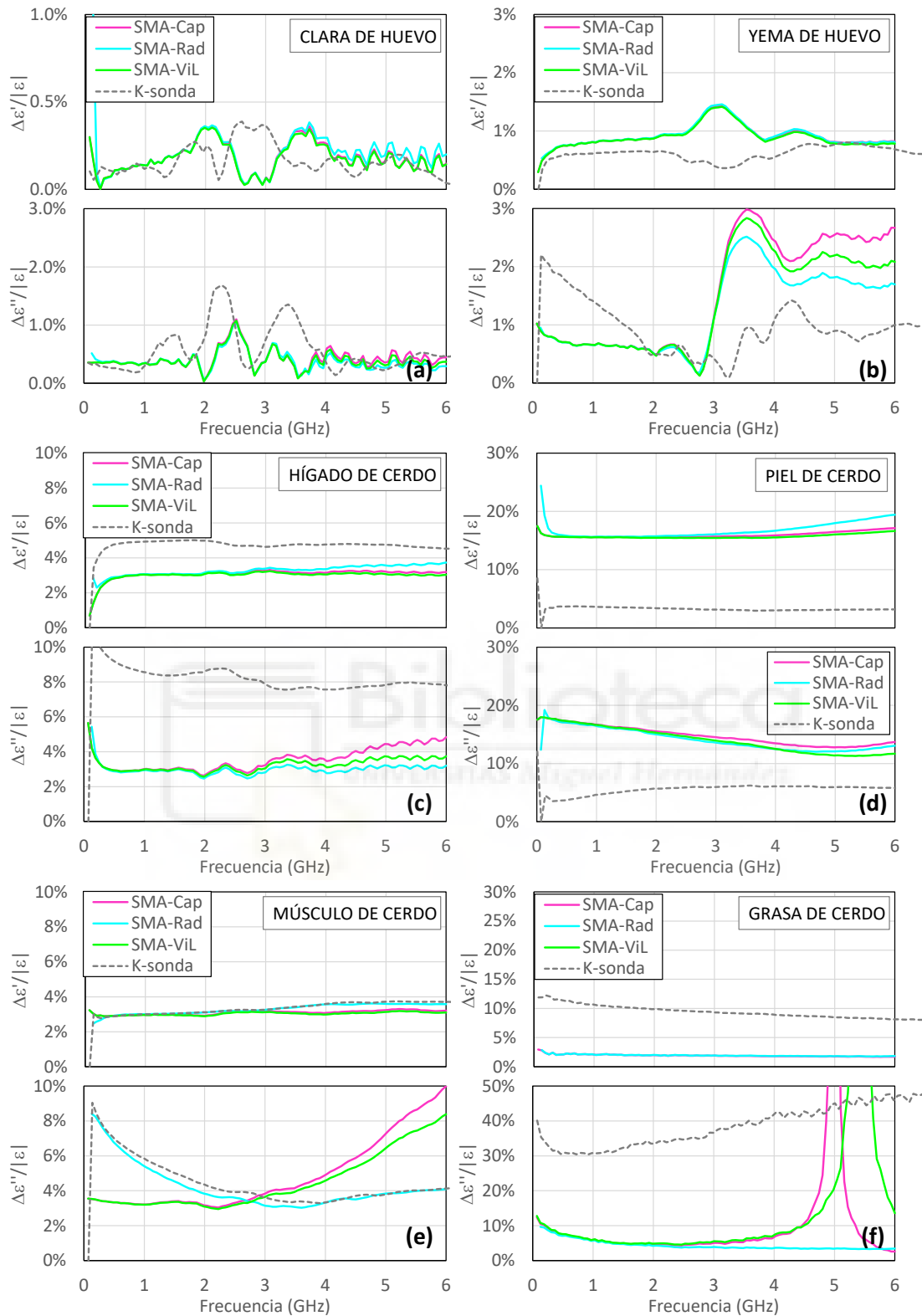


Figura 33. Dispersión espacial de la parte real (panel superior) y parte imaginaria (panel inferior) de la permitividad medida de (a) clara y (b) yema de huevo, (c) hígado, (d) piel, (e) lomo y (f) tocino de cerdo. Los resultados de la medida con sonda SMA se muestran en línea continua de color rosa, azul y verde correspondiendo a los modelos capacitivo, de radiación y de línea virtual, respectivamente. En línea discontinua se muestran los resultados obtenidos con sonda Keysight y su suite de medida.

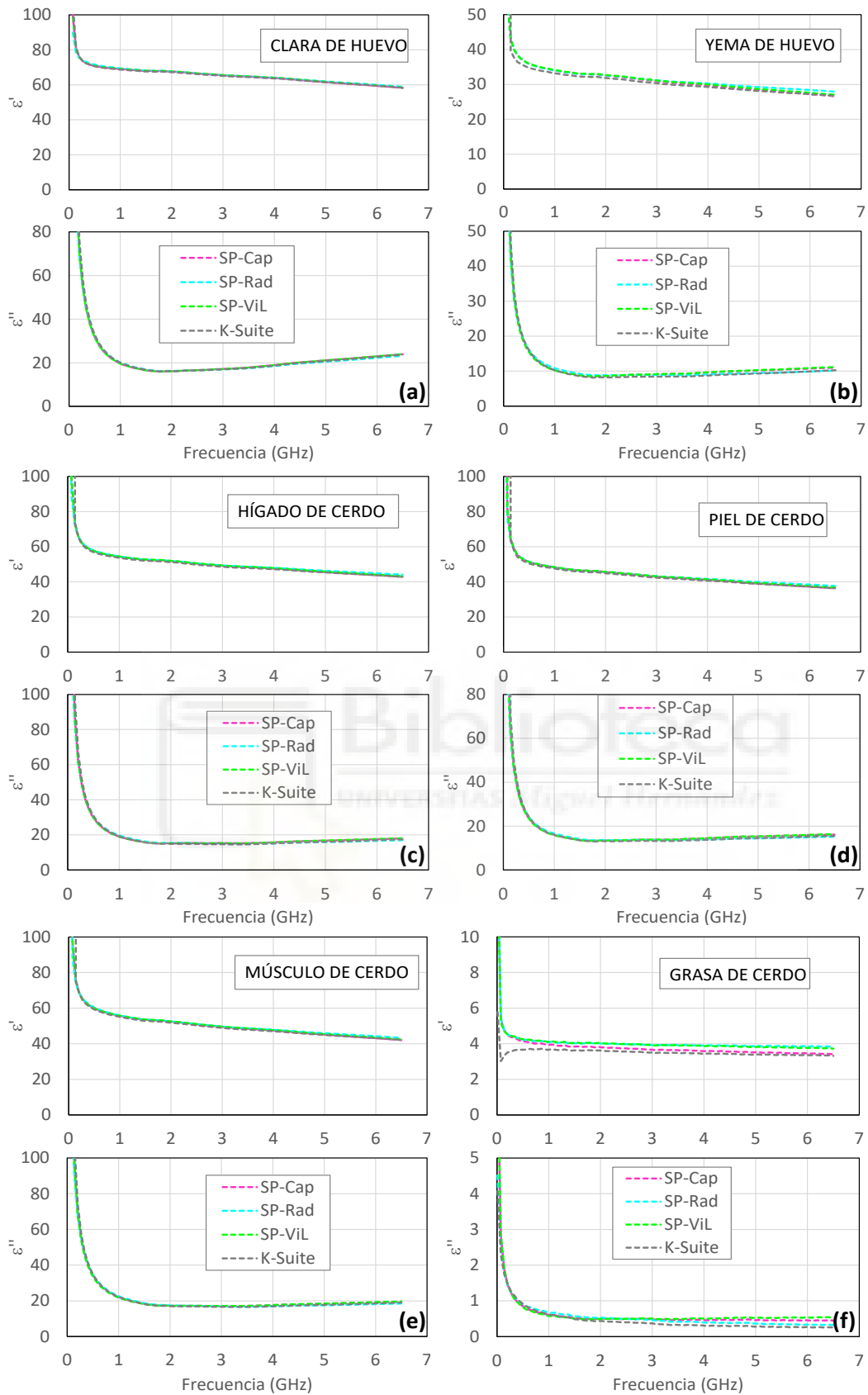


Figura 34. Resultados obtenidos con la sonda Slim-Probe (SP) de Keysight. Parte real (panel superior) y parte imaginaria (panel inferior) de la permitividad medida de (a) clara y (b) yema de huevo, (c) hígado, (d) piel, (e) lomo y (f) tocino de cerdo. Los resultados procesados con los modelos capacitivo, de radiación y de línea virtual se muestran en línea continua de color rosa, azul y verde, respectivamente. En línea discontinua se muestran los resultados obtenidos con sonda Keysight y su suite de medida.

Nuevamente, para explorar la idoneidad de los tres modelos implementados independientemente de las limitaciones de la sonda SMA, se procedió a procesar los parámetros S_{11} medidos de los tejidos biológicos con la sonda de Keysight usando el modo DEMO de la aplicación desarrollada en Python. El resultado de este procesado se muestra en la Figura 34 y se comparan con los resultados obtenidos con el software de la sonda Slim-Probe, basados en los mismos parámetros S_{11} .

Dejando aparte el caso de la grasa de cerdo, se observa que el procesado de los parámetros S_{11} mediante los tres algoritmos de Python y el procesado de la suite de medida de Keysight son prácticamente equivalentes hasta 15 GHz. En el caso de la grasa de cerdo, estamos ante un tejido que presenta un especial desafío para este tipo de sonda, por lo baja que es su permitividad.

5.4 REPRODUCIBILIDAD

Con el objetivo de evaluar la reproducibilidad de las medidas obtenidas mediante el sistema experimental, se fabricaron tres sondas SMA de bajo coste y se llevaron a cabo medidas de permitividad compleja sobre líquidos polares de referencia (etanol, metanol, propan-2-ol y acetona) en las mismas condiciones experimentales. Este análisis se centró en determinar la variabilidad de los resultados proporcionados por cada sonda y su relación con los modelos utilizados: capacitivo, de radiación y de línea virtual.

A partir de los parámetros S medidos con cada sonda, para cada modelo, se obtuvo la parte real (ϵ') y la parte imaginaria (ϵ'') de la permitividad compleja en el rango de frecuencias de 0.1 a 6 GHz.

En las Figura 35 - Figura 37 se muestran los resultados obtenidos con las tres sondas. El análisis conjunto de los tres modelos revela que las sondas SMA fabricadas presentan un excelente comportamiento reproducible. La reproducibilidad se evaluó mediante la máxima desviación de los resultados individuales (δ'_i y δ''_i) respecto al valor promedio, normalizando esta desviación por el módulo del valor promedio complejo ($|\epsilon|$):

$$\frac{\Delta\epsilon'}{|\epsilon|} = \frac{\max(\delta'_1, \delta'_2, \delta'_3)}{|\epsilon|} ; \quad \frac{\Delta\epsilon''}{|\epsilon|} = \frac{\max(\delta''_1, \delta''_2, \delta''_3)}{|\epsilon|}$$

donde $\langle\epsilon'\rangle = \frac{1}{3}(\epsilon'_1 + \epsilon'_2 + \epsilon'_3)$, $\langle\epsilon''\rangle = \frac{1}{3}(\epsilon''_1 + \epsilon''_2 + \epsilon''_3)$, $|\epsilon| = \sqrt{\langle\epsilon'\rangle^2 + \langle\epsilon''\rangle^2}$,

$\delta'_i = |\epsilon'_i - \langle\epsilon'\rangle|$ y $\delta''_i = |\epsilon''_i - \langle\epsilon''\rangle|$.

