

MEJORA DEL SISTEMA FDS-SYSTEM PARA LA CARACTERIZACIÓN DE
AISLAMIENTOS ELÉCTRICOS MEDIANTE ESPECTROSCOPIA EN EL DOMINIO
DE LA FRECUENCIA

Luisa María Parra Zúñiga



Escuela de ingeniería Eléctrica y Electrónica

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Electrónica - 3744

Junio

2025

MEJORA DEL SISTEMA FDS-SYSTEM PARA LA CARACTERIZACIÓN DE
AISLAMIENTOS ELÉCTRICOS MEDIANTE ESPECTROSCOPIA EN EL DOMINIO
DE LA FRECUENCIA

Luisa María Parra Zúñiga

Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniera Electrónica

Director: Asfur Barandica López, M. Sc.

Codirector: Diego Fernando García Gómez, Ph. D.



Universidad del Valle

Escuela de ingeniería Eléctrica y Electrónica

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Electrónica - 3744

Junio

2025

Aceptación

Nota de aceptación:

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Asfur Barandica López, M. Sc., Director

Diego Fernando García Gómez, Ph. D., Codirector

Santiago de Cali, Junio de 2025

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme la fuerza y la claridad necesarias para completar este trabajo. A mi mamá Ana Milena, por estar siempre presente con su apoyo incondicional y por ser ejemplo de dedicación y constancia. A mi familia, por acompañarme y brindarme ánimo en los momentos más exigentes.

Agradezco a mis directores, Asfur Barandica López y Diego Fernando García Gómez, por su guía, disposición y aportes que enriquecieron el desarrollo de este proyecto.

A la Universidad del Valle, por proporcionar el entorno académico, los recursos y la formación que hicieron posible la realización de este trabajo de grado.

Finalmente, a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a que este proyecto se llevara a cabo, mi más sincero agradecimiento.

Tabla de Contenido

	Pág.
Aceptación	I
Agradecimientos	II
Índice General	III
Lista de Figuras	VI
Lista de Tablas	VIII
Resumen	IX
Abstract	X
Introducción	1
1. Marco referencial	5
1.1 Marco teórico	5
1.1.1 Obtención de curvas de referencia mediante la técnica de FDS	5
1.1.2 Simulación de curvas de respuesta dieléctrica	6
1.1.3 Desarrollo del sistema FDS-System	6
1.1.4 Evaluación del estado de transformadores mediante FDS	6
1.1.5 Diagnóstico de transformadores de distribución mediante FDS	7
1.2 Marco conceptual	7
1.2.1 Respuesta dieléctrica de los aislamientos eléctricos	7
1.2.2 Espectroscopía en el dominio de la frecuencia	8
2. Diseño y mejoras en el hardware del sistema FDS-System	12
2.1 Diagnóstico del hardware original del sistema FDS-System	13
2.1.1 Generador de funciones arbitrarias AFG1022.....	13
2.1.2 Fuente programable de corriente alterna (Chroma 61601).	14
2.1.3 Multímetro digital Keithley de alta precisión (DMM6500).	15
2.1.4 Medidor de temperatura y humedad relativa ambiental PCE-HT110. ..	16
2.1.5 Conexión e integración de equipos.	17
2.2 Diagnóstico de limitaciones y mejoras implementadas	18

2.2.1	Medición no simultánea de señales de corriente y tensión	18
2.2.1.1	Descripción de la limitación:	18
2.2.1.2	Propuesta de mejora:	19
2.2.1.3	Diseño de la solución:	19
2.2.2	Conectividad y diseño estructurado del sistema	21
2.2.2.1	Descripción de la limitación:	21
2.2.2.2	Propuesta de mejora:	21
2.2.2.3	Diseño de la solución	22
2.2.3	Ruido y sensibilidad en bajas frecuencias	23
2.2.3.1	Descripción de la limitación:	23
2.2.3.2	Propuesta de mejora:	23
2.2.3.3	Diseño de la solución:	24
2.3	Resultados de las pruebas de rendimiento del hardware mejorado.	30
2.3.0.1	Prueba 1. Ajuste de los relojes de los multímetros	31
2.3.0.2	Prueba 2. Validación del acoplamiento y comunicación de las tarjetas	32
2.3.0.3	Prueba 3. Evaluación del desempeño de mediciones simultáneas con multímetros sincronizados	33
2.3.0.4	Prueba 4. Validación del generador de funciones y el multímetro digital	36
2.3.0.5	Prueba 5. Evaluación de la respuesta en frecuencia	42
2.3.0.6	Prueba 6. Evaluación de la respuesta en frecuencia con corrientes de baja amplitud	44
2.4	Análisis pruebas de hardware	47
3.	Implementación de mejoras en el software del sistema FDS-System	48
3.1	Diagnóstico del software original del sistema FDS-System	49
3.1.1	Funcionamiento del algoritmo original	49
3.1.1.1	Entradas:	49
3.1.1.2	Procesos:	50
3.1.1.3	Salidas:	50
3.2	Diagnóstico de limitaciones y mejoras implementadas	51
3.2.1	Limitaciones identificadas	52
3.2.2	Mejoras implementadas	52
3.3	Diseño del nuevo algoritmo	53
3.3.1	Etapas del algoritmo	54
3.3.1.1	Preprocesamiento de datos	54
3.3.1.2	Cálculo de cruces por cero	54
3.3.1.3	Modelo sinusoidal ajustado	54
3.3.1.4	Cálculo del ángulo de desfase	55
3.4	Comparación entre el algoritmo original y el actual	56
3.4.1	Cálculo del ángulo de desfase	57

3.4.2	Complejidad del algoritmo	57
3.4.3	Adaptabilidad	57
3.5	Pruebas para evaluar las mejoras del software	58
3.5.1	Prueba 1: Validación del ajuste con modelo sinusoidal en bajas frecuencias	58
3.5.1.1	Descripción del algoritmo	58
3.5.1.2	Análisis del ajuste de la señal de corriente	60
3.5.2	Prueba 2: Precisión en el cálculo del ángulo de desfase 0°	63
3.5.2.1	Procedimiento	63
3.5.2.2	Resultados	64
3.5.3	Prueba 3: Precisión en el cálculo del ángulo de desfase de -90°	64
3.5.3.1	Procedimiento	65
3.5.3.2	Resultados	65
3.5.4	Prueba 4: Evaluación comparativa del algoritmo actual vs. algoritmo original en frecuencias <1 Hz	67
3.5.4.1	Resultados	68
3.6	Análisis pruebas de software	68
4.	Implementación de mejoras en la interfaz de usuario del sistema FDS-System	70
4.1	Análisis de la interfaz original	70
4.2	Cambios y mejoras realizadas	73
4.3	Implementación y validación del sistema FDS-SYSTEM	75
4.3.1	Objeto de Prueba 1: Condensador de papel kraft	75
4.3.1.1	Procedimiento para el condensador de papel kraft	76
4.3.1.2	Resultados y análisis	77
4.3.2	Objeto de Prueba 2: Arreglo en paralelo de resistencia y capacitancia ..	79
4.3.2.1	Procedimiento para el arreglo en paralelo	79
4.3.2.2	Resultados y análisis	81
4.4	Validación de la interfaz	83
5.	Validación del sistema FDS-System	84
5.1	Metodología de la prueba	84
5.2	Resultados obtenidos	86
5.3	Análisis del sistema FDS-System.	88
6.	Conclusiones	89
	Referencias	91

Lista de Figuras

FIGURA	Pág.
1. Modelo de circuito equivalente de los aislamientos eléctricos.	8
2. Representación de los parámetros que inciden en la prueba FDS.	9
3. Esquema de medición FDS.	11
4. Generador de funciones arbitrarias AFG1022.	14
5. Fuente programable de corriente alterna (Chroma 61601).	15
6. Multímetro digital Keithley de alta precisión (DMM6500).	16
7. Termohigrómetro PCE-HT110.	16
8. Sistema para la caracterización de aislamientos eléctricos.	17
9. Conexión de dos multímetros con TSP-Link.	19
10. KTTI-GPIB Communication and Digital I/O Accessory.	20
11. Cable DB9 macho-macho para interconexión.	21
12. Regleta eléctrica.	22
13. Organización de equipos.	23
14. Circuito sin protección.	25
15. Circuito con protección.	26
16. Magnitudes típicas de las corrientes generadas.	27
17. Cables coaxiales y triaxiales.	28
18. Gabinete metálico.	29
19. Vista general del sistema de medición y conexiones principales con cable triaxial.	30
20. Direcciones GPIB en multímetros.	33

21. Diagrama de flujo para algoritmo.	38
22. Error absoluto (μs) entre tiempos medidos y estimados en función del ciclo.	42
23. Detalles de los procedimientos matemáticos para una prueba FDS.	51
24. Visualización de las señales de corriente y tensión utilizadas para el cálculo del ángulo de desfase.....	56
25. Comparación entre la señal original de corriente y la señal ajustada.	61
26. $ (\tan \delta) $ vs Frecuencia.	67
27. Ventana inicial de la prueba.	71
28. Ventana de datos inicial de la prueba.	71
29. Ventana de datos principal.....	72
30. Panel inicial reorganizado.	74
31. Nuevos botones de ayuda.	74
32. Apartados inactivos de la interfaz original eliminados.	75
33. Configuración de parámetros de la prueba en la interfaz.	76
34. Presentación de resultados en la interfaz.....	77
35. Factor de pérdidas.	79
36. Configuración de parámetros de la prueba en la interfaz.	80
37. Presentación de resultados en la interfaz.....	80
38. Factor de pérdidas.	82
39. Inyección de desfases con generador de funciones.	85
40. Error absoluto ($^{\circ}$) en función de la frecuencia (Hz).	87

Lista de Tablas

TABLA	Pág.
1 Resultados de la Prueba de Sincronización de Mediciones.....	35
2 Resultados sin mejoras	43
3 Resultados con mejoras.....	43
4 Resultados sin mejoras	45
5 Resultados con mejoras.....	45
6 Especificaciones de exactitud para corriente AC en el Keithley DMM6500	46
7 Comparación entre el algoritmo original y el actual.....	57
8 Errores porcentuales en la reconstrucción de la corriente y el ángulo de fase para diferentes frecuencias	62
9 Resultados de precisión del ángulo de desfase con resistencia de 980Ω	64
10 Resultados de precisión del ángulo de desfase con condensador de 100 nF	65
11 Resultados del ángulo de desfase y factor de pérdidas	65
12 Comparación de desempeño y precisión entre el algoritmo original y el algoritmo actual	68
13 Comparación del error absoluto en el cálculo del ángulo entre el algoritmo original y el algoritmo actual	68
14 Mediciones experimentales del condensador de papel Kraft	78
15 Comparación entre mediciones experimentales y ángulo teórico del arreglo RC paralelo	81
16 Resultados de la medición del ángulo de desfase	86
17 Resultados de la inyección de desfases conocidos.....	86

Resumen

La respuesta dieléctrica de los aislamientos eléctricos es un ensayo que aporta información valiosa para evaluar su estado y garantizar la eficiencia y seguridad de los sistemas eléctricos. El ensayo se realiza habitualmente mediante equipos comerciales que, aunque son muy efectivos, implican costos significativos, lo que limita su accesibilidad para diversos entornos académicos e industriales. En respuesta a esta problemática, la Universidad del Valle ha desarrollado el FDS-System, un prototipo para la realización de espectroscopía en el dominio de la frecuencia, destinado a la caracterización de aislamientos eléctricos. El sistema representa un avance hacia soluciones más asequibles; sin embargo, presenta limitaciones importantes en cuanto a precisión, confiabilidad y facilidad de uso. Con el objetivo de superar restricciones, el trabajo propone el desarrollo y la implementación de mejoras sustanciales en el hardware, la optimización del software y el rediseño de la interfaz de usuario, buscando aumentar la precisión de las mediciones, garantizar la confiabilidad y consistencia en los resultados y ofrecer una experiencia más amigable para el usuario.

Palabras clave— respuesta dieléctrica, aislamientos eléctricos, FDS-System, espectroscopía, confiabilidad.

Abstract

The dielectric response of electrical insulation is a test that provides valuable information for assessing its condition and ensuring the efficiency and safety of electrical systems. This test is typically conducted using commercial equipment which, while effective, involves significant costs, limiting its accessibility in various academic and industrial settings. In response to this issue, Universidad del Valle has developed the FDS-System, a prototype for conducting Frequency Domain Spectroscopy aimed at characterizing electrical insulation. The system represents progress toward more affordable solutions; however, it presents important limitations in terms of accuracy, reliability, and ease of use. To overcome these constraints, this work proposes the development and implementation of substantial improvements to the hardware, software optimization, and a redesign of the user interface. The goal is to increase measurement accuracy, ensure reliability and consistency of results, and offer a more user-friendly experience.

Keywords— dielectric response, electrical insulations, FDS-System, spectroscopy, reliability.

Introducción

La evaluación de los aislamientos eléctricos es un proceso esencial para garantizar la seguridad, eficiencia y rendimiento de los equipos eléctricos en diversas industrias. Una de las técnicas más efectivas para analizar la respuesta dieléctrica de los aislamientos es la espectroscopía en el dominio de la frecuencia (FDS). Sin embargo, los equipos comerciales utilizados para estas mediciones suelen tener un costo elevado, lo que limita su accesibilidad a investigadores y profesionales en entornos académicos e industriales.

Con el objetivo de superar la barrera y promover el avance en el campo de los aislamientos eléctricos, se ha implementado en la Universidad del Valle el FDS-System. El sistema permite realizar mediciones de espectroscopía en el dominio de la frecuencia de manera más económica y asequible, integrando diferentes equipos y ofreciendo una interfaz de usuario intuitiva.

A pesar de sus ventajas, el sistema presentaba limitaciones significativas en términos de precisión, confiabilidad y experiencia de usuario. Por ello, este proyecto se centró en superar deficiencias mediante mejoras en el hardware, optimización del software y rediseño de la interfaz de usuario. Las modificaciones implementadas buscan garantizar resultados más precisos y reproducibles, al tiempo que mejoran la facilidad de uso del sistema.

Con las mejoras, el FDS-System proporciona a la comunidad científica y académica una herramienta más confiable y eficiente para la caracterización de aislamientos eléctricos. Además, al reducir los costos asociados con la adquisición de equipos comerciales, se amplía el acceso a tecnología, fomentando así la investigación y el desarrollo en el campo de los aislamientos eléctricos.

Problema de investigación

La caracterización de aislamientos eléctricos es un proceso crucial en industrias como la eléctrica, electrónica y automotriz, ya que permite evaluar la calidad de los materiales aislantes utilizados en equipos eléctricos y predecir su vida útil [1]. Una de las técnicas más utilizadas para medir la respuesta dieléctrica de los aislamientos es la espectroscopía en el dominio de la frecuencia (*FDS: Frequency Domain Spectroscopy*). Esta técnica es ampliamente aplicada en transformadores, permitiendo medir pérdidas y capacitancia en el sistema de aislamiento en función de la respuesta de frecuencia a una señal aplicada [2] .

Si bien el sistema FDS-System cumple su propósito general, durante su implementación se detectaron limitaciones. Las cuales se relacionan principalmente con los siguientes aspectos:

- Errores en el cálculo del ángulo de desfase: el multímetro utilizado para medir la tensión aplicada y la corriente demanda trabaja simultáneamente sobre ambas señales, lo que genera errores significativos y prolonga la duración de las pruebas.
- Presencia de ruido en la señal de corriente: la falta de un modelo adecuado de filtrado contribuye a la distorsión de la señal, especialmente en sus extremos.
- Ausencia de una base de datos: la falta de un registro organizado de mediciones FDS dificulta el análisis detallado y la evaluación de las condiciones de los aislamientos eléctricos.

El desarrollo del proyecto permite responder la siguiente pregunta: ¿Cómo reducir incertidumbres y tiempos de prueba, incrementar la confiabilidad de los resultados y mejorar la experiencia del usuario, mediante mejoras en el hardware, en el software y en la interfaz del sistema FDS-System para espectroscopía en el dominio de la frecuencia en pruebas de respuesta dieléctrica de aislamientos? Con la respuesta obtenida, se espera mejorar el sistema de caracterización de aislamientos eléctricos mediante espectroscopía en el dominio de la frecuencia, lo que permitirá potenciar las investigaciones realizadas en la Universidad del Valle en esta área.

Objetivo General

Mejorar el desempeño general del sistema FDS-System implementado en la Universidad del Valle para espectroscopía en el dominio de la frecuencia en pruebas de respuesta dieléctrica de aislamientos, considerando cambios en el hardware, en el software y en la interfaz de usuario, que se traduzcan en disminución de la incertidumbre, reducción del tiempo de prueba y una mejor experiencia de usuario.

Objetivos Específicos

1. Implementar mejoras en el hardware del sistema FDS-System que permitan reducir los tiempos de prueba en la caracterización de aislamientos eléctricos.
2. Diseñar un algoritmo que mejore la exactitud y la confiabilidad en la determinación del ángulo de fase entre voltaje y corriente en las frecuencias usadas en las pruebas.
3. Implementar mejoras en la interfaz de usuario del sistema FDS-System usada para la caracterización de aislamientos eléctricos.
4. Elaborar un protocolo de pruebas que permita evaluar la efectividad de las mejoras implementadas en el hardware y software del sistema FDS-System.

Estructura del documento

El documento se estructura en cinco capítulos. El capítulo 1 desarrolla el marco referencial, que incluye tanto el marco teórico como el marco conceptual necesarios para comprender los fundamentos de la espectroscopía dieléctrica, el comportamiento de los aislamientos eléctricos y el funcionamiento del sistema FDS-System.

El capítulo 2 aborda el diseño y las mejoras implementadas en el hardware del sistema FDS-System. En este capítulo se describen las modificaciones realizadas para optimizar la funcionalidad y el rendimiento del sistema, enfocándose en la estructura física y los componentes electrónicos.

El capítulo 3 se centra en la implementación de mejoras en el software del sistema FDS-System. Se detallan los cambios en los algoritmos, las técnicas implementadas para el procesamiento de datos y la optimización del sistema para mejorar la precisión y eficiencia en las mediciones.

El capítulo 4 describe la implementación de mejoras en la interfaz de usuario del sistema FDS-System. Este capítulo detalla los cambios realizados para mejorar la experiencia del usuario, incluyendo la reorganización de los menús, el uso de esquemas de colores y la inclusión de botones de ayuda contextuales.

El capítulo 5 presenta la elaboración del protocolo de pruebas del sistema FDS-System. Se describe el diseño del protocolo, los escenarios de prueba definidos, los resultados obtenidos y los análisis realizados para validar la efectividad de las mejoras implementadas en el sistema.

Finalmente, el documento concluye con un análisis de los logros alcanzados y propuestas de trabajos futuros derivados de este proyecto.

Capítulo 1

Marco referencial

1.1. Marco teórico

En este apartado, se presentan investigaciones relacionadas con el análisis de la respuesta dieléctrica de materiales aislantes mediante la técnica de espectroscopía en el dominio de la frecuencia (FDS). Esto permite obtener más conocimiento e información acerca de la técnica utilizada en el sistema FDS-System, con el objetivo de mejorar la caracterización de aislamientos eléctricos desarrollada en la Universidad del Valle.

Durante la búsqueda de antecedentes relacionados, se identificaron cinco documentos de interés. Para esta búsqueda, se consideró el rápido desarrollo de nuevas tecnologías.

1.1.1. Obtención de curvas de referencia mediante la técnica de FDS

En el trabajo *“Obtención de curvas de referencia para el uso de la técnica de espectroscopía en el dominio de la frecuencia en el secado de transformadores en fábrica”* [3], se propone una metodología para obtener curvas de respuesta dieléctrica del aislamiento entre devanados de un transformador eléctrico. Estas curvas pueden utilizarse como referencia para determinar el momento de finalización del proceso de secado de transformadores eléctricos en las instalaciones de TRACOL S.A.

Para lograr este objetivo, se desarrolló un modelo a escala que emula el comportamiento dieléctrico de los devanados del transformador. A partir de este modelo, se obtuvieron curvas que sirven de referencia para limitar el proceso de secado en fábrica, empleando la técnica FDS. Además, se presenta una base de datos que almacena los parámetros y medidas geométricas de los transformadores asociados a las curvas de referencia. Este trabajo se relaciona con el proyecto en curso, ya que proporciona una base teórica y metodológica útil para la aplicación efectiva de la técnica FDS.

1.1.2. Simulación de curvas de respuesta dieléctrica

El trabajo “*Simulación de curvas de respuesta dieléctrica para evaluación del secado en fábrica de transformadores de potencia*” [4], tiene como objetivo obtener curvas de respuesta dieléctrica de los aislamientos sólidos del transformador en diferentes condiciones de humedad mediante modelos de simulación. Estas curvas se comparan con mediciones experimentales realizadas por TRACOL, y se validan en tres transformadores reales sometidos al proceso de secado en fábrica.

Para ello, se utilizaron herramientas como COMSOL Multiphysics y MATLAB. Además, se desarrolló una aplicación en MATLAB que permite parametrizar los modelos de simulación y obtener curvas de referencia de manera intuitiva. Este trabajo es relevante, ya que demuestra la fiabilidad de la técnica FDS aplicada al secado de transformadores, aportando conocimientos útiles para el proyecto.

1.1.3. Desarrollo del sistema FDS-System

En el documento “*Sistema para la caracterización de aislamientos eléctricos mediante espectroscopia en el dominio de la frecuencia*” [1], se describe la implementación del sistema FDS-System en la Universidad del Valle. Este sistema integra equipos de medición como el generador de funciones AFG1022, la fuente amplificadora CHROMA 61601, el multímetro digital DMM6500 y el termohigrómetro PCE-HT110, permitiendo realizar pruebas automáticas de espectroscopía en el dominio de la frecuencia en aislamientos eléctricos.

El sistema también incluye una interfaz de usuario desarrollada con App Designer de MATLAB para controlar los equipos. Aunque el sistema permite realizar mediciones de respuesta dieléctrica, el documento destaca la necesidad de mejorar la precisión, velocidad de medición y reducción del ruido en los datos obtenidos.

1.1.4. Evaluación del estado de transformadores mediante FDS

El artículo “*Pruebas de transformadores, espectroscopía en el dominio de la frecuencia y método de análisis de respuesta por barrido de frecuencia*” [2], de Néstor Xavier Maya Izurieta

y Luis Alberto Vásquez Restrepo, publicado en la revista Ingenius, analiza el estado de los transformadores eléctricos utilizando FDS y el método de análisis por barrido de frecuencia. Se describen en detalle ambas técnicas y se comparan sus ventajas y desventajas. Este artículo es útil para el proyecto, ya que ofrece una base teórica y práctica para comprender y mejorar las metodologías de prueba existentes.

1.1.5. Diagnóstico de transformadores de distribución mediante FDS

En el trabajo *“Diagnóstico de transformadores de distribución, mediante espectroscopía en el dominio de la frecuencia”* [5], se propone un método de diagnóstico basado en FDS para evaluar el estado de los transformadores de distribución. Se describen las metodologías empleadas para medir los valores de capacitancias reales e imaginarias, factores de pérdidas dieléctricas y otros parámetros relevantes.

Además, se presentan resultados obtenidos antes y después del proceso de secado en un transformador húmedo, demostrando la efectividad del método propuesto. Este trabajo aporta información relevante para validar y comparar los resultados obtenidos en el proyecto del curso.

