



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Electrónica y Telecomunicaciones

Implementación de un sensor de permitividad para fluidos utilizando el método de terminación coaxial abierta

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones.

Autores:

Gabriela Betzabe Jara Carpio

C.I. 0105385504

Josue Sebastián Solano Pacheco

C.I. 0105991640

Director:

Ing. Alcides Fabian Araujo Pacheco M.Sc

C.I. 0102358504

Cuenca - Ecuador

23-octubre-2019



Resumen

Este proyecto está enfocado en la implementación de una sonda coaxial abierta capaz de medir la permitividad compleja en fluidos con ayuda del equipo MegiQ VNA, disponible en la facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca.

Primeramente, se realizaron mediciones con el equipo ENA Keysight Technology disponible en ARCOTEL, para tener una idea global del proceso de medición utilizando el método de sonda coaxial abierta. Posteriormente, tras una breve revisión bibliográfica y teórica acerca de propagación de ondas electromagnéticas en líneas de transmisión y experimentos previos utilizando métodos similares para la medición de permitividad, se describen tres modelos matemáticos que relacionan la permitividad con el coeficiente de reflexión medido, al igual que el proceso de diseño e implementación de la sonda. Se utilizaron datos de referencia para la selección de los líquidos de análisis (Agua, Butanol, Etano, Metanol, Propanol 1 y Propanol 2), los cuales fueron dispuestos por el laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Cuenca.

En la segunda etapa de desarrollo se convierte y registra la medición del coeficiente de reflexión de cada líquido. Al contrastar los resultados obtenidos con datos teóricos, se definen: el modelo matemático adecuado (Modelo Capacitivo), líquido de referencia (Propanol 1), y rango de frecuencias de análisis (500 MHz – 2500 MHz).

Finalmente, tras realizar un ajuste de datos, se exponen los resultados que evalúan la precisión y exactitud de la sonda diseñada mediante el promedio y la desviación estándar del error porcentual producido en mediciones repetitivas de cada líquido (exactamente 10 mediciones). En este contexto, se logra un margen de error del 15 % y un grado de precisión de entre el 3 y 6 %, en la mayoría de las frecuencias analizadas.

Palabras clave : Sonda coaxial abierta. Permitividad compleja. Coeficiente de reflexión.



Abstract

This Project focuses on the implementation of an open-ended coaxial probe capable of measuring the complex permittivity on liquids using the MegiQ VNA, which is available in the School of Engineering of the University of Cuenca.

First, the ENA Keysight Technology equipment, available in ARCOTEL, was used to do measurements and to have a global idea about the measurement process using the open-ended coaxial probe method. Later, the design and implementation of the probe and three mathematical models that relate to the permittivity with the reflection coefficient are described according a little bibliographic and theoretical review about the propagation of electromagnetic waves in the transmission lines and previous experiments on the permittivity measurement using similar methods. The reference data is used for the selection of the analyzed liquids (water, butanol, ethanol, methanol, propan-1-ol, propan-2-ol), which were arranged by the Chemical engineering lab of the University of Cuenca.

A second task described in this thesis is the conversion and registry of the measurement of the reflection coefficient of each liquid. When comparing obtained results with theoretical data, the following parameters were defined: the proper mathematical model (Capacitive Model), reference liquid (propan-1-ol), and analysis frequency range (500 – 2500 MHz).

Finally, after performing data adjustment, the results that evaluate precision and accuracy of the probe according the average and standard deviation of the error rate produced in repetitive measurements on each liquid (exactly 10 measurements) are exposed. The probe has a margin of error of 15 % and a degree of accuracy of 3-6 % in most of the frequencies analyzed.

Keywords : Open-ended coaxial probe. Complex permittivity. Reflection coefficient.



Índice general

Resumen	II
Abstract	III
Índice general	IV
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	XII
Cláusula de Propiedad Intelectual	XIII
Cláusula de Propiedad Intelectual	XIV
Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional	XV
Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional	XVI
Certifico	XVII
Dedicatoria	XVIII
Dedicatoria	XIX
Agradecimientos	XX
Abreviaciones y acrónimos	XXI
1. Introducción	1
1.1. Identificación del problema	1
1.2. Justificación	2
1.3. Alcance	3
1.4. Objetivos	4
1.4.1. Objetivo general	4
1.4.2. Objetivos específicos	4
1.5. Entregables	4



2. Estado del arte	5
2.1. Trabajos que analizan la funcionalidad de la Permitividad	5
2.2. Trabajos que analizan la funcionalidad de la sonda coaxial abierta	6
2.3. Conclusiones	7
3. Marco Teórico	8
3.1. Propagación de ondas Electromagnéticas	8
3.2. Líneas de Tranmisión	10
3.2.1. Líneas de transmisión sin pérdidas	13
3.2.2. Línea de Transmisión Coaxial	15
3.3. Matriz de dispersión o matriz S	16
3.4. Matriz de transmisión o ABCD	17
3.5. Conclusiones	18
4. Modelo matemático de conversión	20
4.1. Consideraciones físicas	20
4.2. Compensación de longitud de sonda	21
4.3. Modelo capacitivo	21
4.4. Modelo de Antena	23
4.5. Modelo de Línea Virtual	24
4.6. Calibración	26
4.7. Conclusiones	26
5. Diseño de Sonda Coaxial	27
5.1. Conclusiones	30
6. Metodología	31
6.1. Selección de líquidos	31
6.2. Descripción de equipos	32
6.2.1. ENA Keysight Technology	32
6.2.2. MegiQ VNA	33
6.2.2.1. Calibración	34
6.3. Descripción del procedimiento de medición	35
6.4. Procesamiento de datos	36
6.5. Elección del modelo matemático	37
6.6. Elección del líquido de referencia y rango de frecuencias de análisis	38
6.7. Problema con el Agua	40
6.8. Conclusiones	40
7. Resultados	41
7.1. Ajuste de datos	41
7.2. Resultados de la permitividad compleja calculada	42
7.3. Análisis del promedio y la desviación estándar del error porcentual	46
7.4. Conclusiones	51



8. Conclusiones y Recomendaciones	52
8.1. Conclusiones	52
8.2. Recomendaciones	52
8.3. Trabajos futuros	53
A. Resultados con los 3 modelos matemáticos	54
A.1. Líquidos a 15° C	54
A.1.1. Modelo Capacitivo	55
A.1.2. Modelo de Antena	61
A.1.3. Modelo de Línea Virtual	67
A.2. Líquidos a 20° C	73
A.2.1. Modelo Capacitivo	73
A.2.2. Modelo de Antena	79
A.2.3. Modelo de Línea Virtual	85
B. Comportamiento del error porcentual en función de la frecuencia	91
C. Resultados del proceso de ajuste de datos	96
D. Comparación entre longitud de sondas	101
Bibliografía	112



Índice de figuras

3.1. Tipos comunes de líneas de transmisión: a) Línea coaxial, b) Línea de dos hilos, c) Línea plana, d) Alambre sobre un plano conductor, e) línea de microcinta	10
3.2. Circuito equivalente de una línea de transmisión - Elementos distribuidos	11
3.3. Línea de transmisión sin pérdidas terminada en una carga arbitraria Z_L . Imagen adoptada de [1]	13
3.4. Interfaz de onda incidente normal, reflejada y transmitida entre dos medios de propagación. Imagen adoptada de [1] [2]	14
3.5. Estructura típica de línea de transmisión coaxial	15
3.6. Red de dos puertos terminada. Imagen adaptada de [1]	17
3.7. Red $ABCD$ de una línea de transmisión. Imagen adoptada de [1]	18
4.1. Esquema de medición; a) Interfaz cable/sonda; b) Interfaz sonda/líquido	20
4.2. Circuito Equivalente - Modelo Capacitivo	22
4.3. Circuito equivalente de Modelo de Antena	23
4.4. Esquema de Línea Virtual	24
5.1. Esquema General de Sonda Coaxial Abierta	27
5.2. Sonda coaxial abierta; a) 50mm, b) 13mm, c) 5mm	30
6.1. ENA Network Analyzer and measurement kit	33
6.2. MegiQ VNA-0460e	33
6.3. Kit de Calibración de MegiQ VNA	35
6.4. Escenario de medición de coeficiente de reflexión utilizando el MegiQ VNA	36
7.1. Parte real de la permitividad compleja del Butanol	42
7.2. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Butanol	43
7.3. Parte real de la permitividad compleja del Etanol	43
7.4. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Etanol	44
7.5. Parte real de la permitividad compleja del Metanol	44
7.6. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Metanol	45
7.7. Parte real de la permitividad compleja del Propanol 2	45
7.8. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Propanol 2	46
7.9. Promedio del error porcentual de ε_r' en función de la frecuencia en los 4 líquidos analizados	47
7.10. Promedio del error porcentual de ε_r'' en función de la frecuencia en los 4 líquidos analizados	48



7.11. Desviación estándar del error porcentual de ε_r' en función de la frecuencia en los 4 líquidos analizados	49
7.12. Desviación estándar del error porcentual de ε_r'' en función de la frecuencia en los 4 líquidos analizados	50
A.1. Parte real de la permitividad compleja del Agua (Modelo Capacitivo - 15° C)	55
A.2. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Agua (Modelo Capacitivo - 15° C)	55
A.3. Parte real de la permitividad compleja del Butanol (Modelo Capacitivo - 15° C)	56
A.4. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Butanol (Modelo Capacitivo - 15° C)	56
A.5. Parte real de la permitividad compleja del Etanol (Modelo Capacitivo - 15° C)	57
A.6. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Etanol (Modelo Capacitivo - 15° C)	57
A.7. Parte real de la permitividad compleja del Metanol (Modelo Capacitivo - 15° C)	58
A.8. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Metanol (Modelo Capacitivo - 15° C)	58
A.9. Parte real de la permitividad compleja del Propanol 1 (Modelo Capacitivo - 15° C)	59
A.10. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Propanol 1 (Modelo Capacitivo - 15° C)	59
A.11. Parte real de la permitividad compleja del Propanol 2 (Modelo Capacitivo - 15° C)	60
A.12. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Propanol 2 (Modelo Capacitivo - 15° C)	60
A.13. Parte real de la permitividad compleja del Agua (Modelo de Antena - 15° C)	61
A.14. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Agua (Modelo de Antena - 15° C)	61
A.15. Parte real de la permitividad compleja del Butanol (Modelo de Antena - 15° C)	62
A.16. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Butanol (Modelo de Antena - 15° C)	62
A.17. Parte real de la permitividad compleja del Etanol (Modelo de Antena - 15° C)	63
A.18. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Etanol (Modelo de Antena - 15° C)	63
A.19. Parte real de la permitividad compleja del Metanol (Modelo de Antena - 15° C)	64
A.20. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Metanol (Modelo de Antena - 15° C)	64
A.21. Parte real de la permitividad compleja del Propanol 1 (Modelo de Antena - 15° C)	65
A.22. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Propanol 1 (Modelo de Antena - 15° C)	65
A.23. Parte real de la permitividad compleja del Propanol 2 (Modelo de Antena - 15° C)	66
A.24. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Propanol 2 (Modelo de Antena - 15° C)	66
A.25. Parte real de la permitividad compleja del Agua (Modelo de Línea Virtual - 15° C)	67
A.26. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Agua (Modelo de Línea Virtual - 15° C)	67
A.27. Parte real de la permitividad compleja del Butanol (Modelo de Línea Virtual - 15° C)	68
A.28. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Butanol (Modelo de Línea Virtual - 15° C)	68
A.29. Parte real de la permitividad compleja del Etanol (Modelo de Línea Virtual - 15° C)	69
A.30. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Etanol (Modelo de Línea Virtual - 15° C)	69
A.31. Parte real de la permitividad compleja del Metanol (Modelo de Línea Virtual - 15° C)	70
A.32. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Metanol (Modelo de Línea Virtual - 15° C)	70
A.33. Parte real de la permitividad compleja del Propanol 1 (Modelo de Línea Virtual - 15° C)	71
A.34. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Propanol 1 (Modelo de Línea Virtual - 15° C)	71
A.35. Parte real de la permitividad compleja del Propanol 2 (Modelo de Línea Virtual - 15° C)	72



A.36. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Propanol 2 (Modelo de Línea Virtual - 15° C)	72
A.37. Parte real de la permitividad compleja del Agua (Modelo Capacitivo - 20° C)	73
A.38. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Agua (Modelo Capacitivo - 20° C)	73
A.39. Parte real de la permitividad compleja del Butanol (Modelo Capacitivo - 20° C)	74
A.40. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Butanol (Modelo Capacitivo - 20° C)	74
A.41. Parte real de la permitividad compleja del Etanol (Modelo Capacitivo - 20° C)	75
A.42. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Etanol (Modelo Capacitivo - 20° C)	75
A.43. Parte real de la permitividad compleja del Metanol (Modelo Capacitivo - 20° C)	76
A.44. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Metanol (Modelo Capacitivo - 20° C)	76
A.45. Parte real de la permitividad compleja del Propanol 1 (Modelo Capacitivo - 20° C)	77
A.46. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Propanol 1 (Modelo Capacitivo - 20° C)	77
A.47. Parte real de la permitividad compleja del Propanol 2 (Modelo Capacitivo - 20° C)	78
A.48. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Propanol 2 (Modelo Capacitivo - 20° C)	78
A.49. Parte real de la permitividad compleja del Agua (Modelo de Antena - 20° C)	79
A.50. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Agua (Modelo de Antena - 20° C)	79
A.51. Parte real de la permitividad compleja del Butanol (Modelo de Antena - 20° C)	80
A.52. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Butanol (Modelo de Antena - 20° C)	80
A.53. Parte real de la permitividad compleja del Etanol (Modelo de Antena - 20° C)	81
A.54. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Etanol (Modelo de Antena - 20° C)	81
A.55. Parte real de la permitividad compleja del Metanol (Modelo de Antena - 20° C)	82
A.56. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Metanol (Modelo de Antena - 20° C)	82
A.57. Parte real de la permitividad compleja del Propanol 1 (Modelo de Antena - 20° C)	83
A.58. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Propanol 1 (Modelo de Antena - 20° C)	83
A.59. Parte real de la permitividad compleja del Propanol 2 (Modelo de Antena - 20° C)	84
A.60. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Propanol 2 (Modelo de Antena - 20° C)	84
A.61. Parte real de la permitividad compleja del Agua (Modelo de Línea Virtual - 20° C)	85
A.62. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Agua (Modelo de Línea Virtual - 20° C)	85
A.63. Parte real de la permitividad compleja del Butanol (Modelo de Línea Virtual - 20° C)	86
A.64. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Butanol (Modelo de Línea Virtual - 20° C)	86
A.65. Parte real de la permitividad compleja del Etanol (Modelo de Línea Virtual - 20° C)	87
A.66. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Etanol (Modelo de Línea Virtual - 20° C)	87
A.67. Parte real de la permitividad compleja del Metanol (Modelo de Línea Virtual - 20° C)	88
A.68. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Metanol (Modelo de Línea Virtual - 20° C)	88
A.69. Parte real de la permitividad compleja del Propanol 1 (Modelo de Línea Virtual - 20° C)	89
A.70. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Propanol 1 (Modelo de Línea Virtual - 20° C)	89
A.71. Parte real de la permitividad compleja del Propanol 2 (Modelo de Línea Virtual - 20° C)	90
A.72. Parte imaginaria de la permitividad compleja del Propanol 2 (Modelo de Línea Virtual - 20° C)	90



B.1. Porcentaje de error en función de la frecuencia al utilizar el Butanol como líquido de referencia (ε_r')	91
B.2. Porcentaje de error en función de la frecuencia al utilizar el Butanol como líquido de referencia (ε_r'')	92
B.3. Porcentaje de error en función de la frecuencia al utilizar el Etanol como líquido de referencia (ε_r')	92
B.4. Porcentaje de error en función de la frecuencia al utilizar el Etanol como líquido de referencia (ε_r'')	93
B.5. Porcentaje de error en función de la frecuencia al utilizar el Metanol como líquido de referencia (ε_r')	93
B.6. Porcentaje de error en función de la frecuencia al utilizar el Metanol como líquido de referencia (ε_r'')	94
B.7. Porcentaje de error en función de la frecuencia al utilizar el Propanol 1 como líquido de referencia (ε_r')	94
B.8. Porcentaje de error en función de la frecuencia al utilizar el Propanol 1 como líquido de referencia (ε_r'')	95
C.1. Resultado del proceso de ajuste en ε_r' del Butanol	96
C.2. Resultado del proceso de ajuste en ε_r'' del Butanol	97
C.3. Resultado del proceso de ajuste en ε_r' del Etanol	97
C.4. Resultado del proceso de ajuste en ε_r'' del Etanol	98
C.5. Resultado del proceso de ajuste en ε_r' del Metanol	98
C.6. Resultado del proceso de ajuste en ε_r'' del Metanol	99
C.7. Resultado del proceso de ajuste en ε_r' del Propanol 2	99
C.8. Resultado del proceso de ajuste en ε_r'' del Propanol 2	100
D.1. Butanol - Respuesta de permitividad real para: Sonda de 5mm, Sonda de 13mm, Sonda de 50mm	102
D.2. Butanol - Respuesta de permitividad imaginaria para: Sonda de 5mm, Sonda de 13mm, Sonda de 50mm	103
D.3. Etanol - Respuesta de permitividad real para: Sonda de 5mm, Sonda de 13mm, Sonda de 50mm	104
D.4. Etanol - Respuesta de permitividad imaginaria para: Sonda de 5mm, Sonda de 13mm, Sonda de 50mm	105
D.5. Metanol - Respuesta de permitividad real para: Sonda de 5mm, Sonda de 13mm, Sonda de 50mm	106
D.6. Metanol - Respuesta de permitividad imaginaria para: Sonda de 5mm, Sonda de 13mm, Sonda de 50mm	107
D.7. Propanol1 - Respuesta de permitividad real para: Sonda de 5mm, Sonda de 13mm, Sonda de 50mm	108
D.8. Propanol1 - Respuesta de permitividad imaginaria para: Sonda de 5mm, Sonda de 13mm, Sonda de 50mm	109
D.9. Propanol2 - Respuesta de permitividad real para: Sonda de 5mm, Sonda de 13mm, Sonda de 50mm	110



D.10.Propanol2 - Respuesta de permitividad imaginaria para: Sonda de 5mm, Sonda de 13mm, Sonda de 50mm	111
--	-----



Índice de tablas

3.1. Ecuaciones generalizadas de Maxwell para campos armónicos en el tiempo	8
3.2. Conversión de parámetros de redes de dos puertos	18
5.1. Dimensiones de Sonda Coaxial Abierta	29
6.1. Capacitivo ε_r' (15° C) - Promedio de Error Porcentual (0.4 – 4 GHz)	38
6.2. Capacitivo ε_r' (15° C) – Desviación Estándar del Error Porcentual (0.4 – 4 GHz) . . .	38
6.3. Capacitivo ε_r'' (15° C) - Promedio de Error Porcentual (0.4 – 4 GHz)	39
6.4. Capacitivo ε_r'' (15° C) – Desviación Estándar del Error Porcentual (0.4 – 4 GHz) . . .	39
7.1. ε_r' - Error promedio del error porcentual	47
7.2. ε_r'' - Error promedio del error porcentual	48
7.3. ε_r' – Desviación estándar del error porcentual	49
7.4. ε_r'' – Desviación estándar del error porcentual	50



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Gabriela Betzabe Jara Carpio, autor de la tesis "Implementación de un sensor de permitividad para fluidos utilizando el método de terminación coaxial abierta", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 23 de octubre de 2019



Gabriela Betzabe Jara Carpio
0105385504



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Josue Sebastián Solano Pacheco, autor de la tesis "Implementación de un sensor de permitividad para fluidos utilizando el método de terminación coaxial abierta", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 23 de octubre de 2019



Josue Sebastián Solano Pacheco
0105991640



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Gabriela Betzabe Jara Carpio en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Implementación de un sensor de permitividad para fluidos utilizando el método de terminación coaxial abierta”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 23 de octubre de 2019

Gabriela Betzabe Jara Carpio

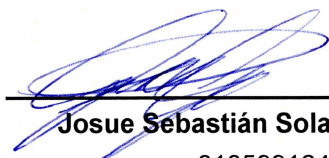
0105385504



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Josue Sebastián Solano Pacheco en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Implementación de un sensor de permitividad para fluidos utilizando el método de terminación coaxial abierta", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 23 de octubre de 2019



Josue Sebastián Solano Pacheco
0105991640



Certifico

Que el presente proyecto de tesis: Implementación de un sensor de permitividad para fluidos utilizando el método de terminación coaxial abierta, fue dirigido y revisado por mi persona.