La Figura 38 presenta los resultados de este análisis para los cuatro líquidos de referencia seleccionados: etanol, metanol, propan-2-ol y acetona. Se observa que, en general, las desviaciones normalizadas son menores al 3% en todo el rango de frecuencias

hasta 6 GHz, lo que evidencia que las sondas SMA de bajo coste son capaces de proporcionar resultados reproducibles en condiciones experimentales similares, lo que permite garantizar resultados fiables para aplicaciones prácticas

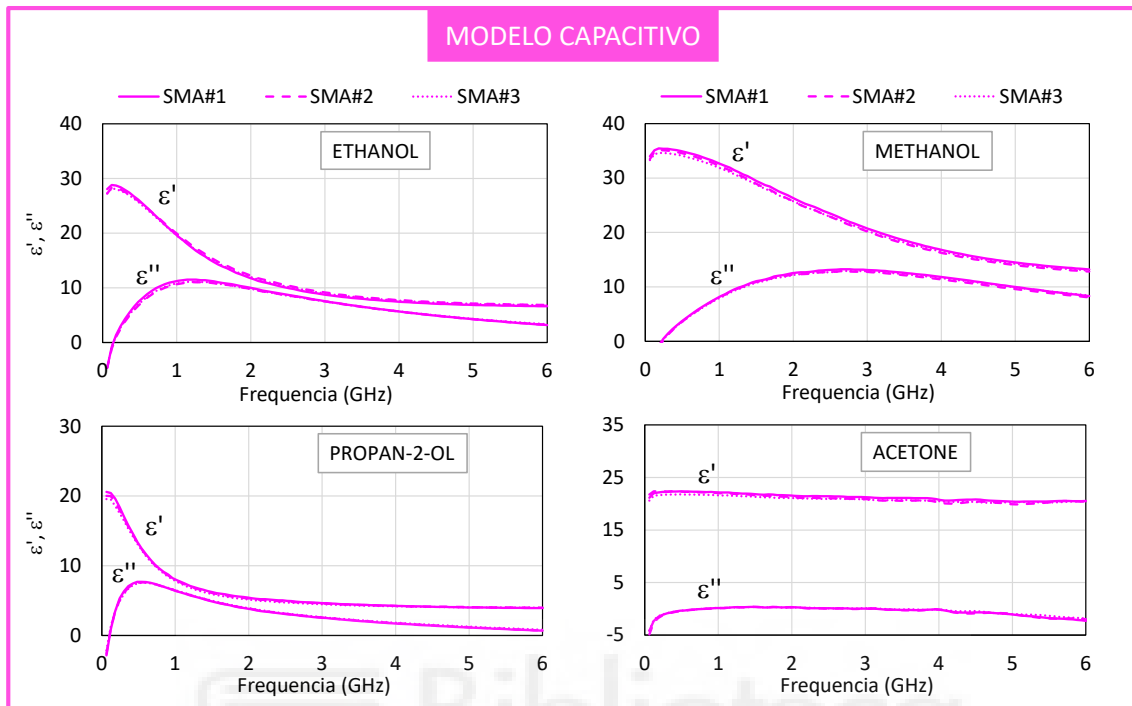


Figura 35. Comparación de los resultados de aplicar el modelo capacitivo a las medidas de las tres sondas SMA fabricadas para el etanol, metanol, propan-2-ol y acetona.

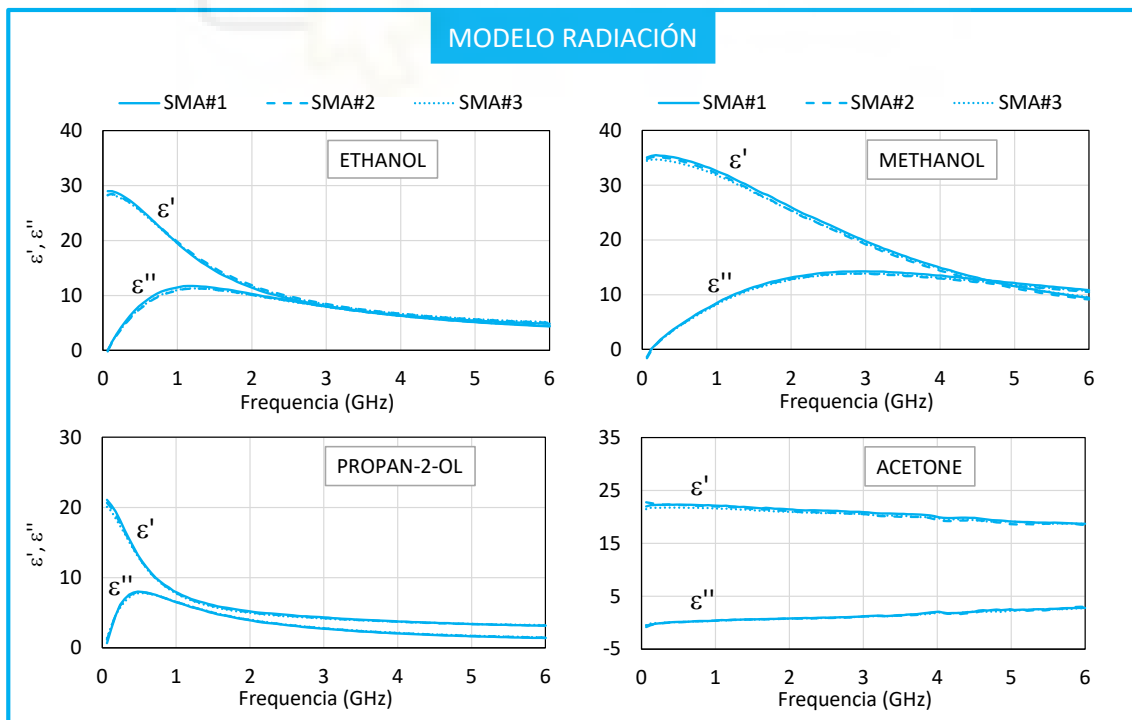


Figura 36. Comparación de los resultados de aplicar el modelo de radiación a las medidas de las tres sondas SMA fabricadas para el etanol, metanol, propan-2-ol y acetona.

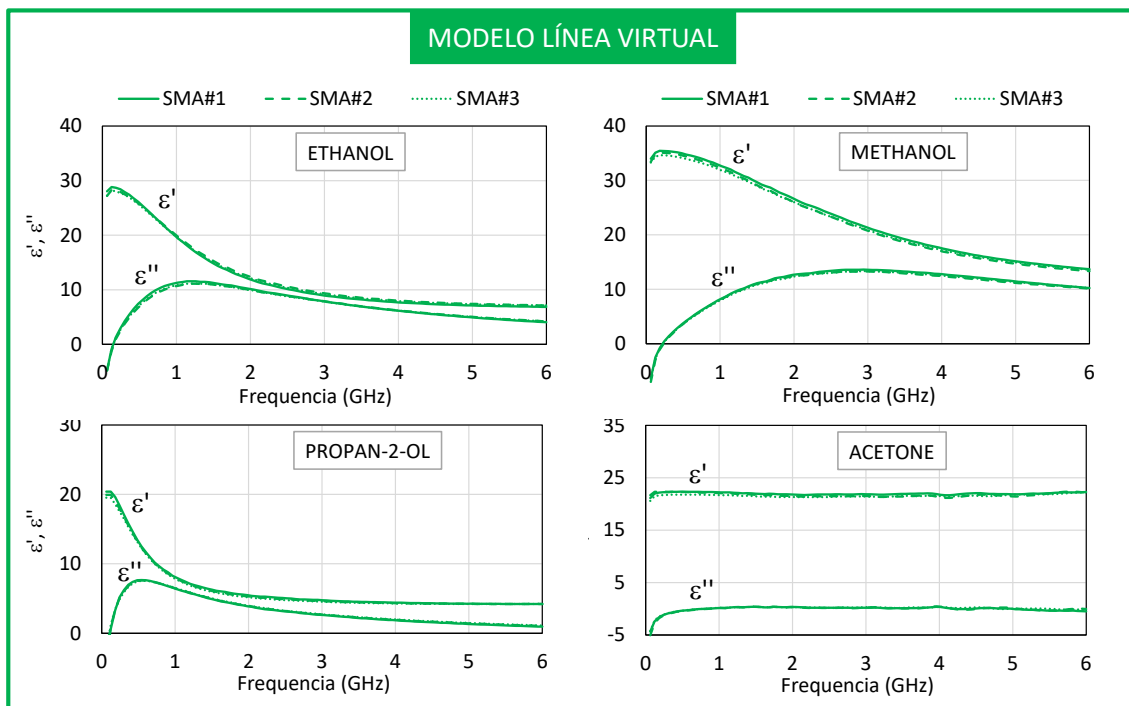


Figura 37. Comparación de los resultados de aplicar el modelo de línea virtual a las medidas de las tres sondas SMA fabricadas para el etanol, metanol, propan-2-ol y acetona.

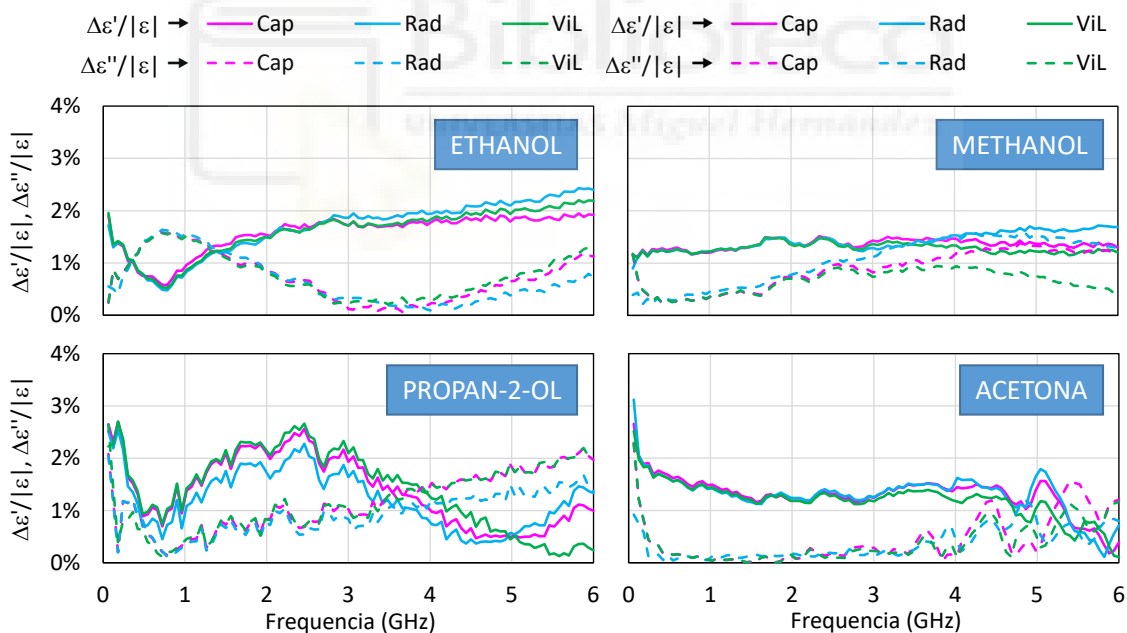


Figura 38. Reproducibilidad de las medidas de permitividad compleja para diferentes líquidos de referencia (etanol, metanol, propan-2-ol y acetona) obtenidas con tres sondas SMA de bajo coste. La gráfica muestra la máxima desviación normalizada ($\Delta\epsilon'/|\epsilon|$ y $\Delta\epsilon''/|\epsilon|$) respecto al valor promedio, representada en función de la frecuencia para los tres modelos empleados: capacitivo (Cap), de radiación (Rad) y de línea virtual (ViL). Las líneas continuas corresponden a ($\Delta\epsilon'/|\epsilon|$) y las líneas punteadas a la parte imaginaria ($\Delta\epsilon''/|\epsilon|$).