1.2. Marco conceptual

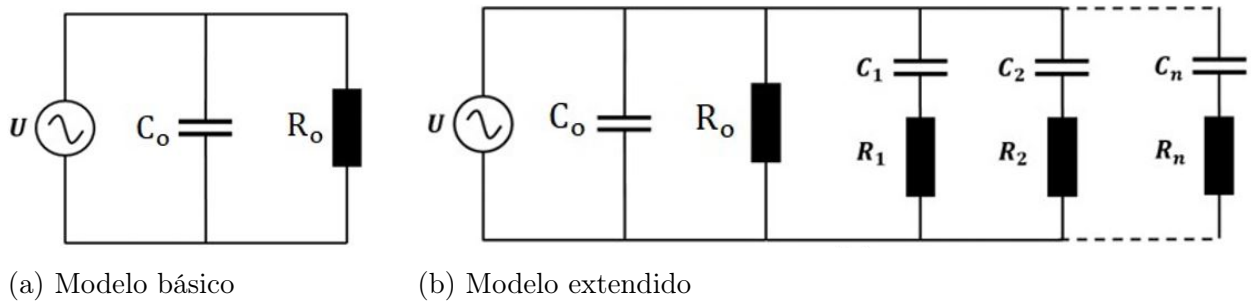
1.2.1. Respuesta dieléctrica de los aislamientos eléctricos

La respuesta dieléctrica es un campo de estudio que se enfoca en analizar las propiedades eléctricas y dieléctricas de materiales y sistemas. A través de métodos de medición específicos, se busca comprender cómo los materiales interactúan con un campo eléctrico aplicado y cómo esto afecta su comportamiento y rendimiento. Estos métodos tienen una amplia gama de aplicaciones en diversos sectores, desde la caracterización de aislantes eléctricos hasta el monitoreo de procesos industriales.

Un dieléctrico sometido a un campo eléctrico externo presenta dos tipos de comportamientos a escala microscópica: conducción y polarización. En la Figura 1 se

interpretan ambos comportamientos dieléctricos, representados a través de modelos de circuitos equivalentes que simulan macroscópicamente la respuesta dieléctrica de los sistemas de aislamiento. La Figura 1(a) muestra el modelo de aislamiento más conocido, donde C_0 es la capacitancia equivalente total que representa la capacitancia geométrica y la polarización sin pérdidas, y R_0 corresponde a la resistencia de aislamiento. En la Figura 1(b) se presenta un modelo extendido con ramas paralelas $R_n - C_n$, que aproximan los procesos de polarización de relajación en el dieléctrico. Aquí, C_n representa la capacidad del dieléctrico para acumular cargas, mientras que R_n caracteriza la pérdida de energía en el proceso de polarización [6].

Figura 1. Modelo de circuito equivalente de los aislamientos eléctricos.



Fuente: A Circuitual Model-Based Analysis of Moisture Content in Oil-Impregnated-Paper Insulation Using Frequency Domain Spectroscopy (Modificado) [6].

1.2.2. Espectroscopía en el dominio de la frecuencia

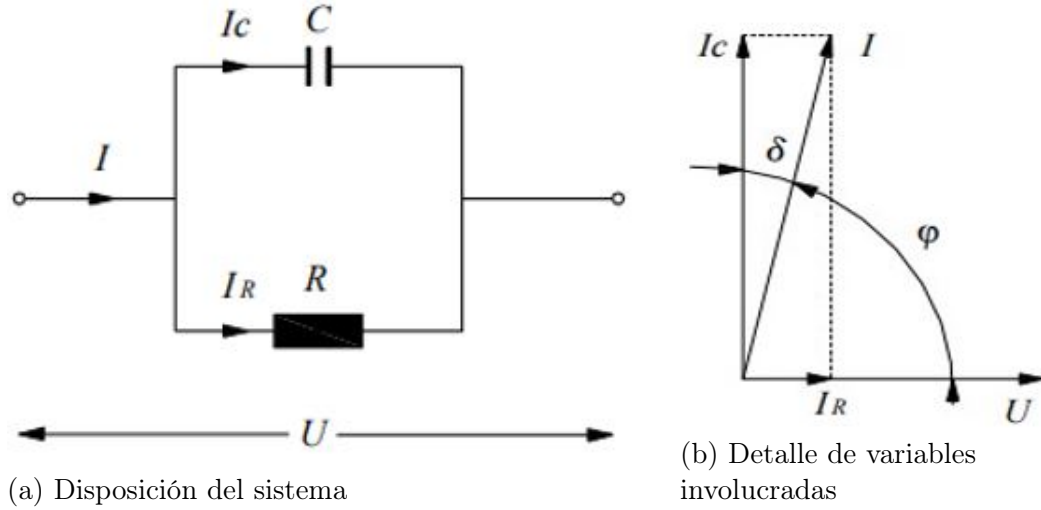
La espectroscopía en el dominio de la frecuencia (FDS, por sus siglas en inglés) es una técnica de respuesta dieléctrica no invasiva ampliamente utilizada para monitorear y evaluar el estado de aislamiento en transformadores. Esta técnica se basa en la generalización del factor de pérdidas ($\tan \delta$), midiendo la capacitancia real y compleja en un rango de frecuencias de 0.1 mHz a 1 kHz. Este rango se selecciona debido a que la condición de aislamiento de los transformadores es sensible a la dispersión dieléctrica de baja frecuencia [3, 4].

Diversos estudios validan la FDS como técnica de diagnóstico confiable Gäfvert y colaboradores mostraron que esta metodología es menos sensible al ruido que los métodos

en el dominio del tiempo y permite identificar cambios sutiles en el aislamiento. Dichos hallazgos sirven como referencia para el presente trabajo, en el que se busca evaluar si un sistema de bajo costo puede obtener curvas reproducibles bajo condiciones controladas. No obstante, a diferencia de los equipos empleados en [7], el sistema aquí desarrollado se limita al análisis de señales sinusoidales, lo que reduce parcialmente su versatilidad.

La FDS consiste en aplicar una tensión sinusoidal a un aislamiento que contiene elementos resistivos y capacitivos, como se muestra en la Figura 2. La corriente resultante (I) se descompone en componentes resistivas (I_R) y capacitivas (I_C), con un ángulo de fase ϕ correspondiente al factor de potencia, mientras que el *ángulo de pérdidas dieléctricas* (δ) está relacionado con $\tan \delta$ [3, 4, 8].

Figura 2. Representación de los parámetros que inciden en la prueba FDS.



Fuente: Testing the Electrical Insulation System of Power Transformer Based on Measuring Factor of Dielectric Losses [8].

La corriente que fluye a través del medio sujeto a un campo eléctrico alterno sinusoidal se describe matemáticamente como:

$$I(\omega) = j\omega \cdot (C'(\omega) - jC''(\omega)) \cdot U(\omega), \quad (1)$$

donde $C'(\omega)$ es la parte real de la capacitancia compleja, $C''(\omega)$ es su parte imaginaria, y ω es la frecuencia angular. El factor de pérdidas dieléctricas ($\tan \delta$) se expresa como:

$$\tan \delta = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)}. \quad (2)$$

La parte real $C'(\omega)$ representa la capacidad del medio para almacenar carga, mientras que la parte imaginaria $C''(\omega)$ refleja la pérdida de energía en forma de calor. Estos parámetros son sensibles a la frecuencia y a la presencia de humedad en los aislamientos, haciendo de la FDS una herramienta clave para el análisis integral del estado de aislamiento [9].

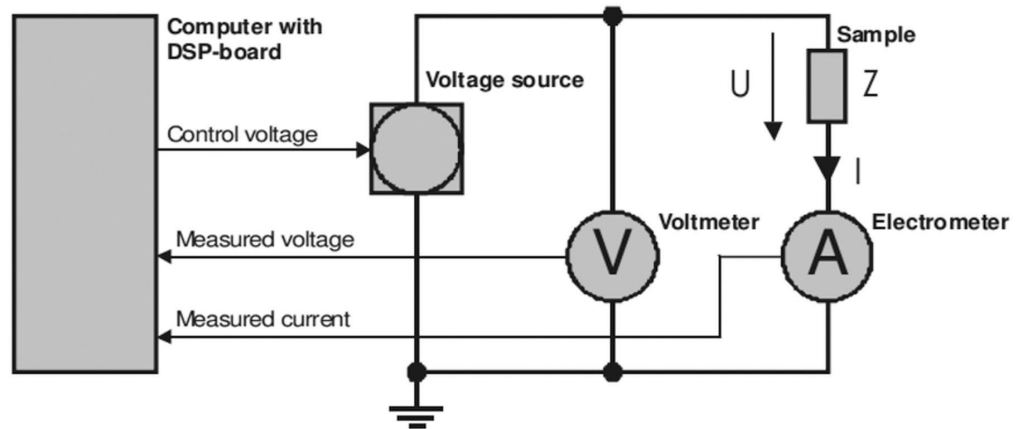
Además de la influencia de la temperatura y la humedad, diversos estudios han señalado que la polarización y la conductividad de aceites y celulosa tienen un impacto significativo en bajas frecuencias [6]. Este comportamiento puede distorsionar las curvas de respuesta dieléctrica y generar interpretaciones erróneas si no se corrigen adecuadamente los efectos de humedad y envejecimiento. En este contexto, la norma IEEE Std C57.152-2013 [11] recomienda aplicar correcciones de temperatura a los parámetros de pérdidas dieléctricas y define lineamientos para la comparación de curvas entre diferentes condiciones de ensayo. Por su parte, la IEC 60076-3 [12] establece que los errores relativos del factor de pérdidas ($\tan \delta$) deben mantenerse dentro de márgenes del 5% para considerarse aceptables y detalla los rangos de frecuencia en los que la técnica FDS presenta mayor sensibilidad. De esta manera, ambas normas constituyen una base sólida para la estandarización de criterios de diagnóstico en pruebas de espectroscopía en el dominio de la frecuencia.

La Figura 3 muestra el esquema básico del sistema de medición FDS, donde se aplica una señal senoidal al material bajo prueba, y se mide la respuesta en tensión y corriente. Estos valores permiten calcular la impedancia compleja del aislamiento y derivar parámetros dieléctricos como la capacitancia y el factor de pérdidas.

Asimismo, Liu y colaboradores [13] demostraron que la técnica de espectroscopía en el dominio de la frecuencia (FDS) puede emplearse para evaluar el estado de envejecimiento del aislamiento aceite-papel, ya que los cambios en la celulosa se reflejan en la variación de la respuesta dieléctrica. Aunque el estudio no cuantifica de manera absoluta el grado de envejecimiento, los resultados evidencian un aumento progresivo del factor de pérdidas ($\tan \delta$) en la región de bajas frecuencias, lo que confirma su utilidad como indicador sensible de

degradación.

Figura 3. Esquema de medición FDS.



Fuente: Study on frequency domain dielectric spectroscopy of epoxy resin impregnated paper bushings under damp conditions [14].

Capítulo 2

Diseño y mejoras en el hardware del sistema FDS-System

El sistema FDS-System ha sido una valiosa herramienta para la caracterización de aislamientos eléctricos mediante espectroscopía en el dominio de la frecuencia (FDS). Se diseñó inicialmente para suplir la carencia de equipos especializados en el laboratorio de alta tensión de la Universidad del Valle. Por tal motivo se construyó integrando dispositivos comerciales y desarrollando una interfaz de usuario que automatiza los procesos de medición y análisis. Sin embargo, la evolución tecnológica y los retos asociados a las pruebas realizadas con el sistema han evidenciado oportunidades para mejorar su rendimiento, precisión y confiabilidad.

Este capítulo aborda un análisis completo del estado actual del sistema, destacando sus fortalezas y limitaciones, seguido de una propuesta de mejora basada en la investigación y selección de nuevas tecnologías y metodologías. Además, se detalla el proceso de diseño e implementación de las mejoras en los componentes, con el objetivo de superar las restricciones e incrementar la capacidad operativa del sistema.

Por último, se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de validación realizadas con el sistema mejorado, evaluando su desempeño frente a los objetivos planteados. Este enfoque garantiza que el FDS-System no solo cumpla con los estándares de medición dieléctrica, sino que también se posicione como una plataforma escalable para futuras investigaciones y desarrollos en el área.

2.1. Diagnóstico del hardware original del sistema FDS-System

El sistema FDS-System, desarrollado para realizar pruebas de espectroscopía en el dominio de la frecuencia (FDS), se basa en la integración de varios dispositivos de medición y control. A continuación, se presenta un análisis detallado del estado actual del hardware, enfocado en maximizar la precisión, confiabilidad y eficiencia del sistema.

2.1.1. Generador de funciones arbitrarias AFG1022.

Tal como se observa en la figura 4, es un generador de doble canal, con un rango de frecuencias de 1 μHz a 25 MHz (resolución de 1 μHz) y una amplitud de salida de 1 mV a 10 Vpp (resolución de 1 mV). Por otra parte, este equipo es capaz de emular todo tipo de formas de onda necesarias en un laboratorio, siendo estas las ondas sinusoidal, cuadrada, rampa y pulso. Además, cuenta con botones de control directo, interfaz USB y un software para PC que facilitan una configuración rápida y amigable para el usuario [15].

En la prueba FDS, el generador de funciones cumple el rol de fuente primaria, generando tensiones sinusoidales ajustada en frecuencia y amplitud según los parámetros establecidos por el usuario. No obstante, el nivel de tensión que entrega este equipo resulta insuficiente para evaluar correctamente los aislamientos eléctricos. Por ello, se requiere incorporar una etapa adicional que permita amplificar la señal y alcanzar los valores de tensión adecuados para la caracterización del material bajo prueba [1].

Figura 4. Generador de funciones arbitrarias AFG1022.



Fuente: Generador de funciones arbitrarias, hoja de datos AFG1022 Tektronix [15].

2.1.2. Fuente programable de corriente alterna (Chroma 61601).

La fuente de alimentación de AC programable Chroma (figura 5), ofrece señales de AC de grado instrumental con muy bajos niveles de ruido. Además, suministra tensiones de salida desde 0 V hasta 300 V de amplitud y frecuencias de 15 a 1000 Hz. Es adecuada para aplicaciones experimentales, de alta precisión y pruebas de laboratorio. Para los puertos de comunicación se cuenta con un interfaz GPIB y RS-232C, pero se puede añadir una tarjeta de accesorios para tener una interfaz USB [16].

En el sistema FDS-System, esta fuente cumple el rol de amplificación, ya que permite aumentar la amplitud de señales provenientes de una fuente externa, incluso cuando estas tienen frecuencias inferiores a 15 Hz —caso en el cual la Chroma actúa únicamente como amplificador y no como generador. La señal externa, conocida como tensión de referencia (V_{ref}), se utiliza como entrada, y la ganancia de salida se ajusta según el rango requerido: cuando se necesita una tensión de salida menor a 150 V se emplea la ecuación (3), y si se requiere superar ese valor, se aplica la ecuación (4). En ambos casos, el cálculo parte de un valor pico de referencia para establecer la relación adecuada de amplificación [1].

$$V_{salida} = V_{ref} \cdot 150 = V_{ref} \cdot 15 \cdot \sqrt{2} \quad (3)$$

$$V_{\text{salida}} = V_{\text{ref}} \cdot 300 = V_{\text{ref}} \cdot 30 \cdot \sqrt{2} \quad (4)$$

Figura 5. Fuente programable de corriente alterna (Chroma 61601).



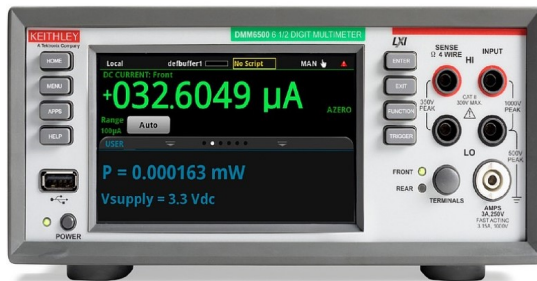
Fuente: Programmable AC source 61601, user's manual [16].

2.1.3. Multímetro digital Keithley de alta precisión (DMM6500).

Este equipo (figura 6 (a)) cuenta con 15 funciones de medición integradas, que incluyen digitalización de señales, capacitancia y temperatura. Realiza mediciones de muy bajas corrientes (del orden de los nA) en dispositivos de baja potencia. Captura señales transitorias con el digitalizador que trae incorporado. Realiza dos mediciones simultáneas para maximizar los datos de prueba. Además, elimina la necesidad de instrumentos de medida adicionales.

En cuanto a conectividad, tal como se observa en la figura 6 (b), dispone de puertos USB y LAN (Ethernet) integrados, y ofrece la posibilidad de ampliar sus interfaces mediante una tarjeta opcional, con la que se puede acceder a conexiones GPIB, RS-232 o TSP-Link [17].

Figura 6. Multímetro digital Keithley de alta precisión (DMM6500).



(a) Panel frontal



(b) Panel posterior

Fuente: DMM6500 6½-Digit Bench/System Digital Multimeter, Datasheet [17].

2.1.4. Medidor de temperatura y humedad relativa ambiental PCE-HT110.

El equipo mostrado en la figura 7 es un usado para el registro de datos de temperatura y humedad ambiente, también para el control de dichas variables en múltiples sectores. El equipo dispone de funciones útiles, como la detección de punto de rocío a través del software, permite la conexión de un sensor externo de temperatura y contiene una memoria de 60000 valores para 3 magnitudes medidas. Para su control remoto cuenta con un puerto de comunicación USB [18].

Figura 7. Termohigrómetro PCE-HT110.

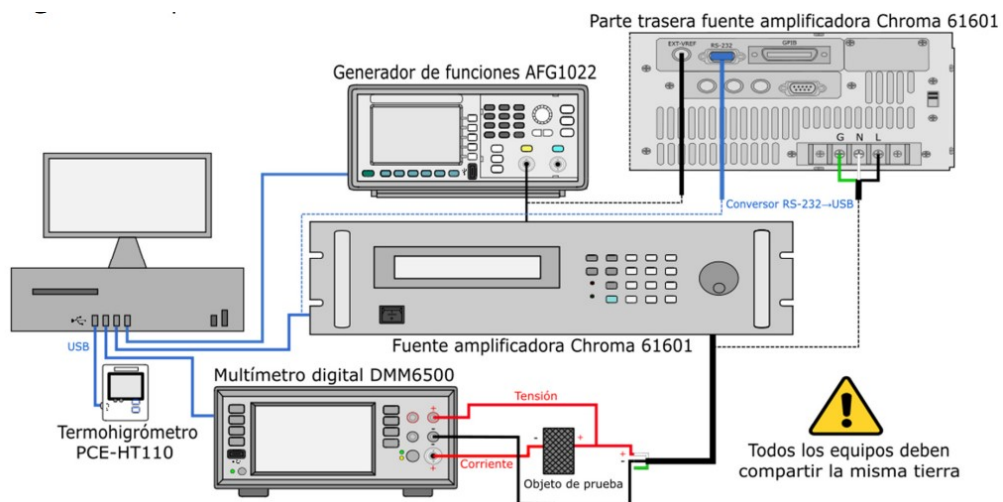


Fuente: Logger de datos para temperatura y humedad Log 100/Log 110 [18].

2.1.5. Conexión e integración de equipos.

El esquema de conexión de los equipos para realizar una prueba FDS es mostrado en la Figura 8; en este, el computador es el eje central del sistema puesto que desde ahí se controla cada uno de los equipos de medida. En éste sistema el generador de funciones AFG1000 actúa como la fuente primaria, generando los valores de tensión, a las frecuencias necesarias para la prueba; pero como los valores de tensión de salida son muy pequeños para caracterizar aislamientos mediante FDS, se requiere de una etapa de amplificación de la señal de tensión, lo que se realiza con la fuente programable de corriente alterna Chroma. Ambos equipos son necesarios para excitar el aislamiento bajo prueba. En el multímetro digital DMM6500, se miden la tensión aplicada y la corriente demandada por el aislamiento bajo prueba. Adicionalmente se emplea el termohigrómetro para el registro de la temperatura y humedad ambiente ya que estas variables pueden influenciar las mediciones. Finalmente, todos los equipos se comunican con el PC, desde el cual se configuran y envían a las fuentes, tanto primaria como amplificadora, los parámetros de la prueba. Además, se adquieren los datos medidos por el multímetro y el termohigrómetro, los cuales son almacenados, procesados y utilizados para mostrar los resultados finales de la medición FDS [1].

Figura 8. Sistema para la caracterización de aislamientos eléctricos.



Fuente: Sistema para la caracterización de aislamientos eléctricos mediante espectroscopia en el dominio de la frecuencia [1].

El hardware original del sistema FDS-System presenta limitaciones que restringen su desempeño en ciertas condiciones. Los principales problemas incluyen una posible desincronización de las mediciones de tensión y corriente debida al uso de un mismo instrumento para ambas variables, la sensibilidad al ruido y la complejidad en la integración de componentes. Estas áreas son priorizadas para futuras mejoras, procurando un sistema más robusto, eficiente y preciso.

2.2. Diagnóstico de limitaciones y mejoras implementadas

El sistema FDS-System, en su estado original, permitió la caracterización de aislamientos eléctricos mediante espectroscopía en el dominio de la frecuencia. Sin embargo, a través de su implementación y análisis de resultados, se han identificado varias limitaciones que restringen su rendimiento y precisión, además de elementos clave donde se pueden implementar mejoras para optimizar su desempeño.

2.2.1. Medición no simultánea de señales de corriente y tensión

2.2.1.1. Descripción de la limitación:

El multímetro digital DMM6500 no realiza la adquisición simultánea de las señales de tensión y corriente. En su lugar se hace un proceso secuencial, que inicia con la captura de la señal de tensión, luego se reconfigura el DMM para medición de corriente y finalmente se captura la señal de corriente. A partir de las estampas de tiempo y asumiendo estabilidad en la frecuencia y amplitud entregada por el generador de señales y la fuente Chroma, se calcula el ángulo de fase entre tensión y corriente. Esto podría introducir desfases en las mediciones debido a la desincronización temporal entre ambas señales. Afecta la precisión del cálculo del ángulo de desfase y, por ende, la determinación del factor de pérdidas dieléctrica.

En la literatura se evidencian sistemas de medida que emplean instrumentación comercial de alta gama, como DIRANA (Omicron) o IDAX (Megger), cuya exactitud se encuentra dentro de márgenes de $\pm 1\%$ [19] En comparación, el sistema desarrollado FDS-System constituye

una alternativa de bajo costo que se aproxima a los estándares internacionales, con capacidad de validación frente a dichos equipos.

2.2.1.2. *Propuesta de mejora:*

Se propone adquirir un segundo multímetro digital DMM6500 Keithley. Este equipo es altamente compatible con la arquitectura existente del sistema y permite una configuración rápida y precisa. La hipótesis inicial era que al distribuir las funciones de medición entre ambos multímetros y conectarlos mediante TSP-Link, sería posible obtener mediciones simultáneas de tensión y corriente. Esto reduciría los errores en el cálculo del ángulo de desfase y aumentaría la precisión de las pruebas.

2.2.1.3. *Diseño de la solución:*

Dos DMM6500 conectados con TSP-Link.

Para superar la limitación de digitalización precisa de las señales de tensión y corriente, en el manual del multímetro se recomienda emplear un segundo multímetro DMM6500 y vincular ambos mediante la interfaz TSP-Link. Con esta configuración se busca permitir sincronizar su operación por medio de programación, lo que posibilitaría la captura simultánea de las señales de tensión y corriente, mejorando así la calidad y eficiencia del proceso de medición [20], tal como se observa en la figura 9:

Figura 9. Conexión de dos multímetros con TSP-Link.



Fuente: Two DMMs connected with TSP-Link [20].

Diseño y configuración de los nuevos componentes.

- *Implementación de tarjetas de comunicación KTTI-GPIB.* Con el objetivo de facilitar la comunicación entre los multímetros digitales, se incorporaron tarjetas mostradas en la figura 10 en ambos equipos. Estas tarjetas fueron seleccionadas por ofrecer una interfaz estandarizada para la transmisión de datos y una posible mejora en la sincronización de mediciones simultáneas. Sin embargo, durante la implementación no se logró establecer una comunicación efectiva ni validar su funcionamiento dentro del sistema, por lo que esta alternativa no resultó satisfactoria en el contexto de la prueba realizada.