Ing. Alcides Fabian Araujo Pacheco M.Sc,
Director



Dedicatoria

Dedico este proyecto de titulación principalmente a Dios, por guiarme en mi camino personal y profesional, enseñándome poco a poco que, en la vida, las personas y los sucesos que marcan una diferencia llegan cuando tienen que hacerlo, aunque muchas veces esperar resulta muy difícil.

Este trabajo también está dedicado a mi familia, que son los pilares de mi vida. La culminación de esta meta se la debo también a su apoyo, entendimiento y sobre todo a su paciencia. De manera especial, a mi mamá que, gracias a su fe y su asombrosa personalidad, a veces un tanto indulgente, cursi y teatral, me ha enseñado que antes de pensar en la opinión de los demás es más importante ser feliz con mis propias reglas.

Gabriela Jara



Dedicatoria

Este trabajo es la culminación de una etapa importante de mi vida, una etapa que ha requerido de mucho esfuerzo y dedicación, de amanecidas, de días pesados y, en algunos casos, llenos de frustración, pero gracias a Dios, a mi familia y amigos he llegado a donde estoy ahora. Por eso, este trabajo lo dedico a todos ellos que han estado a mi lado, en las buenas y en las malas, y me han brindado los ánimos y la fuerza para seguir adelante. Ellos nunca dejaron que me rindiese y me animaron siempre a seguir luchando por mis sueños y por lo que creo justo. Gracias a todos ellos este trabajo ha sido posible.

Sebastián Solano



Agradecimientos

Se dedican agradecimientos especiales al Ingeniero Alcides Araujo, director del proyecto, por brindarnos su confianza para el desarrollo de esta investigación, así como también su apoyo y tiempo invertido. Igualmente, al Ingeniero Vladimiro Tobar, por su disposición desde los inicios de este proyecto y su asesoría, en conjunto con el Ingeniero Fabian Astudillo, para el análisis estadístico. Del mismo modo, un agradecimiento a los ingenieros Luis Bravo, Francisco Sánchez, María José Campoverde y Andrés Villa, encargados del instrumental necesario para el desarrollo del proyecto del cual que dispusieron el tiempo que fue necesario. Adicionalmente, a la Facultad de Química, por disponer de los líquidos y finalmente, a la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, gracias a la cual se dieron los primeros pasos del proyecto.

Gabriela Jara, Sebastián Solano



Abreviaciones y Acrónimos

ARCOTEL Agencia de Regulación y Control de Telecomunicaciones. [3](#), [32](#)

C Capacitancia. [11](#)

DUT Dispositivo En Prueba. [34](#)

E Campo eléctrico. [8](#), [9](#), [11](#), [15](#)

FDTD Finite Difference Time-Domain. [6](#)

G Conductancia. [11](#), [13](#)

H Campo magnético. [8](#), [9](#), [11](#), [15](#)

I Corriente. [11](#)

L Inductancia. [11](#)

OSL Opent-Short-Load Circuit System. [32](#), [34](#)

R Resistencia. [10](#), [11](#), [13](#)

SAR Specific Absorption Rat. [5](#)

TEM Transverse Electromagnetic Wave. [9](#), [11](#), [15](#)

V Voltaje. [11](#)

VNA Vector Network Analyzer. [1–4](#), [20](#), [21](#), [26](#), [28](#), [30](#), [32](#), [53](#)



CAPÍTULO 1

Introducción

Actualmente, en la industria, el uso de sistemas electrónicos es muy común en el monitoreo inalámbrico de propiedades dieléctricas en materiales cuando estos son sometidos a cambios físicos o químicos [3]. Esto permite la creación de dispositivos capaces de analizar características específicas en diferentes materiales de acuerdo a sus propiedades dieléctricas.

La medición de la permitividad en un material dieléctrico permite describir las propiedades dieléctricas del mismo debido a que es un valor complejo adimensional que indica la capacidad del material de almacenar potencial eléctrico inducido por un campo eléctrico. A su vez, la permitividad relativa o constante dieléctrica, es la razón entre la permitividad del material y la del vacío [4] [5] [6]. La parte real de la permitividad representa la cantidad de energía que es almacenada en el material, mientras la parte imaginaria, llamada factor de pérdidas, define cuan disipativo es el material [7].

En este contexto, se considera la hipótesis de que es posible medir, de forma no invasiva, la cantidad de glucosa en sangre a partir de las propiedades dieléctricas de la misma utilizando ondas electromagnéticas. Sin embargo, llegar a ese punto requiere de una profunda investigación en la que es necesario evaluar dispositivos que posibiliten realizar esta medición y encontrar una relación factible entre las propiedades dieléctricas de la sangre y la cantidad de glucosa en la misma. Con este trabajo de titulación se pretende dar un primer paso para lograr este objetivo, al diseñar y construir una sonda coaxial que permita medir la permitividad compleja de forma no invasiva en líquidos, haciendo pruebas sobre 6 muestras diferentes.

1.1. Identificación del problema

Actualmente, un [Vector Network Analyzer \(VNA\)](#) ofrece la capacidad de medir el coeficiente de reflexión en diferentes medios mediante un cable coaxial. Sin embargo, al tratarse de líquidos el proceso requiere un dispositivo adecuado que se adapte al cable coaxial para medir el coeficiente de reflexión del fluido sin afectar su composición. Por esta razón, el proyecto *Implementación de un sensor de permitividad para fluidos utilizando el método de terminación coaxial abierta* propone el diseño y construcción de un dispositivo que permita la adquisición no invasiva de la permitividad o constante

dieléctrica de diferentes fluidos mediante la medición del coeficiente de reflexión utilizando el [VNA](#) disponible en la facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca.

Algunas de las investigaciones previas respecto a este tema proponen diferentes métodos no invasivos adaptables a un [VNA](#), entre los cuales se destacan: sonda coaxial abierta, línea de transmisión, espacio libre, cavidad resonante y placas paralelas. Al ser no invasivos, estos métodos permiten afectar lo menos posible la composición de la muestra, al igual que su estructura física y química, debido a que solamente necesitan un contacto superficial, e incluso en algunos casos, como se describe posteriormente, ningún contacto. Para la elección de un método, es importante analizar las condiciones del proyecto, dado que, cada técnica involucra diferentes factores que pueden influir en la precisión de la medición. Los principales son: rango de frecuencia, estado del material (líquido, sólido, semi sólido), restricciones de tamaño de la muestra, y temperatura [8], [5].

Para definir la permitividad en relación al coeficiente de reflexión, usando una sonda coaxial, se tienen diferentes modelos matemáticos. Sin embargo, los resultados pueden variar dependiendo de las ventajas y limitaciones de cada uno. En capítulos posteriores se realiza una descripción detallada del funcionamiento teórico y experimental de tres modelos matemáticos desarrollados en este proyecto, para seleccionar el que mejor se acople a las condiciones sobre las que se ejecutan los experimentos, y de esta manera comprobar el correcto funcionamiento de la sonda coaxial diseñada.

1.2. Justificación

El método de sonda coaxial, como se menciona en el punto anterior, no es el único modelo que permite la medición no invasiva del coeficiente de reflexión. Entre algunos de los métodos adaptables a un [VNA](#), se puede hacer referencia a los siguientes:

- **Sonda Coaxial Abierta:** Es una línea coaxial truncada capaz de medir el coeficiente de reflexión de un material externo. Para ello, genera, en el borde, campos electromagnéticos que cambian al entrar en contacto con el material. En otras palabras, se produce un coeficiente de reflexión en la línea que depende de las propiedades dieléctricas de la muestra que entra en contacto con la sonda. La permitividad se obtiene a partir de la medición del coeficiente de reflexión.

Se compone de un conductor central y uno externo, separados por un dieléctrico que evita el ingreso de líquidos al sensor. Esos generalmente son hechos de polímeros de baja permitividad, buena resistencia química y estabilidad térmica. Muchos sensores coaxiales incorporan un disco circular al final de la sonda.

Este método tiene la ventaja de soportar materiales que poseen altos índices de pérdidas y que la muestra no requiere un proceso de preparación complicado. Además, da buenos resultados con semisólidos y líquidos. Los problemas que pueden presentarse son: la aparición de burbujas que pueden generarse al momento de realizar la medición, necesita calibraciones repetitivas, depende de la estabilidad del cable y puede verse afectado por el grosor de la muestra analizada [6], [8], [9], [3], [7], [10], [11], [5].

- **Línea de transmisión:** Consiste en colocar al material dentro de una parte de una línea de transmisión cerrada. Generalmente se utiliza una guía de onda rectangular o una coaxial. La permitividad se obtiene a partir de la medición del coeficiente de reflexión.

El método de línea de transmisión se ve limitado solamente a frecuencias en GHz o mayores y requiere un proceso para preparar la muestra, el cual es complejo. Este puede aplicarse a sólidos

y líquidos [6], [8], [9], [3], [7], [5].

- **Espacio libre:** Consiste en utilizar antenas de microondas para dirigir la energía hacia o a través del material de prueba en forma de placa. Es utilizado en condiciones de alta temperatura o ambientes hostiles ya que no requiere contacto con el objeto, pero esto a su vez presenta problemas en el proceso de calibración [8], [9], [3], [7], [12], [5].
- **Cavidad Resonante:** Consiste en insertar dentro de una cavidad resonante, de factor de calidad (Q) alto capaz de resonar a frecuencias específicas, la muestra de un material. Esta muestra debe afectar la frecuencia de resonancia de la cavidad, lo que limita las frecuencias en las que se puede analizar la muestra, además que requiere grandes cantidades de esta [6], [8], [9], [3], [7], [5].
- **Placas paralelas:** Requiere encerrar una placa o líquido de prueba entre dos electrodos formando un capacitor, los cuales necesitan ser configurados. En este caso, se utiliza el valor de capacitancia para calcular la permitividad. Este método tiene tasas altas de precisión en frecuencias bajas y el proceso de medición es relativamente sencillo [8], [7], [5].

Al evaluar las características de los diferentes modelos, se define que el método indicado para el proyecto es el de sonda coaxial abierta, debido a que al evaluar las condiciones de funcionamiento de cada método, se puede percibir que la sonda coaxial abierta es la herramienta que presenta más ventajas funcionalmente adecuadas al enfoque de la investigación. Además de su versatilidad para trabajar con líquidos sin necesidad de una preparación estricta de la muestra, estructuralmente, su diseño y construcción son sencillos y es la técnica de medición de permitividad con literatura más extensa en cuanto a teoría y funcionamiento [9]. Dicho dispositivo brindará al VNA la terminación necesaria para que este pueda medir el coeficiente de reflexión de un líquido y este valor pueda ser transformado en permitividad compleja mediante un modelo matemático.

1.3. Alcance

El proyecto se enfocará en la implementación de una sonda coaxial capaz de medir la permitividad compleja en fluidos con ayuda del MegiQ VNA, disponible en la facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca. En una primera parte de la etapa de desarrollo del proyecto se realizarán mediciones con el equipo ENA Keysight Technology disponible en [Agencia de Regulación y Control de Telecomunicaciones \(ARCOTEL\)](#), lo cual permitirá tener una idea global de como se realiza el proceso de medición utilizando el método de sonda coaxial abierta. Una vez hechas estas mediciones se procederá a diseñar una sonda coaxial teniendo en cuenta los materiales de construcción disponibles en el medio, las limitaciones del equipo de medición y la geometría de la sonda. Siendo lo último, lo que mayor influencia tendrá en los resultados que se obtengan sobre los líquidos definidos para el análisis: Agua, Butanol, Etanol, Metanol, Propanol 1 y Propanol 2. Estos líquidos fueron definidos de acuerdo a su disponibilidad en el laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Cuenca y las características dieléctricas presentadas en la referencia [13].

Se iniciará la etapa de medición tomando una sola muestra del coeficiente de reflexión de cada uno de los 6 líquidos propuestos para el análisis. Estos primeros datos, en conjunto con una revisión bibliográfica, permitirán definir: el modelo matemático que relacionará el coeficiente de reflexión con la permitividad compleja del líquido, el o los líquidos de referencia y el rango de frecuencias sobre el que se realizará el análisis. Con estas definiciones, se procederá a tomar 10 mediciones sobre los líquidos analizados. Los datos obtenidos de este proceso permitirán evaluar, mediante un análisis del



promedio y la desviación estándar del error porcentual, la exactitud y la precisión de la sonda coaxial implementada.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Implementación de una sonda coaxial que permita la medición de permitividad en fluidos, validando un modelo de impedancia que permita la utilización del analizador vectorial de redes.

1.4.2. Objetivos específicos

El presente trabajo tiene los siguientes objetivos específicos:

- Medición de permitividad de los líquidos definidos (Agua, Acetona, Etanol, Metanol, Propanol 1, Propanol 2) con un equipo de referencia.
- Diseño y construcción de una sonda coaxial.
- Definición del modelo que permita definir la relación entre parámetros de red y permitividad.
- Definición de un método de calibración de la sonda sobre un líquido de permitividad conocida.
- Medición del coeficiente de reflexión en la interfaz sonda/líquido, con ayuda de la sonda coaxial y el [VNA](#).
- Validación y ajustes del modelo para determinar la permitividad real e imaginaria de acuerdo al coeficiente de reflexión.

1.5. Entregables

El presente trabajo propone los siguientes entregables:

- Documentación de resultados de mediciones de cada equipo.
- Versión preliminar de la Memoria Técnica del proyecto que será entregado a los revisores.
- Calificación entregada por el Director y notificada a la Secretaría.
- Resumen y Abstract de alrededor de 250 palabras.
- Informe Final del Proyecto (versión revisada y corregida).
- Prototipo
- Lo exigido por la Biblioteca General de la Universidad.



CAPÍTULO 2

Estado del arte

La permitividad es un valor comúnmente utilizado en la industria de lo alimentos para procesamiento y control de calidad, debido a que, en base a la permitividad, se puede detectar, entre otras cosas, la cantidad de grasa en la comida o la edad de la carne [11], [14], [10]. Además de ello, es utilizada para el procesamiento de caucho, plástico, cerámica y recientemente en el área aeroespacial, automovilística, médica, etc [8]. En torno a ello, se han publicado una serie de trabajos con el objetivo de evaluar la aplicabilidad del valor de la permitividad de materiales en aplicaciones nuevas y otros que analizan la funcionalidad de la sonda coaxial abierta como dispositivo de medición. En este capítulo, se expone una síntesis de estudios previos relacionados con esta investigación.

2.1. Trabajos que analizan la funcionalidad de la Permitividad

- En [15] se realiza un estudio de propiedades dieléctricas en sangre de animales y humanos. En este se analiza la dependencia entre las mediciones de permitividad y la temperatura de la muestra al comparar resultados obtenidos respecto al dieléctrico en temperatura ambiente (25 °C). Para ello utiliza un medidor de impedancia en conjunto con una sonda coaxial abierta y un equipo de control de temperatura. Sus resultados muestran una variación de 0.3 % en el coeficiente de temperatura para un rango de frecuencia de 1 MHz a 1 GHz.
- Los efectos nocivos de campos electromagnéticos en el cuerpo han sido investigados por años, sin embargo, hasta el momento, no se han tenido resultados concretos que corroboren esta hipótesis. Actualmente, dado que, las propiedades dieléctricas en tejidos biológicos son fundamentales en el estudio de tecnología médica, las investigaciones de como un campo electromagnético penetra y se propaga a través el cuerpo humano están en función a las propiedades dieléctricas (permitividad y la conductividad) de los tejidos biológicos, debido a que se utilizan para el cálculo de la [Specific Absorption Rat \(SAR\)](#) en dichos tejidos [6].
- En la referencia [16] se realizó un estudio de cómo influye en la permitividad de un material su contenido de agua. Como resultado se obtuvo que la permitividad de un material se incrementa exponencialmente al aumentar su contenido de agua.

- El valor de permitividad posibilita, entre otras cosas, definir la composición de una emulsión. [17] realizó un estudio teórico en el que define el contenido de emulsiones compuestas de agua y aceite. Para ello, se clasificaron las emulsiones en tres tipos: agua en aceite, aceite en agua y múltiples emulsiones y se utilizaron diferentes técnicas de medición. Finalmente, define la técnica más adecuada para cada caso.
- El efecto de permitividad de agua también es utilizado en el estudio [18] midiendo la permitividad de la piel mediante una sonda coaxial abierta, con el objetivo de detectar células cancerosas. Las células cancerígenas se caracterizan por tener alto contenido de agua, por esta razón pueden detectarse cuando el sensor captura altos niveles de permitividad.