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Este trabajo representa un avance significativo en la validación y mejora de un sistema de bajo coste para la medida de la permitividad compleja en materiales líquidos, semisólidos y biológicos. Se ha demostrado que el sistema basado en una sonda SMA es una alternativa viable y económica frente a equipos comerciales de alto coste. Aunque presenta limitaciones en frecuencias altas y para materiales de baja permitividad, como la grasa, su rendimiento es comparable al de sondas comerciales hasta 10 GHz en aplicaciones específicas como tejidos biológicos y soluciones acuosas. Los tres modelos empleados (capacitivo, radiación y línea virtual) han mostrado ser efectivos dependiendo de la muestra y del rango de frecuencias, destacando el modelo de radiación para líquidos polares y tejidos.

Las medidas realizadas evidencian un margen de error bajo ($< 3\%$) en la reproducibilidad al trabajar con líquidos de referencia, lo que subraya la robustez del sistema experimental desarrollado. Sin embargo, la precisión de los modelos implementados para la sonda SMA muestra limitaciones frente a la Slim-Probe de Keysight en frecuencias superiores a 6 GHz, lo que apunta a oportunidades de mejora en el diseño de la sonda y en los algoritmos.

El desarrollo de la aplicación en Python, que incluye una interfaz gráfica intuitiva y un procesamiento de datos eficaz, ha sido clave para simplificar y optimizar la experiencia del usuario.

Las mejoras y líneas futuras que se proponen buscan optimizar el funcionamiento del sistema y ampliar sus aplicaciones. Entre ellas, cabría pensar en el rediseño de la sonda para reducir errores en frecuencias altas, por ejemplo, usando un cable rígido RG-405. Por otro lado, cabría mejorar la medida con SMA usando modelos de admitancia más convenientes a su geometría. En el software, se podría incorporar filtrado de datos

para eliminar anomalías. También sería interesante extender el soporte del software para modelos avanzados como Cole-Cole extendido o modelos multi-Debye para materiales heterogéneos, y dotar al programa de capacidad para el ajuste de datos.

Este TFG refleja la importancia de desarrollar herramientas económicas y efectivas que amplíen el acceso a tecnologías avanzadas de medida dieléctrica. El sistema SMA no solo valida su utilidad en entornos de investigación de bajo coste, sino que también sienta las bases para innovaciones futuras, contribuyendo al avance de campos como la ingeniería biomédica, las telecomunicaciones y la industria alimentaria. Aunque existen desafíos por resolver, las aportaciones realizadas abren un camino prometedor hacia el uso generalizado de sistemas de bajo coste en aplicaciones científicas y tecnológicas.



ANEXOS

A.1 GUÍA DE USUARIO DE LA APP

A.1.1 Instalación

En primer lugar, realizaremos la instalación de Python 3.10.2, a la hora de hacer esta ir a la página oficial, importante asegurarse de marcar la opción "Add Python to PATH" al inicio del instalador, ya que nos facilitará el uso de Python y pip desde la línea de comandos.

A continuación, vamos a instalar Visual Studio Code desde su página oficial. También descargaremos el SDK picoVNA 5 donde podremos encontrar las librerías necesarias para conectar el vna a nuestro PC, este lo podemos encontrar en el siguiente enlace: <https://github.com/picotech/picovna5-examples>.

Archivos necesarios de nuestro SDK para conectar nuestro ordenador con el vna:

- Windows: `_vna_python.pyd`, `vna.lib`, `vna_python.lib`, `vna.dll`, `ftd2xx.dll`, `vna.py`.
- Linux: `_vna_python.so`, `libvna.so` and `libftd2xx.so`
- macOS: `_vna_python.dylib`, `libvna.dylib` and `libftd2xx.dylib`

Estos archivos del SDK deberán ir dentro de la carpeta del proyecto donde está los archivos `.py` de Visual Studio Code.

Una vez instalado los dos programas principales abriremos Visual Studio Code, en el menú de la izquierda en extensiones como indicamos en la Figura 45, instalaremos la extensión de Python compatible con nuestra versión instalada previamente, en la Figura 46 vemos la extensión que hemos instalado.

El siguiente paso es realizar la comprobación de la librería pip que debería de haberse instalado de manera automática junto con Python. Para ello por terminal ejecutamos **pip --version** y nos debería de salir las versiones de pip instaladas, en el caso que no las tengamos instaladas podemos ejecutar por nuestro terminal **python -m ensurepip --upgrade** y debería de realizarse su instalación.

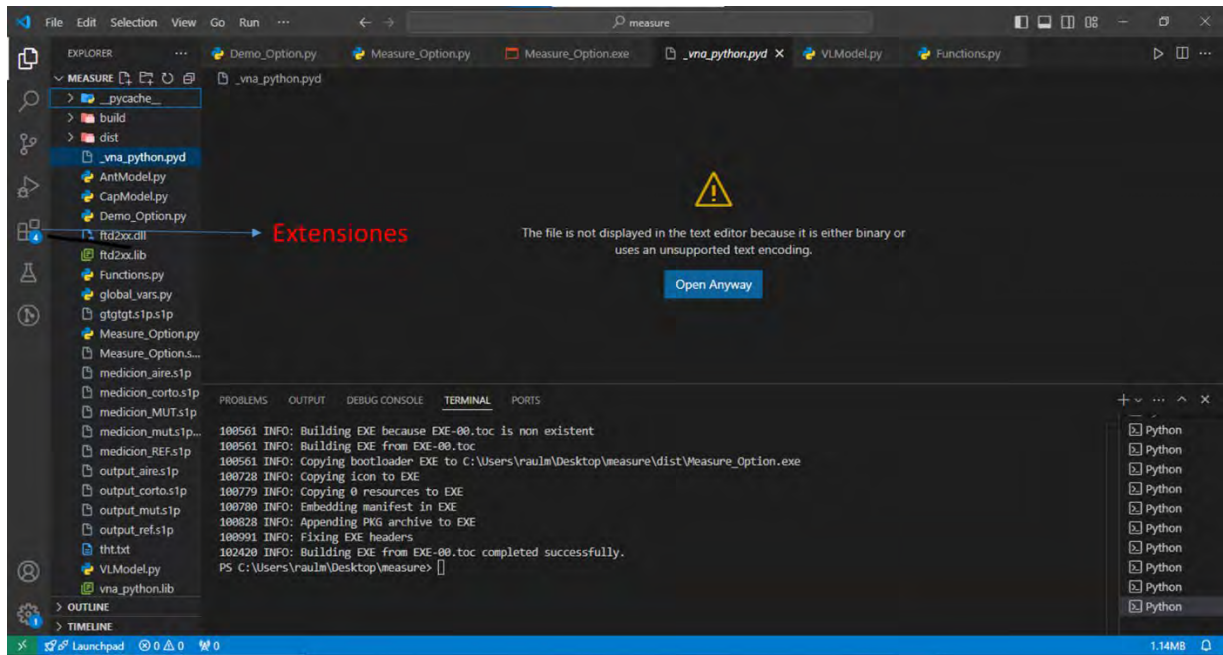


Figura 45: Visual Studio Code Instalación de extensiones

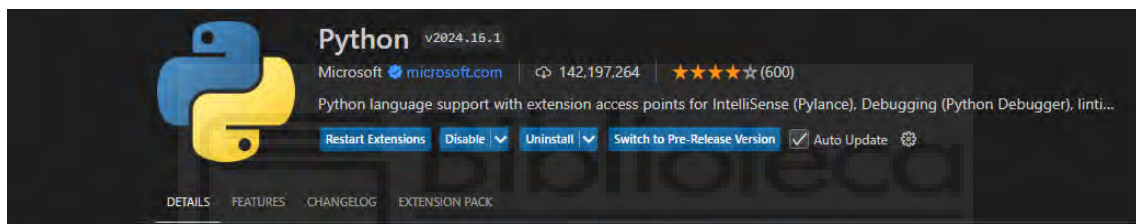


Figura 46: Extensión de Python en Visual Studio Code

Importante la comprobación de la librería pip(Python Index Package), ya que es un sistema de gestión de paquetes utilizado para instalar y administrar paquetes de software. Nosotros lo utilizaremos para instalar las librerías restantes desde solo una orden desde la terminal o CMD de la siguiente manera: `pip install nombre_paquete`

- Pip install numpy
- Pip install matplotlib
- Pip install scipy
- Pip install vna
- Pip install PysimpleGUI

Una vez instaladas todas las librerías es muy sencillo el funcionamiento de Visual Studio Code, para la creación de nuevo proyecto los pasos a seguir son los siguientes:

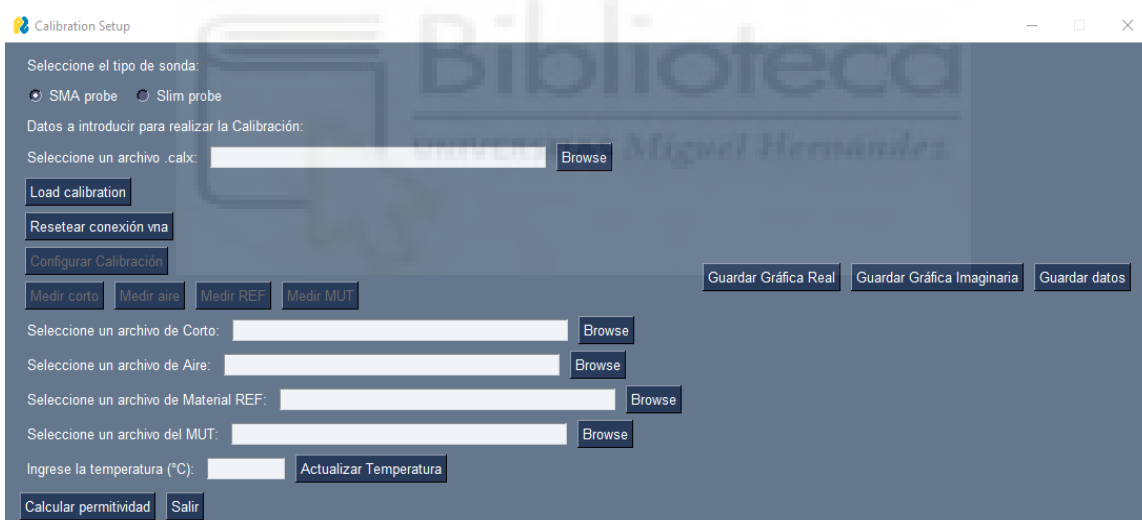
1. Abrir Visual Studio Code y, desde la pantalla de inicio, selecciona la opción "Abrir Carpeta" o "Open Folder".