Figura 10. KTTI-GPIB Communication and Digital I/O Accessory.



Fuente: KTTI-GPIB Communication and Digital I/O Accessory Instruction Sheet [21].

- *Fabricación de cable DB9 macho-macho para interconexión.* Como parte del proceso de integrar las tarjetas de comunicación KTTI-GPIB, se optó por fabricar un cable DB9 macho-macho, tal como se observa en la figura 11, con el fin de establecer la conexión física entre ambas tarjetas. Esta alternativa buscaba permitir una transmisión estable de señales y facilitar la sincronización durante las mediciones simultáneas. Sin embargo, esta solución no resultó funcional en el contexto de la prueba, por lo que no se continuó su implementación.

Figura 11. Cable DB9 macho-macho para interconexión.



Fuente: Elaboración propia.

2.2.2. Conectividad y diseño estructurado del sistema

2.2.2.1. Descripción de la limitación:

La falta de un espacio adecuado y organizado para los sistemas genera problemas en la conexión de los equipos. La dispersión de los dispositivos en distintas áreas y sin una estructura definida dificulta la gestión de cables y aumenta la probabilidad de interferencias y desconexiones. Además, el hecho de que los equipos no estén conectados a un único punto puede resultar en alimentación de equipos con diferentes fases de la red y diferencias de potencial entre tierras, que podrían generar problemas de estabilidad en las mediciones.

2.2.2.2. Propuesta de mejora:

Para abordar los problemas de conexión y estabilidad causados por la falta de un espacio organizado y una alimentación eléctrica centralizada, se propone una solución integral basada en dos acciones principales:

- Implementación de una regleta eléctrica optimizada: permitir una distribución homogénea de la alimentación eléctrica para reducir variaciones de potencial y

mejorar la estabilidad operativa de los equipos.

- Reorganización y apilamiento estructurado de los dispositivos: facilitar la gestión de cables, minimizar interferencias y mejorar la accesibilidad de los componentes.

2.2.2.3. Diseño de la solución

Se analizaron las limitaciones de conectividad y escalabilidad del sistema original, priorizando soluciones que optimizaran la integración física y eléctrica de los componentes. La revisión incluyó opciones como una regleta eléctrica protegida y una reorganización del sistema. Para mejorar la organización y estabilidad del sistema, se llevaron a cabo las siguientes acciones:

Gestión eficiente de la conexión de equipos. La compra de una regleta eléctrica (figura 12) ha optimizado la gestión de la conexión y desconexión de los equipos. Este componente, elegido por su capacidad de carga y características de protección, simplifica la operación diaria y reduce el riesgo de desconexiones involuntarias, además de reducir diferencias de potencial y mejorar la estabilidad operativa.

Figura 12. Regleta eléctrica.

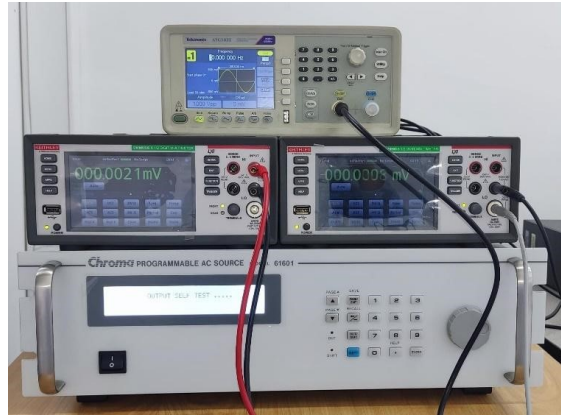


Fuente: Regleta Electrica Multitoma Toma Corriente Oficina Luces.

Optimización del espacio y movilidad. Una medida fundamental fue la reorganización física de los equipos, estratégicamente apilados en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad del Valle sede Meléndez. Este ajuste no solo simplifica la operación diaria, sino

que también minimiza el riesgo de daños asociados al movimiento constante de los dispositivos.

Figura 13. Organización de equipos.



Fuente: Elaboración propia.

2.2.3. Ruido y sensibilidad en bajas frecuencias

2.2.3.1. Descripción de la limitación:

En pruebas con frecuencias inferiores a 1 Hz, las corrientes generadas tienen niveles muy bajos, lo que las hace vulnerables al ruido ambiental y eléctrico. La calidad de los datos disminuye, generando errores significativos en la caracterización de materiales con alta impedancia.

2.2.3.2. Propuesta de mejora:

Implementar cables coaxiales o triaxiales de alta calidad para garantizar la integridad de las señales. Estos cables están diseñados para reducir el ruido y las fugas, características esenciales en pruebas de bajo nivel. Adicionalmente, se propone incorporar un gabinete metálico diseñado para alojar el objeto sometido a prueba. Este componente actuará como un blindaje contra interferencias electromagnéticas externas y proporcionará un entorno seguro y estable para la ejecución de las pruebas.

2.2.3.3. *Diseño de la solución:*

Fuentes de error descritas en manual de Keithley.

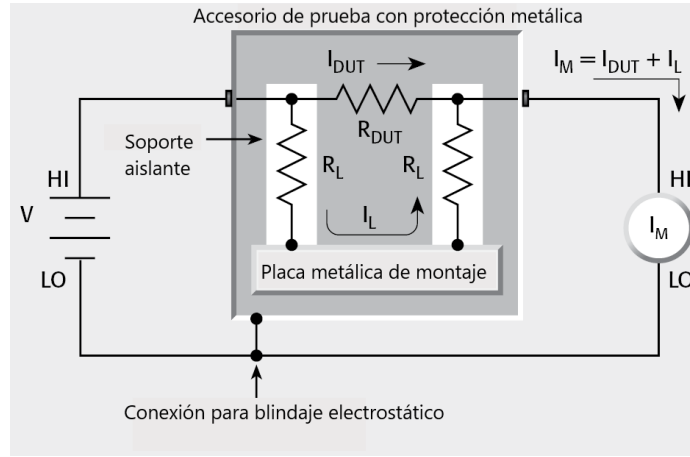
En el manual de mediciones de bajo nivel de Keithley se analizan las fuentes comunes de error, las formas de minimizar estos errores y la ciencia detrás de los equipos de medición se tratan en detalle. En el capítulo 2 se describe información sobre cómo realizar mediciones exitosas de baja corriente con temas como corriente de fuga y protección, ruido e impedancia de fuente, deriva cero, corrientes generadas, etc.

- **Corrientes de fuga y protección.**

Las corrientes de fuga se originan debido a trayectorias de resistencia no deseadas entre el circuito de medición y las fuentes de tensión cercanas. Estas corrientes erróneas fluyen a través de la resistencia de aislamiento cuando se aplica una tensión, constituyendo un fenómeno de fuga. Este problema suele surgir cuando la impedancia del dispositivo bajo prueba es comparable a la de los aisladores presentes en el circuito de prueba. La presencia de corrientes de fuga puede afectar significativamente la precisión de las mediciones en corrientes bajas. Para mitigar este efecto, se recomienda el uso de aisladores de alta calidad, la reducción del nivel de humedad en el entorno de prueba y la implementación de medidas de protección.

Las figuras 14 y 15 muestran cómo la protección puede eliminar la corriente de fuga que puede circular a través de los aisladores de separación en un dispositivo de prueba [22].

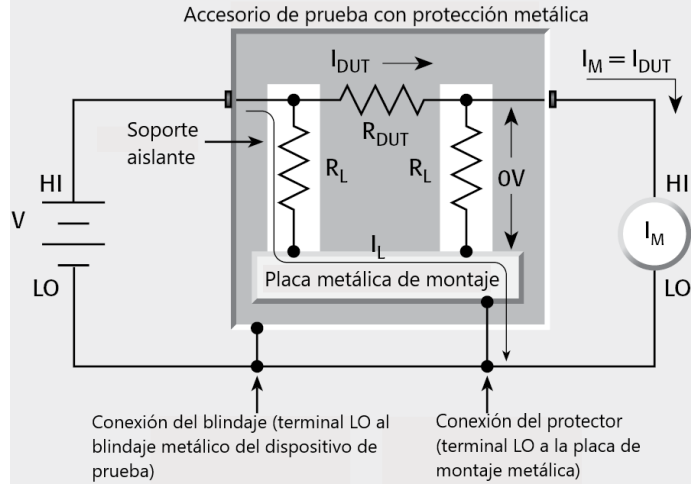
Figura 14. Circuito sin protección.



Fuente: Test Fixture Guarding with an SMU Instrument (modificado) [22] .

La Figura 14, muestra un esquema de medición en el que un dispositivo bajo prueba (representado como R_{DUT}) se conecta a una fuente de tensión y su corriente es medida por un amperímetro. Sin embargo, debido a la presencia de una resistencia parásita (R_L), se produce una corriente de fuga (I_L) hacia tierra. Esta corriente, fluye a través del aislamiento del sistema debido a variables como humedad o el uso de materiales con baja resistencia dieléctrica. Como consecuencia, el amperímetro no mide exclusivamente la corriente del dispositivo (I_{DUT}), sino la suma de esta con la corriente de fuga, es decir, $I_M = I_{DUT} + I_L$. Esta situación genera errores en la medición, que pueden ser especialmente significativos cuando se trabaja con dispositivos de alta impedancia o corrientes muy bajas, donde incluso pequeñas fugas afectan gravemente la precisión del resultado [22].

Figura 15. Circuito con protección.



Fuente: Test Fixture Guarding with an SMU Instrument (modificado) [22] .

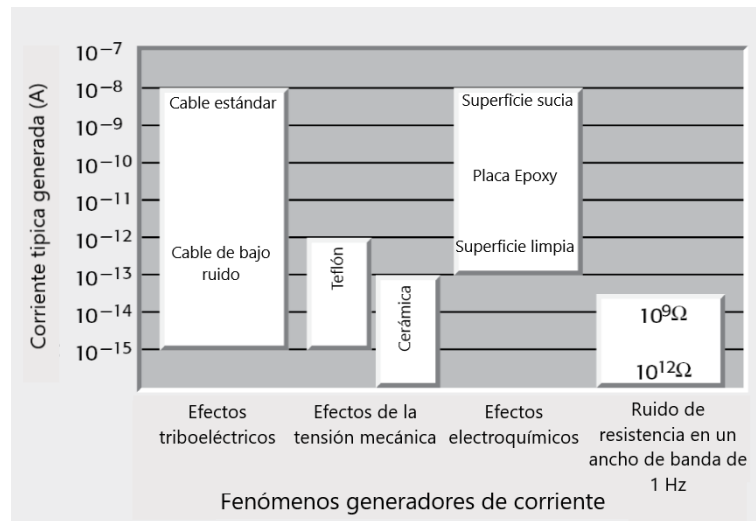
La Figura 15, representa una configuración mejorada del sistema de medición respecto a la mostrada en la Figura 14. En este caso, se incorpora una conexión de guardia entre el terminal de baja del instrumento (LO) y la placa metálica de montaje, que también está en contacto con los soportes del dispositivo bajo prueba. Esta conexión adicional mantiene el mismo potencial que el punto de referencia, lo que anula la diferencia de tensión en las trayectorias parásitas y, por tanto, evita el flujo de corriente de fuga (I_L). Como consecuencia, dicha corriente ya no atraviesa el instrumento de medición y no se suma a la señal medida. De este modo, el amperímetro registra únicamente la corriente real que atraviesa el dispositivo bajo prueba, es decir, $I_M = I_{DUT}$. Este método, conocido como protección activa, es esencial en pruebas de materiales con alta impedancia, ya que permite eliminar errores asociados a fugas en los aislantes, asegurando una medición precisa y confiable incluso en condiciones de corrientes extremadamente bajas [22].

- Corrientes generadas.

Cualquier corriente no deseada generada en el sistema de prueba se agregará a la corriente esperada, lo que resultará en errores. Estas corrientes pueden originarse internamente, como en el caso de la corriente de polarización de entrada del instrumento, o pueden provenir de fuentes externas, como aisladores y cables. El

amperímetro ideal debería mostrar cero cuando sus terminales no están conectadas. Sin embargo, los amperímetros prácticos tienen una pequeña corriente incluso en ausencia de conexión. Este error, conocido como error de corriente 'cero', se debe principalmente a la corriente de polarización de entrada. Esta corriente proviene de corrientes de polarización de dispositivos activos y de fugas a través de aisladores en el instrumento. Otros factores, como variaciones en la compensación de tensión debido al tiempo y la temperatura, también pueden contribuir a errores de corriente, especialmente en los rangos de corriente más altos. La figura 16 resume las magnitudes de una serie de corrientes generadas [22].

Figura 16. Magnitudes típicas de las corrientes generadas.



Fuente: Typical Magnitudes of Generated Currents [22].

- Conexiones de dispositivos.

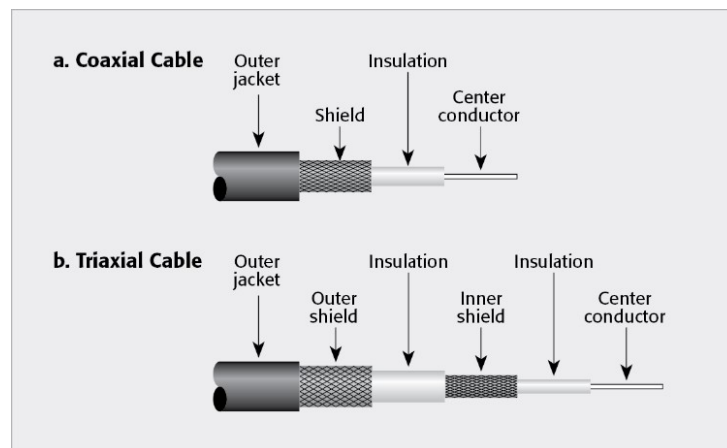
Aunque la precisión del instrumento es crucial al llevar a cabo mediciones de bajo nivel, la integridad de las conexiones del dispositivo también desempeña un papel importante. Es esencial que la ruta completa de la señal, desde los conectores, a través de los cables y hasta el dispositivo de prueba, minimice la degradación de la señal medida tanto como sea posible.

Aunque los DMM comúnmente emplean cables de prueba sin blindaje, estos esquemas

de conexión suelen ser inapropiados para mediciones de bajo nivel llevadas a cabo con picoamperímetros, electrómetros e instrumentos SMU. Estos instrumentos requieren cables coaxiales o triaxiales para garantizar un rendimiento óptimo en la precisión de las mediciones. Un cable coaxial consta de un único conductor rodeado por un blindaje (Figura 17 (a)); un cable triaxial agrega un segundo blindaje alrededor del primero (Figura 17 (b)).

El cable triaxial incluye un blindaje interior que puede conectarse al mismo potencial que el conductor central, lo que se conoce como potencial de protección o guardia. Esta conexión elimina la diferencia de tensión entre ambos y reduce las corrientes de fuga a través del aislamiento del cable. Además, al disminuir la capacitancia del sistema, se reducen los tiempos de subida del circuito, lo cual es especialmente útil en mediciones rápidas o señales de bajo nivel. El blindaje exterior suele conectarse a tierra del chasis o al terminal común para proteger contra interferencias externas. Los triaxiales de buena calidad utilizan aislantes de polietileno con valores típicos de $1 \text{ T}\Omega/\text{pie}$ entre el conductor y el blindaje [22].

Figura 17. Cables coaxiales y triaxiales.



Fuente: Typical Magnitudes of Generated Currents [22].

Diseño y configuración de los nuevos componentes.

- Reducción de interferencias electromagnéticas. La adquisición de un gabinete metálico para los objetos bajo prueba puede ser una solución eficaz para reducir interferencias

electromagnéticas. Este enfoque garantiza un entorno de prueba más controlado, mejorando la precisión de las mediciones y fortaleciendo la consistencia de los resultados.

Figura 18. Gabinete metálico.



Fuente: Propia.

- Cable triaxial para reducción de corrientes de fuga. Con el objetivo de mitigar corrientes de fuga en las mediciones, se construyó un cable triaxial de fabricación propia, diseñado para trabajar con el multímetro digital Keithley DMM6500.

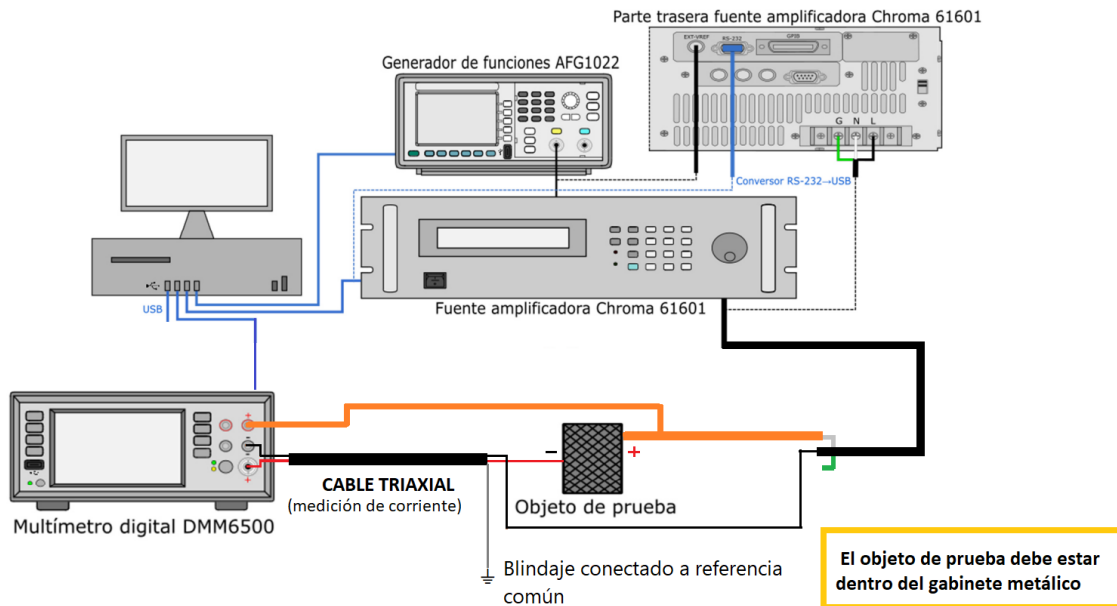
Este cable está compuesto por tres elementos:

1. Un conductor central, encargado de transportar la señal de corriente hacia el instrumento.
2. Un blindaje interno, el cual se conecta a la referencia común del sistema (terminal LO del multímetro). Su función es reducir la capacitancia parásita entre el conductor y el blindaje externo, minimizando así las corrientes de fuga y mejorando los tiempos de subida en la medición.
3. Un blindaje externo, que actúa como apantallamiento electromagnético y se conecta a la tierra del chasis para garantizar una referencia común entre todos los equipos y proteger la señal frente a interferencias externas.

La Figura 19 muestra de forma integrada la arquitectura del sistema de medición, incluyendo el multímetro, la fuente amplificadora Chroma 61601 y el generador de funciones, así como el detalle de la conexión física entre el cable triaxial y el objeto bajo prueba.

Este diseño permitirá realizar mediciones precisas y estables de corriente de fuga, especialmente en configuraciones sensibles, donde el uso de cables coaxiales o simples podría introducir errores significativos por interferencia externa.

Figura 19. Vista general del sistema de medición y conexiones principales con cable triaxial.



Fuente: Sistema para la caracterización de aislamientos eléctricos mediante espectroscopia en el dominio de la frecuencia (modificado) [1].

2.3. Resultados de las pruebas de rendimiento del hardware mejorado.

Con el objetivo de evaluar el impacto de las mejoras implementadas en el hardware del sistema FDS-System, se llevaron a cabo una serie de pruebas comparativas destinadas a medir

su desempeño en condiciones reales de operación. Estas pruebas se enfocaron en aspectos críticos como la precisión de las mediciones, la reducción de errores causados por interferencias electromagnéticas y la consistencia en señales de baja corriente.

2.3.0.1. Prueba 1. Ajuste de los relojes de los multímetros

Con el fin de facilitar el análisis del desfase entre las señales de tensión y corriente, se buscó sincronizar los relojes de los dos multímetros digitales DMM6500, de manera que ambos iniciaran sus mediciones de forma simultánea. La idea era poder ajustar la fecha y hora mediante código (o manualmente), estableciendo un punto de partida común para las mediciones. Sin embargo, se encontró que, aunque era posible configurar la fecha, las horas, los minutos y los segundos, no era factible modificar las fracciones de microsegundos o nanosegundos, que son cruciales para lograr una sincronización de alta precisión.

- **Limitación en el hardware.** El ajuste de tiempo en los multímetros solo permite modificar la fecha completa, así como las horas y los minutos, pero no los segundos.
- **Limitación en el software.** Se implementó un código en MATLAB para ajustar la fecha y hora de ambos multímetros de forma sincronizada. Sin embargo, el código solo permite modificar la fecha, hora, minutos y segundos, sin afectar las fracciones de segundos, las cuales son esenciales para la precisión del análisis.
- **Código Implementado en MATLAB.** El siguiente código se utilizó para establecer la fecha y hora en ambos multímetros:

```
% Establecer la fecha y hora en ambos multímetros
fechaHora = datetime('31-Ene-2025 19:21:50.126803');
timestamp = posixtime(fechaHora);
fprintf(objMultimetro1, 'syst:time %d\n', timestamp);
fprintf(objMultimetro2, 'syst:time %d\n', timestamp);
```

Si bien este código estableció la fecha, hora, minutos y segundos en los multímetros, no logró modificar los milisegundos, lo que generó una pequeña diferencia en la sincronización de las mediciones.

Dado que ni el hardware ni el software permiten ajustar con precisión los milisegundos, no fue posible lograr una sincronización exacta entre los relojes de los multímetros. Esto implica que el algoritmo de análisis del desfase debe considerar una compensación para corregir estas diferencias en el tiempo de inicio de las mediciones.

2.3.0.2. Prueba 2. Validación del acoplamiento y comunicación de las tarjetas

Entre las posibles mejoras implementadas en el hardware del FDS-System, se integró la conexión de dos multímetros Keithley DMM6500 para realizar mediciones simultáneas. Para lograr la sincronización entre estos equipos, se adquirieron tarjetas de comunicación KTTI-PGIB, cuyo acoplamiento era fundamental para garantizar la correcta sincronización y precisión en la captura de datos. La presente prueba se realizó con el objetivo de evaluar la sincronización de las tarjetas y confirmar que estuvieran adecuadamente acopladas a los multímetros, asegurando así la eficiencia del sistema de medición en tiempo real.

- Procedimiento de la Prueba.

Se verificó que las tarjetas de comunicación estuvieran correctamente acopladas en los multímetros, asignándoles una dirección GPIB única a cada multímetro mediante el siguiente código en MATLAB:

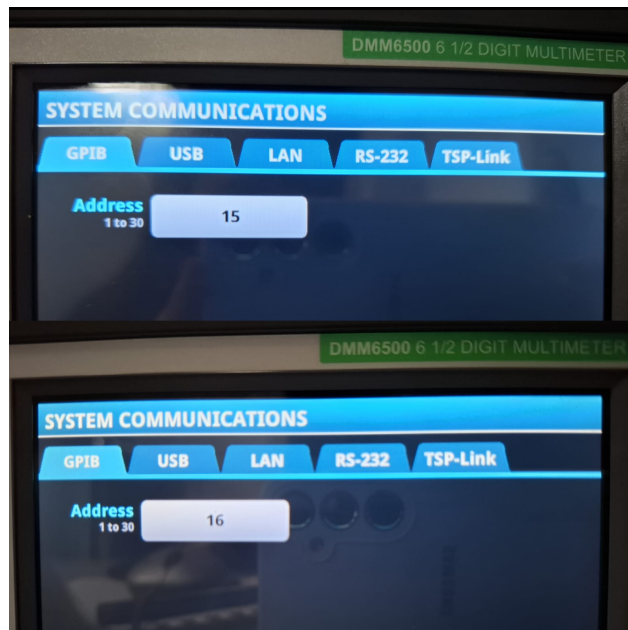
```
fprintf(objMultimetro1, ':SYSTem:GPIB:ADDRess 15');  
fprintf(objMultimetro2, ':SYSTem:GPIB:ADDRess 16');
```

Se verificó en la interfaz física de los multímetros que la dirección GPIB asignada mediante el código correspondía efectivamente a la dirección configurada.