2.2. Trabajos que analizan la funcionalidad de la sonda coaxial abierta

- Por su parte, [11] desarrolla un estudio de medición de permitividad en soluciones estándar y tejidos biológicos vivos mediante la confección de una sonda coaxial abierta, en la que define una relación entre las dimensiones físicas de la sonda y su circuito equivalente. Como resultado de la primera parte que, engloba las soluciones estándar: Agua, Solución salina y Metanol; la sonda mencionada consiguió mediciones precisas de permitividad en tejidos biológicos en un rango de frecuencias de 50 MHz a 1 GHz. En la segunda parte [14] son establecidos los resultados experimentales en tejidos vivos usando como sujeto de prueba un gato. Los resultados fueron definidos para cada tipo de tejido estudiado, de modo que las variaciones de permitividad entre tejidos musculares, bíceps femorales e intestino no son apreciables, lo que no sucede con respecto a tejidos de riñón, bazo e hígado, ya que presentaron menos similitudes.
- Una sonda coaxial abierta ha sido usada durante años para determinar la permitividad de muestras, considerando el grosor del material como infinito o semi infinito. Por su parte, [19] realizó un estudio acerca de la sensibilidad de penetración al medir muestras significativamente delgadas, utilizando dos diseños de sonda coaxial abierta con distintas dimensiones radiales. Se define que la profundidad de penetración de una sonda es aproximadamente igual al radio del conductor externo de la sonda. En un estudio similar [20], se mide la permitividad en diferentes niveles de líquido, dando como resultado que el grosor de la muestra depende de las dimensiones radiales del sensor para considerar a la muestra como infinita.
- Una extensa revisión de modelos teóricos de sonda coaxial, con el objetivo de definir reglas de diseño ha sido realizada en [21]. Se estudian los siguientes factores involucrados: grosor de la muestra, dimensiones necesarias del disco final para una funcionalidad correcta en el modelo espectral. En el mencionado estudio se concluye que, si el grosor del material de prueba es superior a dos veces el radio externo de la sonda, se puede utilizar el modelo de Marcuvitz para el análisis matemático. De lo contrario se aplica el modelo de dominio espectral. En cuanto a dimensiones radiales, los investigadores definen que para el uso del método [Finite Difference Time-Domain \(FDTD\)](#) es importante que se cumpla la relación de $b/a=2.3$, siendo a el radio del conductor interno y b el radio interno del conductor externo, además de la relación con la apertura del dieléctrico d , debe ser $d/b=0.5$.
- La sonda coaxial abierta ha sido utilizada para la hacer la medición de las propiedades dieléctricas de materiales con pérdidas aplicando un modelo de admitancia equivalente en [22]. Como resultado,



los investigadores realizaron una medición precisa de permitividad en líquidos dieléctricos en un rango de frecuencias de 50 MHz a 2.6 GHz. Ellos también asumen que el funcionamiento erróneo de su dispositivo en bajas frecuencias es atribuido a errores en el analizador de red, mientras que, los errores en frecuencias altas se deben a que el modelo matemático no es adecuado.

2.3. Conclusiones

Los estudios que analizan la funcionalidad de la permitividad definen la importancia de este valor en aplicaciones de diferentes industrias. Varios de estos estudios analizan cambios bruscos en la permitividad de un material en base a su contenido de agua. Este líquido en particular, es frecuentemente utilizado debido a su alto grado de permitividad.

Los trabajos que analizan la funcionalidad de sonda coaxial argumentan la versatilidad del método, debido a que confirman el uso exitoso del mismo en diferentes ambientes y circunstancias. De esta manera se pueden prever algunos de los escenarios que pueden presentarse en la investigación. Entorno a esto, varios autores recalcan la importancia de mantener reglas de diseño dependiendo de la utilizad.



Marco Teórico

La teoría de ondas electromagnéticas es muy extensa, sin embargo, en el presente capítulo se realiza una síntesis de la propagación de ondas electromagnéticas, líneas de transmisión y de cómo su comportamiento puede ser representado por una red de dos puertos mediante su matriz de parámetros de transmisión y esparcimiento.

3.1. Propagación de ondas Electromagnéticas

El origen de la teoría electromagnética es atribuido a James C. Maxwell, quien fue el primero en definir una teoría unificada de la electricidad y el magnetismo. A partir de ello, se desarrollaron las condiciones matemáticas para que un campo pueda considerarse como electromagnético, las mismas, fueron expuestas en cuatro expresiones matemáticas conocidas como *Ecuaciones de Maxwell*. En la tabla 3.1, se puede observar una versión generalizada de las ecuaciones de Maxwell para campos armónicos en el tiempo.

Tabla 3.1: Ecuaciones generalizadas de Maxwell para campos armónicos en el tiempo

Forma diferencial	Descripción
$\nabla \cdot D = \rho_v$	Ley de Gauss
$\nabla \cdot B = 0$	Ley de Gauss para campos magnéticos
$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$	Ley de Faraday
$\nabla \times H = j + \frac{\partial D}{\partial t}$	Ley de circuitos de Ampere

Las ondas o campos electromagnéticos dinámicos son **Campo eléctrico (E)** y **Campo magnético (H)** que poseen variación temporal. Estos, a diferencia de los campos electrostáticos, que se producen en corriente estacionaria o directa, son producidos por corrientes variables en el tiempo que generan una interdependencia entre el campo eléctrico $E(x, y, z, t)$ y magnético $H(x, y, z, t)$.

Particularmente, las ondas electromagnéticas, se caracterizan por ser ondas que no requieren de un medio discernible para propagarse, por lo que, comúnmente, son utilizadas para el transporte de energía o información. Un caso especial de las ondas electromagnéticas, son las transversales, también conocidas como [Transverse Electromagnetic Wave \(TEM\)](#). Estas poseen campos $\mathbf{E}$ y $\mathbf{H}$ en un plano transversal a la dirección de propagación.

En este tipo de ondas el uso de un medio físico definido facilita el control de efectos de dispersión y dirección de propagación. En la propagación de ondas, el comportamiento de un medio depende, tanto de los parámetros constitutivos (*conductividad σ , permitividad ε , permeabilidad μ*) como de la frecuencia de operación. A nivel general se pueden mencionar los siguientes medios: El vacío, dieléctricos sin pérdidas, dieléctricos disipativos y buenos conductores. Considerar el tipo de medio es muy importante en el estudio de propagación de ondas, dado que, el medio puede cambiar el funcionamiento de la onda, por ejemplo, a través de un dieléctrico disipativo, una onda electromagnética pierde potencial debido a una conducción defectuosa.

Las ecuaciones de campos electromagnético pueden ser definidas a partir de las ecuaciones de Maxwell en forma de fasor al considerar el factor tiempo $e^{j\omega t}$, debido a que se puede reemplazar las derivadas incluidas con $j\omega$. De esta manera, se consigue lo siguiente:

$$\nabla \times \bar{\mathbf{E}} = j\omega \bar{\mathbf{B}} - \bar{\mathbf{M}} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \bar{\mathbf{H}} = -j\omega \bar{\mathbf{D}} - \bar{\mathbf{J}} \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{D}} = \rho \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{B}} = 0 \quad (3.4)$$

Donde $\bar{\mathbf{M}}$ y $\bar{\mathbf{J}}$ representan el volumen de la corriente en los campos eléctrico y magnético respectivamente. Por su parte, si se trata de una región lineal, isotrópica y homogénea las ecuaciones 3.1 y 3.2, toman la siguiente forma:

$$\nabla \times \bar{\mathbf{E}} = -j\omega \bar{\mathbf{H}} \quad (3.5)$$

$$\nabla \times \bar{\mathbf{H}} = -j\omega \bar{\mathbf{E}} \quad (3.6)$$

Las ecuaciones en forma de fasor de una onda que se propaga en el plano z de un medio general con pérdidas se expresan a continuación:

$$E_x(z) = E^+ e^{-\gamma z} + E^- e^{+\gamma z} \quad (3.7)$$

$$H_y(z) = H^+ e^{-\gamma z} + H^- e^{+\gamma z} \quad (3.8)$$

$$H_y(z) = \frac{j}{\omega \mu} \frac{\partial E_x}{\partial z} \quad (3.9)$$

$$H_y(z) = \frac{1}{\eta} (E^+ e^{-\gamma z} + E^- e^{+\gamma z}) \quad (3.10)$$

Donde, η y γ son la impedancia intrínseca, también llamada la impedancia de onda Z_w , y la constante compleja de propagación del medio, respectivamente. De acuerdo a [2], estos pueden ser definidos en las expresiones 3.11 y 3.12.

$$\eta = \frac{j\omega\mu}{\gamma} = Z_w \quad (3.11)$$

$$\gamma = j\omega\sqrt{\mu\varepsilon}\sqrt{1 - j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}} \quad (3.12)$$

3.2. Líneas de Transmisión

Las líneas de transmisión se pueden definir como estructuras o medios guiados que dirigen la propagación ondas electromagnéticas desde una fuente a su correspondiente carga. Las líneas de transmisión se componen de dos o más conductores en paralelo. En la Figura 3.1, se pueden observar los modelos de líneas más comunes, que son: línea de dos hilos, línea plana o de placas paralelas, alambre sobre un plano conductor, línea de microcinta y línea coaxial [2], [1].

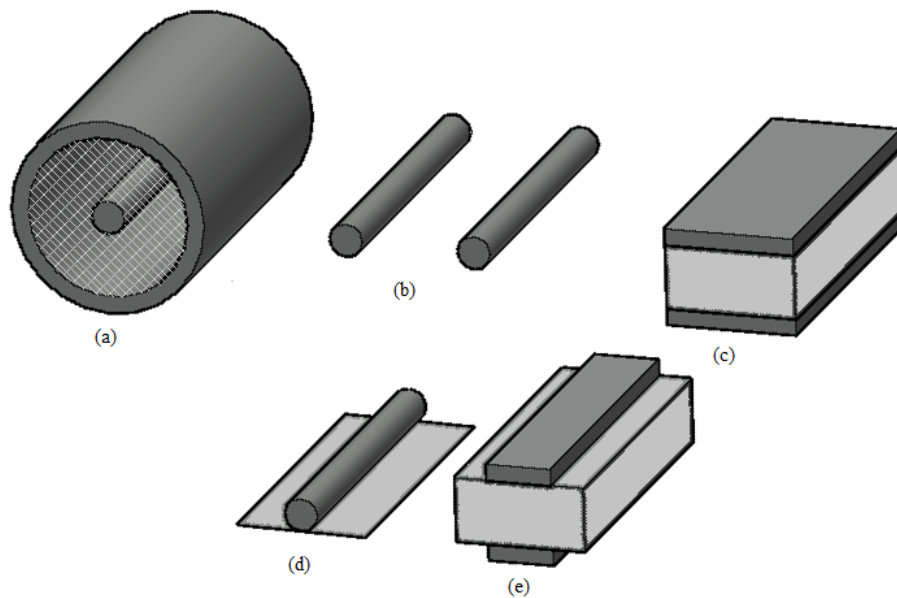


Figura 3.1: Tipos comunes de líneas de transmisión: a) Línea coaxial, b) Línea de dos hilos, c) Línea plana, d) Alambre sobre un plano conductor, e) línea de microcinta

Las líneas de transmisión se caracterizan por la relación no dispersa entre las dimensiones físicas de la línea y la longitud de onda eléctrica. Si una línea de transmisión representa una porción de la longitud de onda funciona como una red de parámetros distribuidos donde el voltaje y la corriente pueden variar en magnitud y fase dependiendo de la longitud de la línea. Este comportamiento resulta un problema que puede resolverse mediante el estudio de campo electromagnético y teoría de circuitos, debido a que, en los circuitos ordinarios las dimensiones físicas de la red son mucho más pequeñas que la longitud de onda eléctrica, por lo que, como es el caso de los “Elementos discretos o sueltos”, el voltaje y la corriente no varían significativamente de acuerdo a las dimensiones físicas de sus elementos [2], [1].

Los parámetros por unidad de longitud de una línea de transmisión, llamados así por qué se encuentran distribuidos uniformemente por todo el largo de la línea de transmisión, son: [Resistencia](#)

(R) $[\Omega/m]$, Inductancia (L) $[H/m]$, Conductancia (G) $[S/m]$ y Capacitancia (C) $[F/m]$. Cada tipo de línea posee modelos matemáticos específicos para la determinación de cada uno de los parámetros. Es importante mencionar también que, en cualquier caso $G \neq 1/R$, dado que, R es la resistencia en corriente alterna de los conductores y G es la conductancia debida al medio dieléctrico que los separa. En otras palabras, mientras L y C muestran una relación de inductancia y capacitancia entre conductores, R y G representan pérdidas en el medio [2].

En general, el funcionamiento de las líneas de transmisión se enfoca en la propagación de TEM a lo largo de la línea. En este tipo de medios los campos E y H en la línea son transversales a la dirección de propagación de la onda. La ventaja de trabajar con líneas TEM es la forma específica en la que se relacionan los campos E y H con el Voltaje (V) y la Corriente (I) respectivamente [2]. Esto permite trabajar con un modelo de circuito equivalente que no requiere las ecuaciones de Maxwell ni las condiciones de frontera. Específicamente, en este caso, el modelo de circuito equivalente es conocido como Elementos Distribuidos (Lumped-Element) [1] o como circuito equivalente tipo L [2], en el que se consideran las dimensiones físicas de la sonda como una fracción de la longitud de onda eléctrica de la red. El circuito equivalente con elementos distribuidos, al considerar una longitud Δz de una línea de transmisión de dos conductores, se puede observar en la Figura 3.2 [1].

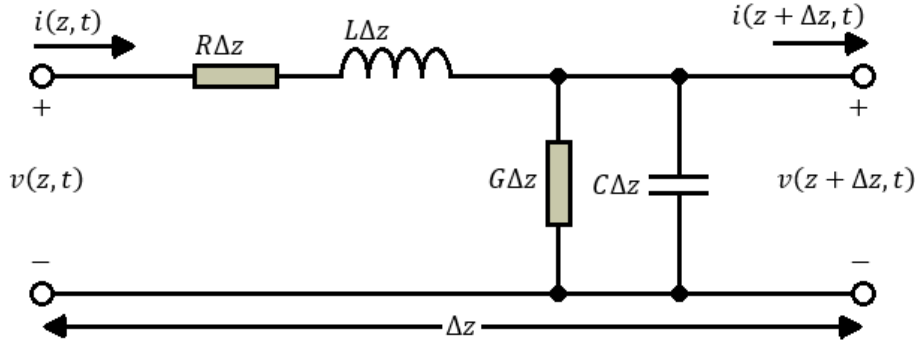


Figura 3.2: Circuito equivalente de una línea de transmisión - Elementos distribuidos

Al aplicar las leyes de Voltaje y Corriente de Kirchhoff sobre el circuito de la Figura 3.2, respectivamente, se obtiene lo siguiente:

$$v(z,t) - R\Delta z i(z,t) - L\Delta z \frac{\partial i(z,t)}{\partial t} - v(z+\Delta z,t) = 0 \quad (3.13)$$

$$i(z,t) - G\Delta z v(z+\Delta z,t) - C\Delta z \frac{\partial v(z+\Delta z,t)}{\partial t} - i(z+\Delta z,t) = 0 \quad (3.14)$$

Si se considera que $\Delta z \rightarrow 0$; da como resultado:

$$-\frac{\partial v(z,t)}{\partial z} = R_i(z,t) + L \frac{\partial i(z,t)}{\partial t} \quad (3.15)$$

$$-\frac{\partial i(z,t)}{\partial z} = G_v(z,t) + C \frac{\partial v(z,t)}{\partial t} \quad (3.16)$$

A partir de este punto se considera dependencia de tiempo armónico, por lo que se puede obtener el valor de $v(z,t)$ e $i(z,t)$ en sus formas de fasor, siendo V_s e I_s , respectivamente, de la siguiente forma:

$$v(z,t) = \text{Re}[V_s(z)e^{j\omega t}] \quad (3.17)$$



$$i(z, t) = \text{Re}[I_s(z)e^{j\omega t}] \quad (3.18)$$

Donde, ω es la frecuencia angular y es igual a $2\pi f$. Por lo tanto, las ecuaciones 3.15 y 3.16 pasan a la siguiente expresión:

$$-\frac{dV_s}{dz} = (R + j\omega L)I_s \quad (3.19)$$

$$-\frac{dI_s}{dz} = (G + j\omega C)V_s \quad (3.20)$$

Para resolver las ecuaciones 3.19 y 3.20 se obtienen la segunda derivada de 3.19 y luego se reemplaza 3.20 de la siguiente manera:

$$\frac{d^2V_s}{dz^2} = -(R + j\omega L)\frac{dI_s}{dz} \quad (3.21)$$

$$\frac{d^2V_s}{dz^2} = -(R + j\omega L)(G + j\omega C)V_s \quad (3.22)$$

El mismo procedimiento se puede realizar con la ecuación 3.20 De modo que, se obtiene:

$$\frac{d^2V_s}{dz^2} - \gamma^2 V_s = 0 \quad (3.23)$$

$$\frac{d^2I_s}{dz^2} - \gamma^2 I_s = 0 \quad (3.24)$$

Siendo γ igual a:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (3.25)$$

Para la solución de las ecuaciones 3.23 y 3.24 son necesarias las ecuaciones de ondas de voltaje y corriente. Estas se obtienen utilizando las ecuaciones 3.7 y 3.8 de campos eléctrico y magnético, aplicando su relación directa con el voltaje y la corriente respetivamente.

$$V_s(z) = V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{+\gamma z} \quad (3.26)$$

$$I_s(z) = I_0^+ e^{-\gamma z} + I_0^- e^{+\gamma z} \quad (3.27)$$

Posteriormente, se reemplaza 3.24 y 3.26 en 3.19 y 3.20, respectivamente, y se obtiene lo siguiente:

$$V_s(z) = \frac{\gamma}{G + j\omega C}(I_0^+ e^{-\gamma z} - I_0^- e^{+\gamma z}) \quad (3.28)$$

$$I_s(z) = \frac{\gamma}{R + j\omega L}(V_0^+ e^{-\gamma z} - V_0^- e^{+\gamma z}) \quad (3.29)$$

Dado que la impedancia característica de una línea de transmisión respecto a ondas de propagación relaciona las ondas de corriente y de voltaje de la siguiente manera:

$$\frac{V_o^+}{I_o^+} = Z_o = -\frac{V_o^-}{I_o^-}$$

Al reemplazar el valor de la impedancia característica en 3.26 y relacionarse con la ecuación 3.28 se obtiene que la impedancia característica en una línea de transmisión de dos conductores.

$$Z_o = \frac{R + j\omega L}{\gamma} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = R_o + jX_o \quad (3.30)$$

3.2.1. Líneas de transmisión sin pérdidas

En una línea de transmisión, tanto la impedancia como la constante de propagación son complejas y dependen de los parámetros distribuidos (R , L , G y C). Esto se da debido a que se consideran los efectos de pérdidas. De acuerdo con [1] estos efectos podrían ser despreciables si las pérdidas en la línea se consideran muy pequeñas. Esto implica que los valores de R y G sean despreciables implicando que la constante de propagación y la impedancia característica tomen un valor real de la siguiente manera:

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega \sqrt{LC} \quad (3.31)$$

$$\beta = \omega \sqrt{LC} \quad (3.32)$$

$$\alpha = 0 \quad (3.33)$$

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3.34)$$

La relación entre las ondas de voltaje y corriente en una línea de este tipo es la impedancia característica Z_o por lo que, las ecuaciones de las ondas de propagación, pasa a ser las siguientes:

$$V(z) = V_o^+ e^{-j\beta z} + V_o^- e^{+j\beta z} \quad (3.35)$$

$$I(z) = \frac{V_o^+}{Z_o} e^{-j\beta z} - \frac{V_o^-}{Z_o} e^{+j\beta z} \quad (3.36)$$

En el caso de tratarse de una línea de transmisión sin pérdidas con carga arbitraria $Z_L \neq Z_o$, como se muestra en la Figura 3.3, se produce un efecto de reflexión.