2. Seleccionar la ubicación en la que deseas crear el proyecto. Esto suele hacerse eligiendo o creando una carpeta vacía que contendrá todos los archivos y recursos del proyecto.
3. Paso 3: Una vez abierta la carpeta, puedes comenzar a añadir archivos nuevos. En VS Code, puedes hacer clic derecho en la barra lateral izquierda y seleccionar "Nuevo archivo" o "New File" para crear un archivo de código, como main.py para Python o index.html para proyectos web.

Para abrir un proyecto existente simplemente con darle a FILE y después darle a Open Folder podremos seleccionar la carpeta que queramos y nos abrirá automáticamente nuestro proyecto.

A.1.2 Manual de usuario

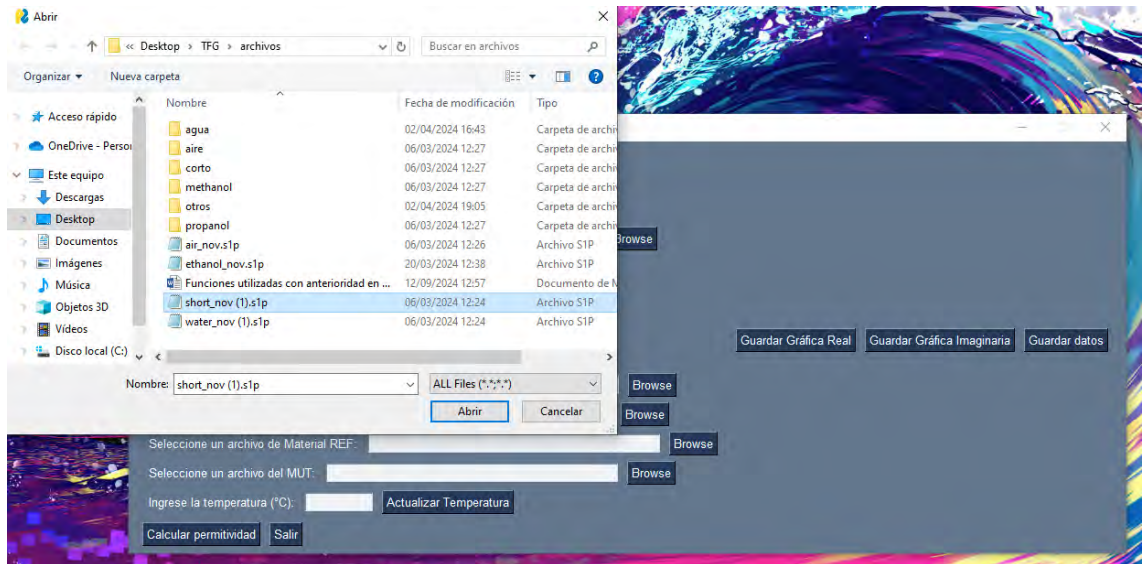
Una vez tengamos todas nuestros programas y librerías instaladas, podemos encontrar toda esta información en el capítulo 4 “Desarrollo de la aplicación Python”, ejecutaremos nuestro programa apareciendo la siguiente ventana:



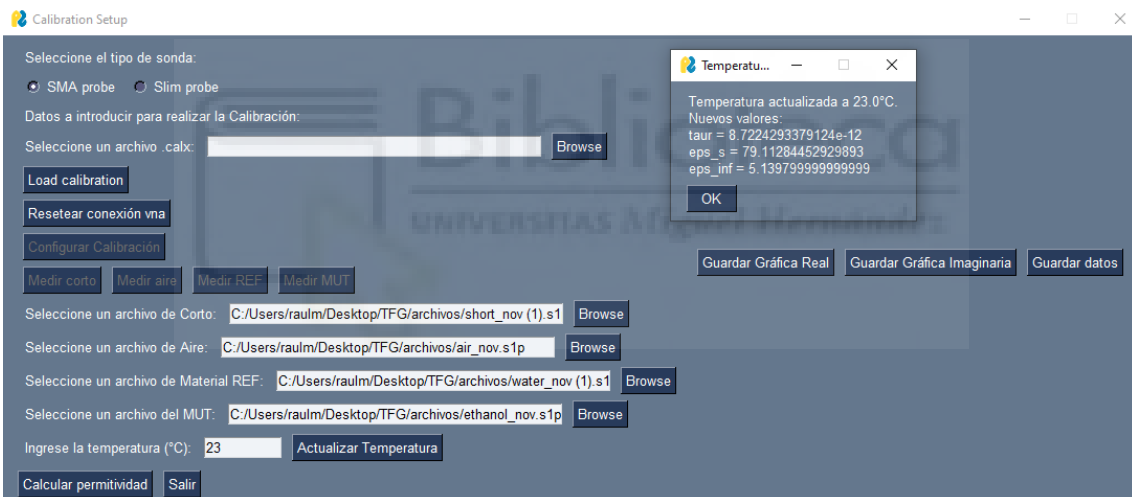
En primer lugar, deberemos de seleccionar con qué tipo de sonda hemos realizado o vamos a realizar las medidas. Tenemos nuestra sonda SMA y la de Keysight (Slim Probe).

Vamos a comenzar explicando nuestra versión DEMO con la que podemos procesar los datos de nuestros archivos .s1p. Seleccionaremos un archivo de corto dándole al botón Browse ubicado a la derecha.

Raúl Moreno, “Validación y mejora de un sistema de medida de la permitividad...”

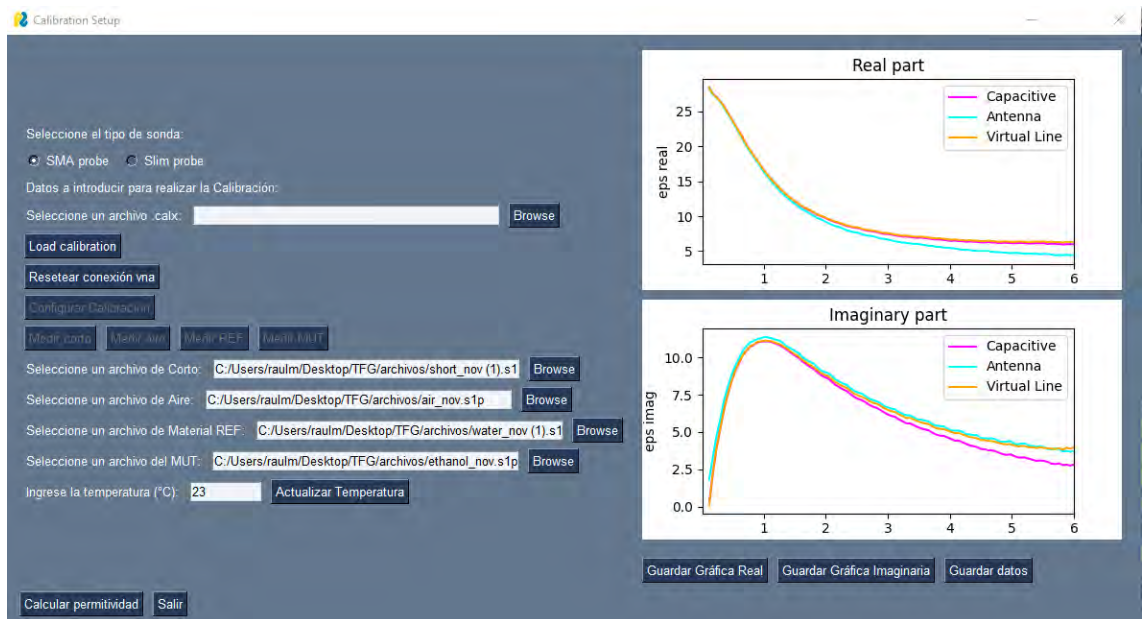


Haremos el mismo proceso con los archivos de aire, agua y de MUT viendo como la dirección del archivo se coloca de manera automática en nuestra ventana. Una vez hecho esto ingresamos la temperatura ambiente y le damos al botón actualizar temperatura.

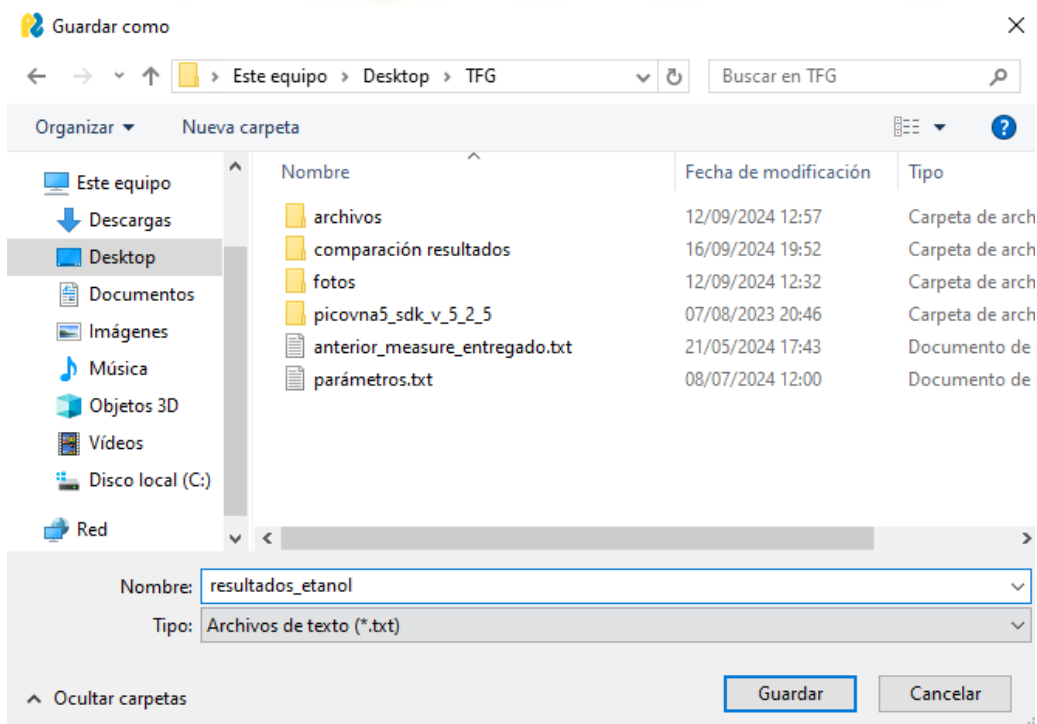


Cuando le demos a actualizar temperatura nos muestra por pantalla en otra ventana como varían las variables a utilizar que están en función de esta y serán utilizadas en nuestros 3 algoritmos.

Por último, le damos al botón de Calcular permitividad y nos generará los dos gráficos y tendremos la opción de guardar tanto los gráficos como los resultados procesados.