- Resultados de la Prueba.

Tal como se observa en la figura 20. Se confirmó que las tarjetas de comunicación GPIB estaban correctamente acopladas y configuradas. La asignación de direcciones GPIB se realizó exitosamente, garantizando una comunicación estable entre los dispositivos. Esto permite la interacción adecuada entre los multímetros y el sistema de adquisición de datos.

Figura 20. Direcciones GPIB en multímetros.



Fuente: Propia.

2.3.0.3. Prueba 3. Evaluación del desempeño de mediciones simultáneas con multímetros sincronizados

Con el objetivo de evaluar la precisión en la sincronización de mediciones entre dos multímetros digitales Keithley DMM6500, se desarrolló una prueba automatizada mediante un script en MATLAB. Ambos dispositivos fueron equipados con tarjetas de comunicación KTTI-GPIB y se conectaron las tarjetas utilizando un cable DB9 macho-macho diseñado específicamente para este sistema.

Descripción del montaje

Se usó el generador de señales configurado para emitir una onda sinusoidal de 10 V de amplitud a 1000 Hz, junto con dos multímetros digitales Keithley DMM6500: uno configurado como maestro síncrono, encargado de medir la tensión y generar la señal de disparo, y otro

como esclavo síncrono, encargado de medir la corriente y responder al disparo recibido. El objeto de prueba consistió en una red en paralelo conformada por una resistencia de 980 Ω y un condensador de 913 nF, diseñada para emular el comportamiento eléctrico de un aislamiento dieléctrico.

Procedimiento experimental

El control del sistema se realizó mediante un código en MATLAB, que configuró y sincronizó tanto el generador de señales como los dos multímetros utilizando comandos SCPI. La lógica del algoritmo puede resumirse así:

Algorithm 1 Sincronización y adquisición de datos con dos multímetros DMM6500

- 1: Definir puertos USB para generador y multímetros
 - 2: Configurar generador:
 - Forma de onda: sinusoidal (SIN)
 - Amplitud: 10 V Frecuencia: 1000 Hz
 - 3: Configurar multímetro maestro (tensión):
 - :SENS:FUNC "VOLT:AC" (Modo tensión AC)
 - :SYST:GPIB:ADDR 15
 - :DIGital:LINE2:MODE SYNC, MAST (Sincronización como maestro)
 - 4: Configurar multímetro esclavo (corriente):
 - :SENS:FUNC "CURR:AC" (Modo corriente AC)
 - :SYST:GPIB:ADDR 16
 - :DIGital:LINE1:MODE SYNC, ACC (Sincronización como aceptador)
 - 5: Activar salida del generador (OUTPut ON)
 - 6: **for** $i = 1$ hasta 10 **do**
 - 7: Enviar :INIT a ambos multímetros
 - 8: Medir tensión y corriente
 - 9: Leer buffer interno con :TRAC:DATA? ...
 - 10: Leer estampas de tiempo con TST
 - 11: Calcular diferencia temporal
 - 12: Almacenar resultados
 - 13: **end for**
 - 14: Apagar generador y cerrar conexiones
-

Resultados

Durante la prueba, se realizaron 10 mediciones consecutivas. Para cada una, se registraron las estampas de tiempo correspondientes a las señales de tensión y corriente. La diferencia entre estas estampas permitió evaluar la precisión de la sincronización. Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 1. Resultados de la Prueba de Sincronización de Mediciones

Número de Medición	Estampa de Tiempo (Tensión) [s]	Estampa de Tiempo (Corriente) [s]	Diferencia (s)
1	57.1402	57.1442	0.0040
2	01.5280	01.5308	0.0028
3	04.2275	04.2312	0.0037
4	06.9266	06.9319	0.0053
5	09.6269	09.6311	0.0042
6	12.3338	12.3378	0.0040
7	15.0272	15.0297	0.0025
8	17.7262	17.7296	0.0034
9	20.4259	20.4297	0.0038
10	23.1250	23.1291	0.0041

Como se observa en la Tabla 1 la diferencia promedio de 3.78 ms entre las señales de tensión y corriente está por encima del nivel deseable. Esto confirma que el uso del protocolo GPIB con TSP-Link, aunque técnicamente viable para otras aplicaciones, no resulta adecuado para este nivel de precisión.

El protocolo GPIB (*General Purpose Interface Bus*) fue diseñado para facilitar la comunicación confiable entre instrumentos de medición y sistemas de control, pero no está optimizado para la ejecución simultánea de eventos en tiempo real. Su funcionamiento se basa en una lógica de comunicación por turnos (*polling*), en la que el controlador envía instrucciones secuenciales a cada dispositivo y espera su respuesta antes de continuar con el siguiente. Aunque estas acciones ocurren rápidamente, no son instantáneas, lo que introduce pequeñas diferencias temporales entre los comandos enviados. Incluso cuando se configura una línea de disparo físico entre los equipos, como se hizo en esta prueba, la

respuesta de cada instrumento depende de su propio procesamiento interno y de cómo interpreta la señal. Esto genera variabilidad en los tiempos de medición, evidenciada en las diferencias entre las estampas de tiempo registradas, y limita la capacidad del sistema para garantizar una sincronización precisa entre dispositivos [17].

Por esta razón, se optó por regresar a una configuración con un solo multímetro, aprovechando las estampas de tiempo generadas por el propio dispositivo para calcular diferencias entre señales con mayor consistencia, a costa de un aumento en el tiempo total de medición.

2.3.0.4. Prueba 4. Validación del generador de funciones y el multímetro digital

Debido a que no fue posible sincronizar los dos multímetros inicialmente planificados, se optó por continuar utilizando únicamente uno de ellos. Con el fin de garantizar el correcto funcionamiento del sistema de medición, se decidió validar tanto el generador de funciones como la capacidad del multímetro para capturar de forma precisa las señales generadas. El objetivo de esta prueba es confirmar la estabilidad del generador de funciones y verificar que el multímetro Keithley registra correctamente la señal alterna, permitiendo evaluar su desempeño y confiabilidad en la medición. Para esto primero se realizó un análisis del algoritmo usado anteriormente.

Algoritmo utilizado para el cálculo del ángulo de fase

El cálculo del ángulo de desfase entre las señales de tensión y corriente aplicadas al objeto bajo prueba se realiza mediante el análisis de sus respectivos cruces por cero. Esta estimación requiere especial cuidado debido a que, por limitaciones del multímetro, ambas señales no pueden ser adquiridas de forma simultánea, lo que introduce un retardo fijo entre sus registros. El algoritmo fue implementado en MATLAB y se apoya en el uso de vectores de magnitud y estampas de tiempo (TST, por sus siglas en inglés: *Time Stamp Token*) para cada señal.

El procedimiento se divide en las siguientes etapas:

1. Filtrado y detección del cruce ascendente por cero.

Las señales digitalizadas de tensión y corriente son primero suavizadas mediante un filtro de media móvil para reducir el ruido y facilitar la identificación precisa de los cruces por cero. Se emplea un ciclo de búsqueda que detecta el cambio de signo de

negativo a positivo en el vector de magnitudes de cada señal. Las posiciones donde se produce este cruce se almacenan para su posterior uso.

2. Adecuación de las estampas de tiempo (TST).

Se selecciona el valor de TST capturadas por el multímetro correspondiente al primer cruce por cero y se convierte al formato de duración en MATLAB para poder calcular diferencias temporales con alta precisión.

3. Cálculo de la diferencia de tiempo.

Una vez que se tienen los tiempos exactos del primer cruce por cero de cada señal, se calcula su diferencia temporal. Esta diferencia incluye tanto el desfase entre las señales como un retardo sistemático introducido por la adquisición secuencial.

4. Cálculo del ángulo de desfase.

La diferencia temporal se convierte a un ángulo mediante la relación:

$$\theta = \left(\frac{\Delta t}{T} \right) \cdot 360^\circ \quad (5)$$

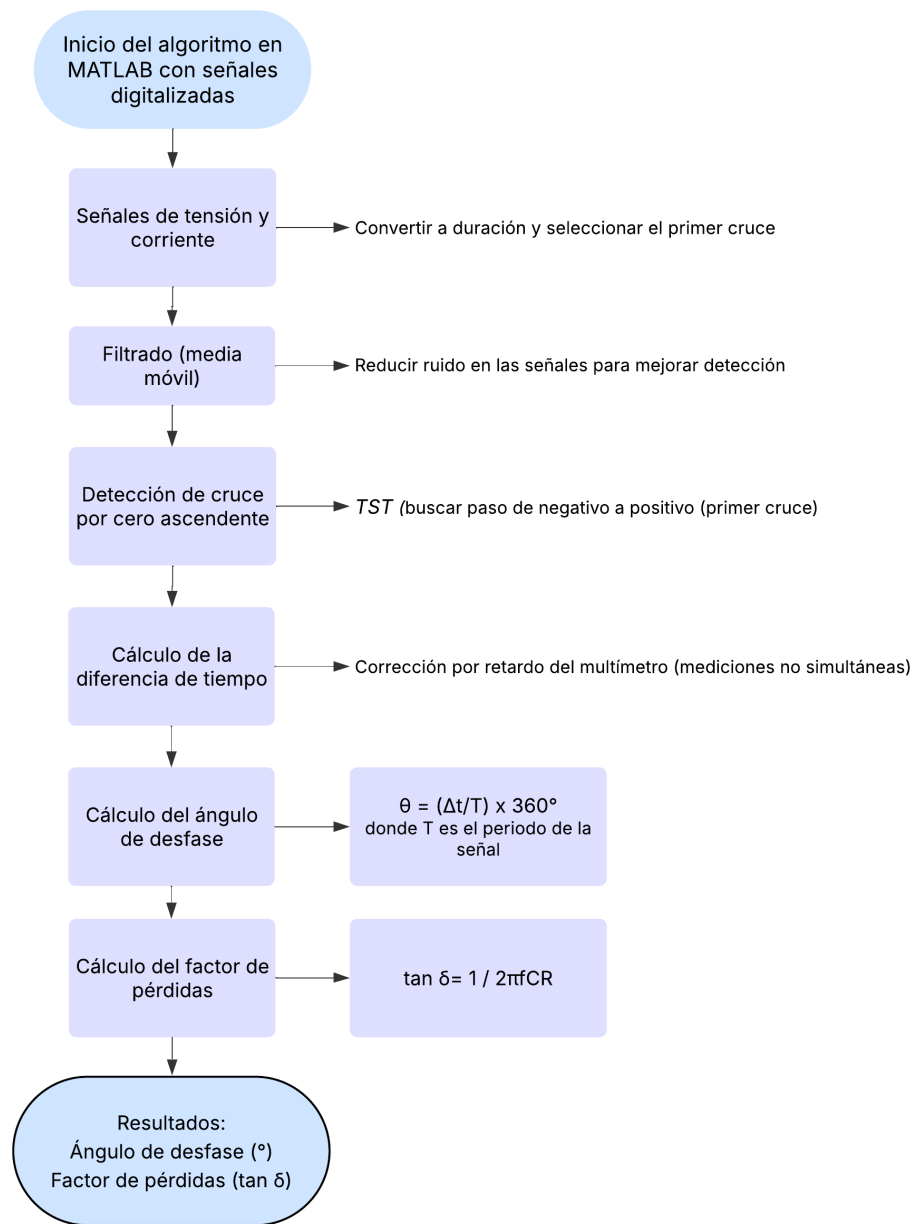
donde Δt es la diferencia de tiempo en segundos y T es el periodo de la señal. Luego, se eliminan los ciclos enteros de desfase mediante un ajuste, y el ángulo resultante se expresa dentro del rango $[-180^\circ, 180^\circ]$ para representar adecuadamente adelantos o retardos. Finalmente, se invierte el signo del ángulo si se considera que la referencia es la tensión.

5. Cálculo del factor de pérdidas.

Una vez obtenido el ángulo de desfase, puede calcularse el factor de pérdidas dieléctricas ($\tan \delta$) del objeto bajo prueba. Para ello se construyen vectores complejos a partir de las magnitudes máximas de tensión y corriente, y del ángulo de fase estimado. Se calcula la impedancia, la capacitancia compleja, y finalmente el factor de pérdidas como el cociente entre la parte imaginaria y la real de la capacitancia.

La Figura 21 presenta el diagrama de flujo que resume el procedimiento implementado en MATLAB para calcular el ángulo de desfase entre las señales de tensión y corriente aplicadas al objeto bajo prueba. Este algoritmo se basa en el análisis de los cruces por cero de ambas señales, teniendo en cuenta que, debido a las limitaciones del instrumento de adquisición, las señales no pueden capturarse de forma simultánea.

Figura 21. Diagrama de flujo para algoritmo.



Fuente: Propia.

Una vez analizado el algoritmo utilizado para el cálculo del ángulo de desfase, se procedió a realizar una prueba orientada a validar la estabilidad y precisión del generador de señales

empleado durante la adquisición. Esta validación fue necesaria para asegurar que las estimaciones del desfase no se vieran afectadas por posibles fluctuaciones en la frecuencia o el período de la señal generada. Para ello, se analizaron las estampas de tiempo correspondientes a los valores mínimos de la señal de tensión en múltiples ciclos consecutivos, con el fin de verificar la constancia periódica de la señal y confirmar la ausencia de distorsiones temporales significativas.

Condiciones de prueba. La prueba se realizó utilizando como objeto de prueba un circuito RC en paralelo, compuesto por una resistencia de $980\ \Omega$ y un condensador de $913\ \text{nF}$. Los parámetros de entrada fueron una frecuencia de $1000\ \text{Hz}$ y una tensión pico de $10\ \text{V}$, generados desde un generador de funciones Tektronix.

Método empleado. Se extrajeron 40 muestras correspondientes a los mínimos de la señal, tomados cada 10 ciclos. A partir de estos datos se realizó una regresión lineal que permite estimar la relación entre el número de ciclo y el tiempo de ocurrencia del mínimo. La ecuación general utilizada es:

$$t_{\text{estimado}} = m \cdot x + b \quad (6)$$

donde:

- t_{estimado} : tiempo estimado del mínimo (en segundos)
- x : número de ciclo
- m : pendiente de la recta (período promedio)
- b : intersección con el eje vertical (tiempo inicial estimado)

Los coeficientes m y b se calcularon con las siguientes fórmulas de regresión lineal:

$$m = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (7)$$

$$b = \frac{\sum y_i - m \sum x_i}{n} \quad (8)$$

donde:

- n : número de datos (40 muestras)

- x_i : ciclo i -ésimo
- y_i : tiempo real medido para ese ciclo

Se obtuvieron los siguientes valores:

$$\sum x_i = 7840 \quad \sum y_i = 1231.9913 \text{ s}$$

$$\sum x_i^2 = 2069640 \quad \sum x_i y_i = 242003.2826$$

Sustituyendo:

$$m = \frac{40 \cdot 242003.2826 - 7840 \cdot 1231.9913}{40 \cdot 2069640 - 7840^2} = 0.0009999843 \text{ s/ciclo}$$

$$b = \frac{1231.9913 - (0.0009999843 \cdot 7840)}{40} = 30.6037851 \text{ s}$$

Por tanto, la ecuación de regresión obtenida fue:

$$t_{\text{estimado}} = 0.0009999843 \cdot x + 30.6037851$$

Análisis del error. Se calculó el error absoluto en cada ciclo como:

$$\varepsilon_i = |y_i - t_{\text{estimado},i}| \quad (9)$$

Y el error medio absoluto (EMA) como:

$$\text{EMA} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \quad (10)$$

El error medio absoluto resultante fue:

$$\text{EMA} = 0.6584 \mu\text{s}$$

Evaluación relativa según la frecuencia. Para una señal de 1000Hz, el período esperado es:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1000} = 1\text{ms} = 1000 \mu s \quad (11)$$

El error relativo:

$$\text{Error relativo (\%)} = \left(\frac{\text{Error absoluto}}{\text{Valor de referencia}} \right) \times 100 \quad (12)$$

$$\text{Error relativo} = \left(\frac{0.6584 \mu s}{1000 \mu s} \right) \times 100 = 0.066 \%$$

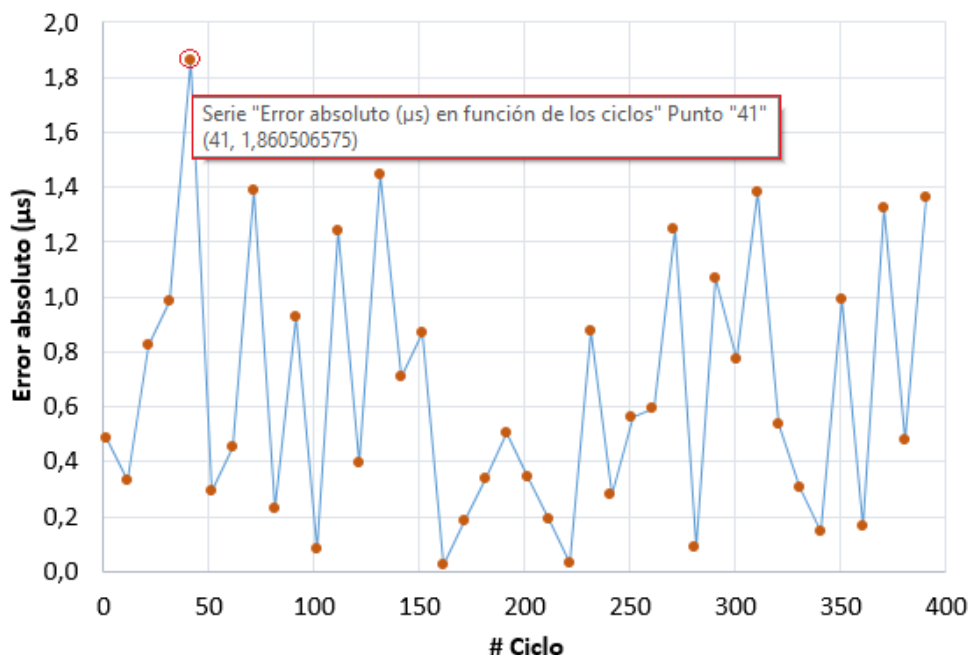
Y el desfase angular:

$$\theta = \frac{0.6584}{1000} \cdot 360^\circ = 0.237^\circ$$

Cabe resaltar que, considerando la frecuencia de muestreo del multímetro de 1 Msps, la resolución angular para una señal de 1 kHz es de aproximadamente $0,36^\circ$. Este valor se calcula dividiendo la frecuencia de muestreo (1.000.000 muestras/s) por la frecuencia de la señal (1.000 ciclos/s), obteniendo 1.000 muestras por ciclo; por lo tanto, cada muestra representa un ángulo de $360^\circ/1000 = 0,36^\circ$. Así, el error angular calculado de $0,24^\circ$ se encuentra dentro de esta resolución, indicando que puede atribuirse al efecto del muestreo y no necesariamente a oscilaciones reales en la frecuencia del generador o del reloj interno del DMM.

Análisis visual. Se graficó el error absoluto entre los tiempos medidos y los estimados mediante regresión lineal. La Figura 22 muestra la distribución de estos errores en microsegundos (μs) para cada ciclo analizado, permitiendo evaluar la variabilidad, estabilidad temporal y precisión del sistema de medición utilizado.

Figura 22. Error absoluto (μs) entre tiempos medidos y estimados en función del ciclo.



Fuente: Propia.

Se observa que los errores oscilan entre un mínimo de $0.025 \mu\text{s}$ y un máximo de $1.86 \mu\text{s}$, con un promedio de $0.658 \mu\text{s}$ y una desviación estándar de $0.476 \mu\text{s}$. La mayoría de los valores se mantienen por debajo de $1 \mu\text{s}$, sin evidenciar tendencias crecientes o decrecientes, lo que indica una variabilidad moderada pero controlada y confirma la estabilidad temporal del sistema de medición. Los picos puntuales observados superiores a $1.3 \mu\text{s}$ no siguen un patrón repetitivo, sugiriendo que corresponden a fluctuaciones aleatorias y no a errores sistemáticos.

2.3.0.5. Prueba 5. Evaluación de la respuesta en frecuencia

Esta prueba tiene como objetivo evaluar el desempeño del sistema FDS-System cuando opera en un rango amplio de frecuencias. Se busca determinar si las mejoras implementadas, como el cable triaxial y el gabinete metálico, mantienen la precisión y repetibilidad de las mediciones dieléctricas tanto en frecuencias bajas como altas.

- Descripción de la Prueba

La prueba consistió en realizar mediciones de tensión y corriente sobre un circuito de prueba compuesto por un circuito RC en paralelo con una resistencia de $980\ \Omega$ y un condensador de $913\ \text{nF}$, utilizando el sistema con y sin las mejoras implementadas en el hardware. Se aplicó una señal sinusoidal de $10\ \text{V}$ de amplitud, variando la frecuencia entre $0.1\ \text{Hz}$ y $1\ \text{kHz}$, generada por el generador de funciones. Durante las mediciones, se calculó la desviación estándar entre el promedio de 10 mediciones para cada frecuencia con el objetivo de evaluar la repetibilidad, el nivel de ruido y la sensibilidad a interferencias externas.

- Resultados

Los resultados presentados en la tabla 2 muestran la desviación estándar entre mediciones a diferentes frecuencias sin las mejoras de hardware implementadas y en la tabla 3 se muestran los resultados después de las mejoras.

Tabla 2. Resultados sin mejoras

Frecuencia (Hz)	Tensión (V)	Corriente (mA)	Desviación estándar Corriente (mA)
1000	9,7634	60,2102	0,3503
100	9,7026	11,4626	0,0263
10	10,3904	10,4956	0,0043
1	10,3956	10,4846	0,0052
0.1	10,3845	10,6537	0,0326
0.01	10,3924	10,6874	0,0563

Tabla 3. Resultados con mejoras

Frecuencia (Hz)	Tensión (V)	Corriente (mA)	Desviación estándar Corriente (mA)
1000	9,7279	60,2218	0,2596
100	9,7546	11,4533	0,0243
10	10,3692	10,4890	0,0037
1	10,3838	10,4615	0,0022
0.1	10,3789	10,6356	0,0018
0.01	10,3820	10,6492	0,0015

Los resultados de esta prueba muestran que, tras las mejoras implementadas, el sistema FDS-System logra mediciones más estables de tensión y corriente. En particular, la desviación

estándar de la corriente fue menor en comparación con los resultados obtenidos antes de la mejora. Este comportamiento se mantiene en todas las condiciones evaluadas, lo que confirma la estabilidad de las mediciones incluso cuando la señal varía considerablemente. Así, el sistema demuestra ser adecuado para escenarios donde las propiedades dieléctricas dependen de la frecuencia de excitación.

2.3.0.6. Prueba 6. Evaluación de la respuesta en frecuencia con corrientes de baja amplitud

La prueba consistió en realizar mediciones de tensión y corriente sobre una resistencia de $1\text{ G}\Omega$, utilizando el sistema con y sin las mejoras implementadas en el hardware. Se aplicó una señal sinusoidal de 50 V de amplitud, variando la frecuencia entre 0.1 Hz y 1 kHz, generada por el generador de funciones. Dado que el valor de la resistencia es extremadamente alto, la corriente medida es de 50 nA, lo que permite evaluar la sensibilidad del sistema en estas condiciones.