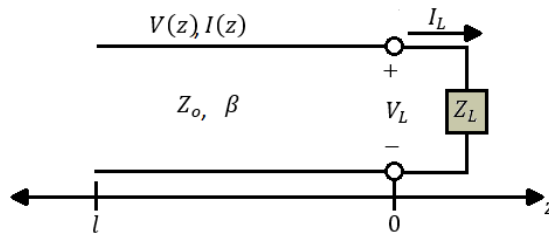


Figura 3.3: Línea de transmisión sin pérdidas terminada en una carga arbitraria Z_L . Imagen adoptada de [1]

En este caso, la relación entre las ondas de voltaje y corriente de la línea pasa a ser la impedancia de carga Z_L , por lo que, a partir de las ecuaciones 3.35 y 3.36 en el punto $z = l = 0$ se obtiene lo siguiente:

$$Z_L = \frac{V(0)}{I(0)} = \frac{V_o^+ + V_o^-}{V_o^+ - V_o^-} Z_o \quad (3.37)$$

Con la cual es posible definir la relación entre V_o^- y V_o^+ , también conocido como, el *coeficiente de reflexión* Γ .

$$\Gamma = \frac{V_o^-}{V_o^+} = \frac{Z_L - Z_o}{Z_L + Z_o} \quad (3.38)$$

El coeficiente de reflexión es el valor que permite definir el grado de reflexión entre 0 y 1 al propagar ondas electromagnéticas a través de dos medios de propagación con distintas características. En otras palabras, como se puede observar en la Figura 3.4, cuando la onda incidente llega al punto de discontinuidad de los medios, una porción de la misma es reflejada y la restante es transmitida a través del nuevo medio. En este contexto, es posible definir tres ondas: incidentes (E_i, H_i), reflejadas (E_r, H_r) y transmitidas (E_t, H_t). Cada medio se caracteriza por sus parámetros constitutivos respectivos de la siguiente manera: medio 1 ($\sigma_1, \varepsilon_1, \mu_1$) y medio 2 ($\sigma_2, \varepsilon_2, \mu_2$).

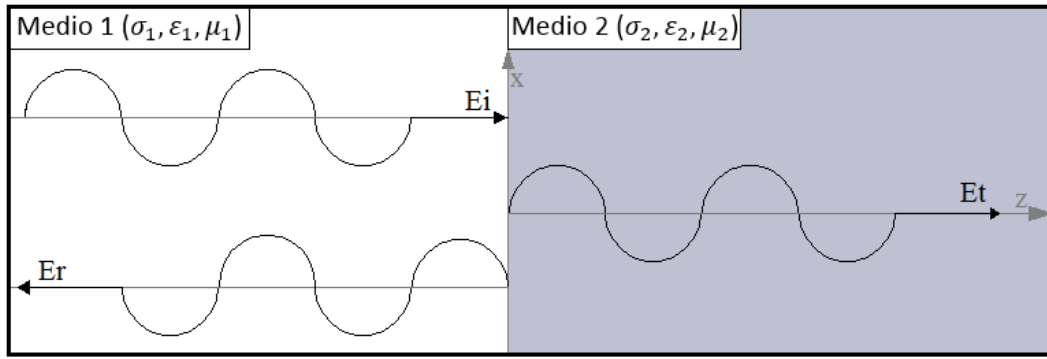


Figura 3.4: Interfaz de onda incidente normal, reflejada y transmitida entre dos medios de propagación. Imagen adoptada de [1] [2]

Al expresar las ecuaciones de onda de voltaje y corriente de la línea con respecto al *coeficiente de reflexión* se obtiene lo siguiente:

$$V(z) = V_o^+(e^{-j\beta z} + \Gamma e^{+j\beta z}) \quad (3.39)$$

$$I(z) = \frac{V_o^+}{Z_o}(e^{-j\beta z} - \Gamma e^{+j\beta z}) \quad (3.40)$$

Si se da el caso de $Z_L = Z_o$, significa que la carga está acoplada, por lo que no existe onda de reflexión y por lo tanto $\Gamma = 0$.

Por otro lado, al generalizar la expresión anterior para cualquier punto en la línea con $z = -l$, el *coeficiente de reflexión*, pasa a ser el siguiente:

$$\Gamma(l) = \frac{V_o^- e^{-j\beta l}}{V_o^+ e^{+j\beta l}} = \Gamma(0) e^{-2j\beta l} \quad (3.41)$$

En un medio sin pérdidas continuo, la amplitud de la onda de voltaje es constante, sin embargo, en este caso, cuando se encuentra con otro medio, debido a la onda reflejada, dicha amplitud varía a lo largo de la línea, lo que, a su vez, provoca que la impedancia también resulte variable. Esto permite que el valor de la impedancia de la línea pueda ser calculado en un punto específico de la misma. Para ello, se define la relación entre el voltaje y la corriente a una distancia de $z = -l$ después del punto $l = 0$ utilizando las ecuaciones 3.47 y 3.48 de la siguiente manera:

$$Z_{in} = \frac{V(-l)}{I(-l)} = \frac{V_o^+(e^{+j\beta l} + \Gamma e^{-j\beta l})}{V_o^+(e^{+j\beta l} - \Gamma e^{-j\beta l})} Z_o = \frac{1 + \Gamma e^{-2j\beta l}}{1 - \Gamma e^{-2j\beta l}} Z_o \quad (3.42)$$

Finalmente, al reemplazar 3.38 en 3.42, se obtiene la expresión en su forma típica y más utilizada, conocida como la *ecuación de impedancia en línea de transmisión*.

$$Z_{in} = Z_o \frac{Z_L + jZ_o \tan(\beta l)}{Z_o + jZ_L \tan(\beta l)} \quad (3.43)$$

3.2.2. Línea de Transmisión Coaxial

Como se puede observar en la Figura 3.1(a), una línea de transmisión coaxial se compone de un conductor cilíndrico central de radio a , separado del conductor externo de radio interno b , por un material dieléctrico homogéneo de permitividad conocida ϵ_d .

La propagación de una onda electromagnética por medio de una línea coaxial, produce un efecto de campo electromagnético de la siguiente manera: por medio de un interruptor, al introducir corriente en el conductor interno, este se vuelve positivo respecto al externo, de modo que irradia **E** hacia afuera, mientras el **H** circunda al mismo. El cierre del interruptor genera una perturbación en forma de **TEM** plana no uniforme que se propaga a lo largo de la línea [2].

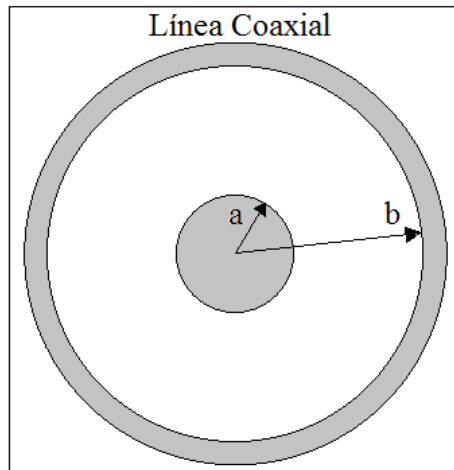


Figura 3.5: Estructura típica de línea de transmisión coaxial

Los valores para los parámetros del circuito equivalente (R , L , G y C) en una línea de transmisión coaxial, se definen mediante un análisis de los campos electromagnéticos en relación con sus características geométricas, como se ven en la Figura 3.5 [1], resultando en las siguientes expresiones:

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad \left[\frac{H}{m}\right] \quad (3.44)$$

$$C = \frac{\epsilon'}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad \left[\frac{F}{m}\right] \quad (3.45)$$

$$R = \frac{R_s}{2\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b}\right) \quad \left[\frac{\Omega}{m}\right] \quad (3.46)$$

$$G = \frac{2\pi\epsilon''}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad \left[\frac{S}{m}\right] \quad (3.47)$$

En las expresiones 3.44-3.47, a y b se definen como los radios del conductor central o interno y el externo, mientras ϵ' hace referencia a la permitividad real del dieléctrico, μ es la permeabilidad de la línea de transmisión y ϵ'' es la permitividad imaginaria del material dieléctrico.

De acuerdo con [23], [2] y [1], como se mencionó anteriormente, al considerar el circuito eléctrico equivalente, los parámetros de una línea de transmisión no cambian apreciablemente con la longitud de la línea, por lo que, al considerar una línea de longitud infinita con dimensiones radiales homogéneas, se puede definir que, la expresión de la impedancia característica se mantiene, a partir de la relación entre el voltaje y la corriente en una línea sin pérdidas. Por este motivo, al reemplazar 3.44 y 3.45 en 3.34, se obtiene la expresión para la impedancia característica por unidad de longitud.

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln \frac{b}{a} \quad (3.48)$$

Donde:

$$\mu = \mu_r \mu_o \quad (3.49)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_o \quad (3.50)$$

$$\mu \cong \mu_o \cong 4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$$

$$\varepsilon_o \cong 8,854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$$

Finalmente, al reemplazar 3.49 y 3.50 en 3.48 y sus respectivos valores de equivalencia en el vacío, se obtiene lo siguiente.

$$Z_o = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln \frac{b}{a} \quad (3.51)$$

3.3. Matriz de dispersión o matriz S

Al utilizar redes de n puertos para representar un circuito, el análisis de reflexión se realiza de manera distinta, dado que, en este caso, se relaciona la onda reflejada de un puerto, respecto a todos los demás. Para ello se utiliza la conocida matriz de dispersión o matriz S.

La matriz de dispersión presenta la relación de la onda de voltaje incidente en un puerto con la onda de voltaje reflejada en otros puertos pertenecientes a una red (lineal) de n-puertos, para, de esta manera, proveer una descripción completa de la red vista desde sus n-puertos, la cual permitirá predecir el comportamiento de la red en cualquier ambiente externo. Además, esta matriz puede ser transformada en matrices de otros parámetros.

La elección de los parámetros de dispersión o parámetros S para caracterizar una red de n-puertos es natural en el caso de microondas, debido a que estos parámetros son fáciles de medir y permiten trabajar en altas frecuencias, lo que, a su vez, los convierte una opción factible para describir transistores y otros dispositivos activos. Sumado a esto, los parámetros S, a diferencia del voltaje y la corriente, tienen la ventaja de no variar su magnitud a lo largo de una línea de transmisión sin pérdidas, ya que son medidas de reflexión y transmisión de ondas de voltaje en una red eléctrica.

La matriz de dispersión [S] está definida en relación a las ondas de voltaje reflejadas e incidentes tal como se observa en la siguiente matriz:

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \\ \vdots \\ V_N^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1N} \\ S_{21} & & & \\ S_{N1} & \cdots & & S_{NN} \\ \vdots & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \\ \vdots \\ V_N^+ \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

Cada elemento o parámetros S de la matriz de dispersión puede determinarse utilizando la expresión 3.53.

$$S_{ij} = \left. \frac{V_i^-}{V_j^+} \right|_{V_k^+ = 0 \text{ para } k \neq j} \quad (3.53)$$

La ecuación 3.53 indica que S_{ij} es la relación entre el voltaje de una onda incidente en el puerto j , que divide la amplitud medida de la onda de voltaje reflejado en el puerto i . Además, todos los puertos se encuentran libres de ondas incidentes exceptuando el puerto j , lo que significa que todos estos puertos deben tener una carga acoplada para evitar reflexión.

Algo importante que se debe tener en cuenta es que el *coeficiente de reflexión* visto en el puerto i no es igual a S_{ii} a menos que todo el resto de los puertos de la red se encuentren acoplados.

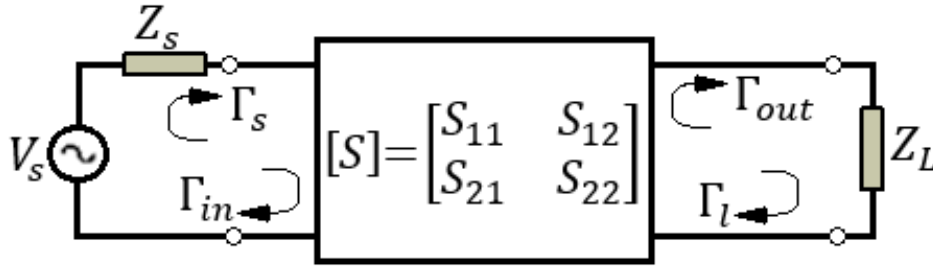


Figura 3.6: Red de dos puertos terminada. Imagen adaptada de [1]

En casos específicos, una red o circuito de 2 puertos puede representar una línea de transmisión. La Figura 3.6 muestra un circuito de dos puertos que representa una línea de transmisión terminada [1].

Por otro lado, en el caso de relacionar los parámetros de dispersión con los coeficientes de reflexión que intervienen en el circuito de la Figura 3.6, [1] se utiliza una técnica conocida como *grafico de flujo de la señal*, para obtener las expresiones de Γ_{in} y Γ_{out} .

$$\Gamma_{in} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_l}{1 - S_{22}\Gamma_l} \quad (3.54)$$

$$\Gamma_{out} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_s}{1 - S_{11}\Gamma_s} \quad (3.55)$$

3.4. Matriz de transmisión o ABCD

Otra manera de caracterizar una red o circuito de dos puertos, con la finalidad de facilitar el cálculo de parámetros S , es mediante la matriz de parámetros $ABCD$ también conocida como $[A]$. En el caso de una línea de transmisión, como se puede observar en la Figura 3.7, cada parámetro se deduce a partir de las características de la línea mediante las expresiones 3.56 - 3.59 [1].

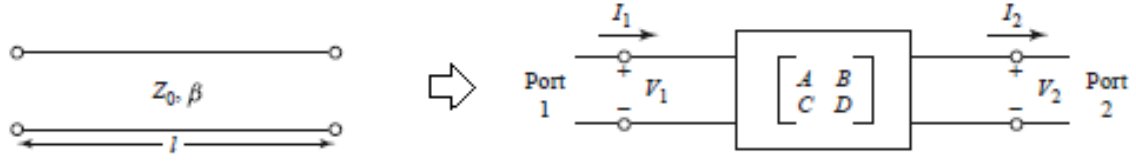


Figura 3.7: Red $ABCD$ de una línea de transmisión. Imagen adoptada de [1]

$$A = \cos(\beta l) \quad (3.56)$$

$$B = jZ_o \sin(\beta l) \quad (3.57)$$

$$C = jZ_o \sin(\beta l) \quad (3.58)$$

$$D = \cos(\beta l) \quad (3.59)$$

La conversión que relaciona los parámetros en una red de dos puertos, específicamente, entre parámetros $ABCD$ y S se despliegan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Conversión de parámetros de redes de dos puertos

S	ABCD
S_{11}	$\frac{A + \frac{B}{Z_o} - CZ_o - D}{A + \frac{B}{Z_o} + CZ_o + D}$
S_{12}	$\frac{2(AD - BC)}{A + \frac{B}{Z_o} + CZ_o + D}$
S_{21}	$\frac{2}{A + \frac{B}{Z_o} + CZ_o + D}$
S_{22}	$\frac{-A + \frac{B}{Z_o} - CZ_o + D}{A + \frac{B}{Z_o} + CZ_o + D}$
ABCD	S
A	$\frac{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$
B	$Z_o \frac{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$
C	$\frac{1}{Z_o} \frac{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$
D	$\frac{(1 - S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$

3.5. Conclusiones

La teoría de ondas electromagnéticas provee la información suficiente para un análisis de coeficiente de reflexión de una onda que atraviesa dos medios distintos, en este caso, una línea coaxial y un líquido externo. Por su parte, el estudio de línea coaxial de transmisión proporciona de las herramientas requeridas para el diseño de la sonda coaxial abierta y definir sus características radiales en base a su impedancia característica y el dieléctrico interno. Además de ello, establece la relación entre el coeficiente de reflexión y características de funcionamiento de la sonda.



Por último, los parámetros de dispersión, ya sean en matriz S o $ABCD$, proporcionan las herramientas necesarias para el manejo del coeficiente de reflexión en relación a una red de dos puertos.

Modelo matemático de conversión

En este capítulo se abarcan a detalle tres modelos matemáticos propuestos para la conversión de coeficiente de reflexión medido a permitividad y de su respectivo método de calibración.

4.1. Consideraciones físicas

La sonda coaxial abierta y el VNA son las herramientas físicas utilizadas para el desarrollo de este proyecto. De modo que, el VNA permite medir el *coeficiente de reflexión* en la interfaz cable/sonda mediante un cable coaxial semirrígido. Por su parte, la sonda genera la terminación adecuada del cable para comportarse como el sensor que se pone en contacto con la muestra en la interfaz sonda/líquido, como se muestra en la Figura 4.1.

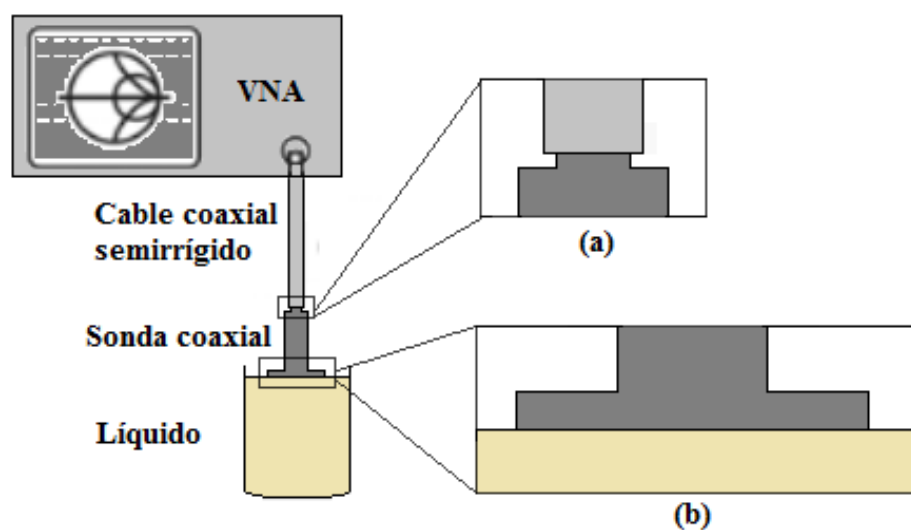


Figura 4.1: Esquema de medición; a) Interfaz cable/sonda; b) Interfaz sonda/líquido

El modelo matemático de conversión tiene como objetivo definir el valor de permitividad compleja a partir del coeficiente de reflexión del líquido. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, el coeficiente de reflexión medido por el VNA es referente a la interfaz cable/sonda. Es decir, al modelar el proceso de medición como una línea coaxial terminada sin pérdidas, Figura 3.3, todo el conjunto generado por el líquido y la sonda coaxial, actúa como la carga Z_L al final de la línea. Para conseguir el coeficiente de reflexión del líquido producido en la interfaz sonda/líquido, es necesaria una compensación de longitud de la sonda coaxial desplazando el punto de análisis de Γ a través del plano $+z$, [24].

Muchos investigadores han optado por modelar matemáticamente la interfaz sonda/líquido como una línea coaxial y adaptarla, teóricamente, al cable coaxial semirrígido. En este contexto, los modelos utilizados comunmente son: Modelo Capacitivo [25], [19], [14], [11], [24]; Modelo de Antena [22], [26]; y Línea Virtual [27], [28], [29]. Los principios matemáticos de cada modelo se describen en los siguientes puntos .

4.2. Compensación de longitud de sonda

Una de las opciones para realizar este proceso es desplazar el punto de análisis del coeficiente de reflexión medido definiendo a la sonda coaxial como una red de dos puertos. Siguiendo el esquema de la Figura 3.6, Z_s es la impedancia característica de la línea de transmisión representada, en este caso, por el cable coaxial semirrígido, es decir 50Ω . Del mismo modo, Z_L simboliza la impedancia del líquido de prueba.