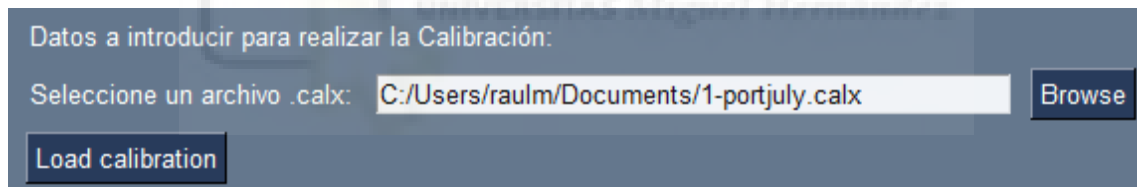
Si le damos a Guardar datos se nos abrirá otra ventana dándole a Save as podemos guardar en la ubicación que queramos.



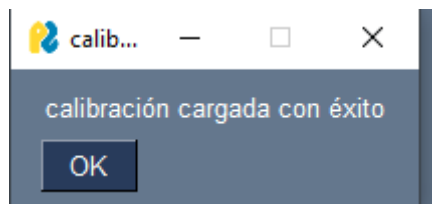
En este caso hemos procesado el etanol. Una cosa muy buena que tiene nuestro programa es que guarda en el mismo archivo los resultados de los tres algoritmos tanto de la parte real como de la imaginaria.

Frequency	Er_ant	El_ant	Er_M	El_M	Er_cap	El_cap
123540000.000000	28.464955	1.779432	28.423826	0.119309	28.479046	0.163809
182950000.000000	27.479745	3.303440	27.524889	2.210598	27.566034	2.239129
242360000.000000	26.971020	4.765541	27.055148	3.932085	27.095154	3.954610
301770000.000000	26.447793	5.954162	26.441274	5.198076	26.479081	5.211490
361180000.000000	25.802227	7.121269	25.728745	6.902127	25.764897	6.919122
420590000.000000	24.805408	8.007298	24.809928	7.493709	24.841757	7.500075
480000000.000000	23.815958	8.797335	23.953988	8.362966	23.982199	8.364386
539410000.000000	22.877732	9.444969	23.026709	9.062281	23.051045	9.060491
598820000.000000	22.015969	9.921577	22.160107	9.626407	22.180416	9.619533
658230000.000000	21.237300	10.247360	21.265696	10.132090	21.283356	10.122089
717640000.000000	20.636882	10.766906	20.236581	10.444558	20.289815	10.431596
777050000.000000	19.277551	11.004617	19.462524	10.743883	19.469711	10.725463
836460000.000000	18.445260	11.211198	18.644960	10.858236	18.647841	10.831331
895870000.000000	17.718579	11.243762	17.920960	11.063051	17.927397	11.032496
955280000.000000	16.824980	11.213640	17.140702	11.074439	17.136618	11.039615
1014690000.000000	16.116613	11.382403	16.410781	11.127564	16.402230	11.089311
107350000.000000	15.418180	11.333968	15.741094	11.179503	15.726181	11.079102
1132310000.000000	14.824375	11.269646	15.094971	11.068630	15.078688	11.016197
1191120000.000000	14.242790	11.187870	14.544456	10.987282	14.524993	10.909132
125000000.000000	13.645768	11.121555	13.999130	10.879381	13.966571	10.816131
1308810000.000000	13.137962	10.935607	13.467794	10.737577	13.435819	10.665693
1367620000.000000	12.647313	10.770328	12.960412	10.579575	12.927638	10.497610
1426430000.000000	12.194088	10.586710	12.564817	10.395213	12.530707	10.308224
1485240000.000000	11.781763	10.441518	12.193027	10.225428	12.156676	10.133036
1544050000.000000	11.394145	10.329439	11.825682	10.073010	11.785125	9.976704
1602860000.000000	11.012034	10.239906	11.441097	9.846789	11.396589	9.729828
1661670000.000000	10.713368	9.857151	11.149624	9.681183	11.100964	9.566875
1720480000.000000	10.392595	9.722755	10.888977	9.510510	10.839933	9.387938
1779290000.000000	10.059974	9.606977	10.599791	9.364792	10.547467	9.236916
183810000.000000	9.709713	9.608963	10.276928	9.169700	10.220889	9.021874
1896910000.000000	9.345913	9.127377	10.066608	8.965333	10.004742	8.814407
1955720000.000000	9.114669	9.024612	9.877043	8.833952	9.812466	8.680439
2014530000.000000	9.022359	8.945137	9.616902	8.749562	9.549349	8.598298
2073340000.000000	8.769555	8.751108	9.408596	8.534740	9.339454	8.366821
2132150000.000000	8.699796	8.511502	9.210551	8.331349	9.135250	8.160696
2190960000.000000	8.411494	8.382727	9.077974	8.168100	8.900264	8.001664

Si queremos realizar las medidas debemos de realizar la calibración con nuestro software PicoVNA 5 y guardarla. Una vez tengamos esta calibración hecha y el archivo guardado, veremos que en nuestra ventana tendremos la opción de seleccionar un archivo .calx, le damos a Browse y la seleccionamos volviendo a quedarse la dirección en memoria de este archivo.



Después de dar a Load calibration para cargarla. Habilitando la opción de configurarla con el botón de Configurar Calibración. Si los pasos a seguir se han realizado de manera correcta nos deberá de aparecer el siguiente mensaje por pantalla:



Podemos apreciar que se ha habilitado nuestro botón de Configurar calibración.

Seleccione el tipo de sonda:

SMA probe Slim probe

Datos a introducir para realizar la Calibración:

Seleccione un archivo .calx:

Seleccione un archivo de Corto:

Seleccione un archivo de Aire:

Seleccione un archivo de Material REF:

Seleccione un archivo del MUT:

Ingrese la temperatura (°C):

Dándole a Configurar Calibración nos aparecerá otra ventana donde podemos dejar los datos de nuestra primera calibración o modificarlos a necesidad del usuario.

Configuración de Medición

Desea configurar manualmente los parámetros de medición?

Sí No

Número de puntos:

Frecuencia de inicio (Hz):

Frecuencia de parada (Hz):

Nivel de potencia (dBm):

IBW (Hz):

Le damos a Ok y nos aparecerá la siguiente pantalla:

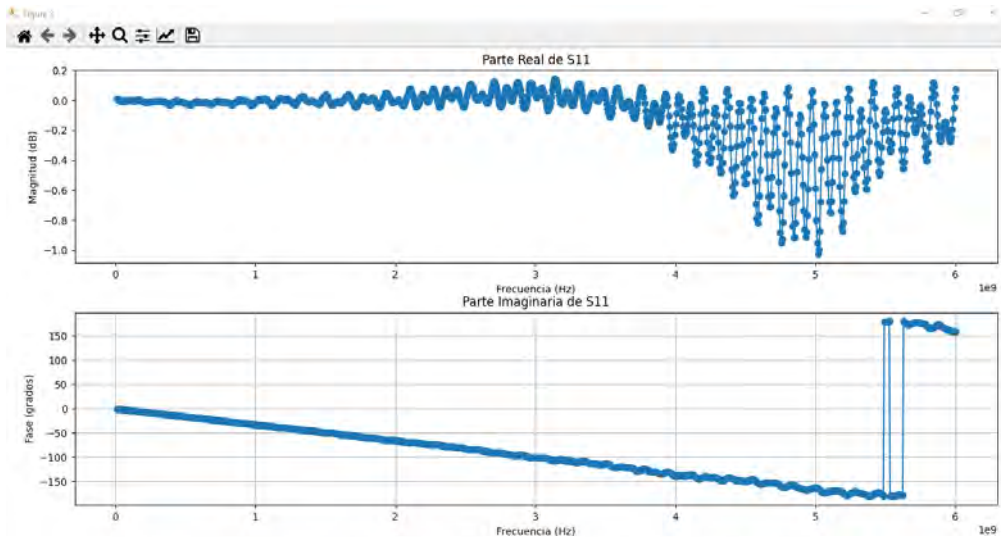
Configuración de calibrac...

Configuración de calibración manual completada

Veremos que se han habilitado los botones de Medir corto, Medir aire, Medir REF, Medir MUT. Ponemos el corto a nuestra sonda SMA y le damos a Medir corto.

Raúl Moreno, "Validación y mejora de un sistema de medida de la permitividad..."

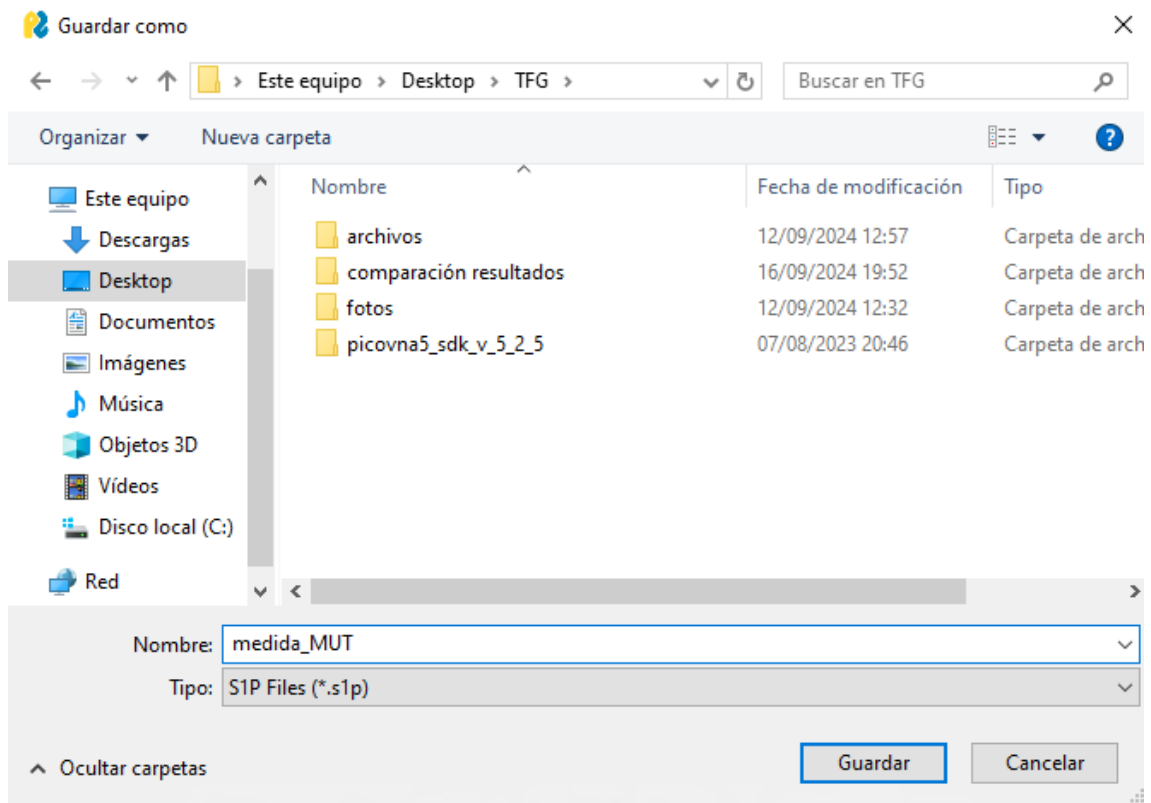
Al seleccionar la opción "Medir Corto," aparecerá una pantalla con los resultados de la medida, lo que nos permitirá verificar si nuestro corto casero funciona correctamente, ya que conocemos cómo debería comportarse. En el ejemplo mostrado, el corto no está bien conectado, pues su respuesta es similar a la del aire. Esta herramienta resulta útil para asegurarnos de que el corto casero esté debidamente conectado.