Durante las mediciones, se calculó la desviación estándar entre el promedio de 10 mediciones para cada frecuencia con el objetivo de evaluar la repetibilidad, el nivel de ruido y la sensibilidad a interferencias externas. La baja corriente esperada en la medición también permite evaluar la estabilidad del sistema frente a ruido eléctrico y posibles fuentes de error inducidas por la alta impedancia del circuito.

Resultados de la Prueba

Los valores obtenidos en la medición permitieron identificar el comportamiento del sistema en distintas frecuencias y su capacidad para mantener mediciones precisas a corrientes extremadamente bajas. Se analizaron los efectos del ruido y las posibles variaciones en las mediciones, observando si las mejoras implementadas en el hardware ayudaron a mitigar estos efectos.

Tabla 4. Resultados sin mejoras

Frecuencia (Hz)	Tensión (V) Promedio	Corriente (μA) Promedio	Desviación estándar Corriente (μA)
1000	47,4812	8,4231	0,3258
100	50,0398	0,9213	0,0512
10	49,6013	0,1456	0,0389
1	49,5924	0,0617	0,0157
0.1	49,5881	0,0354	0,0112

Tabla 5. Resultados con mejoras

Frecuencia (Hz)	Tensión (V) Promedio	Corriente (μA) Promedio	Desviación estándar Corriente (μA)
1000	47,5264	8,5965	0,3208
100	50,1160	0,9548	0,0402
10	49,6751	0,1772	0,0229
1	49,6590	0,0897	0,0085
0.1	49,6696	0,0701	0,0006

Análisis de los resultados de corriente en alta impedancia

Al aplicar una señal de 50 V pico sobre una resistencia de $1\text{ G}\Omega$, la corriente teórica esperada es:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{50}{1 \times 10^9} = 50\text{ nA} \quad (13)$$

No obstante, los valores registrados experimentalmente (ver Tablas 5 y 4) muestran corrientes del orden de 70 nA hasta $8.59\mu\text{A}$, lo cual supera ampliamente el valor teórico. Esta discrepancia puede explicarse a partir de tres factores principales:

1. Impedancia efectiva reducida por fugas y parásitos.

El sistema de medición incluye cables, conectores, y posibles contaminaciones que introducen rutas de fuga y capacitancias parásitas. Al recalcular la impedancia efectiva para el caso de 1000 Hz, se obtiene:

$$Z_{\text{ef}} = \frac{V_{\text{ef}}}{I_{\text{ef}}} \quad (14)$$

$$Z_{ef} = \frac{47.53}{8.59 \times 10^{-6}} \approx 5.53 \text{ M}\Omega,$$

Lo cual está muy por debajo de $1 \text{ G}\Omega$, indicando que la corriente está circulando principalmente por rutas no ideales [22].

2. Aumento de corriente con la frecuencia.

Además de la resistencia, en un sistema real existen capacitancias parásitas distribuidas entre los terminales, pistas del circuito impreso, cables de prueba, y la resistencia misma. Estas capacitancias introducen un camino adicional para la circulación de corriente alterna. La impedancia capacitiva está dada por:

$$Z_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (15)$$

Donde f es la frecuencia de la señal y C es la capacitancia parásita. A medida que la frecuencia aumenta, Z_C disminuye, facilitando el paso de más corriente por este camino paralelo al de la resistencia. Como resultado, el sistema se comporta como una impedancia total menor a la esperada, y la corriente medida aumenta progresivamente con la frecuencia [23].

3. Limitaciones del DMM6500 en corrientes bajas de AC.

En base al datasheet de Keithley DMM6500, la exactitud para el rango de $100 \mu\text{A}$ en AC es tal como se muestra en la siguiente tabla 6:

Tabla 6. Especificaciones de exactitud para corriente AC en el Keithley DMM6500

Rango	Resolución	Frecuencia	Exactitud (%)
$100 \mu\text{A}$	100 pA	$3 \text{ Hz} - 1 \text{ kHz}$	$\pm(0.10 \% \text{ lectura} + 0.07 \% \text{ rango})$

Para una corriente esperada de 50 nA , esto se traduce en:

$$\pm(0.001 \times 50 + 0.0007 \times 100000) = \pm 70.05 \text{ nA}$$

Este cálculo es una aplicación directa de la fórmula de incertidumbre establecida por el fabricante. La incertidumbre obtenida es incluso mayor que el valor de corriente esperado, lo cual significa que el equipo no tiene resolución confiable para distinguir señales en ese rango. Cualquier lectura en el intervalo aproximado de -20 nA a 120 nA

sería técnicamente aceptable según especificaciones, aunque desde el punto de vista metrológico no se pueda afirmar que representa con precisión el valor real. Por lo tanto, los valores medidos por encima de este umbral reflejan en realidad efectos adicionales del sistema, como rutas de fuga o influencia capacitiva [24].

2.4. Análisis pruebas de hardware

Las mejoras implementadas en el hardware del FDS-System representaron un avance en la estabilidad y repetibilidad de las mediciones. En la prueba de respuesta en frecuencia, la desviación estándar de la corriente en condiciones de baja frecuencia (0.1 Hz) disminuyó de 0.0326 mA a 0.0018 mA, lo que representa una reducción aproximada del 94.5 %. En condiciones de baja frecuencia, la desviación estándar se redujo de 0.0112 μ A a 0.0006 μ A en 0.1 Hz, equivalente a una mejora del 94.6 %. Estos resultados demuestran la efectividad de las acciones implementadas, como el uso del cable triaxial y el gabinete metálico, para minimizar el impacto del ruido y las interferencias.

Sin embargo, los intentos por lograr medición simultánea mediante dos DMM6500 conectados por TSP-Link no alcanzaron la sincronización precisa deseada. La diferencia promedio de 3.78 ms entre las señales medidas quedó muy por encima del objetivo ideal de <1 ms, confirmando que el protocolo GPIB no es adecuado para adquisiciones estrictamente sincrónicas en esta aplicación.

Adicionalmente, las pruebas con corrientes bajas mostraron que el equipo utilizado no tiene la exactitud suficiente para rangos de corriente de decenas de nanoamperios en AC: el error relativo fue superior al 100 % en esas condiciones. Esto refuerza la necesidad de considerar, en futuros desarrollos, la integración de electrometros o instrumentos específicamente diseñados para este tipo de medición.

Las mejoras aportaron un incremento significativo en la calidad de los datos (reducción del ruido superior al 90 % en condiciones críticas), aunque persisten limitaciones estructurales del hardware que restringen el alcance de las mediciones, especialmente en sincronización y corrientes muy bajas.

Capítulo 3

Implementación de mejoras en el software del sistema FDS-System

La implementación de mejoras en el software del FDS-System es esencial para garantizar un desempeño óptimo en las mediciones dieléctricas. Este apartado aborda las acciones realizadas para identificar las limitaciones del software original, destacando los avances en los algoritmos de procesamiento y la automatización de tareas.

En primer lugar, se realizó un diagnóstico del software existente, evaluando la precisión de los algoritmos utilizados, la eficiencia en la adquisición de datos y la capacidad del sistema para integrarse con el hardware. Se identificaron problemas recurrentes, como falta de confiabilidad en el cálculo del ángulo de desfase y retrasos en el procesamiento de señales, lo que limitaba el desempeño general del sistema.

El desarrollo de mejoras se centró en la optimización de los algoritmos para aumentar la precisión en las mediciones, reduciendo el ruido y los errores acumulados durante el procesamiento de datos. Asimismo, se implementaron técnicas avanzadas que mejoraron la capacidad del sistema para manejar grandes volúmenes de información sin comprometer la estabilidad ni los tiempos de respuesta.

Finalmente, se llevaron a cabo pruebas detalladas para validar las mejoras realizadas, evaluando aspectos como la precisión de los cálculos, la velocidad de procesamiento y la estabilidad del sistema bajo diferentes escenarios de uso. Los resultados obtenidos demostraron una mejora significativa en la confiabilidad y el desempeño del software, consolidando su papel como una herramienta eficiente para la caracterización de aislamientos eléctricos.

3.1. Diagnóstico del software original del sistema FDS-System

El software original del FDS-System fue diseñado para gestionar la adquisición y procesamiento de datos provenientes de las mediciones dieléctricas. Su funcionalidad principal consiste en registrar señales de tensión y corriente, calcular el ángulo de desfase y generar reportes con los resultados obtenidos. Aunque cumplía con su propósito, presentaba varias limitaciones en términos de eficiencia y flexibilidad.

El sistema utiliza MATLAB como entorno de desarrollo principal, aprovechando su capacidad para procesar datos y generar gráficos. Sin embargo, el software carece de optimización en sus algoritmos de cálculo, lo que resultaba en tiempos de procesamiento elevados y, en algunos casos, inconsistencias en los resultados. Adicionalmente, la falta de herramientas para filtrar ruido en las señales afectaba la calidad de las mediciones, especialmente en frecuencias altas o señales de baja amplitud.

El diagnóstico inicial destaca la necesidad de mejoras en el algoritmo. Las observaciones sirven como base para establecer un plan estructurado de optimización, orientado a resolver las limitaciones identificadas y a convertir al sistema FDS-System en una herramienta más robusta y accesible.

3.1.1. Funcionamiento del algoritmo original

3.1.1.1. Entradas:

- **Señales digitalizadas de tensión y corriente:** adquiridas mediante un sistema de adquisición de datos, y utilizadas como entradas principales del algoritmo para el cálculo de desfase, impedancia y otros parámetros.
- **Frecuencia de excitación:** definida por el generador de señales y utilizada como referencia para procesar las señales adquiridas. Esta información permite establecer la condición de operación AC y ajustar el procesamiento temporal.
- **Amplitud de la señal de prueba:** configurada en el generador de señales antes de la adquisición, es un parámetro relevante para caracterizar el comportamiento del objeto

bajo prueba y asegurar que las señales obtenidas mantengan un nivel adecuado respecto al rango de medición del sistema.

- **Secuencia de frecuencias (en barrido):** cuando se realiza un barrido de prueba, es necesario definir una lista de frecuencias a evaluar, la cual es procesada por el sistema de control para generar y sincronizar cada medición.

3.1.1.2. *Procesos:*

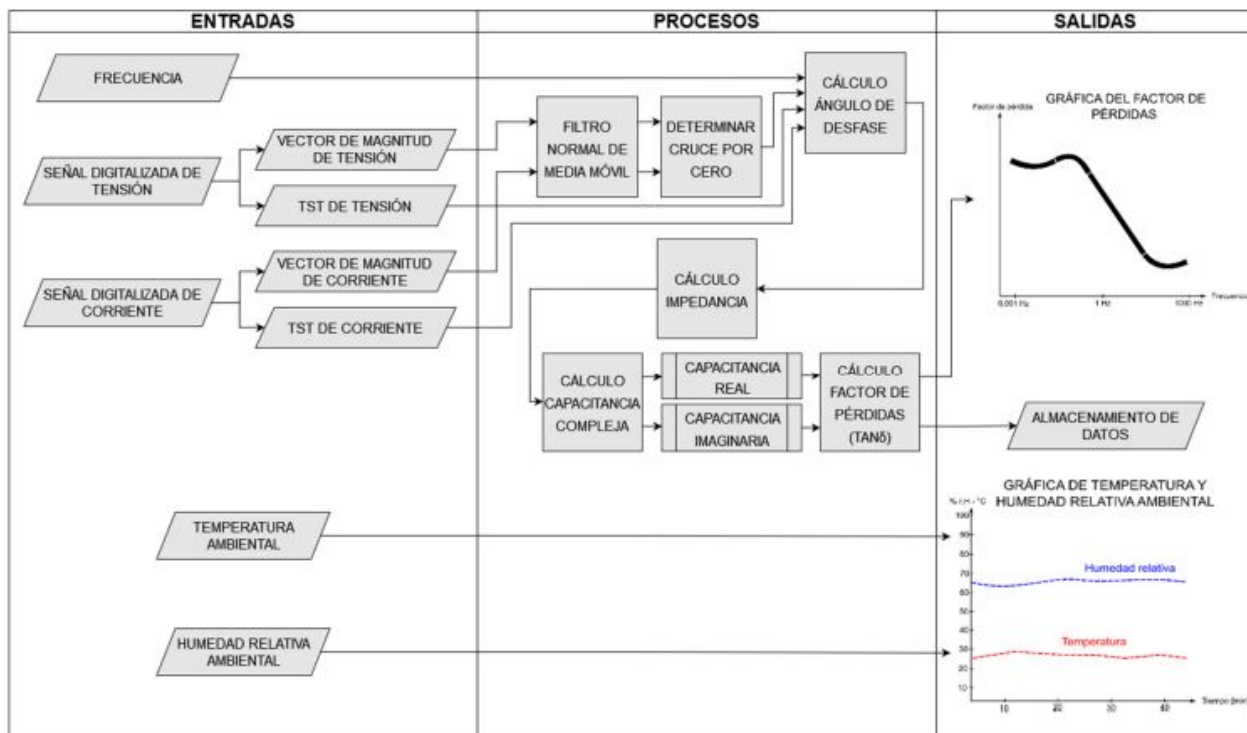
- **Filtrado de señales:** las señales de tensión y corriente pasan por un filtro normal de media móvil para reducir el ruido.
- **Determinación del cruce por cero ascendente:** identificación de los puntos donde las señales cruzaban el eje de tiempo, necesarios para calcular la fase.
- **Cálculo del ángulo de desfase:** se obtiene a partir de la diferencia entre los cruces por cero de las señales de tensión y corriente.
- **Cálculo de la impedancia:** basado en los valores medidos de tensión y corriente.
- **Capacitancia compleja:** se descompone en sus componentes real e imaginario, derivadas de los valores de impedancia.
- **Factor de pérdidas $\tan \delta$:** calculado como la relación entre la capacitancia imaginaria y la capacitancia real.

3.1.1.3. *Salidas:*

- Gráfica del factor de pérdidas: una curva que muestra la relación entre la frecuencia y el factor de pérdidas $\tan \delta$.
- Almacenamiento de datos: registro de las mediciones realizadas para análisis posterior.

En la figura 23, se presenta un diagrama detallado que ilustra los pasos clave del análisis matemático del software original:

Figura 23. Detalles de los procedimientos matemáticos para una prueba FDS.



Fuente: Sistema para la caracterización de aislamientos eléctricos mediante espectroscopia en el dominio de la frecuencia [1].

El procedimiento ofrece una solución funcional para las mediciones dieléctricas, pero presenta limitaciones en términos de manejo del ruido, eficiencia computacional y robustez en escenarios con señales complejas. Estas observaciones fueron clave para proponer mejoras sustanciales en el algoritmo y el diseño del sistema.

3.2. Diagnóstico de limitaciones y mejoras implementadas

El software del sistema FDS-System presentaba diversas limitaciones que afectaban su eficiencia y precisión en la medición dieléctrica. A partir de un diagnóstico inicial, se identificaron los siguientes elementos de mejora:

3.2.1. Limitaciones identificadas

- **Sensibilidad al ruido:** la señal de corriente, particularmente en frecuencias bajas, era altamente susceptible al ruido, generando fluctuaciones en el cálculo del ángulo de desfase y comprometiendo la confiabilidad de las mediciones.
- **Procesamiento lento en frecuencias bajas:** el algoritmo original requería analizar al menos dos ciclos completos de la señal para detectar cruces por cero, lo que incrementaba significativamente el tiempo de procesamiento en frecuencias más bajas.
- **Falta de herramientas avanzadas para reconstrucción de señales:** la ausencia de métodos efectivos para mejorar la calidad de las señales adquiridas dificultaba la interpretación de los resultados en presencia de ruido o distorsión.
- **Inconsistencias en la integración con el hardware:** problemas de sincronización entre el software y el hardware generaban errores intermitentes en la adquisición de datos, afectando la continuidad de las pruebas.

Estas deficiencias influyeron en la necesidad de optimizar los algoritmos de procesamiento e implementar herramientas de reducción de ruido en las señales adquiridas. Con base en este diagnóstico, se diseñó un plan de acción para mejorar el desempeño general del sistema FDS-System.

3.2.2. Mejoras implementadas

Para abordar estas limitaciones, se investigaron y seleccionaron diversas tecnologías y metodologías que permitirán mejorar el software del sistema FDS-System:

1. Optimización del procesamiento de señales mediante herramientas de MATLAB

- Se aprovechó la flexibilidad de MATLAB para definir modelos personalizados, destacando el uso de *fittype* para el ajuste de curvas sinusoidales.
- Se implementó un modelo de ajuste sinusoidal que permite la reconstrucción precisa de

señales a partir de datos parciales, reduciendo la susceptibilidad al ruido y mejorando la precisión del cálculo del ángulo de desfase.

- Se implementaron scripts automatizados en MATLAB, lo que permitió mejorar la eficiencia en la realización de pruebas al reducir significativamente los tiempos de configuración y procesamiento.

2. Incorporación de librerías para ajuste de curvas y procesamiento de señales

- Se implementaron herramientas como *FitType* y *Curve Fitting Toolbox*, que permitieron la aplicación de modelos de ajuste sinusoidal para reducir los efectos del ruido en las señales adquiridas.

3. Metodologías optimizadas

- Se adoptó un modelo sinusoidal ajustado que permite reconstruir señales utilizando únicamente 1 ciclo, optimizando así el tiempo de procesamiento sin afectar la precisión.

4. Factores de selección de tecnología

Las herramientas y metodologías seleccionadas fueron evaluadas con base en los siguientes criterios:

- **Compatibilidad.** Integración fluida con el hardware y software preexistente.
- **Eficiencia.** Reducción del tiempo de procesamiento y mejora en la precisión de las mediciones.

Con estos avances, se pretende que el sistema FDS-System tenga una mejora significativa en su rendimiento y confiabilidad, fortaleciendo su aplicabilidad en contextos de medición dieléctrica.

3.3. Diseño del nuevo algoritmo

El nuevo algoritmo del sistema FDS-System fue diseñado para optimizar la precisión y eficiencia en la medición del ángulo de desfase entre señales de tensión y corriente. Este diseño integra técnicas avanzadas de preprocesamiento, modelado sinusoidal y cálculo de parámetros, superando las limitaciones del algoritmo original.

3.3.1. Etapas del algoritmo

3.3.1.1. Preprocesamiento de datos

- **Eliminación de información redundante:** se utilizan expresiones regulares (`regexprep`) para limpiar las marcas de tiempo y eliminar datos innecesarios, como fechas en formato MM/DD/YYYY.
- **Separación de componentes temporales:** las marcas de tiempo se dividen en horas, minutos y segundos, facilitando el análisis posterior.
- **Filtrado de señales:** se aplica el modelo de ajuste sinusoidal que actúa como filtro para eliminar ruido de alta frecuencia.

3.3.1.2. Cálculo de cruces por cero

- **Cruce por cero de tensión:** se identifica el primer cruce por cero ascendente de la señal de tensión mediante un bucle que compara puntos consecutivos.
- **Cruce por cero de corriente:** similar al procedimiento de tensión, se determina el cruce ascendente inicial de corriente, ajustado según la frecuencia de medición.

3.3.1.3. Modelo sinusoidal ajustado

El modelo sinusoidal ajustado se define como:

$$x(t) = a \sin(2\pi ft + \phi) \quad (16)$$

donde:

- a : Amplitud de la señal,
- f : Frecuencia de la señal
- ϕ : Desfase inicial.

Los parámetros iniciales del modelo se calculan como:

$$a = \frac{\text{máx}(y) - \text{mín}(y)}{2} \quad (17)$$

$$b = 2\pi f \quad (18)$$

ϕ = estimado a partir del cruce por cero.

El modelo permite reconstruir la señal utilizando porciones parciales (1 ciclo) y extendiendo su rango en frecuencias bajas para mejorar el tiempo de procesamiento.

3.3.1.4. *Cálculo del ángulo de desfase*

En el procedimiento se determina el ángulo de desfase entre la señal de tensión y la señal de corriente utilizando un único multímetro, por lo que las mediciones se realizan de forma secuencial. Inicialmente, se registra la señal de tensión y, posteriormente, la señal de corriente; así se genera una diferencia temporal entre el primer dato medido de cada señal. Para obtener un valor preciso del ángulo de desfase, es necesario alinear ambas series de datos y corregir la diferencia de tiempo.

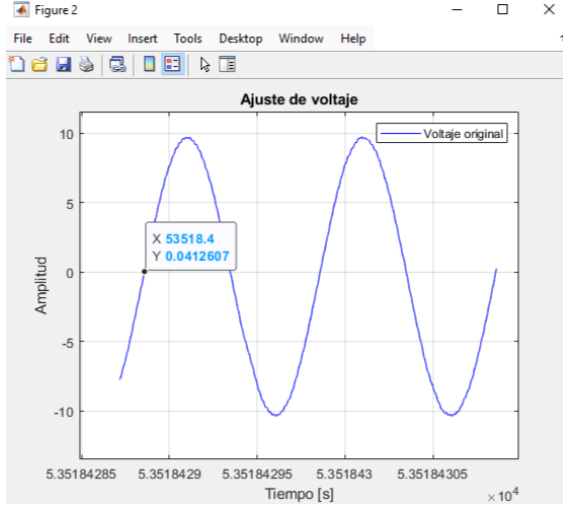
El proceso consiste en calcular la diferencia de tiempo entre el primer cruce ascendente de cada señal. El valor equivale al desfase que se quiere medir, más un número entero de periodos de la señal, debido al retardo ocasionado por la medición secuencial. Posteriormente, se convierte la diferencia de tiempo de segundos a grados y se normaliza para expresarla en el rango de -180° a $+180^\circ$. El valor es fundamental para el análisis del comportamiento del sistema.

Variables de entrada:

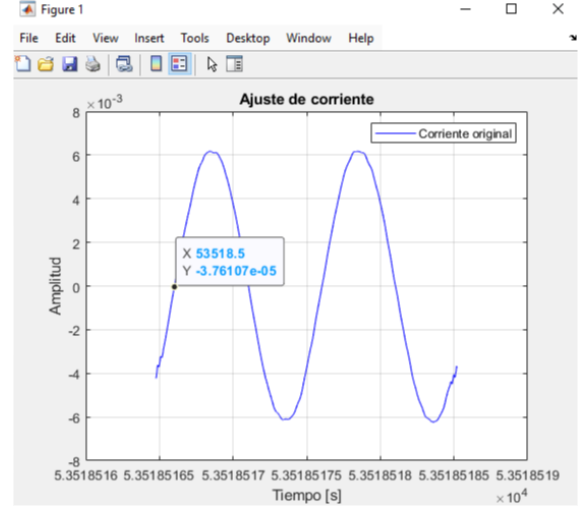
- **duracionI:** Instante de cruce por cero positivo de la señal de corriente.
- **duracionV:** Instante de cruce por cero positivo de la señal de tensión.
- **MedicionF:** Frecuencia de la señal aplicada (Hz).

En las siguientes figuras se muestran las señales de tensión y corriente. El punto marcado corresponde al cruce por cero ascendente que determina duracionV y duracionI:

Figura 24. Visualización de las señales de corriente y tensión utilizadas para el cálculo del ángulo de desfase.



(a) Señal de tensión.



(b) Señal de corriente.

Fuente: Propia.