Los parámetros S de la red se definen a partir de los parámetros $ABCD$ que caracterizan la sonda coaxial al considerarla como una línea de transmisión, como se muestra en la Figura 3.7. Dichos parámetros son obtenidos utilizando las expresiones 3.56-3.59 y a su vez la ecuación 3.32 que se relaciona con las dimensiones radiales de la sonda. Posteriormente, simplemente se utiliza la conversión de parámetros $ABCD$ a S .

Finalmente, considerando, Ω_{in} como el coeficiente de reflexión medido al final del cable coaxial semirrígido y Ω_l al medido al final de la sonda coaxial. Se obtiene el valor de coeficiente coaxial del líquido despejando Ω_l de la expresión 3.54. El resultado de la expresión 4.1 se utiliza en todos los modelos matemáticos para encontrar la permitividad de cada líquido.

$$\Gamma_l = \frac{\Gamma_{in} - S_{11}}{S_{12}S_{21} - S_{11}S_{22} + S_{22}\Gamma_{in}} \quad (4.1)$$

4.3. Modelo capacitivo

El principio de este modelo matemático, consiste en caracterizar la interfaz sonda/líquido mediante un sensor de admitancias representado por una capacitancia pura, a partir de un circuito equivalente compuesto de dos capacitores en paralelo, como se puede observar en la Figura 4.2. En este circuito C_f representa la capacitancia de la línea coaxial, inducida por el dieléctrico de la sonda, mientras $\epsilon_r C_o$ simboliza la capacitancia de la carga o, en este caso, el líquido. A su vez, ϵ_r representa la permitividad relativa compleja de del fluido que es igual a $\epsilon_r' + j\epsilon_r''$.

El coeficiente de reflexión es obtenido a partir de la admitancia compleja del circuito equivalente [28]. Para ello, primeramente, se utiliza la expresión 3.38, es decir, del coeficiente de reflexión de una

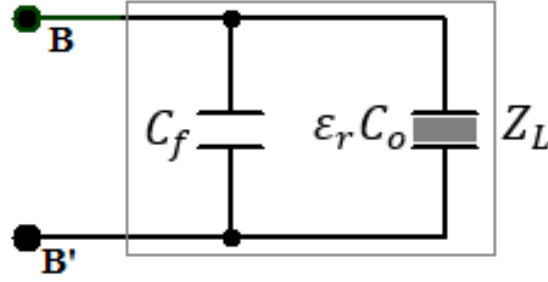


Figura 4.2: Circuito Equivalente - Modelo Capacitivo

línea de transmisión con carga, la cual, en este caso es Z_L , mientras Z_o es la impedancia característica de la línea. Posteriormente, se desarrolla de la siguiente manera:

$$S_{11} = \frac{Z_L - Z_o}{Z_L + Z_o} \quad (4.2)$$

$$S_{11} = |S_{11}| e^{j\varphi} = \frac{1 - \frac{Z_o}{Z_L}}{1 + \frac{Z_o}{Z_L}} \quad (4.3)$$

Siendo $|S_{11}|$ y φ la magnitud y la fase del coeficiente de reflexión del líquido, respectivamente, en coordenadas polares.

Considerando,

$$C_T = \epsilon_r C_o + C_f \quad (4.4)$$

$$Z_L = X_{C_T} = j \frac{1}{\omega C_T} \quad (4.5)$$

El coeficiente de reflexión pasa a ser el siguiente:

$$\Gamma = \frac{1 - j\omega Z_o[(\epsilon'_r + j\epsilon''_r)C_o + C_f]}{1 + j\omega Z_o[(\epsilon'_r + j\epsilon''_r)C_o + C_f]} \quad (4.6)$$

A partir de la ecuación 4.6, se obtienen las expresiones tanto para la permitividad relativa real ϵ'_r como para la permitividad imaginaria o factor de pérdidas ϵ''_r .

$$\epsilon'_r = \frac{-2|S_{11}|\sin\varphi}{\omega Z_o C_o (1 + 2|S_{11}|\cos\varphi + |S_{11}|^2)} - \frac{C_f}{C_o} \quad (4.7)$$

$$\epsilon''_r = \frac{1 - |S_{11}|^2}{\omega Z_o C_o (1 + 2|S_{11}|\cos\varphi + |S_{11}|^2)} \quad (4.8)$$

Por otro lado, los valores de C_f y C_o se definen mediante un proceso de calibración, en el cual, se utiliza la misma ecuación 4.6, para despejar dichos parámetros y definir sus valores a partir de un líquido de permitividad conocida. Las ecuaciones específicas se definen en las expresiones 4.9 y 4.10.

$$C_o = \frac{1 - |S_{11}|^2}{\omega Z_o \epsilon''_o (1 + 2|S_{11}|\cos\varphi + |S_{11}|^2)} \quad (4.9)$$

$$C_f = \frac{-2 |S_{11}| \sin \varphi}{\omega Z_o \left(1 + 2 |S_{11}| \cos \varphi + |S_{11}|^2 \right)} - \epsilon'_r C_o \quad (4.10)$$

Según investigaciones previas, el modelo capacitivo muestra incongruencias para muestras con permitividad alta, altas frecuencias y sensores largos [30]. Sin embargo, de acuerdo con [22] y [31] el modelo puede extenderse a frecuencias altas, cuando se considera una dependencia entre la permitividad y la frecuencia a través de la conductancia, tomando en cuenta la radiación en la muestra, lo que da paso al modelo de Antena que se define en el siguiente punto.

También pueden provocarse anomalías debido a que, en este tipo de sonda, la permitividad de la muestra será menor a la permitividad real si el grosor de la muestra es menor que la sensibilidad de penetración, al momento de considerar una muestra infinita en los cálculos. La sensibilidad de penetración depende de las dimensiones de la sonda, dado que, para que una muestra sea considerada infinita debe tener un grosor mayor al radio externo de la sonda.

4.4. Modelo de Antena

El modelo de antena considera a la sonda coaxial abierta como una antena en un dieléctrico con pérdidas. Esto es posible dado que, al sumergir la sonda coaxial en un medio, esta radia en el mismo [28]. El circuito equivalente parte de un modelo de admitancia de la sonda que consta de 2 capacitancias C_f y $\epsilon_r C_o$ y la conductancia de radiación $G_o \epsilon_r^{5/2}$ [22], como se muestra en la Figura 4.3.

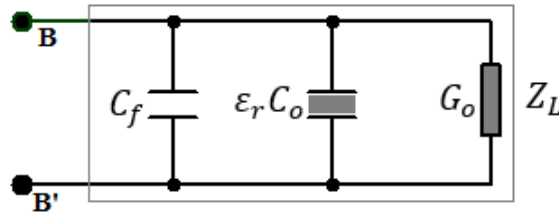


Figura 4.3: Circuito equivalente de Modelo de Antena

Primeramente, se obtiene el valor de admitancia del circuito equivalente, a partir del circuito mencionado de la siguiente manera:

$$Y = j\omega C_f + j\omega \epsilon_r C_o + G_o \epsilon_r^{5/2} \quad (4.11)$$

Posteriormente, se obtiene la admitancia de la línea a partir de la expresión 3.38, que relaciona la impedancia característica y de carga de la línea con el coeficiente de reflexión. Al despejar la impedancia de carga se obtiene la siguiente expresión:

$$Z_L = Z_o \frac{(1 + S_{11})}{(1 - S_{11})} \quad (4.12)$$

De modo que,

$$Y = Y_o \frac{1 - S_{11}}{1 + S_{11}} \quad (4.13)$$

El valor de la admitancia en la línea es el mismo en el circuito equivalente, por lo que, el siguiente paso es igualar la expresión 4.11 y 4.13.

$$Y_o \frac{1 - S_{11}}{1 + S_{11}} = j\omega C_f + j\omega \varepsilon_r C_o + G_o \varepsilon_r^{5/2} \quad (4.14)$$

Finalmente, el valor de ε_r de la ecuación 4.14 representa la permitividad del fluido de prueba.

Al igual que en el modelo capacitivo, es necesario un proceso de calibración para determinar los valores de C_f , C_o , G_o . La diferencia recae en que, al ser tres incógnitas es necesario plantear tres ecuaciones, es decir, la expresión 4.14 utilizando tres líquidos diferentes de permitividad conocida como referencia.

4.5. Modelo de Línea Virtual

En el modelo de línea virtual se modela el líquido de prueba como una línea de transmisión virtual de longitud L_m que terminada en circuito abierto. Las dimensiones radiales se consideran iguales a las de la línea física, como se puede observar en la Figura 4.4 [27] [32].

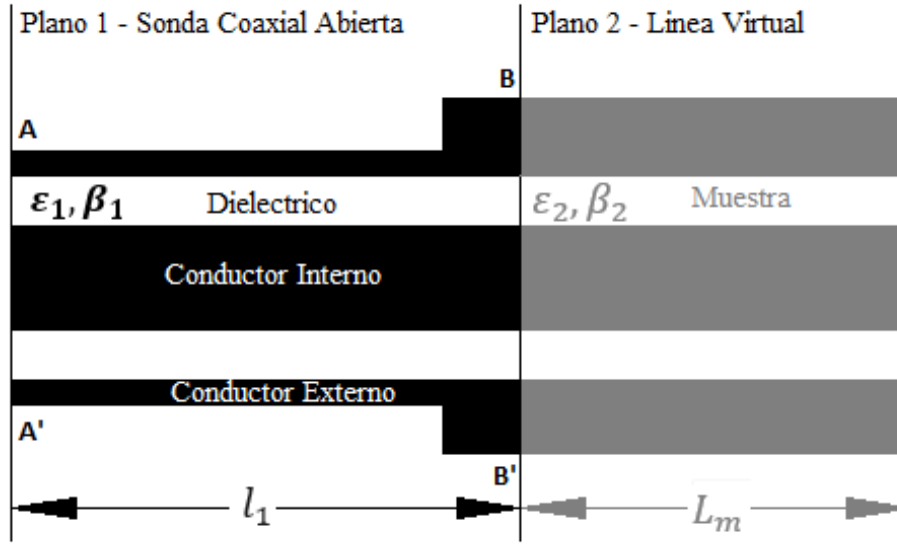


Figura 4.4: Esquema de Línea Virtual

El modelo parte de la ecuación de *admitancia de una línea de transmisión efectiva*. En el capítulo 3, la expresión 3.43 representa la ecuación de *impedancia en una línea de transmisión*, por lo que, se utiliza la relación inversa respecto a la admitancia, para obtener lo siguiente:

$$Y_{in} = Y_o \frac{Y_L + jY_o \tan(\beta l)}{Y_o + jY_L \tan(\beta l)} \quad (4.15)$$

Donde, Y_{in} representa la impedancia de entrada la línea, Y_o es la impedancia característica de la línea, Y_L representa la impedancia de carga, β es la constante de propagación y por último l es la longitud de la línea.

A partir de la expresión 4.15, se define la ecuación de la admitancia de entrada del plano 2, es decir, la línea de transmisión virtual.

$$Y_{in_2} = Y_{o_2} \frac{Y_{L_2} + jY_{o_2} \tan(\beta_2 L_m)}{Y_{o_2} + jY_{L_2} \tan(\beta_2 L_m)} \quad (4.16)$$

La expresión 4.16 se adapta a las características de una sonda coaxial abierta. En otras palabras, la carga final de la línea fija es representada mediante un circuito abierto, por lo que, Y_{L_2} , que representa la admitancia de la carga al final de la línea virtual, toma el valor de 0.

$$Y_{in_2} = jY_{o_2} \tan(\beta_2 L_m) \quad (4.17)$$

Donde, l_2 y β_2 son la longitud virtual y el coeficiente de fase virtual, respectivamente, de la línea de transmisión efectiva que simboliza el líquido de prueba.

$$\beta_2 = \frac{2\pi f \sqrt{\varepsilon_2}}{c} \quad (4.18)$$

Por último, Y_{o_2} representa la admitancia característica de la línea virtual. Esta se define a partir de la expresión de impedancia característica 3.51, de la siguiente manera:

$$Y_{o_2} = \frac{\sqrt{\varepsilon_2}}{60 \ln \frac{b}{a}} \quad (4.19)$$

En este caso, ε_2 representa la permitividad relativa del líquido de prueba, por lo que su valor es igual a $\varepsilon_r' + j\varepsilon_r''$.

En lo que respecta a la línea de transmisión física, la siguiente expresión, describe su admitancia de entrada. Esta se basa en la expresión 3.42.

$$Y_{in_1} = \frac{1 - \Gamma_1 e^{2j\beta_1 l_1}}{1 + \Gamma_1 e^{2j\beta_1 l_1}} Y_{o_1} \quad (4.20)$$

Donde, Γ_1 figura como el coeficiente de reflexión, mientras β_1 y l_1 son el coeficiente de propagación y la longitud de la línea física, respectivamente. Por último, Y_{o_1} indica la admitancia característica de la línea física que se expresa de acuerdo a la permitividad del dieléctrico interno en la sonda (En este caso Teflón con $\varepsilon_1 = 2,1$, como se puede ver a continuación:

$$Y_{o_1} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1}}{60 \ln \frac{b}{a}} \quad (4.21)$$

Dado que, Y_{in_1} tiene que ser igual a Y_{in_2} se puede introducir la expresión 4.17 en 4.20 para despejar la permitividad del líquido representado por la línea de transmisión física.

$$j \frac{\sqrt{\varepsilon_2}}{60 \ln \frac{b}{a}} \tan(\beta_2 L_m) = \frac{\sqrt{\varepsilon_1}}{60 \ln \frac{b}{a}} \frac{1 - \Gamma_1 e^{2j\beta_1 l_1}}{1 + \Gamma_1 e^{2j\beta_1 l_1}}$$
$$\sqrt{\varepsilon_2} = -j \sqrt{\varepsilon_1} \left(\frac{1 - \Gamma_1 e^{2j\beta_1 l_1}}{1 + \Gamma_1 e^{2j\beta_1 l_1}} \right) \cot(\beta_2 L_m) \quad (4.22)$$

En el modelo de línea virtual, es importante definir correctamente el valor de la longitud virtual L_m , por lo que, al igual que en el modelo Capacitivo, es necesario un proceso de calibración para obtener dicho valor a partir de un líquido con permitividad conocida. Para ello, de la expresión 4.22 es necesario despejar la longitud virtual hasta obtener la siguiente expresión:

$$L_m = \frac{c}{2\pi f \sqrt{\varepsilon_2}} \tan^{-1} \left(-\frac{j\sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_2}} \frac{1 - \Gamma_1 e^{2j\beta_1 l_1}}{1 + \Gamma_1 e^{2j\beta_1 l_1}} \right) \quad (4.23)$$

4.6. Calibración

El proceso de medición consta de dos procesos de calibración. El primero, es un proceso estándar realizado por el VNA. El segundo, se aplica en el modelo matemático para disminuir la incertidumbre en los resultados del mismo. Además, es utilizado para minimizar los errores de acoplamiento que se generan en el límite entre el conector de la sonda y la línea, sobre todo cuando el diseño no posee sección de transición [33], [1], [34].

El proceso de calibración permite utilizar un líquido de referencia, para ajustar el modelo a las condiciones de medición de los demás líquidos. Para este proceso, es importante considerar que, las discrepancias en entre los resultados, respecto a valores teóricos, pueden disminuir, si el líquido de referencia tiene propiedades similares al líquido medido [24], [35], [30].

4.7. Conclusiones

Los modelos matemáticos descritos se originan a partir de un modelo de admitancia equivalente que permite relacionar el coeficiente de reflexión medido por el VNA y la permitividad de líquido. Para su desarrollo, es importante considerar los requerimientos de cada uno. De modo que, el modelo Capacitivo requiere un líquido de referencia o calibración y un proceso de compensación de longitud de sonda. El modelo de Antena también requiere el proceso de compensación de longitud de sonda además de tres líquidos de referencia o calibración. Por ultimo, el modelo de línea virtual requiere de un líquido de referencia y no necesita compensación de longitud de sonda, dado que el método ya considera esta variable en su desarrollo.

Diseño de Sonda Coaxial

En este capítulo se describe el proceso de diseño de la sonda coaxial abierta a partir de aspectos bibliográficos y teóricos considerados en base a los principios matemáticos de líneas de transmisión coaxiales que establecen una dependencia entre las características físicas de la sonda y su funcionamiento.

Una sonda coaxial típica, cuyo esquema se puede observar en la Figura 5.1, se compone de una línea coaxial truncada con un disco de diámetro definido en el extremo final. El funcionamiento de este dispositivo se basa en el principio matemático de una línea coaxial, estudiado en el capítulo 3, por lo que se conoce de antemano que su comportamiento depende directamente de las dimensiones radiales y la permitividad del dieléctrico, de acuerdo con la expresión 3.51.

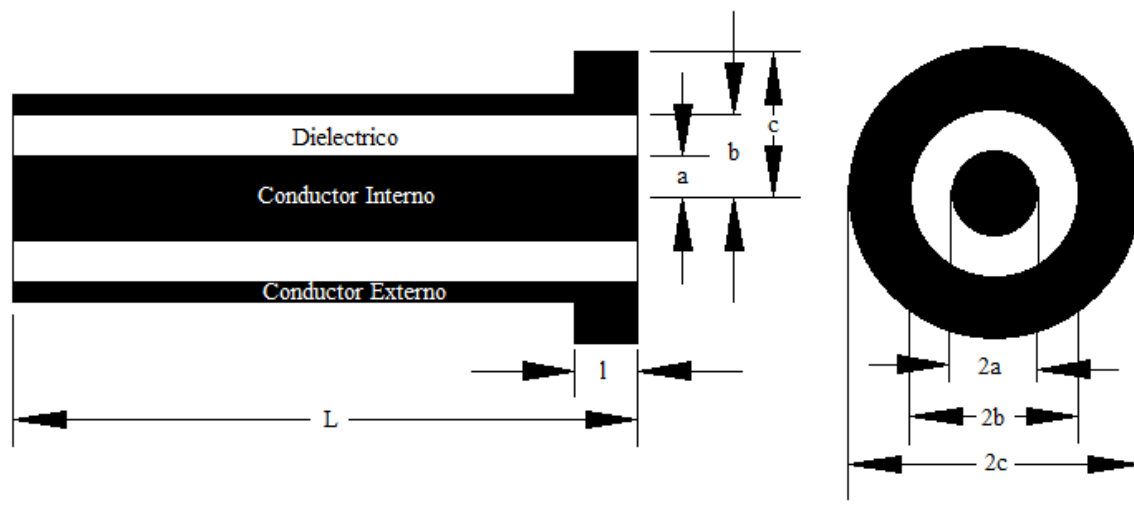


Figura 5.1: Esquema General de Sonda Coaxial Abierta

El diseño de la sonda consiste en definir los siguientes elementos: dieléctrico interno, material de los conductores y por supuesto, las características geométricas (dimensiones radiales y longitud). Estos factores deben ser adecuados para el comportamiento que se pretende conseguir, tomando en cuenta

todas las limitaciones en cuanto a funcionalidad y accesibilidad de los materiales. Entre las condiciones de diseño deben tomarse en cuenta también otros elementos como la permitividad compleja de la muestra y la frecuencia de medición, dado que pueden afectar la sensibilidad de la sonda [36] [9].

En este contexto, primero se define un rango de funcionamiento. Para el desarrollo de este proyecto se propone la utilización del MegiQ VNA, disponible en la Universidad. Por esta razón, inicialmente se delimita el rango de frecuencias de medición entre los 400MHz y 6GHz, dado a que es el rango de funcionamiento del VNA.