Hacemos las cuatro medidas de la misma manera, cierto es que para las de corto, aire y el material de referencia veremos que las direcciones en memoria se colocan directamente en nuestro programa.

The screenshot shows a software interface with four buttons: "Medir corto", "Medir aire", "Medir REF", and "Medir MUT". Below the buttons are three input fields for file selection, each with a "Browse" button. The first field is labeled "Seleccione un archivo de Corto:" and contains the text "medicion_corto.s1p". The second field is labeled "Seleccione un archivo de Aire:" and contains the text "medicion_aire.s1p". The third field is labeled "Seleccione un archivo de Material REF:" and contains the text "medicion_ref.s1p".

En cambio, cuando le demos Medir MUT se nos abrirá una ventana para que guardemos el archivo donde queramos.



Una vez hecho esto seleccionamos la temperatura ambiente y le damos a calcular permitividad como en la opción DEMO.

Muy importante indicar que para utilizar otro archivo de calibración si hemos cargado otra calibración previa debemos de darle al botón de Resetear conexión VNA, si no se saldrá de programa ya que debemos de resetear la conexión para poder cargar un archivo diferente.

A.2 ARTÍCULO URSI



14:00 – 14:15

VALIDACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDIDA DE PERMITIVIDAD DE TEJIDOS BIOLÓGICOS BASADO EN CONECTOR SMA DE BAJO COSTE

GASCÓN COLLADO, CRISTINA; MORENO MERÍN, RAÚL; MARTÍNEZ LOZANO, ANDREA; TORREGROSA PENALVA, GERMÁN; **ÁVILA NAVARRO, ERNESTO**; ARIAS RODRÍGUEZ, JULIA
UNIVERSIDAD MIGUEL HERNANDEZ, ESPAÑA

This work presents the measurement of permittivity in biological materials using an open-ended coaxial probe fabricated from a simple SMA connector. The study investigates liquids and biological tissues within the microwave frequency range. Results from measurements on polar reference liquids demonstrate satisfactory agreement with literature values and a commercial system, validating the proposed system's efficacy. Analysis of the employed models reveals that the capacitive model satisfactorily predicts the real part of permittivity, while the radiation model effectively predicts the imaginary part. Measurements on commercially acquired biological tissues show coherent and similar qualitative results to those obtained with commercial systems. This research contributes to the development of accessible and cost-effective methods for permittivity measurement in biomedical engineering and related fields.

[239-VALIDACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDIDA DE PERMITIVIDAD DE TEJIDOS BIOLÓGICOS .PDF](#)

Validación de un sistema de medida de permitividad de tejidos biológicos basado en conector SMA de bajo coste

Cristina Gascón-Collado, Raúl Moreno-Merín, Andrea Martínez Lozano, Germán Torregrosa Penalva, Ernesto Ávila-Navarro, Julia Arias Rodríguez
cristina.gascon01@alu.umh.es, raul.moreno01@alu.umh.es, andrea.martinezl@umh.es, gtorregrosa@umh.es, eavila@gmail.es, julia.arias@umh.es
Laboratorio de Microondas de Elche (EMwLab). Instituto de Investigación en Ingeniería de Elche. Universidad Miguel Hernández, Avda. de la Universidad s/n, 03202, Elche

Abstract- This work presents the measurement of permittivity in biological materials using an open-ended coaxial probe fabricated from a simple SMA connector. The study investigates liquids and biological tissues within the microwave frequency range. Results from measurements on polar reference liquids demonstrate satisfactory agreement with literature values and a commercial system, validating the proposed system's efficacy. Analysis of the employed models reveals that the capacitive model satisfactorily predicts the real part of permittivity, while the radiation model effectively predicts the imaginary part. Measurements on commercially acquired biological tissues show coherent and similar qualitative results to those obtained with commercial systems. This research contributes to the development of accessible and cost-effective methods for permittivity measurement in biomedical engineering and related fields.

I. INTRODUCCIÓN

La variación en la permitividad de los materiales biológicos puede proporcionar información valiosa sobre su composición y estructura interna. En el ámbito médico, esta información es crucial para el diseño y la optimización de dispositivos médicos, como resonadores magnéticos y equipos de imagen médica basados en microondas [1], [2]. La dependencia que la propagación de las microondas tiene de la permitividad de los tejidos, que cambia de sana a maligna [3], así como las capacidades no invasivas y no ionizantes, han llevado a considerar las técnicas de microondas en contextos de imágenes médicas. Uno de los métodos de banda ancha más extendidos para la medida de la permitividad es el método de sonda coaxial de extremo abierto, que es especialmente usado para muestras líquidas o semisólidas, como los tejidos biológicos [4]. Este trabajo pretende abordar la viabilidad y eficacia de un sistema de bajo coste para la medida de la permitividad en materiales biológicos, basado en un conector SMA de bajo coste, proporcionando una herramienta potencialmente accesible y útil para la investigación en ingeniería biomédica y otros campos relacionados.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Sistema experimental

En la Figura 1 se muestra el set-up experimental propuesto. Consta de una sonda coaxial de extremo abierto que se conecta a un VNA (modelo PicoVNA 106 de Pico Technology). El control del VNA se lleva a cabo mediante una aplicación desarrollada en Python corriendo en un PC. Este último se

encarga de gestionar la toma de datos de parámetros S y aplicar los algoritmos de extracción de la permitividad. Las medidas del sistema propuesto se llevaron a cabo en un rango de frecuencias de 10 MHz a 6.0 GHz.

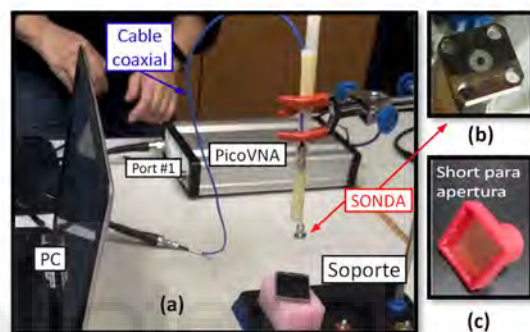


Fig. 1. (a) Sistema experimental propuesto para la sonda basada en conector SMA. (b) Detalle de la apertura de la sonda. (c) Bloque de cortocircuito para la sonda.

La sonda coaxial ha sido fabricada de forma manual a partir de un conector (modelo R124510000 de Radiall) que es un conector de panel cuadrado SMA hembra, con lengüeta, como se muestra en la Figura 1(a). A este conector, se le ha seccionado el pin central y se ha limado hasta dejarlo lo más plano posible al nivel del plano de la montura cuadrada, como se puede apreciar en la Figura 1(b). El radio del conductor central es $a = 0.635$ mm y el radio interno del conductor externo es $b = 2.032$ mm.

Para medir una muestra de material, ésta se posiciona verticalmente hasta tocar el extremo abierto de la sonda, asegurando que toda la apertura está en contacto con la muestra. En el caso de una muestra líquida, tan sólo hay que sumergir la sonda lo suficiente como para que cubra la montura cuadrada. En el caso de muestras sólidas con cierta elasticidad, se debe presionar ligeramente la sonda contra la superficie de la muestra. En el caso de muestras que presenten varias texturas, distintos tejidos o membranas se ha de tener la precaución de colocar el extremo de la sonda en una zona lo más homogénea posible o promediar las medidas posicionando la sonda en distintas posiciones.

Para la calibración del sistema en el plano de la apertura de la sonda se han usado como estándares aire y un bloque de cortocircuito construido *ad hoc* (Fig. 1(c)). Para la aplicación de los algoritmos, se usa como estándar agua destilada.

Por otro lado, para contrastar los resultados obtenidos, se ha dispuesto de un segundo sistema experimental basado en una sonda comercial (kit de sonda dieléctrica Keysight N1501A, Slim Probe) conectada a un segundo VNA (Keysight, modelo P9371A). Este VNA está controlado por ordenador, usando el software de medida de materiales N1500A de Keysight, que proporciona los valores de la parte real, ϵ' , y la parte imaginaria, ϵ'' , de la permitividad relativa. Las medidas se llevaron a cabo en un rango de frecuencias de 10 MHz a 6.5 GHz. No obstante, el fabricante especifica una frecuencia mínima confiable de 500 MHz para este sistema de medida. Este segundo sistema también usa aire, bloque de cortocircuito (específico de esta sonda comercial) y agua destilada como estándares de calibración

B. Modelos para la obtención de la permitividad

La sonda coaxial de extremo abierto permite medir simultáneamente la parte real e imaginaria de la permitividad compleja analizando el coeficiente de reflexión S_{11} de una señal electromagnética en la apertura de la sonda, es decir, en la interfaz sonda-muestra, y aplicando algoritmos de inversión. La magnitud compleja de la onda reflejada depende significativamente de las propiedades dieléctricas del material bajo prueba. Los algoritmos de inversión y las soluciones de onda completa han sido ampliamente estudiados, y se proporciona una buena explicación de los diferentes procesos matemáticos y computacionales en [5]. En este trabajo nos centraremos en los modelos capacitivo, de radiación y de línea virtual cuya descripción detallada se puede encontrar en [6].

De forma somera, el modelo capacitivo describe la carga de la sonda como la combinación de dos condensadores (uno de ellos vinculado a la permitividad compleja del material y el otro a la estructura de la sonda) en paralelo, para modelar la respuesta del material.