Algorithm 2 Cálculo del ángulo de desfase

- | | |
|--|--|
| <pre> 1: duracion ← duracionI – duracionV 2: desfase ← duracion / (1/MedicionF) 3: entero ← floor[desfase] 4: desfase ← desfase – entero 5: Angulo ← desfase × 360 6: if Angulo > 180 then 7: Angulo ← 360 – Angulo 8: end if </pre> | <pre> ▷ Diferencia de tiempo entre mediciones ▷ Cálculo del desfase en ciclos ▷ Obtener la parte entera de desfase ▷ Extraer la parte fraccionaria del ciclo ▷ Convertir la fracción del ciclo a grados ▷ Normalizar el ángulo al rango [–180°, 180°] </pre> |
|--|--|
-

3.4. Comparación entre el algoritmo original y el actual

El diseño del nuevo algoritmo para el sistema FDS-System representa una mejora significativa respecto al algoritmo original. A continuación, se presenta una comparación detallada entre ambos algoritmos:

3.4.1. Cálculo del ángulo de desfase

- **Algoritmo original.** Calcula el ángulo de desfase directamente a partir de los cruces por cero de las señales. Esto lo hace susceptible a errores en presencia de ruido o distorsión.
- **Algoritmo actual.** Reconstruye las señales mediante el modelo sinusoidal antes de calcular los cruces por cero, lo que garantiza mayor precisión y consistencia en el cálculo.

3.4.2. Complejidad del algoritmo

- **Algoritmo original.** Más simple y directo, pero carece de optimizaciones avanzadas, lo que lo hace dependiente de la calidad de las señales adquiridas.
- **Algoritmo actual.** Introduce complejidad adicional al implementar el ajuste del modelo sinusoidal, lo que mejora notablemente la precisión y robustez.

3.4.3. Adaptabilidad

- **Algoritmo original:** Limitado a escenarios con señales limpias y constantes. No maneja bien distorsiones significativas.
- **Algoritmo actual:** Es adaptable a señales complejas, gracias a la capacidad del modelo sinusoidal para reconstruir señales con alta precisión.

Tabla 7. Comparación entre el algoritmo original y el actual

Aspecto Principal	Álgoritmo original	Algoritmo actual	Ventaja Principal
Manejo de Ruido	Sin filtrado avanzado	Filtrado con modelo sinusoidal	Mayor precisión en señales ruidosas
Eficiencia	Procesa dos ciclos	Procesa un ciclo	Reducción significativa de tiempos
Cálculo del Desfase	Directo, sin optimización	Reconstrucción precisa	Mayor precisión en mediciones
Complejidad	Simple y menos robusto	Más complejo y optimizado	Más robusto y adaptable
Adaptabilidad	Limitada a señales limpias	Alta, maneja señales complejas	Eficiente bajo condiciones diversas

El algoritmo actual pretende superar ampliamente al algoritmo original en términos de precisión, eficiencia y adaptabilidad, convirtiéndolo en una herramienta más robusta para las mediciones dieléctricas.

3.5. Pruebas para evaluar las mejoras del software

El rendimiento del software mejorado fue evaluado mediante un conjunto de pruebas diseñadas para validar su precisión, eficiencia y robustez. Estas pruebas se enfocaron en verificar el correcto funcionamiento del nuevo algoritmo bajo diferentes escenarios experimentales. A continuación, se detallan las pruebas realizadas.

3.5.1. Prueba 1: Validación del ajuste con modelo sinusoidal en bajas frecuencias

La prueba evalúa la efectividad del modelo sinusoidal para reconstruir la señal cuando la frecuencia es inferior a 1Hz. Dado que la ventana de adquisición cubre solo un ciclo, el algoritmo extiende la señal mediante ajuste no lineal, permitiendo una forma de onda completa y reduciendo el tiempo de medición.

La prueba se realizó en un circuito RC en paralelo y para verificar el correcto funcionamiento se desarrolló un script en MATLAB en el que se adquirieron las señales de tensión y corriente y se buscó validar que la señal ajustada sea igual en amplitud, frecuencia y fase a la señal real.

3.5.1.1. Descripción del algoritmo

El nuevo algoritmo desarrollado para calcular el ángulo de desfase entre las señales de tensión y corriente se estructura en las siguientes etapas:

1. **Extracción y transformación de marcas de tiempo.** Se procesan las señales adquiridas desde el multímetro, eliminando las fechas y transformando las marcas de tiempo (hh:mm:ss.SSS) a valores numéricos en segundos. Esto se realiza para ambas señales (tensión y corriente), generando los vectores de tiempo correspondientes.

2. **Modelado de la señal.** Se define un modelo sinusoidal del tipo:

$$y = a \sin(bx + c) \quad (19)$$

donde a es la amplitud, b la frecuencia angular (ver ecuación (18)), y c el desfase inicial.

3. **Estimación inicial del desfase c .** Para cada señal, se estima un valor inicial del parámetro c a partir del primer valor de la señal mediante:

$$c = \begin{cases} \arcsin\left(\frac{y(1)}{a}\right) - b \cdot x(1), & \text{si } \left|\frac{y(1)}{a}\right| \leq 1 \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Esta expresión permite calcular una estimación inicial del desfase c en el modelo sinusoidal (ecuación (19)), utilizando el primer punto medido de la señal. La fórmula se obtiene al despejar c a partir del modelo, con los valores de $y(1)$, a , b y $x(1)$.

El parámetro a representa una estimación inicial de la amplitud de la señal. Se calcula como la mitad de la diferencia entre el valor máximo y el mínimo de los datos adquiridos, tal como se muestra en la ecuación (17).

Esta estimación se basa en la suposición de que la señal tiene una forma sinusoidal centrada en cero, por lo que la amplitud real puede aproximarse razonablemente de esta manera. Obtener un valor inicial adecuado para a es fundamental, ya que este parámetro se utiliza tanto para definir el modelo como para evaluar la validez del argumento de la función arcsin en el cálculo de c . Un valor mal estimado podría generar errores numéricos o afectar negativamente la convergencia del proceso de ajuste.

$$c = \arcsin\left(\frac{y(1)}{a}\right) - b \cdot x(1) \quad (20)$$

Este valor sirve como punto de partida para el algoritmo de ajuste no lineal, facilitando la convergencia hacia una solución precisa. No obstante, como la función arcsin está definida únicamente para argumentos en el intervalo $[-1, 1]$, es necesario verificar que:

$$\left|\frac{y(1)}{a}\right| \leq 1 \quad (21)$$

Si esta condición no se cumple, el argumento no es válido y el cálculo de c sería erróneo.

Por ello, en tales casos se asigna de forma segura un valor genérico de $c_{\text{initial}} = 0$, lo cual garantiza que el modelo pueda ajustarse sin interrupciones. Esta estrategia proporciona robustez al algoritmo, incluso ante señales ruidosas o con estimaciones iniciales imprecisas.

4. **Ajuste del modelo mediante optimización.** Se aplica el algoritmo `lsqcurvefit` para encontrar los parámetros óptimos $[a, b, c]$ del modelo. Se exploran diferentes valores iniciales para c en el rango $[-\pi, \pi]$, seleccionando el que minimiza el error.
5. **Reconstrucción de la señal para frecuencias bajas.** Si la frecuencia de medición es menor a 1 Hz, se extiende la señal ajustada agregando un ciclo y medio adicional. Para ello, se evalúa el modelo ajustado en un nuevo vector de tiempo extendido:

Algorithm 3 Extensión de la señal mediante ajuste del modelo sinusoidal

```

1:  $t_{\text{inicio}} \leftarrow x$                                 ▷ Tiempos originales
2:  $t_{\text{final}} \leftarrow \text{máx}(t_{\text{inicio}})$                 ▷ Último punto de medición
3:  $n_{\text{extra}} \leftarrow 1$                                 ▷ Número de ciclos adicionales a reconstruir
4:  $t_{\text{extra}} \leftarrow \text{linspace}(t_{\text{final}}, t_{\text{final}} + n_{\text{extra}} \cdot \text{periodo}, 10000)$     ▷ Generar tiempos extendidos
5:  $x_{\text{extended}} \leftarrow [t_{\text{inicio}}; t_{\text{extra}}]$         ▷ Concatenar tiempos originales y extendidos
6:  $y_{\text{extended}} \leftarrow \text{modelo\_seno}(\text{params\_opt}, x_{\text{extended}})$     ▷ Evaluar el modelo ajustado en el
   rango extendido

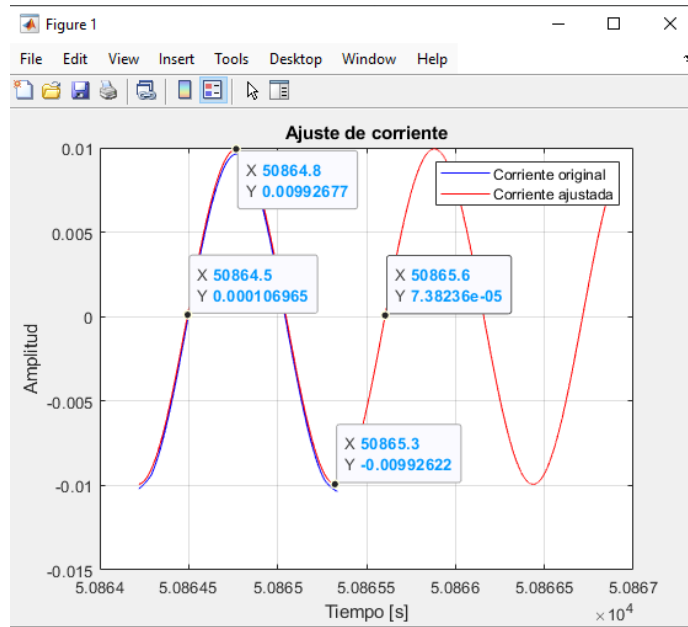
```

6. **Detección del cruce por cero.** Se detecta el primer cruce por cero ascendente en la señal ajustada (o original, si $f \geq 1$ Hz) tanto para tensión como para corriente. A partir de los tiempos de cruce se calculan las duraciones: `duracionV` y `duracionI`.
7. **Cálculo del ángulo de desfase.** El ángulo se obtiene a partir de la diferencia de tiempos entre los cruces por cero de tensión y corriente. Esta diferencia se convierte en fracción de ciclo y luego a grados, eliminando la parte entera para representar el desfase de forma continua, tal como se hacía en el algoritmo original.

3.5.1.2. Análisis del ajuste de la señal de corriente

A continuación se presenta el resultado del ajuste de la señal de corriente a una onda sinusoidal, correspondiente a una frecuencia de entrada de 0.9 Hz y una tensión de 10 V.

Figura 25. Comparación entre la señal original de corriente y la señal ajustada.



Fuente: Propia.

A continuación, se analizan los principales aspectos del ajuste:

- **Amplitud.** Se observa que la señal ajustada (roja) replica fielmente la amplitud de la señal original (azul). Los valores máximos y mínimos coinciden, lo que indica una correcta estimación del parámetro a (amplitud) del modelo sinusoidal.
- **Frecuencia.** La periodicidad de ambas señales es consistente. El número de ciclos y la separación temporal entre picos es equivalente, lo que valida que la frecuencia angular $b = 2\pi f$ fue correctamente ajustada y que la frecuencia del modelo coincide con la de la señal real.
- **Fase.** En la región donde ambas señales se superponen (inicio de la gráfica), se observa una alineación precisa entre crestas y valles. Esto demuestra que el parámetro c (desfase) fue correctamente estimado, permitiendo un alineamiento adecuado entre la fase del modelo y la señal medida.
- **Extensión del modelo.** A partir del segundo ciclo, la señal ajustada continúa fuera del intervalo de medición. Esta extensión es resultado de evaluar el modelo ajustado más allá de los datos reales para facilitar el cálculo del cruce por cero.

El ajuste realizado es satisfactorio. La señal ajustada conserva de manera precisa las características de la señal original en cuanto a amplitud, frecuencia y fase, lo cual valida la aplicabilidad del modelo sinusoidal en el procesamiento de señales de corriente para este caso experimental.

Tabla 8. Errores porcentuales en la reconstrucción de la corriente y el ángulo de fase para diferentes frecuencias

F (Hz)	I_{med} (mA)	I_{teo} (mA)	Error I (%)	Fase _{med} (°)	Fase _{teo} (°)	Error fase (absoluto (°))
0.9	9.631	10	3.69	-0.340	-0.281	0.059
0.8	9.800	10	2	-0.353	-0.225	0.128
0.7	9.633	10	3.67	-0.273	-0.225	0.048
0.6	9.633	10	3.67	-0.319	-0.169	0.150
0.5	9.631	10	3.69	-0.089	-0.112	0.023
0.4	9.631	10	3.69	-0.358	-0.112	0.246
0.3	9.633	10	3.67	-0.025	-0.056	0.031
0.2	9.630	10	3.7	-0.172	-0.056	0.116
0.1	9.632	10	3.68	-0.027	-0.003	0.024
0.09	9.632	10	3.68	-0.117	-0.0029	0.1141
0.08	9.636	10	3.64	-0.034	-0.0026	0.0314
0.07	9.635	10	3.65	-0.191	-0.0023	0.1887
0.06	9.657	10	3.43	-0.017	-0.0019	0.0151
0.05	9.638	10	3.62	-0.118	-0.0016	0.1164
0.04	9.638	10	3.62	-0.075	-0.0013	0.0737
0.03	9.637	10	3.63	-0.247	-0.01	0.237
0.02	9.638	10	3.62	-0.001	-0.006	0.005
0.01	9.643	10	3.57	-0.099	-0.003	0.096

Análisis de la tabla de errores en corriente y fase

La Tabla 8 presenta los errores relativos en la magnitud de la corriente y en el *ángulo de fase* para diferentes frecuencias de prueba en un circuito RC paralelo compuesto por una resistencia de 980Ω y un condensador de 913 nF , al cual se aplicó una señal de 10 V pico.

Corriente. El error porcentual en la magnitud oscila entre **2% y 3,7%** en todo el rango de frecuencias evaluado. Esto representa errores absolutos menores a 0.37 mA , lo cual se considera aceptable si se tienen en cuenta:

- Las tolerancias típicas de los componentes electrónicos utilizados ($\pm 1\%$ a $\pm 5\%$).

- El uso de valores teóricos ideales para comparación.

No se observa una tendencia creciente o decreciente significativa del error con la frecuencia, lo que indica buena estabilidad del sistema de medición.

Ángulo de fase. El error absoluto de fase permanece menor a 0.25° en todas las frecuencias, lo cual refleja una buena reconstrucción del desfase. No obstante, el error relativo porcentual aparenta ser elevado ($> 100\%$) en ciertos casos. Esto se explica porque:

- El valor teórico de fase es muy cercano a cero en la mayoría de los casos.
- El uso de error porcentual con denominadores tan pequeños puede inducir a conclusiones engañosas.

Por esta razón, se optó por reportar también el *error absoluto en grados*, mucho más representativo en este contexto.

Los resultados obtenidos permiten concluir que el algoritmo implementado logra una reconstrucción precisa de la corriente y del ángulo de fase, incluso bajo condiciones de baja frecuencia. Los errores se mantienen dentro de rangos técnicamente aceptables, lo que valida la confiabilidad y estabilidad del sistema propuesto.

3.5.2. Prueba 2: Precisión en el cálculo del ángulo de desfase 0°

Esta prueba tiene como objetivo evaluar la precisión del cálculo del ángulo de desfase entre las señales de tensión y corriente mediante el nuevo algoritmo. El valor teórico esperado del ángulo es de 0° .

3.5.2.1. Procedimiento

- a) Configurar el generador de señales para emitir ondas sinusoidales de 10 V de amplitud y frecuencias de 0.01 Hz, 0.1 Hz, 1 Hz, 10 Hz, 100 Hz y 1 kHz.
- b) Conectar el generador al circuito de prueba compuesto por una resistencia de $980\ \Omega$.
- c) Registrar las señales de corriente y tensión con el software.
- d) Calcular el ángulo de desfase utilizando el algoritmo mejorado.
- e) Repetir la prueba 10 veces por cada frecuencia.
- f) Comparar los resultados obtenidos con el valor teórico.

3.5.2.2. Resultados

Se evaluó el desempeño del sistema FDS-SYSTEM en la estimación del ángulo de desfase. Tal como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 9. Resultados de precisión del ángulo de desfase con resistencia de $980\ \Omega$

Frecuencia (Hz)	Ángulo Calculado ($^{\circ}$)	Desviación Estándar
1000	0,252	0,409
100	0,304	0,251
10	0,206	0,098
1	0,047	0,096
0.1	-0,059	0,021
0.01	-0,095	0,014

Los resultados obtenidos son consistentes con el comportamiento esperado de los instrumentos dentro de sus márgenes especificados. En alta frecuencia (1000 Hz y 100 Hz), el error y la variabilidad son mayores debido a la limitación del tiempo de adquisición del multímetro respecto al corto periodo de la señal (1 ms a 1000 Hz). Según el datasheet del DMM6500, en este rango la precisión es $\pm(0.15\% \text{ lectura} + 0.07\% \text{ rango})$.

En frecuencias intermedias (10 Hz y 1 Hz), el desempeño es más estable, con especificación de $\pm(0.10\% \text{ lectura} + 0.04\% \text{ rango})$. Los ángulos calculados son pequeños y las desviaciones estándar reflejan buena consistencia.

A bajas frecuencias (0.1 Hz y 0.01 Hz), el sistema presenta buena repetibilidad gracias al mayor periodo de la señal; sin embargo, la menor densidad de datos por ciclo hace que los errores en cruce por cero e interpolación generen pequeños ángulos residuales. El datasheet indica un incremento de 0.2 % lectura en la incertidumbre para frecuencias menores a 5 Hz, coherente con lo observado [24].

3.5.3. Prueba 3: Precisión en el cálculo del ángulo de desfase de -90°

Esta prueba tiene como objetivo evaluar la precisión del cálculo del ángulo de desfase entre las señales de tensión y corriente mediante el algoritmo propuesto, aplicado a un circuito de prueba que incluye un condensador de poliéster de 100 nF. En un condensador ideal, la corriente adelanta a la tensión en un ángulo de -90° , por lo que este valor se toma como referencia.

3.5.3.1. Procedimiento

Se configuró un generador de señales para emitir una onda sinusoidal de 10 V de amplitud a frecuencias de 0,1 Hz, 1 Hz, 10 Hz, 100 Hz y 1000 Hz. Las señales de tensión y corriente fueron adquiridas y procesadas con el software y algoritmo desarrollados. En cada frecuencia se realizaron 10 repeticiones para evaluar la repetibilidad. Posteriormente, se calcularon el ángulo de desfase y el factor de pérdidas ($\tan \delta$) y se compararon con el valor teórico.

3.5.3.2. Resultados

Tabla 10. Resultados de precisión del ángulo de desfase con condensador de 100 nF

Frecuencia (Hz)	Ángulo Calculado (°)	Desviación Estándar	Error Absoluto (°)	%Rdg
1000	-90,4351	0,4609	0,4351	0,4811
100	-90,6103	1,6073	0,6103	0,6735
10	-92,7084	0,5560	2,7084	2,9214
1	-103,3272	1,5313	13,3272	12,8980
0,1	-115,9410	0,2821	25,9410	22,3743

A partir de los ángulos calculados, se determinaron los valores de $\tan(\delta)$:

Tabla 11. Resultados del ángulo de desfase y factor de pérdidas

Frecuencia (Hz)	Ángulo Calculado (°)	$\tan \delta$
1000	-90,4351	0,008
100	-90,6103	0,011
10	-92,7084	0,047
1	-103,3272	0,237
0,1	-115,9410	0,486

En la Tabla 10 se incluye la columna %Rdg, que representa el porcentaje de la lectura y se calcula con la expresión:

$$\%Rdg = \frac{\text{Error Absoluto}}{|\text{Ángulo Calculado}|} \times 100 \quad (22)$$

Este parámetro indica el error relativo respecto al valor medido. Se observa que tanto el error absoluto como su impacto porcentual crecen en frecuencias bajas, pasando de

0,48 % a 22,37 %, lo que evidencia una disminución en la precisión de la medición en estas frecuencias.

En altas frecuencias (1000 Hz y 100 Hz), el ángulo calculado es cercano al valor teórico, reflejando un comportamiento capacitivo esperado. En este rango, la tangente delta presenta valores bajos (0,008 y 0,011 respectivamente), lo que indica pérdidas dieléctricas mínimas. A medida que la frecuencia disminuye, el ángulo de desfase se aparta progresivamente de -90° y la tangente delta aumenta, alcanzando valores de 0,237 a 1 Hz y hasta 0,486 a 0,1 Hz. Este incremento se explica porque, a bajas frecuencias, la corriente que circula por el condensador es menor y adquiere mayor relevancia la contribución de las corrientes parásitas, de fuga y de polarización. Dichos fenómenos evidencian que el condensador no es ideal. Aunque se empleó un cable triaxial para mitigar estos efectos, persisten influencias residuales inevitables en un sistema real.

A partir de los ángulos de desfase calculados, se obtuvo el factor de pérdidas empleando la definición formal del ángulo de pérdidas δ , entendido como el complemento respecto a -90° del ángulo de desfase $|\varphi|$:

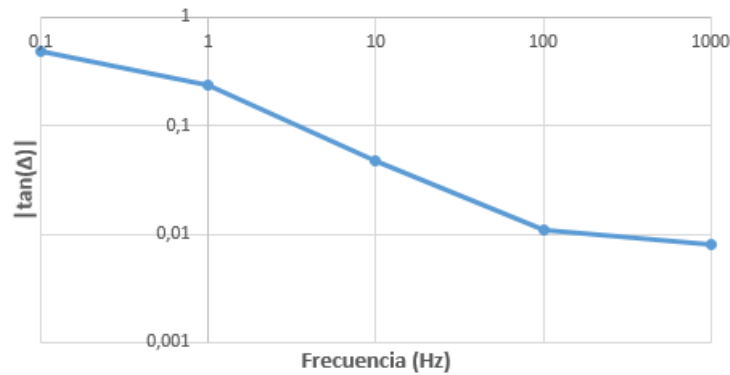
$$\delta = 90^\circ - |\varphi| \quad (23)$$

De esta manera, la tangente delta se calculó con:

$$\tan \delta = \tan(90^\circ - |\varphi|) \quad (24)$$

Para analizar el comportamiento del factor de pérdidas en todo el rango de frecuencias, se presenta la Figura 26. Esta representación permite identificar claramente las tendencias generales del factor de pérdidas, ya que facilita la interpretación de los resultados y permite una comparación equilibrada entre las distintas frecuencias. Además, en estas mediciones influyen las corrientes de polarización y los efectos asociados a la permitividad dieléctrica, los cuales dependen de la frecuencia de la señal aplicada.

Figura 26. $|\tan(\delta)|$ vs Frecuencia.



Fuente: Propia.

En el gráfico se aprecia que la tangente delta es mínima en altas frecuencias, confirmando el comportamiento casi ideal del condensador. A bajas frecuencias, en cambio, aumenta debido a las pérdidas dieléctricas y corrientes de fuga, evidenciando la no idealidad del componente.

3.5.4. Prueba 4: Evaluación comparativa del algoritmo actual vs. algoritmo original en frecuencias < 1 Hz

Esta prueba tuvo como objetivo comparar la precisión y el tiempo de adquisición del algoritmo original frente al algoritmo mejorado, que incorpora un ajuste no lineal basado en un modelo sinusoidal. Se usó un circuito de prueba formado por una resistencia de $210.9\text{ k}\Omega$ y un condensador de 100.80 nF conectados en paralelo.

Se realizaron mediciones con ambos algoritmos, aplicando señales de 10 V a frecuencias de $0,1\text{ Hz}$, $0,05\text{ Hz}$, $0,01\text{ Hz}$ y $0,005\text{ Hz}$. El proceso consistió en registrar las señales de tensión y corriente, calcular el ángulo de desfase y comparar los resultados obtenidos con el valor teórico esperado. Los datos mostraron que el algoritmo actual logró mayor precisión y redujo significativamente el tiempo de adquisición, demostrando su robustez y eficacia en condiciones de baja frecuencia.