A partir del equipo de medición VNA lo que se obtiene es el coeficiente de reflexión de la muestra, por lo que es necesario un proceso de conversión que requiere al menos de un líquido de permitividad bien conocida como referencia. Como se menciona anteriormente, la permitividad compleja de la muestra puede afectar la sensibilidad de la sonda, por lo que se presume que las dimensiones de la sonda deben ser establecidas de acuerdo al líquido que se pretenda usar como referencia. Para este proyecto se dispone de seis líquidos en particular que son: Butanol, Etanol, Metanol, Propanol 1, Propanol 2 y Agua.

En [36], se analizan los resultados de mediciones de permitividad utilizando diferentes líquidos de referencia con cuatro sondas de variadas dimensiones y rangos de frecuencia definidos. Particularmente, en el rango de medición de 400MHz - 6GHz se encontraron resultados satisfactorios en sondas cuyo diámetro interno del conductor externo tiene un valor de 3.5mm y 7mm, al utilizar como líquidos de referencia Etanol y Metanol.

En cuanto al disco circular al extremo de la sonda, se recomienda que tanto el disco como la muestra sean lo suficientemente grandes como para encerrar los campos electromagnéticos, de tal manera que los efectos de borde se aproximan a 0 y se puede asumir una geometría de espacio infinito para el análisis matemático [9]. De acuerdo con [37] aunque en el análisis matemático asuma que el diámetro del disco es infinito, se alcanza una medición precisa con un disco de diámetro de pocas veces el de la línea, de manera que, el diámetro del disco final debe ser de aproximadamente tres veces el diámetro interno del conductor externo.

De esta manera se define que el diámetro interno del conductor externo de la sonda sea de 7mm y el disco final de 25mm para que resulte mayormente realizable debido a los recursos disponibles. Los valores del espesor del disco oscilan entre los 3 y 5mm.

Posteriormente, se utiliza el modelo matemático de una línea coaxial, que se tiene en la ecuación 3.51 para el cálculo del radio del conductor interno. Considerando que el VNA trabaja con el cable coaxial semirrígido cuya impedancia característica es de 50Ω , la sonda coaxial debe funcionar con la misma impedancia para conseguir el acoplamiento adecuado. Por lo tanto, al despejar la variable deseada de la expresión 3.51, se obtiene lo siguiente:

$$a = \frac{b}{e^{\frac{Z_o \sqrt{\epsilon_r}}{60}}} \quad (5.1)$$

Donde ϵ_r es la permitividad relativa del dieléctrico entre los conductores. Dado que la finalidad del dieléctrico es impermeabilizar la sonda, es importante que este sea maleable y pueda ajustarse al espacio disponible. Tras una revisión de los dieléctricos utilizados en [38] [39], [23], [33], [6] [15], [21], [40], [20], [31], [15], [41]; los resultados de los mismos y la disponibilidad; el dieléctrico seleccionado es el teflón. La ventaja de este dieléctrico, entre otras cosas, es que su permitividad no varía con la frecuencia, de modo que el valor de su permitividad real de 2.1 se mantiene y la tangente dieléctrica de pérdidas es despreciable. Además, esta disponible en formas sólidas y flexibles [4].

Como se menciona en la teoría de línea coaxial, los valores de los elementos dieléctricos de la sonda, no se ven afectados con la longitud de la misma. Sin embargo, es importante mencionar que de acuerdo con [36], afecta su sensibilidad, de manera que, en los sensores pequeños los efectos de borde se consideran insignificantes para el volumen de muestra adecuado. Es decir, se puede utilizar a la muestra como un plano infinito y por ende, el modelo matemático planteado. Tomando las consideraciones mencionadas y las limitaciones de implementación, se define la longitud de la sonda con una medida de 5mm.

Finalmente, el material de los conductores puede ser de cualquier conductor, entre los más utilizados están el acero inoxidable, aluminio y latón. Sin embargo, tomando en cuenta factores como maleabilidad y disponibilidad se define como material de fabricación al bronce, dado que sus características son similares al latón.

Una síntesis de las especificaciones de la sonda se puede observar en la tabla 5.1.

Tabla 5.1: Dimensiones de Sonda Coaxial Abierta

Elemento	Denominación	Unidad	Valor
Radio del conductor externo	b	mm	3.5
Radio del conductor interno	a	mm	1.04618
Radio del disco externo	c_e	mm	12.5
Permitividad del dieléctrico (teflón)	ϵ_r		2.1
Espesor de disco	L	mm	5
Longitud de la Sonda	l	mm	5

En lo que respecta al conector, debido al tipo de cable y sus dimensiones, resulta conveniente trabajar con conductores tipo *SMA*. Por lo tanto, la parte posterior de la sonda es diseñada para adaptarse al mismo.

Además, se implementan dos diseños adicionales de sonda que mantienen las dimensiones radiales, pero varían en longitud. Esto se realiza debido a que, en investigaciones previas no se encontró una relación clara entre la longitud y la precisión de los resultados, por lo que se puede considerar a la longitud de la sonda como un valor empírico. Específicamente, se fabricaron sondas de 13mm y 50mm de longitud, estas se pueden observar en la Figura 5.2.

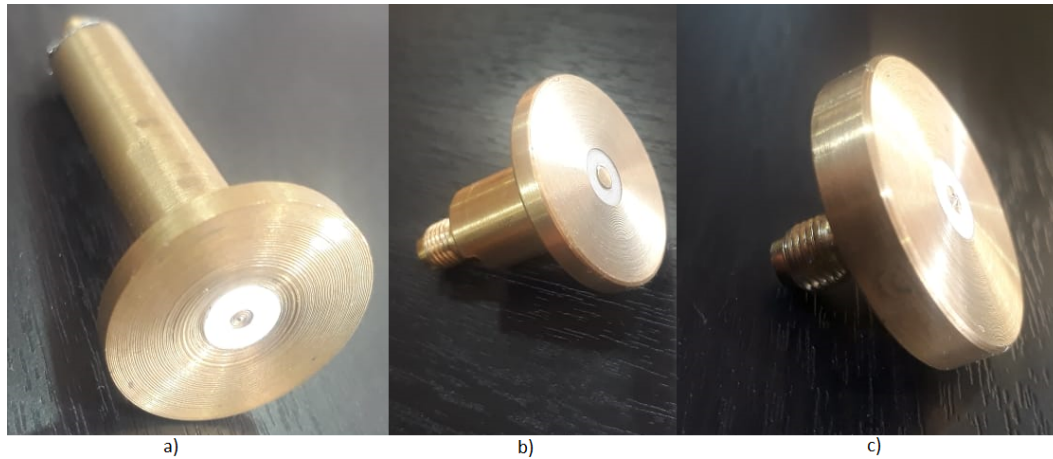


Figura 5.2: Sonda coaxial abierta; a) 50mm, b) 13mm, c) 5mm

5.1. Conclusiones

La sonda coaxial abierta se diseñó e implementó en base las consideraciones típicas del diametro interno del conductor externo de acuerdo al líquido de referencia que se pretende utilizar. Luego, tomando en cuenta que el cable que conecta el puerto RF del VNA con la sonda coaxial tiene una impedancia característica de 50Ω , se establece el diametro del conductor interno aplicando la teoría de líneas de transmisión. El material utilizado para el ensamblaje de los conductores es el bronce y el dieléctrico entre los mismos es de teflón.



Metodología

En este capítulo se realiza una síntesis de cómo fueron seleccionados los líquidos de prueba, además de una descripción general de los equipos utilizados y la metodología específica de medición aplicada en cada uno. Adicionalmente, se describe la elección del modelo matemático aplicado, los líquidos de referencia, el rango de frecuencias de análisis, y anomalías encontradas con respecto al “Agua”.

6.1. Selección de líquidos

Los líquidos fueron seleccionados en base a tres criterios: recurrencia de líquidos en investigaciones previas, datos teóricos accesibles, y disponibilidad. Tras realizar la revisión bibliográfica se indagó en la información teórica de los líquidos utilizados frecuentemente en proyectos relacionados, con la intención de contar con una base de datos teórica del valor de permitividad compleja.

La referencia [13] contienen un registro de permitividad compleja de las siguientes sustancias puras: Metanol, Etanol, Propanol 1, Propanol 2, Butanol, Sulfoxido dimethyl y Etanediol. El registro de cada líquido se expone en un rango de temperatura de 10 a 50 °C, y se presenta una tabla cada 5 °C por cada líquido. En cada tabla los valores de permitividad compleja son definidos en relación a la frecuencia de operación en un rango de 0.1 a 5 GHz, con saltos de 0.1 GHz hasta 1 GHz, de 0.2 y 0.3 GHz hasta 2 GHz y de 0.5 GHz hasta 5 GHz. Esta información ha sido utilizada en trabajos relacionados [4], [6], [9], [36], [23], por lo que se ha optado por utilizarla como resultados teóricos de referencia para cada líquido. Por su parte, las referencias [5], [42], [43], se utilizan para obtener los datos teóricos del “Acetona” y “Agua”.

Los líquidos fueron proporcionados por la facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Cuenca, por lo tanto, del conjunto de fluidos analizados en [13], [5], [42] y [43], se dispuso de los siguientes: Agua, Acetona, Butanol, Etanol, Metanol, Propanol 1 y Propanol 2.

Inicialmente, la disponibilidad de “Butanol” en la Universidad era incierta, por lo que, no fue incluido en la denuncia de Proyecto de Titulación. Sin embargo, aunque posteriormente fue incluido entre los líquidos de análisis, este presentó inconsistencias en las mediciones realizadas con el equipo de referencia ENA Keysight Technology. Se presume que la razón puede estar relacionada con limitaciones

del equipo en cuanto a permitividades de valor bajo y debido a que se utilizó una versión de software con una licencia de prueba. Sin embargo, más adelante, se incluye al “Butanol” entre los líquidos de análisis de este proyecto, debido a que, si bien no se dispone de los datos obtenidos con el equipo *ENA Keysight Technology*, el análisis puede ser realizado en base a los datos teóricos disponibles en [13].

Finalmente, la “Acetona” se descartó de entre los líquidos de análisis debido a que en las tablas de valor de permitividad compleja de [5] se presentan resultados en saltos de frecuencia de 1 GHz, por lo que la referencia teórica no es suficiente para un análisis comparativo adecuado.

6.2. Descripción de equipos

Tanto el equipo de referencia ENA Keysight Technology, como el utilizado para el proyecto MegiQ VNA, son analizadores de red, con la diferencia de que, el equipo de referencia está capacitado e incluye, además del software especializado, todo el instrumental adicional necesario para la medición de permitividad en líquidos. A continuación, se realiza una descripción general de cada uno.

6.2.1. ENA Keysight Technology

El equipo facilitado por [ARCOTEL](#) es el ENA Network Analyzer (E5071C 300 kHz – 14 GHz) de dos puertos de Keysight Technology, Figura 6.1. Se trata de un analizador de red integrado con un conjunto de prueba de parámetros S, fuente RF sintetizada, pantalla LCD en color de 10.4 pulgadas y una unidad de disco duro [44] [45].

Para el proceso de medición, se utiliza el [VNA](#) en conjunto con un cable semirrígido de $50\ \Omega$, la sonda de alta temperatura ($23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$), vaso de precipitación y líquido. Adicionalmente, se requiere el kit de calibración [Opent-Short-Load Circuit System \(OSL\)](#) [28] y el software especializado de Keysight Technology. Todos los accesorios mencionados vienen incluidos en el kit de medición de líquidos *SATIMO SN 25/13 OCPG54*.

El proceso de calibración es requerido para eliminar el ruido generado en el conector y el cable. Para ello, se escoge el rango de frecuencias para las mediciones, se realizan mediciones con datos conocidos por el sistema para realizar corrección de errores en puntos específicos. En este caso son, como se mencionó anteriormente, corto circuito, circuito abierto y carga acoplada [46].

Posteriormente, para la calibración del software, tras seleccionar el tipo de sonda en el sistema (de alta temperatura), es necesario utilizar dos referencias. Para este punto se utilizaron agua y aire.

Por último, el proceso de medición es sencillo, consiste en colocar la superficie de la sonda en contacto con el líquido y realizar la medición. Sin embargo, se deben evitar, en lo posible, situaciones que puedan añadir ruidos externos a la medición, como son: vibraciones en el cable, que la superficie del líquido este inestable y que se generen burbujas en la superficie de la sonda.

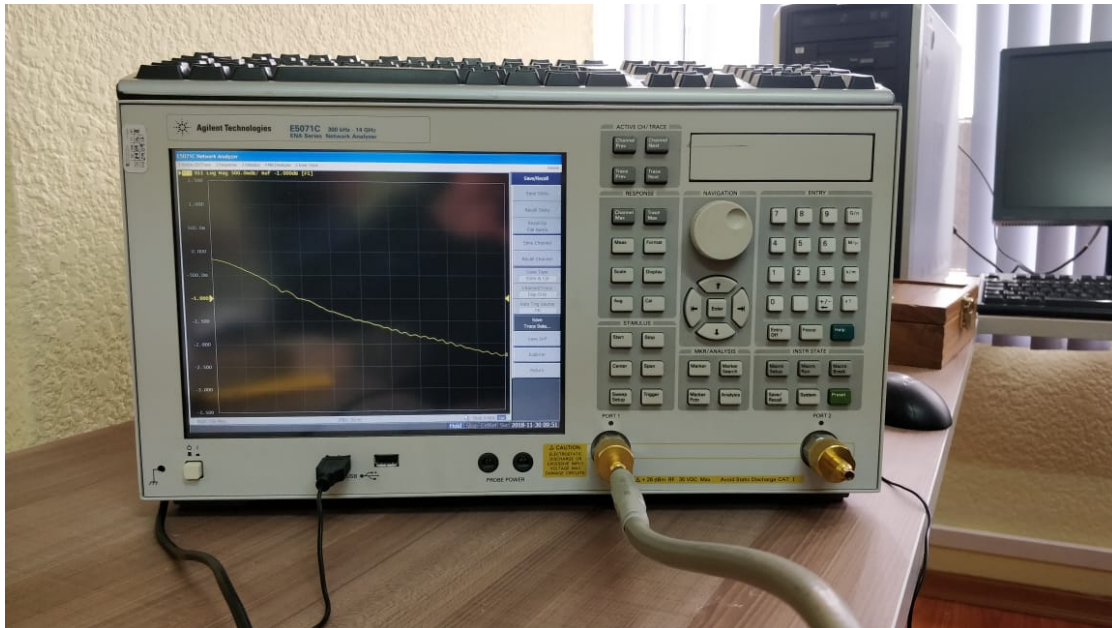


Figura 6.1: ENA Network Analyzer and measurement kit

6.2.2. MegiQ VNA

El equipo disponible en la Universidad de Cuenca es un MegiQ VNA-0460e que cuenta con 2 puertos de medición bidireccional con un generador de polarización interno bias-Tee's, Figura 6.2. Es ideal para la medición de microcircuitos. Su rango de frecuencias de funcionamiento es de 400 MHz a 6 GHz, es decir abarca la banda de telecomunicaciones más utilizada. Incluye un kit completo de calibración [47], Figura 6.3. El equipo funciona en conjunto con su respectivo software MegiQ VNA, que debe instalarse en un computador personal, [48] y se conecta con el equipo físico mediante un puerto USB 3.0.



Figura 6.2: MegiQ VNA-0460e

El dispositivo mide parámetros de dispersión o parámetros-S en redes de 1 y 2 puertos, además de la impedancia de entrada y la ganancia para el caso de 2 puertos. El dispositivo mide tanto magnitud como fase, por lo que es llamado *Vector Network Analyzer*. Al trabajar con un puerto se transmite una señal en un rango de frecuencias hacia el [Dispositivo En Prueba \(DUT\)](#), que en este caso es el líquido de prueba, y simultáneamente, el equipo detecta la señal que regresa al mismo puerto. En otras palabras, el parámetro medido es el S_{11} también conocido como coeficiente de reflexión en ese puerto. Los resultados se muestran en el siguiente capítulo mediante tablas y curvas de respuesta de frecuencia.

El MegiQ VNA esta totalmente calibrado de fabrica para la medición en sus puertos RF. Sin embargo, al utilizar cables y adaptadores adicionales para llegar a los puertos RF desde un *DUT*, la medición se ve afectada, debido a que en altas frecuencias, un cable casi de cualquier longitud, actúa como un transformador de impedancia que altera la medición real. Afortunadamente, los cables actúan como elementos lineales que pueden ser calibrados facilmente permitiendo ajustar los resultados de la medición.

6.2.2.1. Calibración

El proceso de calibración busca, teóricamente, eliminar el cable de la medición y acceder directamente a las características del [DUT](#). Para ello, se alimenta al MegiQ VNA, incluyendo cable y adaptador, con impedancias conocidas para todo el rango de frecuencias de interés antes de realizar la medición real.

Las impedancias conocidas que utiliza MegiQ VNA, para un solo puerto, son: conexión en circuito abierto (O), corto circuito (S) y carga acoplada de $50\ \Omega$ (L), es decir, el clásico sistema [OSL](#) [28]. Gracias a que el software de MegiQ VNA tiene una interfaz de usuario muy intuitiva, el proceso de calibración, es sencillo, simplemente es necesario acceder al menú de calibración en el panel del software y se activa cada circuito colocando el pin correspondiente al final del cable y adaptador [49]. El kit de calibración esta incluido entre los accesorios del MegiQ VNA, Figura 6.3.

Es importante tomar en cuenta que, si se realiza un cambio de cable o conector, el procedimiento debe repetirse. Los puertos del MegiQ VNA pueden adaptarse a cables destinados a este fin o cables estandar. Los primeros son sin duda más adecuados, pero desafortunadamente su costo es bastante elevado. Por su parte, los cables estandar, pueden generar buenos resultados pero requieren un trato más cauteloso de mantenimiento y de utilización y deben renovarse con frecuencia.

Otra consideración importante es que el proceso de calibración realiza una corrección de los errores hasta el final del cable. Por lo tanto, no se toman en cuenta los errores que se puedan generar en la sonda ni en la interfaz cable/sonda.



Figura 6.3: Kit de Calibración de MegiQ VNA

6.3. Descripción del procedimiento de medición

En el proceso de medición del coeficiente de reflexión en el MegiQ VNA se coloca la cara frontal de la sonda en contacto con la superficie del líquido y se activa el sensor previamente calibrado. Este proceso se realiza para cada líquido, quitando la humedad de la sonda entre cada uno. Para ello, se utilizan las siguientes herramientas:

- MegiQ VNA
- Software MegiQ VNA
- Kit de calibración
- Cable USB
- Cable de poder
- Cable estándar semirrígido de 50Ω con adaptador SMA hembra/macho
- Trípode
- Pinza universal
- Pinza nuez
- Sonda coaxial
- Vaso de precipitación
- Líquido de prueba

El software MegiQ VNA, el kit de calibración, el cable USB y el cable de poder son herramientas incluidas en el MegiQ VNA, con el fin de realizar una medición simple. Para el caso de medición de líquidos, además de la sonda coaxial, son requeridos: un vaso de precipitación, trípode, pinza universal

y pinza nuez, para el montaje de un escenario que permita generalizar las condiciones de medición adecuadas para todos los líquidos, como se muestra en la Figura 6.4. De esta manera también se busca evitar movimientos bruscos en el cable durante la medición, evadiendo así, el ingreso exagerado de ruidos externos. Este escenario posibilita también nivelar la altura de la sonda coaxial hasta entrar en contacto estable con el líquido de prueba.