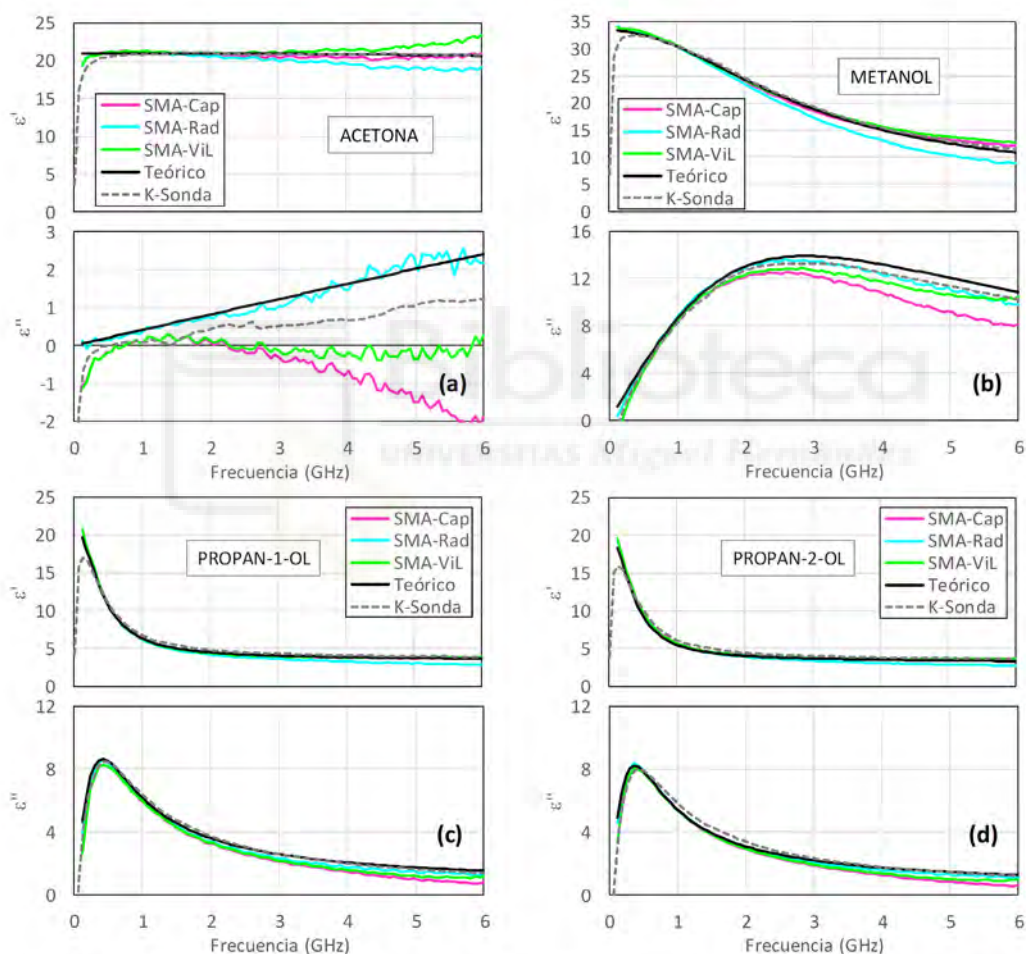


Fig. 2. Medidas de la permitividad relativa (parte real, panel superior, y parte imaginaria, panel inferior) en función de la frecuencia para líquidos polares: (a) acetona, (b) metanol, (c) propan-1-ol y (d) propan-2-ol. Las líneas rosa, azul y verde corresponden a los valores medidos con la sonda SMA propuesta usando el modelo capacitivo, de radiación y de línea virtual, respectivamente. La línea negra corresponde a los valores referenciados en [7] y la línea punteada corresponde a los valores medidos mediante el sistema comercial.

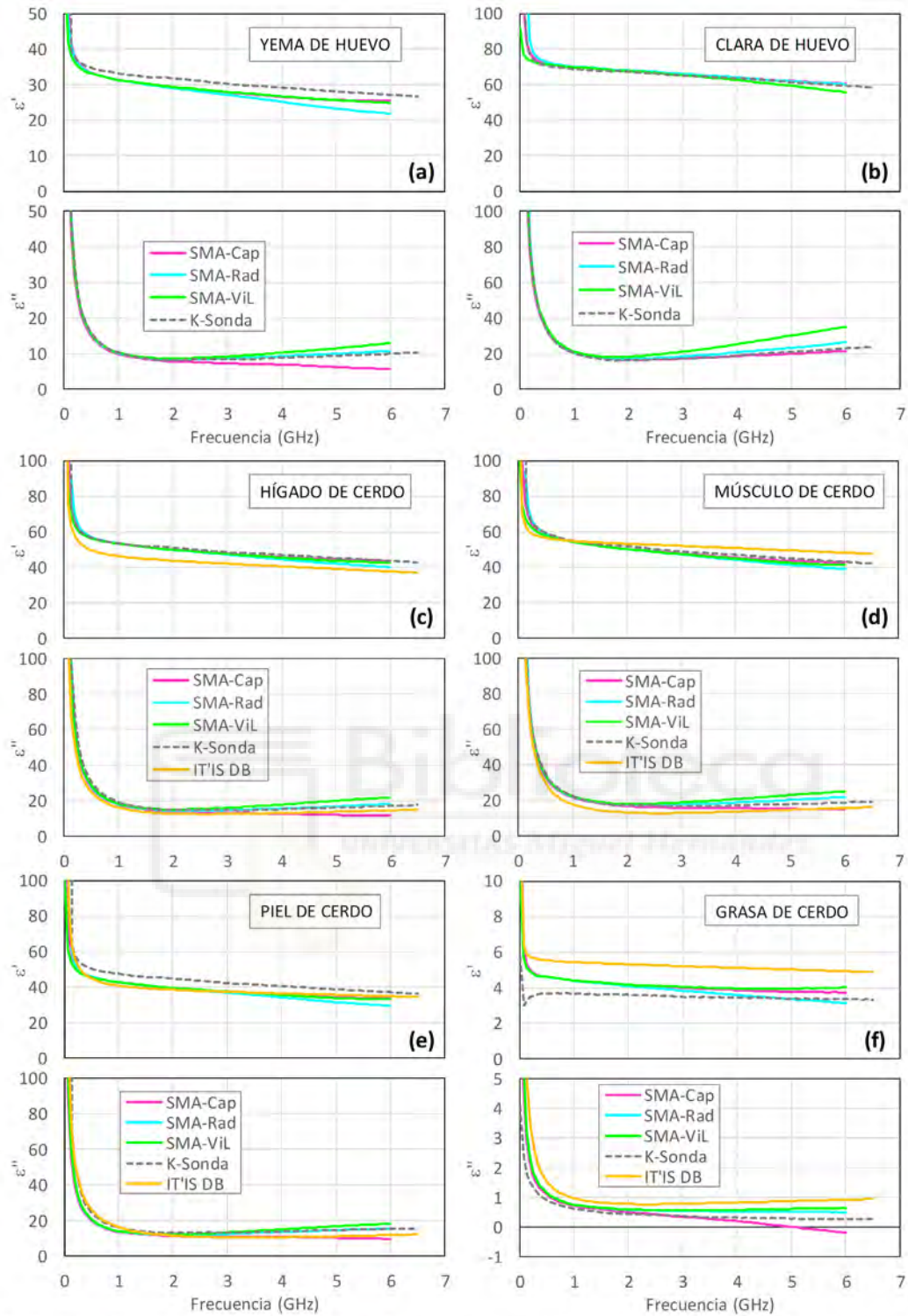


Fig. 3. Medidas de la permitividad relativa (parte real, panel superior, y parte imaginaria, panel inferior) en función de la frecuencia para (a) yema de huevo, (b) clara de huevo, (c) hígado de cerdo, (d) músculo de cerdo, (e) piel de cerdo y (f) grasa de cerdo. Las líneas rosa, azul y verde corresponden a los valores medidos con la sonda SMA propuesta usando el modelo capacitivo, de radiación y de línea virtual, respectivamente. La línea punteada corresponde a los valores medidos mediante el sistema comercial y la línea naranja corresponde a los valores referenciados en [8] para tejidos humanos.

En cuanto al modelo de radiación, en este trabajo se representa al material en estudio mediante un condensador (vinculado a la permitividad compleja) en paralelo con una resistencia, estando ésta principalmente vinculada a la radiación proveniente de la apertura coaxial y que también depende de la permitividad del material. Por último, el modelo de línea virtual representa el campo de dispersión en el extremo de la sonda como una línea de transmisión equivalente con las mismas dimensiones transversales que la sonda física. La admitancia compleja de esta línea se calcula considerando la longitud de la línea virtual y las características físicas de la sonda coaxial.

Para determinar en cada uno de los modelos los parámetros asociados (capacidades, en el caso del modelo capacitivo, capacidad y conductancia, en el caso del modelo de radiación, y longitud de la línea virtual, en el caso del modelo de línea virtual) se requiere la medida de un material de referencia, cuya permitividad se supone conocida en las condiciones de medida. En este estudio hemos usado agua destilada, y su medida forma parte del proceso de calibración, como se ha mencionado.

III. RESULTADOS

A. Líquidos polares

Las permitividades de los líquidos presentados en este apartado están documentadas en la literatura [7] como líquidos de referencia/trazables. Por tanto, se ha comparado el valor obtenido con el sistema presentado en este trabajo con aquel recogido en la literatura. En la Figura 2 se muestran los resultados correspondientes a las medidas con la sonda SMA con los tres algoritmos, los valores teóricos y los valores medidos con la sonda comercial.

Los resultados indican que el modelo capacitivo predice relativamente bien la parte real de la permitividad, con un error por debajo del 5% en relación al valor absoluto de la permitividad relativa. Sin embargo, en general, falla en la estimación de la parte imaginaria.

Por otro lado, el modelo de radiación predice relativamente bien la parte imaginaria de la permitividad, con un error por debajo del 10%. Los resultados del modelo de línea virtual sugieren un compromiso entre los errores en la parte real e imaginaria.

La sonda comercial presenta dificultades en la estimación de la parte imaginaria en el caso de la acetona, que exhibe valores muy pequeños. Esto era esperable dadas las especificaciones del fabricante de esta sonda. Sin embargo, es interesante observar que la sonda SMA propuesta arroja valores excelentes con el modelo de radiación. Además, se nota que por debajo de los 500 MHz, la sonda comercial no es confiable, confirmando las especificaciones del fabricante. No obstante, los resultados muestran que la sonda SMA predice satisfactoriamente los valores hasta el límite inferior de medida (10 MHz).

B. Tejidos y sustancias biológicas

Se llevaron a cabo medidas en tejidos y sustancias biológicas de origen animal adquiridos en el supermercado. Los resultados de estas medidas, junto con la permitividad de tejidos humanos homólogos (sólo en algunos casos) obtenida de la base de datos de la IT'IS Foundation [8], se muestran en la Figura 3. Los resultados obtenidos con nuestro sistema

coinciden cualitativamente con los valores de tejidos humanos. Si consideramos las mediciones del sistema comercial como válidas, podemos concluir que el modelo de línea virtual muestra los resultados menos satisfactorios, mientras que el modelo capacitivo presenta dificultades en la detección de la parte imaginaria. Por otro lado, el modelo de radiación parece ser el más apropiado para las medidas con la sonda SMA.

IV. CONCLUSIONES

En este estudio, se ha evaluado un sistema de medida basado en un conector SMA de bajo coste para extraer la permitividad de tejidos biológicos y líquidos polares. Los resultados obtenidos muestran una concordancia adecuada con los valores documentados en la literatura y los valores medidos por el sistema comercial, lo que valida la eficacia del sistema propuesto. El análisis de los modelos utilizados revela que el modelo capacitivo predice satisfactoriamente la parte real de la permitividad, mientras que el modelo de radiación es eficaz en la predicción de la parte imaginaria. Además, las mediciones en tejidos biológicos muestran resultados coherentes y similares a los obtenidos con el sistema comercial, lo que sugiere la viabilidad del sistema propuesto para aplicaciones en ingeniería biomédica y campos relacionados.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al respaldo financiero parcial del proyecto I+D+i PID2022-139783OB-I00, financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por "FEDER Una manera de hacer Europa". Además, contó con el respaldo parcial de la Conselleria de Educación, Universidades y Empleo a través del proyecto CIAICO/2022/068.