3.5.4.1. Resultados

Tabla 12. Comparación de desempeño y precisión entre el algoritmo original y el algoritmo actual

Frecuencia (Hz)	Valor Teórico (°)	Algoritmo Original (°)	Algoritmo Actual (°)	Duración Original (s)	Duración Actual (s)
0,1	0,7653	2,1354	0,7712	20.98	10.49
0,05	0,3826	1,4730	0,3388	44.25	22.12
0,01	0,0765	1,8418	0,3849	3:33.74	1:66.87
0,005	0,0383	2,0328	0,5129	7:09.96	3:54.98
0,001	0,0076	1,9025	0,2331	33:33.72	16:66.86

Tabla 13. Comparación del error absoluto en el cálculo del ángulo entre el algoritmo original y el algoritmo actual

Frecuencia (Hz)	Error Absoluto original(°)	Error Absoluto actual(°)
0,1	1,3701	0,0059
0,05	1,0904	0,0438
0,01	1,7653	0,3084
0,005	1,9945	0,4746
0,001	1,8949	0,2255

Las Tablas 12 y 13 presentan los resultados obtenidos para frecuencias bajas al aplicar dos versiones del algoritmo de cálculo de ángulo de desfase: el algoritmo original y el algoritmo actual mejorado.

El algoritmo actual mostró una mejora notable en exactitud, reduciendo los errores absolutos en todas las frecuencias evaluadas. Por ejemplo, en 0,1 Hz el error bajó de 1,37° a 0,0059° (reducción superior al 99 %), y en 0,001 Hz de 1,89° a 0,23°. Además, el tiempo de adquisición se redujo casi a la mitad sin afectar la calidad de las mediciones: en 0,05 Hz pasó de 84,17 s a 44,25 s. Esto evidencia la eficiencia y robustez del modelo sinusoidal, que logró menor dispersión de los errores y un mejor desempeño frente al ruido y las dificultades propias de frecuencias muy bajas.

3.6. Análisis pruebas de software

Las mejoras implementadas en el software del FDS-System permitieron cumplir el objetivo principal del proyecto: reducir el porcentaje de error en el cálculo del ángulo

de desfase y optimizar los tiempos de medición. Las pruebas realizadas, incluyendo la validación del ajuste sinusoidal, el cálculo de ángulos cercanos a 0° y -90° , y la comparación entre el algoritmo original y el mejorado, demostraron una reducción del error absoluto en más del 99 % en frecuencias por debajo de 1Hz y una disminución del tiempo de prueba de hasta el 50 %.

Sin embargo, las pruebas con corrientes muy bajas (del orden de 50 nA) mostraron que el sistema no es confiable en ese rango: el algoritmo no puede compensar las limitaciones del hardware y las corrientes parásitas y de fuga dominan la medición. Esto evidencia que el sistema, aunque mejorado, solo es confiable en rangos donde las señales superen el umbral de precisión del instrumento de medida.

En conjunto, el nuevo software representa un avance notable en la precisión y eficiencia del sistema, pero deja claras las condiciones bajo las cuales su desempeño es óptimo, lo que orienta futuros desarrollos hacia la integración de hardware más adecuado para rangos de corrientes extremadamente bajas.

Capítulo 4

Implementación de mejoras en la interfaz de usuario del sistema FDS-System

La mejora de la interfaz de usuario del sistema FDS-System fue desarrollada mediante un enfoque que incluyó el análisis de la interfaz actual, el diseño e implementación de una nueva versión, y la validación mediante pruebas. Esta sección describe las actividades realizadas y los resultados obtenidos. Es importante destacar que todas las pruebas de hardware y software presentadas en capítulos anteriores se realizaron utilizando esta interfaz, lo que permitió validar su correcto funcionamiento y robustez en condiciones reales de operación.

4.1. Análisis de la interfaz original

La interfaz del FDS-SYSTEM fue desarrollada en MATLAB utilizando App Designer, con el objetivo de facilitar la configuración, ejecución y visualización de pruebas FDS de forma automatizada. Esta interfaz busca reducir el tiempo de medición y mejorar la interacción del usuario con el sistema, integrando todos los equipos necesarios mediante Instrument Control Toolbox.

La interfaz se compone de varias ventanas que permiten al usuario llevar a cabo la prueba de forma estructurada:

- Ventana inicial: permite iniciar una nueva prueba o cargar una prueba anterior en formato *.mat. Incluye ventanas emergentes que guían al usuario en la selección y validación de archivos. Tal como se muestra en la siguiente figura:

Figura 27. Ventana inicial de la prueba.



Fuente: Sistema para la caracterización de aislamientos eléctricos mediante espectroscopia en el dominio de la frecuencia [1].

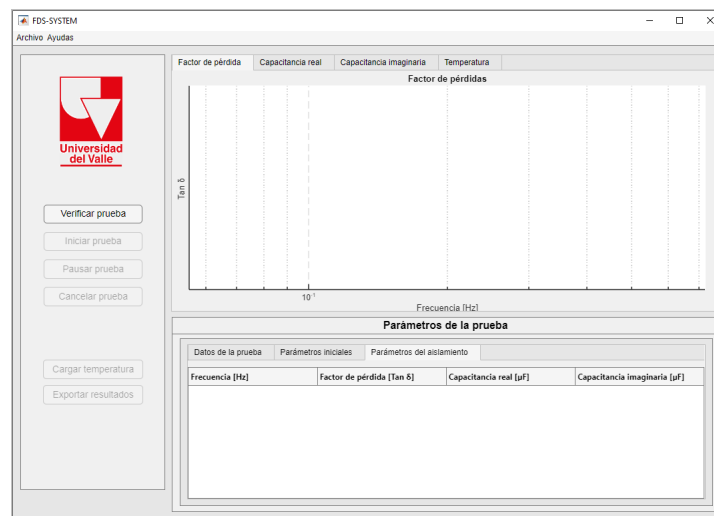
- Ventana de datos iniciales: permite configurar el tipo de señal, la tensión de prueba y el grado de precisión, tal como se muestra en la figura 28. Si bien la interfaz ofrece mensajes emergentes de error o advertencia para guiar al usuario cuando se ingresan valores fuera de rango o se omiten parámetros necesarios, la disposición de los campos y controles es confusa, lo que puede dificultar el proceso de configuración y volver más complejo realizar la prueba de forma eficiente.

Figura 28. Ventana de datos inicial de la prueba.

Fuente: Sistema para la caracterización de aislamientos eléctricos mediante espectroscopia en el dominio de la frecuencia [1].

- Ventana principal: desde aquí se verifica la conexión de los equipos, se inicia y pausa la prueba, se eliminan mediciones erróneas y se visualizan los resultados. Los resultados se muestran tanto en tablas como en gráficas (factor de pérdidas, capacitancia real e imaginaria). Además, permite almacenar los resultados en archivos *.xls y *.mat y ofrece un menú de ayudas con preguntas frecuentes, características de los equipos y detalles del programa.

Figura 29. Ventana de datos principal.



Fuente: Sistema para la caracterización de aislamientos eléctricos mediante espectroscopia en el dominio de la frecuencia [1].

Si bien la interfaz cumple con los objetivos funcionales, el análisis detallado revela varias áreas con oportunidad de mejora:

- Organización visual: la disposición de los botones, campos y gráficos no resulta intuitiva. En particular, el panel de datos iniciales presenta una estructura que puede generar confusión entre las opciones de configuración de prueba, dificultando el flujo de trabajo y aumentando el riesgo de errores en el ingreso de parámetros.
- Ausencia de ayudas contextuales: la interfaz carece de botones o elementos de ayuda específicos en cada módulo, lo que dificulta al usuario comprender el propósito y funcionamiento de algunas secciones, especialmente para quienes no están familiarizados con el sistema.

- Presencia de apartados innecesarios o inactivos: algunas secciones o funcionalidades (tipo de señal) no se encuentran operativas y permanecen visibles en la interfaz, lo que genera un entorno gráfico más complejo y aumenta la posibilidad de confusión o uso incorrecto.
- Flexibilidad visual: la interfaz podría aprovechar mejor el espacio disponible para la visualización de resultados, por ejemplo, permitiendo ampliar gráficas o personalizar vistas según las necesidades del usuario.

También se identificó que el sistema presentaba fallas funcionales originadas por modificaciones previas en el código fuente. Estas alteraciones generaron errores de ejecución en MATLAB que impedían la correcta realización de las pruebas FDS, comprometiendo la adquisición, procesamiento y visualización de datos en la interfaz.

Por tal motivo, como fase preliminar, se llevó a cabo un análisis integral del código y de la estructura de la interfaz, con el fin de detectar y depurar los errores que limitaban su operatividad. Esta intervención permitió restablecer las funcionalidades básicas del sistema y garantizar un entorno estable desde el cual desarrollar las mejoras propuestas.

4.2. Cambios y mejoras realizadas

Con el fin de optimizar la interacción y facilitar el manejo del sistema, se introdujeron las siguientes mejoras en la interfaz:

- a) **Reorganización del panel de datos iniciales.** Se rediseñó el panel de datos iniciales de la interfaz con el objetivo de mejorar la organización y claridad de los apartados. La nueva estructura permite distinguir de forma intuitiva entre las pruebas de frecuencia única y las de frecuencia múltiple, facilitando al usuario la comprensión y selección de la opción adecuada para cada tipo de prueba.

Figura 30. Panel de datos iniciales reorganizado.

Fuente: Propia.

- b) **Incorporación de botones de ayuda contextual.** Se agregaron nuevos botones de ayuda en cada sección de la interfaz. Estos botones despliegan información detallada sobre el funcionamiento de cada módulo, las configuraciones disponibles y posibles soluciones a dudas frecuentes. Esta característica incrementa la usabilidad y minimiza errores de digitación o configuración.

Figura 31. Nuevos botones de ayuda.

Fuente: Propia.

- c) **Eliminación de apartados inactivos.** Se suprimieron aquellas secciones y funcionalidades que no se encontraban en funcionamiento o que generaban

confusión en el usuario. Esta simplificación del entorno gráfico contribuye a una navegación más intuitiva y permite concentrarse en las herramientas esenciales para la medición y análisis de las pruebas FDS.

Figura 32. Apartados inactivos de la interfaz original eliminados.

The image shows a software window titled 'FDS-SYSTEM' with a sub-header 'DATOS INICIALES DE LA PRUEBA'. The form contains several input fields and dropdown menus. Two fields are highlighted with red rectangles: 'Tipo de señal' and 'Grado de precisión'. The 'Tipo de señal' field is a dropdown menu with a '-' symbol. The 'Grado de precisión' field is a dropdown menu with a '-' symbol and a '?' icon. Other fields include 'Fecha de la prueba' (03-May-2022), 'Persona a cargo', 'Nombre de la prueba', 'Tensión de prueba' (0), 'Medición frecuencias bajas' (?), 'Pasará automáticamente' (-), 'Tensión' (0), 'Observaciones', 'Tipo de frecuencia' (-), 'Frecuencia [Hz]' (0), 'Repeticiones' (0), 'Intervalos' (0), 'Rango' (-), 'Intervalo' (-), 'Frecuencia máxima [Hz]' (0), 'Frecuencia mínima [Hz]' (0), and 'Intervalo [Hz]' (0). At the bottom are 'Continuar' and 'Cancelar' buttons.

Fuente: Sistema para la caracterización de aislamientos eléctricos mediante espectroscopia en el dominio de la frecuencia (modificado) [1].

4.3. Implementación y validación del sistema FDS-SYSTEM

Para validar el sistema se emplearon dos objetos de prueba sobre los cuales se realizaron ensayos FDS con un barrido de frecuencias. Estas pruebas permitieron evaluar la correcta operación del sistema y su interfaz, verificando la precisión en la medición de parámetros (ángulo de desfase, factor de pérdidas, entre otros) y la facilidad de uso de la aplicación.

4.3.1. Objeto de Prueba 1: Condensador de papel kraft

El primer objeto consistió en un condensador fabricado con capas de papel kraft arrolladas sobre un carrete de aluminio, con un electrodo de malla de acero en el exterior. La conexión al sistema FDS-SYSTEM se realizó según la configuración mostrada en la Figura 19 (página 29).

4.3.1.1. Procedimiento para el condensador de papel kraft

- a) Se configuraron los parámetros de la prueba en la interfaz del sistema, definiendo la amplitud de la señal (100 V) y el rango de frecuencias para el barrido (de 0.001 Hz a 1000 Hz), lo que permitió al sistema controlar el generador de señales de forma automática. Tal como muestra la siguiente figura:

Figura 33. Configuración de parámetros de la prueba en la interfaz.

DATOS INICIALES DE LA PRUEBA

Fecha de la prueba: 15-Jun-2025 ✓

Persona a cargo: Luisa Parra

Nombre de la prueba: Prueba_barrido_condensador.

Datos de entrada

Voltaje de prueba: 100 [Vp] ?

Tipo de frecuencia: Múltiple ?

Observaciones:

Configuración para Frecuencia Múltiple

Rango: Automático ? Intervalo: - ?

Intervalos de frecuencia [Hz]: 1000,446.68,222.22,110.70,40.20,10.4,6417.2,1546

Medición frecuencias bajas ?

Pasar automáticamente: Si

Voltaje: 200 [Vp] ?

Configuración para Frecuencia Única

Frecuencia [Hz]: 0

Repeticiones: 0

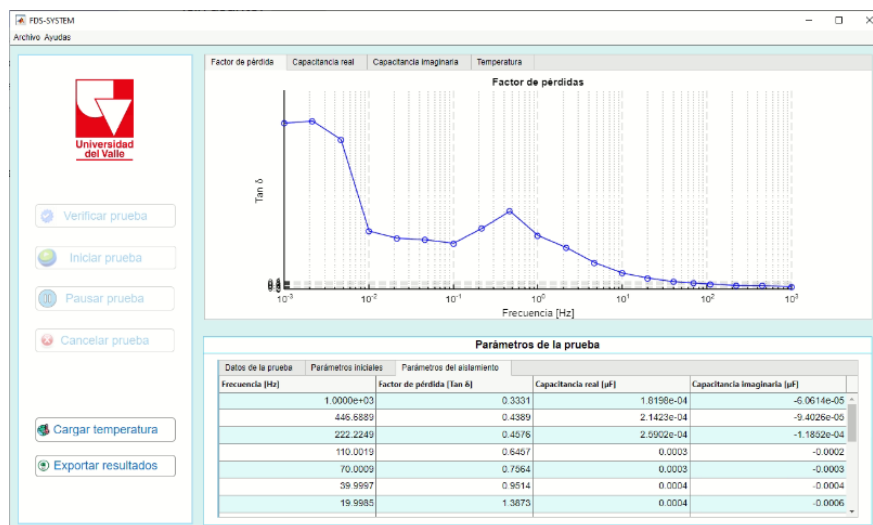
Intervalos: 0 -

Continuar **Cancelar**

Fuente: Propia.

- b) Se conectó el condensador y se verificó la comunicación a través de la interfaz.
- c) Se ejecutó el barrido de frecuencias y se registraron las señales de tensión y corriente.
- d) Con el algoritmo implementado se calcularon el ángulo de desfase y el factor de pérdidas para cada frecuencia, mostrándose los resultados gráficamente y en tabla.

Figura 34. Presentación de resultados en la interfaz.



Fuente: Propia.

4.3.1.2. Resultados y análisis

Los resultados experimentales obtenidos para el condensador de papel Kraft se presentan en la Tabla 14. Se observa el comportamiento esperado para un dieléctrico de este tipo, caracterizado por un ángulo de desfase elevado y un bajo factor de pérdidas en frecuencias altas, y una disminución progresiva del desfase con un incremento del factor de pérdidas a medida que la frecuencia disminuye.

Tabla 14. Mediciones experimentales del condensador de papel Kraft

Frecuencia [Hz]	Tensión [V]	Corriente [mA]	Ángulo [°]	Tan δ
1000,0235	100,0086	0,1205	71,5776	0,3331
446,6889	94,2156	0,0619	66,3034	0,4389
222,2249	109,3990	0,0435	65,4128	0,4576
110,0019	93,2539	0,0232	57,1511	0,6457
70,0009	107,3552	0,0200	52,8975	0,7564
39,9997	92,6331	0,0127	46,4276	0,9514
19,9984	107,0478	0,0103	35,7846	1,3873
10,0000	106,9579	0,0084	26,4672	2,0086
4,6417	106,9245	0,0072	16,7550	3,3216
2,1546	106,9314	0,0070	10,8731	5,2061
1,0000	106,9238	0,0069	8,4895	6,6995
0,4642	106,9309	0,0066	5,8454	9,7679
0,2154	106,9405	0,0065	7,4934	7,6025
0,1000	106,9463	0,0060	9,8738	5,7452
0,0464	106,9511	0,0054	9,1897	6,1812
0,0215	106,9531	0,0050	8,9193	6,3718
0,0100	106,9563	0,0048	7,8309	7,2710
0,0046	106,9470	0,0047	3,0541	18,7423
0,0021	106,9497	0,0046	2,7224	21,0304
0,0010	106,9561	0,0045	2,7540	20,7887

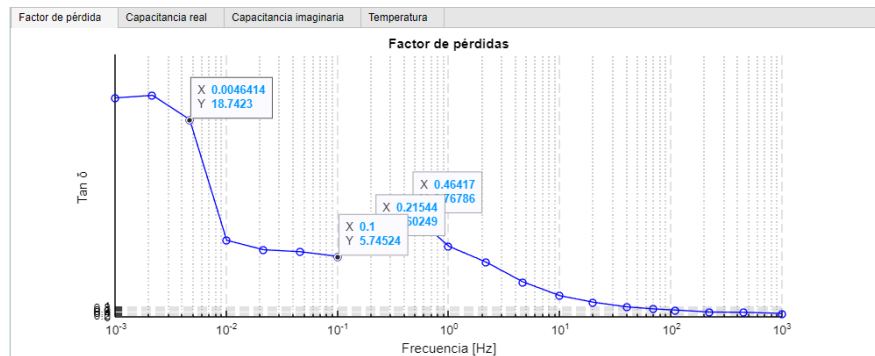
En altas frecuencias (por encima de 100 Hz), el ángulo de desfase es elevado (71,6° a 1000 Hz) y el factor de pérdidas bajo (0,33 a 0,65), lo que evidencia un comportamiento capacitivo típico de un buen aislamiento. Al reducir la frecuencia, el ángulo disminuye y el tan δ aumenta, indicando mayor influencia de la componente resistiva y mayores pérdidas.

En frecuencias muy bajas (por debajo de 0.01 Hz), tan δ alcanza valores elevados (hasta 21) y el ángulo cae a valores cercanos a 2°. Este patrón podría deberse a varios factores:

- En frecuencias muy bajas, la corriente es extremadamente pequeña, lo que hace que el sistema de medición sea más sensible al ruido eléctrico y a las interferencias.
- El algoritmo de cálculo del ángulo de desfase puede tener dificultades para determinar con precisión el desfase cuando las señales son de muy baja amplitud.
- Posibles efectos parásitos del entorno o del propio equipo que son irrelevantes a altas frecuencias, pero que afectan en estas condiciones.

En la siguiente figura generada por el sistema, estos valores aparecen como puntos atípicos que no siguen la tendencia suave que se esperaría.

Figura 35. Factor de pérdidas.



Fuente: Propia.

En general, el condensador se comporta como se espera en la mayor parte del rango, mostrando un ángulo alto y pérdidas bajas en altas frecuencias, y un aumento progresivo de pérdidas a medida que la frecuencia baja. En frecuencias muy bajas, los resultados se ven afectados por factores externos o limitaciones del sistema, lo que genera valores atípicos que deben ser considerados en el análisis. El sistema permite identificar claramente estas tendencias y es una herramienta útil para caracterizar el estado del dieléctrico.

4.3.2. Objeto de Prueba 2: Arreglo en paralelo de resistencia y capacitancia

El segundo objeto de prueba se compone de un arreglo formado por una resistencia de 980Ω y un condensador de 913 nF , conectados en paralelo para emular el equivalente circuital de un aislamiento eléctrico.

4.3.2.1. Procedimiento para el arreglo en paralelo

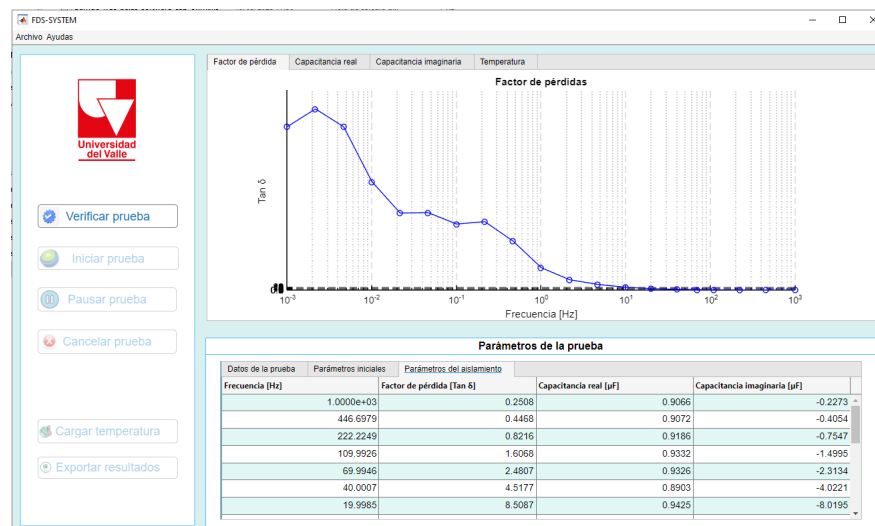
- Se configuraron los parámetros de la prueba en la interfaz del sistema, definiendo la amplitud de la señal (10 V) y el rango de frecuencias para el barrido (de 0.001 Hz a 1000 Hz). Tal como muestra la siguiente figura:

Figura 36. Configuración de parámetros de la prueba en la interfaz.

Fuente: Propia.

- b) Se conectó el arreglo en paralelo y se verificó la comunicación a través de la interfaz.
- c) Se ejecutó el barrido de frecuencias y se registraron las señales de tensión y corriente.
- d) Con el algoritmo implementado se calcularon el ángulo de desfase y el factor de pérdidas para cada frecuencia, mostrándose los resultados gráficamente y en tabla.

Figura 37. Presentación de resultados en la interfaz.



Fuente: Propia.

4.3.2.2. Resultados y análisis

La Tabla 15 presenta las mediciones experimentales obtenidas por el arreglo en paralelo. A partir de las señales de tensión y corriente medidas, se calculó el ángulo de desfase y el correspondiente factor de pérdidas ($\tan \delta$) para distintas frecuencias de entrada.

Tabla 15. Comparación entre mediciones experimentales y ángulo teórico del arreglo RC paralelo

Frecuencia (Hz)	Tensión (V)	Corriente (mA)	Ángulo desfase (°)	Ángulo Teórico (°)	Error absoluto (°)	Tan δ
1000,026	9,784	57,460	-75,922	-79,914	3,992	0,251
446,698	9,154	25,531	-65,923	-68,287	2,364	0,447
222,225	10,704	17,767	-50,593	-51,325	0,731	0,822
109,993	9,074	11,076	-31,896	-31,731	0,165	1,607
69,995	10,438	11,450	-21,955	-21,479	0,476	2,481
40,001	9,029	9,348	-12,481	-12,674	0,193	4,518
19,998	10,393	10,544	-6,703	-6,415	0,288	8,509
10,000	10,404	10,487	-3,416	-3,218	0,199	16,751
4,642	10,403	10,464	-1,692	-1,495	0,197	33,857
2,155	10,406	10,462	-0,925	-0,694	0,231	61,931
1,000	10,395	10,460	-0,429	-0,322	0,107	133,629
0,464	10,399	10,563	-0,196	-0,150	0,046	292,763
0,215	10,398	10,601	-0,140	-0,069	0,071	408,919
0,100	10,400	10,627	-0,145	-0,032	0,113	394,729
0,046	10,402	10,633	-0,124	-0,015	0,109	462,329
0,022	10,396	10,640	-0,124	-0,007	0,118	460,340
0,010	10,400	10,646	-0,088	-0,003	0,085	647,896
0,005	10,401	10,663	-0,059	-0,001	0,057	976,039
0,002	10,403	10,678	-0,053	-0,001	0,052	1082,692
0,001	10,404	10,637	-0,059	0,000	0,058	976,172

En un circuito RC paralelo, el comportamiento de la corriente y su desfase respecto a la tensión pueden analizarse mediante la expresión:

$$\theta = -\arctan(\omega RC) \quad (25)$$

donde $\omega = 2\pi f$ es la frecuencia angular, R la resistencia y C la capacitancia. Este ángulo de desfase θ refleja la combinación de la corriente resistiva (en fase con la tensión) y la corriente capacitiva (adelantada 90°). El signo negativo indica que, en un RC paralelo ideal, la corriente total se adelanta respecto a la tensión, situándose θ entre 0° y -90° ,

acercándose a -90° en frecuencias altas y a 0° en bajas frecuencias.