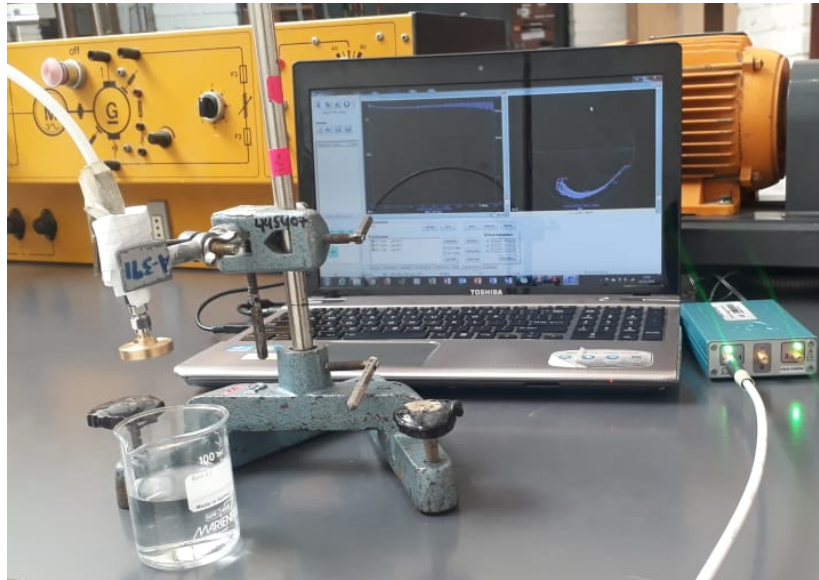


Figura 6.4: Escenario de medición de coeficiente de reflexión utilizando el MegiQ VNA

6.4. Procesamiento de datos

El MegiQ VNA exporta los resultados obtenidos mediante archivos .csv. A partir de los mismos, se genera un formato de archivo dependiendo del número necesario de líquidos de referencia en cada modelo matemático.

Los modelos matemáticos fueron implementados mediante algoritmos en *Matlab* en los que se codifican las expresiones matemáticas del Capítulo 4. Primeramente, a partir del valor medido de cada punto de frecuencia, cada algoritmo calcula el coeficiente de reflexión de los líquidos de referencia considerando la compensación de longitud de sonda coaxial. Posteriormente, ese valor es reemplazado en el lugar que corresponda de cada modelo matemático para realizar la calibración del mismo. Luego, tras repetir el proceso de compensación de longitud en los valores de coeficiente de reflexión medidos de los líquidos restantes, se calcula la permitividad compleja.

Los valores de permitividad compleja obtenidos, se contrastan con los valores teóricos mediante gráficas de tendencia, error porcentual y desviación estándar para reducir el volumen de datos de análisis y evaluar las condiciones que presenten resultados más aproximados. Es decir, el modelo matemático y los líquidos de referencia que generan resultados más acertados. Posteriormente, se determina un rango de frecuencias adecuado para el análisis de precisión y exactitud de los datos adquiridos y ajustados en 10 mediciones del coeficiente de reflexión de cada líquido.

Finalmente, en el Apéndice D se muestra un análisis adicional de la comparación entre las gráficas de tendencia obtenidas con sondas de diferente longitud utilizando el modelo matemático seleccionado en el punto 6.5.

6.5. Elección del modelo matemático

En el capítulo 4 se presentaron tres modelos matemáticos basados en un modelo de admitancias para establecer la relación entre el coeficiente de reflexión y la permitividad compleja. En este punto se define cuál de ellos será el que se utilice para el análisis.

De los tres modelos matemáticos, el único que necesita más de un líquido de referencia para el proceso de calibración es el modelo de Antena, siendo en total tres los líquidos, con propiedades dieléctricas bien conocidas, necesarios para este proceso [28]. Los resultados al aplicar este modelo matemático, como se puede evidenciar en el Anexo A, se aproximan bastante bien a las curvas de permitividad compleja esperadas, el problema recae en la necesidad de utilizar tres líquidos de referencia para el proceso de calibración. Al tener únicamente disponibles 6 líquidos para analizar, usar 3 líquidos para el proceso de calibración nos deja con 3 líquidos para analizar y se generan 10 posibles combinaciones de líquidos de referencia, si se deja de lado el Propanol 2 por su similitud con el Propanol 1, para el proceso de calibración. Tener tantas combinaciones de líquidos de referencia y tan pocos líquidos, complicará el análisis del comportamiento de la sonda coaxial, por ello, este modelo matemático no sería el más indicado para cumplir los objetivos del proyecto.

Por su parte, el modelo de línea virtual requiere definir la longitud efectiva de la línea de transmisión virtual para cada punto de frecuencia. En [27], se implementa un proceso iterativo para definir el valor de la longitud virtual en relación a la longitud de la línea física y la permitividad del líquido. Utilizando como líquido de referencia agua y aire, los resultados conseguidos, son bastante precisos, sobre todo al medir Metanol. Sin embargo, su investigación esta centrada en el uso de un reflectómetro de seis puertos para la recolección de datos, de manera que el coeficiente de reflexión complejo Γ se calcula a partir de las cuatro lecturas de potencia y los parámetros de calibración del reflectómetro. El método de calibración utilizando seis puertos, se detalla en [50]. En el punto 4.5 Línea virtual, se describe el sustento matemático necesario para el desarrollo de este modelo en base de la ecuación de admitancia de una línea de transmisión efectiva y el planteamiento de [27], con la finalidad de utilizar la expresión matemática 4.23 para relacionar la permitividad compleja del líquido con la longitud efectiva de la línea virtual. Pero, al no contar con el método de calibración de 6 puertos, se plantea un proceso de calibración no iterativo utilizando la longitud de la línea física como variable conocida. Se puede intuir que, al utilizar un método de calibración funcional pero no iterativo, los resultados no alcanzarán mismo nivel de precisión. Esto se evidencia en el Anexo A. Por esta razón, este modelo no es la mejor opción para este proyecto.

Finalmente, queda el modelo capacitivo. Este modelo matemático se ve limitado en su efectividad a frecuencias bajas, sondas cortas y líquidos con alta permitividad, según se sugiere en la referencia [19]. Pero estas limitaciones no aplican para las condiciones con las que se realizan las mediciones, dado que, la frecuencia máxima para la medición es de 6 GHz y la sonda utilizada tiene una longitud de 5mm, además los líquidos analizados, exceptuando el “Agua”, no resultan tener permitividades tan altas. Por otro lado, en el Anexo A se puede observar que al igual que el modelo de Antena, los resultados obtenidos al aplicar este modelo matemático son satisfactorios, con la ventaja de que necesita un único líquido de referencia para el proceso de calibración. Por estas razones, el modelo capacitivo, en este caso, es la mejor opción para el cálculo de la permitividad compleja a partir del coeficiente de reflexión medido.

6.6. Elección del líquido de referencia y rango de frecuencias de análisis

El modelo capacitivo, para su proceso de calibración, necesita un medio con propiedades dieléctricas bien conocidas. Según la referencia [28] el líquido que se suele utilizar con este fin es el “Agua desionizada”, pero en la referencia [36] se indica que para las características físicas de la sonda utilizada existen ciertos problemas con líquidos de alta permitividad, entre ellos el “Agua”, por lo que, sugiere el uso de “etanol” como líquido de referencia o de calibración. Teniendo en cuenta estas acotaciones se analizaron los resultados utilizando 5 de los 6 líquidos disponibles para encontrar la mejor opción entre ellos.

Para el análisis se calculó el valor promedio y la desviación estándar del error porcentual (en el rango de frecuencias de 0.4 – 4 GHz) obtenidos al utilizar el modelo capacitivo con el fin de obtener el valor de la permitividad compleja de los 6 líquidos seleccionados haciendo uso de distintos líquidos de referencia. Los valores obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 6.1: Capacitivo ε_r' (15° C) - Promedio de Error Porcentual (0.4 – 4 GHz)

Referencia \ Analizado	Butanol	Etanol	Metanol	Propanol 1	Propanol 2	Agua
Butanol	-	7.333 %	11.952 %	8.812 %	14.531 %	11.113 %
Etanol	24.026 %	-	14.081 %	10.232 %	6.771 %	8.93 %
Metanol	44.813 %	26.1656 %	-	32.094 %	33.301 %	6.979 %
Propanol 1	10.359 %	5.881 %	12.231 %	-	8.628 %	7.769 %
Agua	1028.112 %	481.606 %	130.778 %	817.446 %	812.248 %	-

Tabla 6.2: Capacitivo ε_r' (15° C) – Desviación Estándar del Error Porcentual (0.4 – 4 GHz)

Referencia \ Analizado	Butanol	Etanol	Metanol	Propanol 1	Propanol 2	Agua
Butanol	-	5.107 %	7.997 %	6.017 %	9.639 %	8.833 %
Etanol	14.038 %	-	6.736 %	5.201 %	2.919 %	8.084 %
Metanol	35.541 %	18.881 %	-	25.773 %	20.676 %	6.283 %
Propanol 1	6.474 %	4.194 %	2.742 %	-	0.851 %	3.945 %
Agua	485.477 %	347.824 %	102.118 %	456.713 %	406.049 %	-

Tabla 6.3: Capacitivo ε_r'' (15° C) - Promedio de Error Porcentual (0.4 – 4 GHz)

Referencia \ Analizado	Butanol	Etanol	Metanol	Propanol 1	Propanol 2	Agua
Butanol	-	10.134 %	15.198 %	8.652 %	10.752 %	181.257 %
Etanol	9.669 %	-	10.821 %	10.282 %	12.899 %	168.801 %
Metanol	16.949 %	11.938 %	-	14.181 %	20.983 %	184.087 %
Propanol 1	8.775 %	10.717 %	12.652 %	-	6.932 %	177.677 %
Agua	52.706 %	53.603 %	57.82 %	52.304 %	45.043 %	-

Tabla 6.4: Capacitivo ε_r'' (15° C) – Desviación Estándar del Error Porcentual (0.4 – 4 GHz)

Referencia \ Analizado	Butanol	Etanol	Metanol	Propanol 1	Propanol 2	Agua
Butanol	-	9.273 %	7.482 %	7.753 %	8.26 %	166.21 %
Etanol	7.764 %	-	5.424 %	6.375 %	6.845 %	142.069 %
Metanol	10.018 %	6.307 %	-	8.755 %	12.158 %	125.158 %
Propanol 1	8.501 %	7.845 %	7.253 %	-	1.978 %	158.135 %
Agua	22.461 %	20.346 %	17.446 %	23.529 %	21.204 %	-

En las tablas presentadas en esta sección se han resaltado los valores más bajos del promedio y la desviación estándar del error porcentual obtenidos con los distintos líquidos de referencia. En el caso del promedio del error porcentual, los líquidos de referencia que presentan valores más bajos tanto para la parte real como para la parte imaginaria de la permitividad compleja son: “Butanol”, “Etanol” y “Propanol 1”. Por otro lado, el valor más bajo de la desviación estándar del error porcentual para la parte real de la permitividad compleja se obtiene con el “Propanol 1” como líquido de referencia. En el caso de la parte imaginaria de la permitividad compleja, los valores más reducidos de desviación estándar se obtienen con los siguientes líquidos de referencia: “Etanol”, “Metanol” y “Propanol 1”.

De acuerdo a los datos del valor promedio del error porcentual, los líquidos de referencia que dan mejores resultados serían el “Butanol”, “Etanol”, “Propanol 1” los cuales presentan un error promedio menor al 16 %, 25 %, 13 % (Sin tener en cuenta la parte imaginaria del “Agua”), respectivamente, con todos los líquidos analizados. Pero a pesar de presentar valores promedio bajos, el “Butanol” y “Etanol”, como líquidos de referencia, muestran valores más altos que el “Propanol 1” en la desviación estándar, lo que implica una mayor dispersión con respecto a la media. Por ello y por lo que se puede apreciar en las gráficas de error porcentual en función de la frecuencia, incluidas en el Anexo B, el líquido de referencia que mejor se acopla a la sonda coaxial utilizada es el “Propanol 1”.

Si bien en un inicio se planteó la medición de permitividad compleja mediante un equipo de referencia para definir un rango de frecuencias de operación, sin embargo, las mediciones no fueron realizadas en condiciones adecuadas dado que: no se pudo realizar el control de temperatura de los líquidos, no se tenía disponible ningún dispositivo para sujetar la sonda en el proceso de medición, el proceso de calibración se realizó sin conocer el tipo de sonda ni la temperatura del líquido de referencia.

Por este motivo el rango de frecuencias será definido mediante un sustento bibliográfico.

El rango de frecuencias de operación del conjunto MegiQ VNA – sonda coaxial no solo depende de las capacidades del MegiQ VNA, el cual tiene un rango de frecuencias de operación de 400 MHz a 6 GHz, sino también del método de medición y los líquidos involucrados. Según las referencias [7] Y [3] el método de medición de sonda coaxial abierta permite un rango de medición de 500 MHz - 110 GHz, con una precisión limitada en el caso de líquidos con valores bajos de permitividad compleja. En el caso de líquidos con un factor de pérdidas (ϵ_r'') mayor a 1, el rango en el que el método de medición se considera válido, va de 915 – 2450 MHz. Por otro lado, en la referencia [9] se indica que sondas coaxiales con características casi idénticas a la sonda diseñada para el proyecto funcionan bien en un rango de 0.1 – 6 GHz. Por estos motivos, las limitaciones de frecuencia que tiene el MegiQ VNA y los resultados que se aprecian en el Anexo B, no se podrá definir un rango de frecuencias de operación, pero si un rango de frecuencias para realizar los análisis. Dado que 5 de los 6 líquidos analizados tienen un factor de pérdidas mayor a 1 y los valores de referencia de la permitividad compleja son bastante limitados, el rango de frecuencias para los siguientes análisis quedaría definido entre 500 – 2500 MHz.

6.7. Problema con el Agua

En las gráficas que se presentan en el Anexo A, se puede observar a simple vista que ninguno de los tres modelos matemáticos puede obtener el valor de permitividad complejo del “Agua” en ningún rango de frecuencias, a pesar de utilizar distintos líquidos de referencia, el valor obtenido no mantiene tan siquiera una tendencia similar a la curva “Teórica”, por el contrario, son datos completamente dispersos. Esto ocurre también cuando el “Agua” es utilizada como líquido de referencia. Sumado al Anexo A, en las tablas 6.1 y 6.3 el error que presenta el “Agua” es demasiado alto. Estos resultados se pueden justificar con lo dicho en las referencias [9] y [36], en las que se indica que sondas con una apertura mayor a 7 mm tiene problemas al medir líquidos de alta permitividad y con una tangente de pérdidas baja, como el caso del “Agua”, dado que la medición puede verse afectada por el disco de la sonda coaxial y resonancias volumétricas. Además se indica que los líquidos deben tener valores de permitividad similar para obtener mejores resultados. Por esta razón, se descarta el análisis del “Agua” como líquido de referencia o prueba en los siguientes puntos.

6.8. Conclusiones

Se realizó una descripción del proyecto detallando cada fase del mismo de manera que: los líquidos de prueba utilizados en este proyecto son Butanol, Etanol, Metanol, Propanol-1 y Propanol 2. El equipo de referencia es el ENA Network Analyzer (E5071C 300 kHz – 14 GHz) con dos puertos de Keysight Technology, proporcionado por ARCOTEL. El proceso de experimentación y medición se realizó mediante el MegiQ VNA-0460e (400 MHz - 6 GHz) con dos puertos disponible en la Universidad de Cuenca. Mientras, la conversión de coeficiente de reflexión a permitividad se realizó en *Matlab* aplicando el modelo matemático Capacitivo y utilizando “Propanol 1” como líquido de referencia. Además de ello, los datos del “Agua” fueron descartados de los siguientes procesos de análisis debido a las anomalías presentadas en la sección 6.7.



CAPÍTULO 7

Resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos al realizar 10 mediciones en cada uno de los líquidos a una temperatura de 15° C haciendo uso de la sonda de 5mm una vez que se han elegido: el modelo matemático, el rango de frecuencias (sobre el que se llevará a cabo el análisis) y el líquido de referencia (para el proceso de calibración del modelo matemático).

7.1. Ajuste de datos

Previo al análisis de los resultados obtenidos, es necesario realizar un proceso de ajuste sobre la magnitud y ángulo del coeficiente de reflexión. Este proceso tiene como objetivo obtener una tendencia más definida de la permitividad compleja en función de la frecuencia, y de esta manera, reducir las variaciones generadas en el proceso de medición. Los resultados de este ajuste pueden observarse en las gráficas que se presentan en el Anexo C, en las que se contrastan los valores permitividad compleja: teórico, ajustado y sin realizar el proceso de ajuste de datos.

Los ajustes están centrados en linealizar, si es necesario, la relación magnitud – frecuencia y ángulo – frecuencias, para que estas dos relaciones puedan ser caracterizadas por una ecuación de la recta, permitiendo corregir los datos y eliminar las variaciones en la tendencia de las curvas de permitividad compleja en función de la frecuencia.

Una de las formas en las que se puede lograr una tendencia lineal en la relación entre dos variables es mediante un proceso en el que se le resta una constante k a una de las variables y al resultado de esta operación se le aplica el logaritmo natural. Dependiendo de la relación este proceso se deberá aplicar sobre las dos variables como dos procesos separados. En el caso de la relación magnitud – frecuencia, la frecuencia fue la variable a la que se requirió aplicar este proceso. Por su parte, la relación ángulo – frecuencia mostró una tendencia que se pudo considerar lineal sin requerir ningún tipo de proceso matemático.

Por otra parte, para obtener las ecuaciones de las curvas de tendencia en las relaciones magnitud – frecuencia y ángulo – frecuencia, una vez linealizadas, es necesario, dado que se utiliza la ecuación de la recta, determinar el valor de la pendiente (m) y de la intercepción con el eje de las ordenadas

(b). Para obtener las dos constantes requeridas se hizo uso de la función “ESTIMACION.LINEAL” disponible en Excel (o “LINEST” en el caso de versiones en inglés).