REFERENCIAS

- [1] Blanco-Angulo, C.; Martínez-Lozano, A.; Gutiérrez-Mazón, R.; Juan, C.G.; García-Martínez, H.; Arias-Rodríguez, J.; Sabater-Navarro, J.M.; Ávila-Navarro, E. "Non-Invasive Microwave-Based Imaging System for Early Detection of Breast Tumours". *Biosensors* 2022, 12, 752.
- [2] L. Wang, "Microwave Imaging and Sensing Techniques for Breast Cancer detection." *Micromachines* 14, no. 7, 1462, Jul. 2023.
- [3] Lazebnik, M.; Popovic, D.; McCartney, L.; Watkins, C.B.; Lindstrom, M.J.; Harter, J.; Sewall, S.; Ogilvie, T.; Magliocco, A.; Breslin, T.M.; et al. "A large-scale study of the ultrawideband microwave dielectric properties of normal, benign and malignant breast tissues obtained from cancer surgeries". *Phys. Med. Biol.* 2007, 52, 6093–6115.
- [4] T. W. Athey, M. A. Stuchly and S. S. Stuchly, "Measurement of Radio Frequency Permittivity of Biological Tissues with an Open-Ended Coaxial Line: Part I," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 30, no. 1, pp. 82-86, Jan. 1982.
- [5] Komarov, S.A.; Komarov, A.S.; Barber, D.G.; Lemes, M.J.L.; Rysgaard, S. "Open-Ended Coaxial Probe Technique for Dielectric Spectroscopy of Artificially Grown Sea Ice". *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2016, 54, 4941–4951.
- [6] D. Berube, F. M. Ghannouchi and P. Savard, "A comparative study of four open-ended coaxial probe models for permittivity measurements of lossy dielectric/biological materials at microwave frequencies," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, no. 10, pp. 1928-1934, Oct. 1996.
- [7] A. P. Gregory y R. N. Clarke, "Tables of the complex permittivity of dielectric reference liquids at frequencies up to 5 GHz," National Physical Laboratory (NPL) Report MAT 23, (2012).
- [8] The Foundation for Research on Information Technologies in Society (ITIS), <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/tissue-frequency-chart/>

BIBLIOGRAFÍA

- [Adm21] S. Admassu Emire, T. Tuba Tringo, and M. Makiso Urugo, "Microwave Processing of Food and Biological Materials," *Croat. J. food Sci. Technol.*, vol. 13, no. 2, pp. 253–267, 2021, doi: 10.17508/cjfst.2021.13.2.09.
- [Ath82] T. W. Athey, M. A. Stuchly, and S. S. Stuchly, "Measurement of Radio Frequency Permittivity of Biological Tissues with an Open-Ended Coaxial Line: Part I," *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, vol. 30, no. 1, pp. 82-86, Jan. 1982.
- [Ber96] D. Berube, F. M. Ghannouchi, and P. Savard, "A comparative study of four open-ended coaxial probe models for permittivity measurements of lossy dielectric/biological materials at microwave frequencies," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, no. 10, pp. 1928-1934, Oct. 1996.
- [Bla22a] C. Blanco-Angulo *et al.*, "Non-Invasive Microwave-Based Imaging System for Early Detection of Breast Tumours," *Biosensors*, vol. 12, no. 9, Sep. 2022, doi: 10.3390/bios12090752.
- [Bla22b] C. Blanco-Angulo *et al.*, "Validation of an RF Image System for Real-Time Tracking Neurosurgical Tools," *Sensors*, vol. 22, no. 10, 2022, doi: 10.3390/s22103845.
- [Bra81] M. M. Brady, S. A. Symons, and S. S. Stuchly, "Dielectric behavior of selected animal tissues in vitro at frequencies from 2 to 4 GHz," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 28, no. 3, pp. 305-307, Mar. 1981.
- [Buc99] Richard Buchner, Glenn T. Hefter, and Peter M. May, "Dielectric Relaxation of Aqueous NaCl Solutions" *The Journal of Physical Chemistry A* 1999 103 (1), 1-9. DOI: 10.1021/jp982977k
- [Cas98] J.O. Casas Piedrafita "Contribución a la obtención de imágenes paramétricas en tomografía de impedancia eléctrica para la caracterización de tejidos biológicos," Ph.D. dissertation, Dept. of Electrical Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, 1998.
- [Che24] L. F. Chen, C. K. Ong, C. P. Neo, V. V. Varadan, and V. K. Varadan,

- "Measurement and Materials Characterization," *Microw. Electron.*, pp. 37–42, 2004, [Online]. Available: <http://doi.wiley.com/10.1002/0470020466>
- [Col41] Cole, K. S., & Cole, R. H. "Dispersion and Absorption in Dielectrics I." *Journal of Chemical Physics*, 9(4), 341-351 (1941).
- [Deb29] Debye, P. (1929) *Polar Molecules*. The Chemical Catalogue Company, New York.
- [Des62] G. Deschamps, "Impedance of an antenna in a conducting medium," *IRE Trans. Antennas Propag.*, vol. 10, no. 5, pp. 648-650, Sep. 1962.
- [Dir17] G. Diraco, A. Leone, and P. Siciliano, "A radar-based smart sensor for unobtrusive elderly monitoring in ambient assisted living applications," *Biosensors*, vol. 7, no. 4, 2017, doi: 10.3390/bios7040055.
- [Fel05] Y. Feldman, A. Puzenko, and Y. Ryabov, *Dielectric Relaxation Phenomena in Complex Materials*, vol. 133, no. October. 2005. doi: 10.1002/0471790265.ch1.
- [Gas24a] C. Gascón Collado, "Automatización de la medida de permitividad de materiales biológicos en microondas mediante sonda coaxial," Grado en Ingeniería Electrónica y Automática Industrial, Universidad Miguel Hernández de Elche, Elche, Spain, Trabajo Fin de Grado, Jan. 2024.
- [Gas24b] C. Gascón Collado, R. Moreno Merín, A. Martínez Lozano, G. Torregrosa Penalva, E. Ávila-Navarro, J. Arias Rodríguez. "Validación de un sistema de medida de permitividad de tejidos biológicos basado en conector SMA de bajo coste," XXXIX Simposio Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, URSI 2024, Cuenca (Spain) 2024.
- [Gav16] Gavish N, Promislow K. "Dependence of the dielectric constant of electrolyte solutions on ionic concentration: A microfield approach." *Phys Rev E*. 2016 Jul;94(1-1):012611. doi: 10.1103/PhysRevE.94.012611. Epub 2016 Jul 13. PMID: 27575183.
- [Gha89] F. M. Ghannouchi and R. G. Bosisio, "Measurement of microwave permittivity using a six-port reflectometer with an open-ended coaxial line," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 38, no. 2, pp. 505-508, Apr. 1989.
- [Gre02] A. P. Gregory and R. N. Clarke, "Traceable measurements on dielectric reference liquids over the temperature range 10-50 °C using coaxial-line methods," *Conference Digest Conference on Precision Electromagnetic Measurements*, Ottawa, ON, Canada, 2002, pp. 102-103.

- [Gre12] A. P. Gregory y R. N. Clarke, "Tables of the complex permittivity of dielectric reference liquids at frequencies up to 5 GHz," National Physical Laboratory (NPL) Report MAT 23, (2012).
- [Itis] The Foundation for Research on Information Technologies in Society (IT'IS), <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/tissue-frequency-chart/>
- [Kaa89] Kaatze, U., "Complex permittivity of water as a function of frequency and temperature." *J. Chem. Eng. Data*, vol. 34, pp. 371-374 (1989).
- [Keya] Keysight Technologies Application Note, "Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials - Measurement Techniques," [Online]. Available: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-01284/application-notes/5989-2589.pdf>. (Última consulta 01-Dic-2024).
- [Keyb] Keysight Technologies, "Understanding the Fundamental Principles of Vector Network Analysis," Application Note, 2024. [Online]. Available: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-06841/application-notes/5965-7707.pdf>. [Accessed: 10-Sep-2024].
- [Keyc] Keysight Technologies, "Streamline Series P937XA USB Vector Network Analyzer 2-port, Up to 26.5 GHz," Keysight Technologies, [Online]. Available: <https://www.keysight.com/zz/en/assets/7018-06033/data-sheets/5992-2765.pdf>. [Accessed: 1-Sep-2024].
- [Keyd] Keysight Technologies, "P93xxB Streamline Series Vector Network Analyzer (VNA)," Keysight Technologies, [Online]. Available: <https://www.keysight.com/zz/en/assets/3121-1262/technical-overviews/P93xxB-Streamline-Series-Vector-Network-Analyzer-VNA.pdf>. [Accessed: 1-Sep-2024]
- [Keye] N1501A Dielectric Probe Kit, Technical overview, <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-04631/technical-overviews/5992-0264.pdf>. [Accessed: 1-Dic-2024]
- [Kom16] S. A. Komarov, A. S. Komarov, D. G. Barber, M. J. L. Lemes, and S. Rysgaard, "Open-Ended Coaxial Probe Technique for Dielectric Spectroscopy of Artificially Grown Sea Ice," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 54, no. 8, pp. 4941–4951, Aug. 2016.
- [Kuč16] O. Kučera and M. Cifra, "Radiofrequency and microwave interactions between biomolecular systems," *J. Biol. Phys.*, vol. 42, no. 1, pp. 1–8, 2016, doi:

10.1007/s10867-015-9392-1

- [Kuw13] Y. Kuwahara, “Microwave imaging for breast cancer detection,” in *Biomedical Applications of Microwave Imaging*, 1st ed., Springer, 2013, pp. 1–45.
- [Laz07] L. A. Lazebnik, J. H. Lee, H. D. J. R. Berg, and M. L. McCormick, "A large-scale study of the ultrawideband microwave dielectric properties of normal, benign, and malignant breast tissues obtained from cancer surgeries," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 55, no. 12, pp. 3050–3057, Dec. 2007.
- [Liu11] Y. Liu, L. R. Bush, M. J. S. R. Pinto, and G. A. S. Magar, “Microwave dielectric properties and heating characteristics of food materials: A review,” *Food Biophysics*, vol. 6, no. 1, pp. 67–82, 2011.
- [Mat24] T. Matsushita, *Electromagnetism and Electric Circuits*. Tokyo, Japan: Ohmsha, 2024.
- [Mak24] A. Matković, *Permittivity Measurement of Biological Tissues and Open-Ended Coaxial Probe Measurement Method Analysis*, Ph.D. dissertation, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture, Univ. of Split, Split, Croatia, 2024.
- [Mea16] P. M. Meaney, A. P. Gregory, J. Seppälä and T. Lahtinen, "Open-Ended Coaxial Dielectric Probe Effective Penetration Depth Determination," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 64, no. 3, pp. 915–923, March 2016, doi: 10.1109/TMTT.2016.2519027.
- [Pic24] Pico Technology, "PicoVNA® 100 Series 6 GHz and 8.5 GHz vector network analyzers," Pico Technology, 2024. [Online]. Available: <https://www.picotech.com/download/datasheets/picovna-vector-network-analyzer-data-sheet.pdf>. [Accessed: 1-Sep-2024].
- [Poz12] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed., Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2012.
- [Sem05] Y. Semenov, O. Svenson, A. Bulyshev, A. Souvorov, R. Sizov, and G. Tatsis, “Microwave-tomographic imaging of the high dielectric-contrast objects using different image-reconstruction approaches,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 53, no. 7, pp. 2284–2294, Jul. 2005.