Esta expresión se deduce al obtener la parte real e imaginaria de la impedancia total del circuito y calcular el ángulo de fase como:

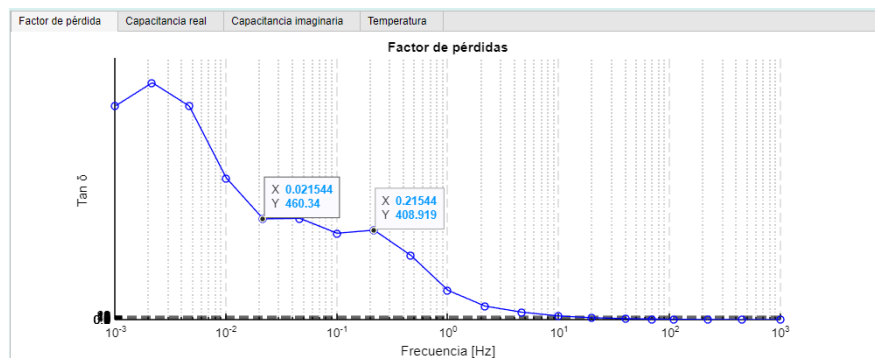
$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(Z)}{\text{Re}(Z)} \right) \quad (26)$$

Al observar los resultados experimentales del circuito paralelo, se aprecia que el comportamiento general concuerda con el modelo teórico.

Los resultados del circuito paralelo concuerdan con el modelo teórico: en altas frecuencias (>100 Hz), el ángulo es alto ($-75,9^\circ$ a 1000 Hz) y $\tan \delta$ bajo ($0,25$ a $0,44$), confirmando el predominio capacitivo y bajas pérdidas. Al bajar la frecuencia, el ángulo se acerca a 0° y $\tan \delta$ aumenta ($16,75$ a 10 Hz), evidenciando mayor influencia resistiva. En frecuencias muy bajas ($<0,01$ Hz), $\tan \delta$ es muy alto ($647,9$ a $0,01$ Hz) y el ángulo sigue bajo, afectado por ruido, errores de medición y efectos parásitos.

La figura 38 obtenida en la prueba, muestra el comportamiento esperado de un circuito RC en paralelo: bajas pérdidas en frecuencias altas y un aumento progresivo de $\tan \delta$ a medida que disminuye la frecuencia. Esto refleja el paso de un régimen capacitivo, donde las pérdidas son menores, a un régimen con mayor influencia resistiva a bajas frecuencias.

Figura 38. Factor de pérdidas.



Fuente: Propia.

Al observar la curva, se identifican algunos puntos que no siguen una evolución continua, especialmente en el rango de frecuencias muy bajas. Estos valores atípicos interrumpen la suavidad de la tendencia y podrían estar asociados a limitaciones del sistema de medición en condiciones extremas. La representación gráfica facilita la visualización de estas desviaciones, reforzando la utilidad de la herramienta para identificar posibles mejoras en el proceso de adquisición y análisis de datos.

4.4. Validación de la interfaz

A lo largo del presente documento se ha demostrado la efectividad de la nueva interfaz desarrollada para la ejecución de pruebas de caracterización eléctrica. A diferencia de la versión anterior, que presentaba limitaciones en el código que impedían completar algunas pruebas, la versión actual permite realizar todo el proceso de medición de manera fluida y sin interrupciones.

La nueva interfaz no solo ha corregido los errores que afectaban la adquisición de datos, sino que también ha mejorado significativamente la visualización de las señales y parámetros medidos, lo que facilita el análisis inmediato de los resultados. Las mediciones realizadas confirmaron la concordancia de los parámetros calculados con los modelos teóricos en el rango de frecuencias evaluado, reforzando la validez de la herramienta.

No obstante, en frecuencias extremadamente bajas se identificaron limitaciones en la fiabilidad de las mediciones, atribuibles a factores como el ruido y la sensibilidad del sistema, lo que sugiere la necesidad de incorporar mejoras en el procesamiento y filtrado de señales.

Capítulo 5

Validación del sistema FDS-System

El propósito principal de esta prueba es validar que el sistema **FDS-System**, incluyendo su algoritmo de medición, funciona correctamente y cumple con los objetivos para los cuales fue diseñado. En particular, se busca comprobar que el sistema es capaz de medir de manera precisa el ángulo de desfase entre la tensión y la corriente en un circuito RC y que responde de forma adecuada cuando se introducen modificaciones controladas en las señales.

5.1. Metodología de la prueba

La prueba se centró en la validación funcional del sistema de medición.

- a)* **Caracterización del circuito.** Se midieron los valores reales de los componentes del circuito con instrumentos de alta precisión.

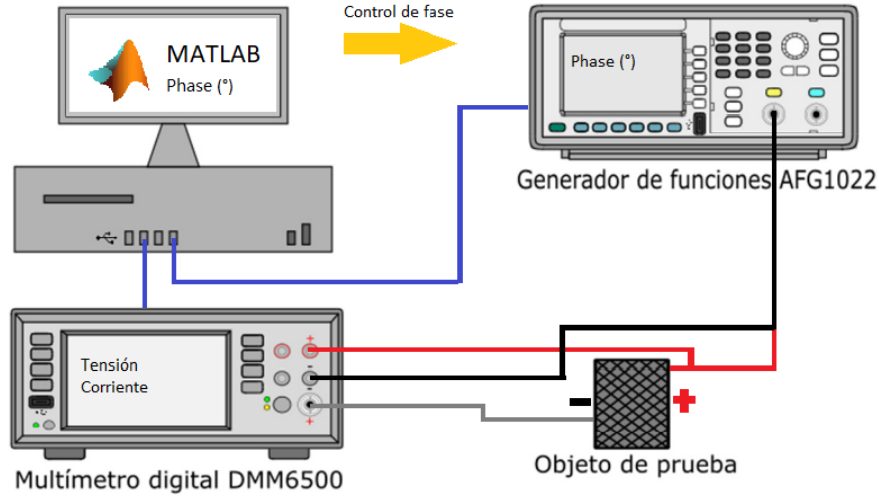
$$R = 210.9 \text{ k}\Omega, \quad C = 100.54 \text{ nF}$$

- b)* **Cálculo del ángulo de desfase teórico.** A partir de los valores de R y C , se calcularon los ángulos de desfase teóricos usando la ecuación 25.
- c)* **Medición con el FDS-System.** Se aplicaron señales senoidales a diferentes frecuencias y se midió el ángulo de desfase.
- d)* **Cálculo del error absoluto.**

$$\text{Error absoluto} = |\theta_{\text{FDS}} - \theta_{\text{teórico}}|$$

- e)* **Inyección de desfases conocidos.** Se usó el generador de señales para introducir desfases de referencia y verificar la respuesta del sistema. Tal como se muestra en la figura 39.

Figura 39. Inyección de desfases con generador de funciones.



Fuente: Sistema para la caracterización de aislamientos eléctricos mediante espectroscopia en el dominio de la frecuencia (modificado) [1].

El desfase de la señal generada se programó mediante código en MATLAB, donde se ajustó el valor de fase en radianes en el generador de señales. El siguiente fragmento del código muestra cómo se realizó este ajuste:

Algorithm 4 Inyección de desfase en el generador de señales

Definir $Phase \leftarrow 85$	▷ Ángulo de desfase deseado en grados
Calcular $aux \leftarrow Phase \times \pi/180$	▷ Convertir a radianes
Configurar generador: ajustar fase de la salida 1 a aux radianes	

De este modo, se inyectaron desfases conocidos en el sistema (por ejemplo, 85°), que permitieron validar la capacidad del FDS-System para detectar y medir correctamente dichos desfases. Esto formó parte esencial de la prueba de inyección de desfases conocidos.

f) Cálculo del error al inyectar desfases:

$$\text{Error residual} = |\theta_{\text{FDS}} - \theta_{\text{inyectado}}|$$

5.2. Resultados obtenidos

Las tablas 16 y 17, junto con la gráfica de error absoluto vs frecuencia, permiten realizar un análisis completo del desempeño del FDS-System en la medición del ángulo de desfase. Estos elementos, combinados, muestran cómo se comporta el sistema en dos escenarios: la medición del desfase generado por el propio circuito RC y la detección de desfases impuestos de forma controlada mediante el generador de señales. Cabe destacar que los ángulos de desfase teóricos presentados corresponden a cálculos ideales basados en los valores medidos de R y C, y no necesariamente representan con exactitud los ángulos reales del circuito debido a tolerancias de los componentes y otros efectos no modelados.

Tabla 16. Resultados de la medición del ángulo de desfase

Frecuencia [Hz]	$\theta_{\text{teórico}} [^\circ]$	$\theta_{\text{FDS}} [^\circ]$	Error absoluto $[^\circ]$
1000	89,57	91,15	1,58
100	85,71	87,66	1,95
10	53,11	54,95	1,84
1	7,59	9,20	1,61
0,1	0,76	0,81	0,05
0,01	0,076	0,30	0,22

Tabla 17. Resultados de la inyección de desfases conocidos

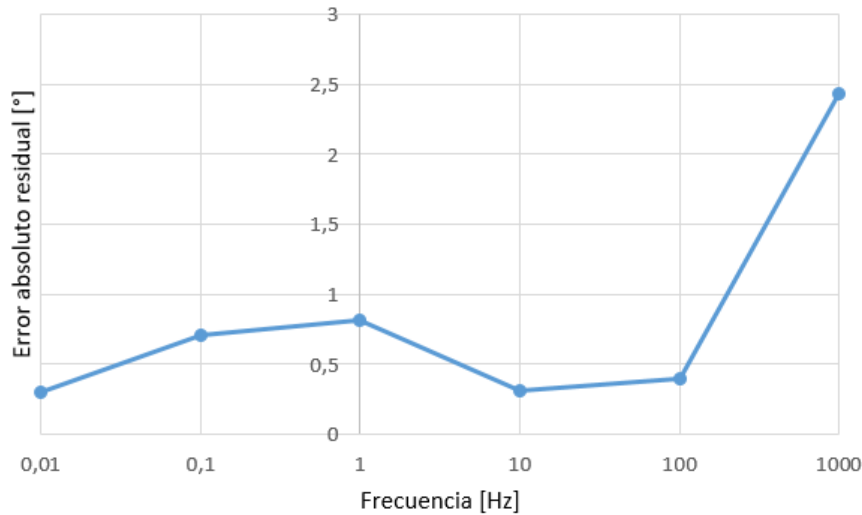
Desfase inyectado $[^\circ]$	$\theta_{\text{FDS}} [^\circ]$	Error $[^\circ]$
89	91,43	2,43
85	85,40	0,4
53	53,31	0,31
7	7,82	0,82
0	0,71	0,71
0	0,30	0,30

La tabla 16 muestra los ángulos de desfase teóricos y medidos, con errores absolutos que se mantienen entre $1,58^\circ$ y $1,95^\circ$ en frecuencias altas e intermedias (1000 Hz, 100 Hz, 10 Hz), lo cual es aceptable en mediciones experimentales. En frecuencias bajas (0,1 Hz y 0,01 Hz), el error fue menor ($0,05^\circ$ y $0,22^\circ$), reflejando mayor estabilidad y menor impacto de retardos en la adquisición.

Por su parte, la tabla 17 valida la capacidad del sistema para detectar desfases inyectados, mostrando una respuesta lineal y coherente. Aunque los errores fueron

mayores en ángulos altos ($2,43^\circ$ para 89°), en desfases menores se mantuvieron bajos ($0,31^\circ$ para 53° y $0,30^\circ$ para 0°). Las pruebas confirman la precisión del sistema tanto en condiciones de circuito real como con ángulos impuestos.

Figura 40. Error absoluto ($^\circ$) en función de la frecuencia (Hz).



Fuente: Propia.

La figura 40 complementa las tablas al ofrecer una representación visual clara del comportamiento del error según la frecuencia. En ella se observa que el error es bajo en los extremos del rango de frecuencias, mientras que en las frecuencias altas el error es mayor.

El análisis conjunto de las tablas y la figura demuestra que el FDS-System es capaz de medir el ángulo de desfase con un nivel de precisión aceptable para aplicaciones experimentales. El sistema presenta un comportamiento coherente y predecible, confirmando que su algoritmo y hardware funcionan correctamente. La prueba de inyección de desfases conocidos fue clave para validar el sistema, ya que permitió eliminar la influencia de las características del circuito y comprobar que el sistema responde bien a ángulos impuestos de forma externa.

No obstante, los resultados también evidencian áreas de mejora: los errores aumentan en desfases altos y en frecuencias intermedias, lo que sugiere la necesidad de optimizar la sensibilidad del sistema, mejorar la resolución temporal y considerar la adquisición simultánea de señales para aplicaciones que requieran mayor precisión.

La norma IEC 60076-3 [12] establece que los errores relativos de factor de pérdidas tan en ensayos de diagnóstico deben mantenerse dentro de márgenes del 5 % para considerarse aceptables. En este trabajo, los errores obtenidos frente al DIRANA y al modelo teórico se mantienen dentro de dichos rangos, lo que valida la confiabilidad del sistema propuesto.

5.3. Análisis del sistema FDS-System.

El proceso de validación del FDS-System demuestra que el sistema cumple su objetivo principal: disminuir el porcentaje de error en la medición del ángulo de desfase frente al sistema previo. Las pruebas realizadas evidencian que el error absoluto se mantiene dentro de márgenes aceptables en la mayor parte del rango de frecuencias, con valores inferiores a 2° en frecuencias altas ($1,58^\circ$ a 1000 Hz) e intermedias ($1,95^\circ$ a 100 Hz y $1,84^\circ$ a 10 Hz). En frecuencias bajas, el error es aún menor, destacando valores de $0,05^\circ$ a 0,1 Hz y $0,22^\circ$ a 0,01 Hz, lo que confirma la mayor estabilidad del sistema en estas condiciones. En las pruebas de inyección de desfases conocidos, el sistema mostró buena respuesta con errores bajos en desfases moderados ($0,31^\circ$ para 53° y $0,4^\circ$ para 85°), aunque en desfases altos el error aumentó ($2,43^\circ$ para 89°).

Adicionalmente, las mediciones realizadas con corrientes de muy baja magnitud (del orden de nA) confirman que el sistema no es confiable en ese rango, debido al impacto de las corrientes parásitas, ruido y las limitaciones propias del instrumento de medición, tal como se observó en capítulos anteriores. En conjunto, las pruebas validaron la precisión alcanzada por el sistema en el rango operativo útil.

Capítulo 6

Conclusiones

El presente trabajo cumplió los objetivos planteados, logrando mejorar el FDS-System para la caracterización de aislamientos eléctricos mediante espectroscopía en el dominio de la frecuencia. Las conclusiones principales son:

1. Las mejoras en **hardware** (reorganización de equipos, cable triaxial, gabinete metálico) atenuaron el ruido y las corrientes de fuga. A 0.1 Hz, la desviación estándar de la corriente bajó de 0.0326 mA a 0.0018 mA (reducción >94.5 %). En alta impedancia ($R=1\text{ G}\Omega$), se pasó de 0.0112 μA a 0.0006 μA .
2. El nuevo **algoritmo** con ajuste sinusoidal redujo el error del ángulo de desfase y el tiempo de adquisición. A 0.1 Hz, el error pasó de 1.37° a 0.0059° (>99 % de mejora) y el tiempo de 40,9 s a 20,98 s.
3. La **interfaz de usuario** mejorada ofreció mayor usabilidad mediante mejor organización, eliminación de apartados innecesarios y ayudas contextuales, asegurando la correcta ejecución de las pruebas.
4. Las **pruebas de validación** confirmaron que el sistema mide el ángulo de desfase con error absoluto $<2^\circ$ en frecuencias altas e intermedias (1000 Hz: 1.58° , 100 Hz: 1.95° , 10 Hz: 1.84°) y aún menor en bajas frecuencias (0.1 Hz: 0.05° , 0.01 Hz: 0.22°). La inyección de desfases conocidos validó la linealidad del sistema, con errores de 0.4° (85°) y 0.31° (53°), aunque con mayor error en 89° (2.43°).
5. Se identificaron limitaciones en mediciones de corrientes extremadamente bajas (50 nA), donde las corrientes medidas superaron ampliamente el valor esperado (hasta 8.6 μA), mostrando que el sistema no es confiable en ese rango.
6. En conjunto, el FDS-System mejorado logró reducir el porcentaje de error frente al sistema original y mostró un desempeño adecuado para caracterización

experimental de aislamientos eléctricos, aunque persisten áreas de mejora en frecuencias intermedias y en mediciones de muy baja corriente.

Trabajos Futuros

El desarrollo e implementación del FDS-System permitió reducir el error en la medición del ángulo de desfase y mejorar la estabilidad del sistema bajo condiciones experimentales. No obstante, el trabajo realizado abre la posibilidad de abordar nuevas líneas de mejora y aplicación:

Optimización para corrientes extremadamente bajas. Las pruebas demostraron que el sistema es confiable en un amplio rango operativo, pero no resulta adecuado para mediciones con corrientes del orden de nanoamperios debido al impacto de corrientes parásitas y fugas. Se recomienda explorar la integración de amplificadores transimpedancia para mejorar la capacidad de medición en alta impedancia.

Certificación y validación industrial. Los resultados obtenidos muestran el potencial del sistema para caracterización de aislamientos eléctricos en laboratorio. Como trabajo futuro, se sugiere realizar ensayos comparativos frente a equipos comerciales certificados y bajo normativas internacionales, con el fin de evaluar su desempeño y viabilidad para aplicaciones en entornos industriales o de diagnóstico en campo.

Ampliación del software e interfaz. La interfaz desarrollada mostró un funcionamiento robusto en el contexto de las pruebas realizadas. Sin embargo, como mejora futura, podría integrarse un sistema de generación automática de reportes con análisis estadístico de las mediciones y exportación directa en formatos estándar (por ejemplo, PDF o CSV con estructura de informe técnico).

Estos trabajos permitirían llevar el FDS-System a un nivel superior de desarrollo, extendiendo su aplicabilidad y confiabilidad en escenarios de mayor complejidad.

Referencias

- [1] K. R. Bernal Arias. Sistema para la caracterización de aislamientos eléctricos. Master's thesis, Universidad del Valle, 2022.
- [2] N. X. Maya Izurieta and L. A. Vásquez Restrepo. Pruebas de transformadores, espectroscopía en el dominio de la frecuencia y método de análisis de respuesta por. *Ingenius*, (5):55–56, 2011.
- [3] C. A. Siachoque Gómez. Obtención de curvas de referencia de transformadores en fábrica. Master's thesis, Universidad del Valle, Santiago de Cali, 2017.
- [4] D. E. Córdoba Mejía. Simulación de curvas de respuesta dieléctrica para evaluación del secado en fábrica de transformadores de potencia. Master's thesis, Universidad del Valle, Santiago de Cali, 2019.
- [5] O. I. Miranda Salinas. Diagnóstico de transformadores de distribución mediante espectroscopia en el dominio de la frecuencia. Master's thesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2016.
- [6] F. Yang and L. Du. A circuital model-based analysis of moisture content in oil-impregnated-paper insulation using frequency domain spectroscopy. *IEEE Access*, 8:47092–47102, March 2020.
- [7] J. Blennow, S. M. Gubanski, J. O. Lundgaard, and U. Gäfvert. Dielectric spectroscopy in time and frequency domain applied to diagnostics of power transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 19(3):6–12, 2003.
- [8] V. Valentiü, S. Gržiniü, and D. Dobrec. Testing the electrical insulation system of power transformer based on measuring factor of dielectric losses. In *IEEE EUROCON 2017 - 17th International Conference on Smart Technologies*, pages 423–427, Ohrid, Macedonia, 2017.
- [9] L. Li, Q. Ren, S. Xiao, W. Yang, W. Xiong, and B. Fu. Study of frequency domain dielectric properties of vegetable oil and mineral oil transformer. *J. Eng*, 2019(16):1599–1601, 2019.
- [10] A. Setayeshmehr, I. Fofana, C. Eichler, A. Akbari, H. Borsi, and E. Gockenbach. Dielectric spectroscopic measurements on transformer oil-paper insulation under

- controlled laboratory conditions. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 15(4):1100–1111, August 2008.
- [11] Ieee std c57.152-2013: Guide for diagnostic field testing of fluid-filled power transformers, regulators, and reactors, 2013.
 - [12] Iec 60076-3: Power transformers – part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air, 2013.
 - [13] X. Liu, W. Qin, Q. Wang, C. Yang, and Y. Li. Using frequency domain dielectric spectrum for aging state evaluation of transformer oil-paper insulation. In *Proceedings of the 2023 International Conference on Computers, Information Processing and Advanced Education (CIPAE)*, pages 749–752, Chongqing, China, June 2023. IEEE.
 - [14] Z. Xu, F. Yi, G. Hu, X. Wang, P. Yin, W. Hu, and Z. Peng. Study on frequency domain dielectric spectroscopy of epoxy resin impregnated paper bushings under damp conditions. *J. Eng*, 2019(16):1319–1323, 2019.
 - [15] Tektronix Inc. *AFG1022 Arbitrary/FunctionGenerator Quick Start User Manual*.
 - [16] Chroma. *Programmable AC Source*, 2015.
 - [17] Tektronix Inc. *Model DMM6500 6 $\frac{1}{2}$ -Digit Multimeter User’s Manual*, 2019.
 - [18] P. I. S.L. *Logger de datos para temperatura y humedad Log 100 / Log 110*.
 - [19] Omicron Electronics. *Dielectric Response Analyzer DIRANA: Technical Brochure*. Klaus, Austria, 2024.
 - [20] Keithley Instruments. *Model DMM6500 6 $\frac{1}{2}$ -digit Bench/System Multimeter*. Keithley Instruments, Cleveland, Ohio, U.S.A., 2019.
 - [21] Keithley Instruments. *KTTI-GPIB Communication and Digital I/O Accessory Instruction Sheet*. Tektronix, Cleveland, Ohio, U.S.A., 2018. Document No. 077143700. [En línea]. Disponible en:
url<https://www.tek.com/keithley>. [Último acceso: 18 mayo 2025].
 - [22] Tektronix. *Keithley Low Level Measurements Handbook – 7th Edition*. Tektronix, Cleveland, Ohio, U.S.A., 2023. [Último acceso: 15 noviembre 2023].
 - [23] Tony R. Kuphaldt. *Lessons in Electric Circuits – Volume II: AC*. All About Circuits, U.S.A., 2009. Capítulo 4, p. 85. [En línea]. Disponible en:
url<https://www.allaboutcircuits.com/assets/pdf/alternating-current.pdf>. [Último acceso: 8 junio 2025].

- [24] Tektronix. *DMM6500 6 1/2-Digit Bench/System Multimeter Specifications*. Tektronix, Cleveland, Ohio, U.S.A., 2018. p. 7. [Último acceso: 8 junio 2025].