7.2. Resultados de la permitividad compleja calculada

Se repitió el proceso de medición 10 veces para cada uno de los líquidos, haciendo control de temperatura manteniéndola a 15°C en cada una de las mediciones. De estas mediciones se obtuvieron los resultados que se muestran en las siguientes gráficas, en las que se colocaron barras de error porcentual de máximo 15 %:

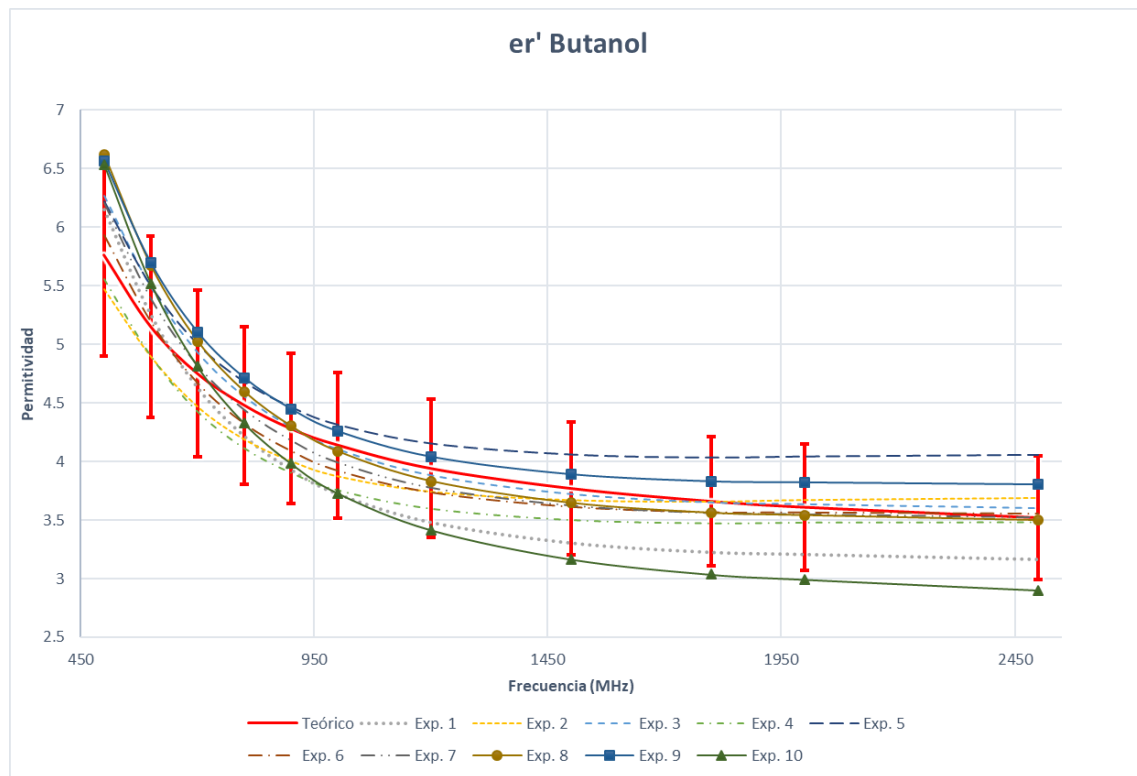


Figura 7.1: Parte real de la permitividad compleja del Butanol

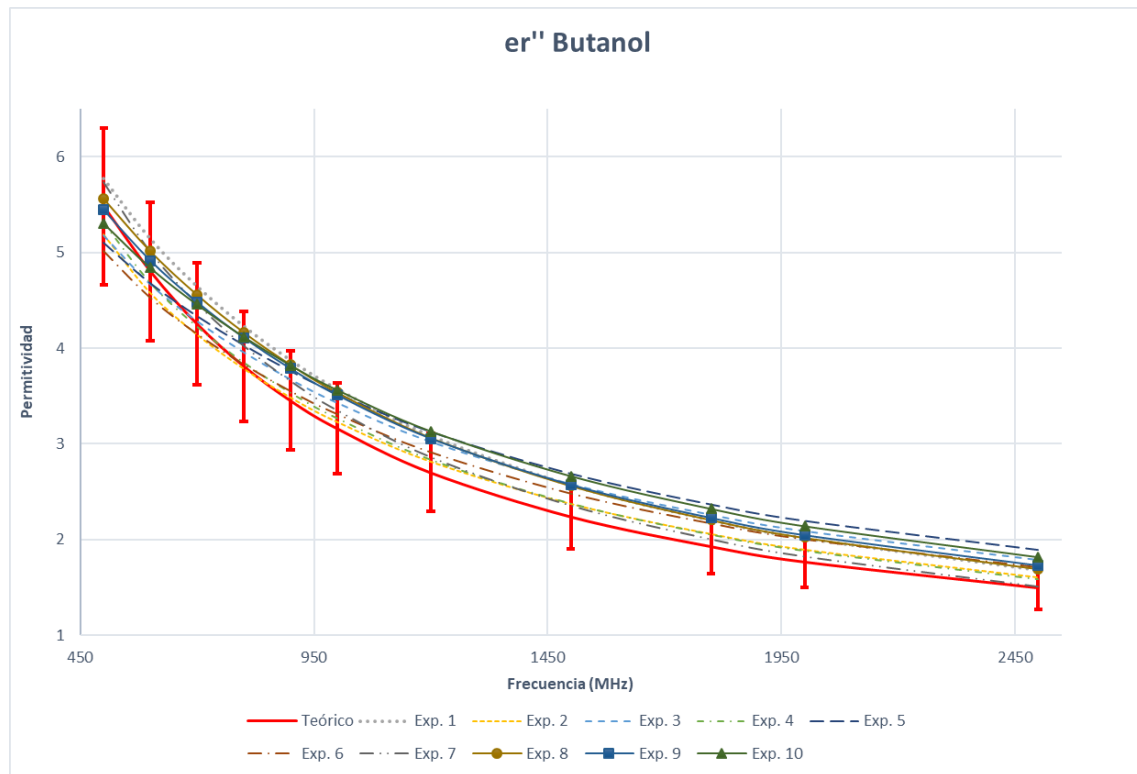


Figura 7.2: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Butanol

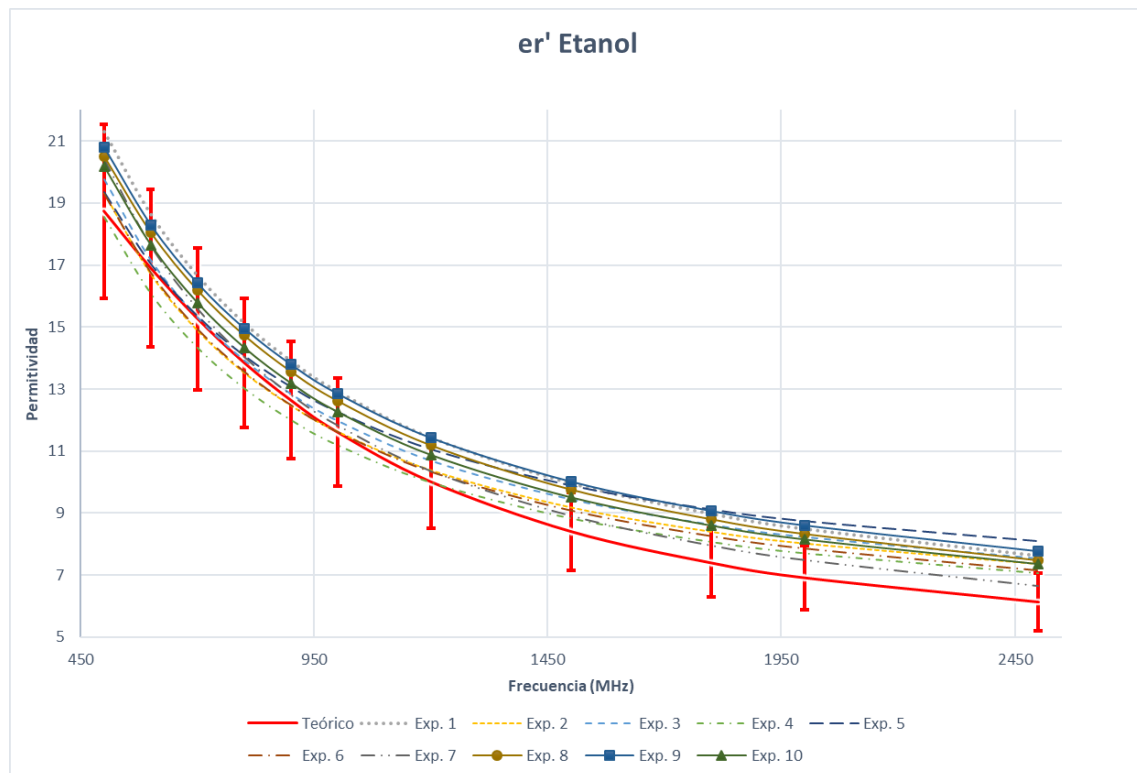


Figura 7.3: Parte real de la permitividad compleja del Etanol

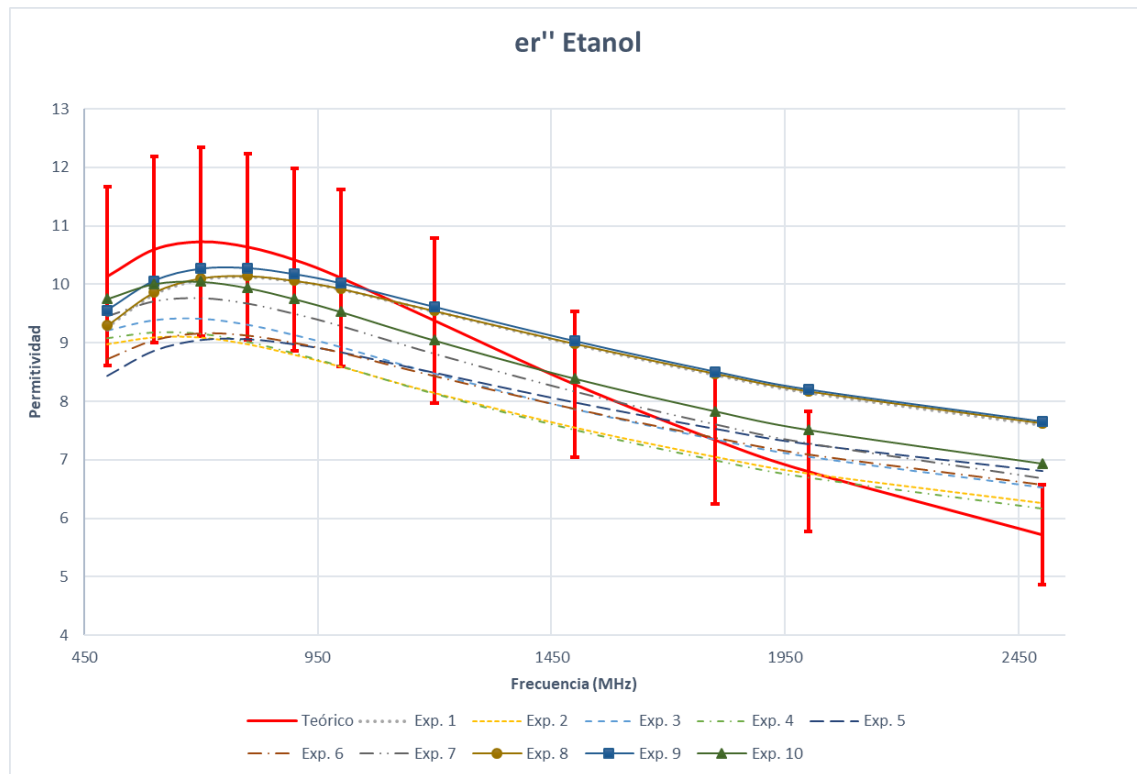


Figura 7.4: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Etanol

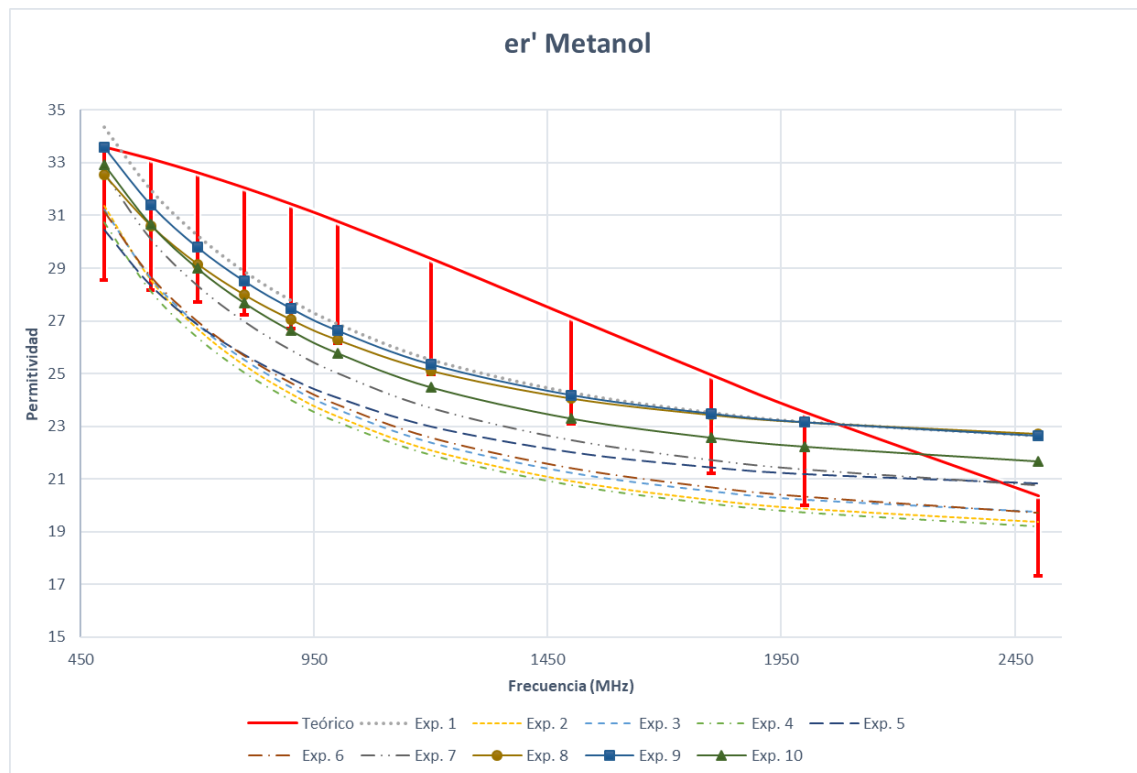


Figura 7.5: Parte real de la permitividad compleja del Metanol

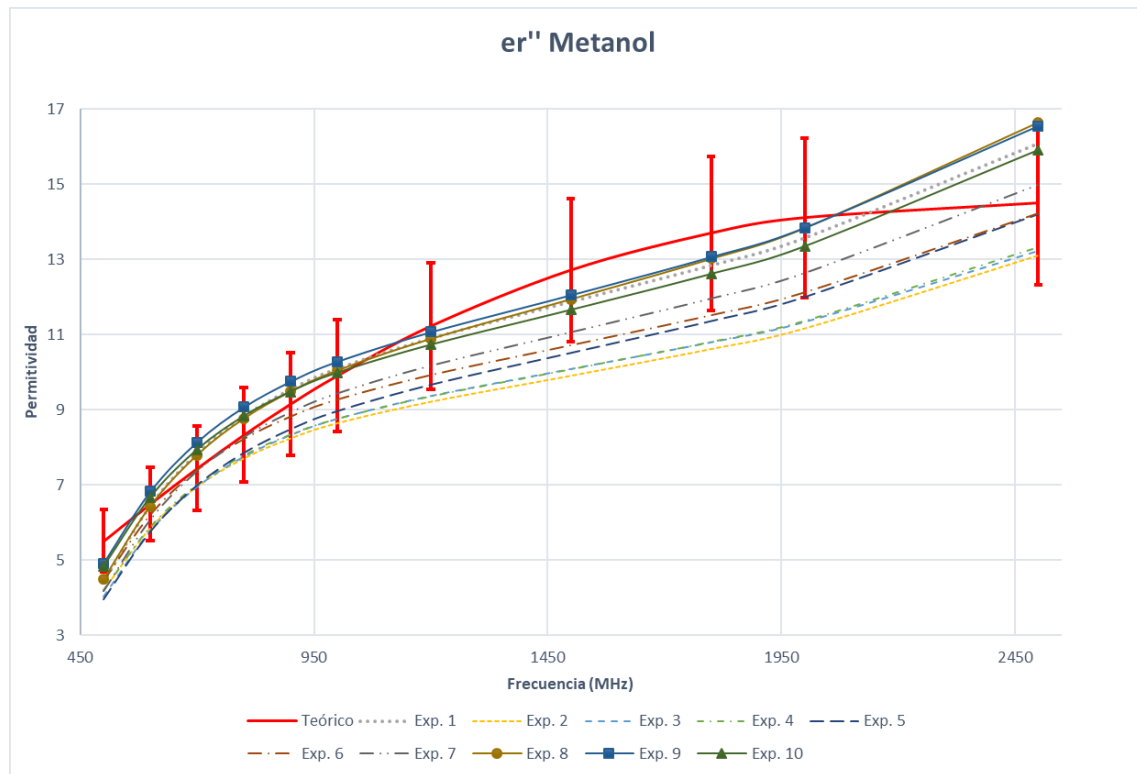


Figura 7.6: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Metanol

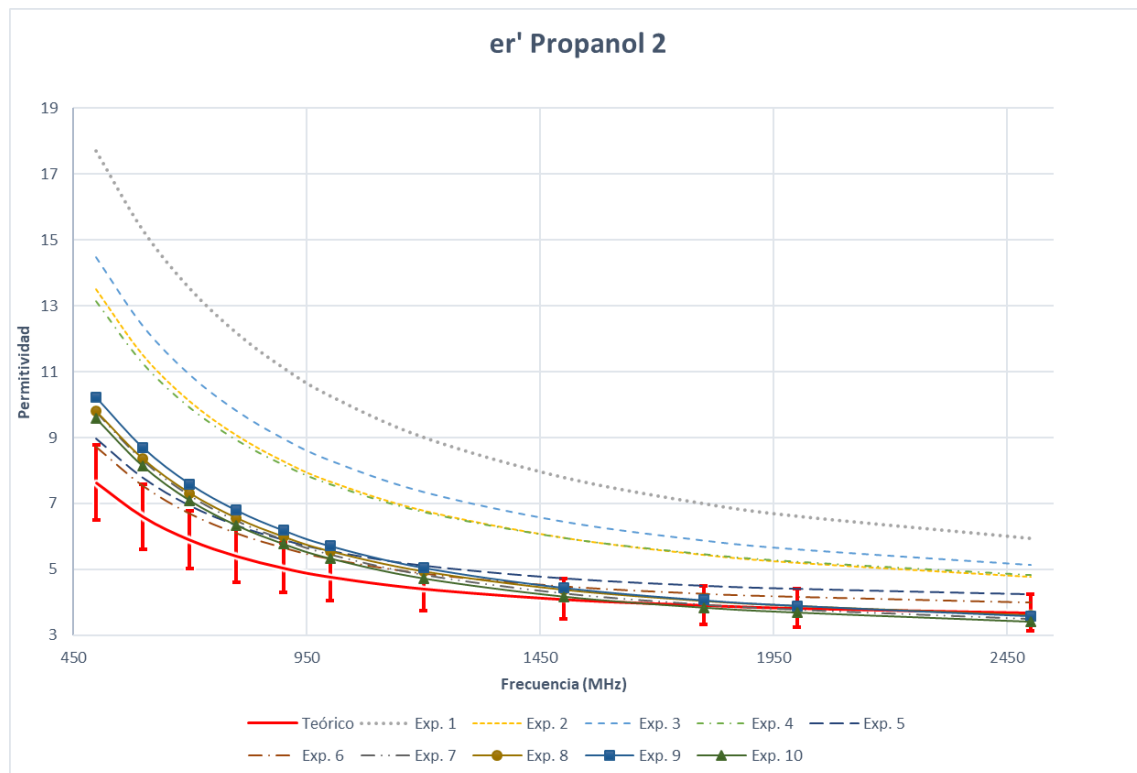


Figura 7.7: Parte real de la permitividad compleja del Propanol 2

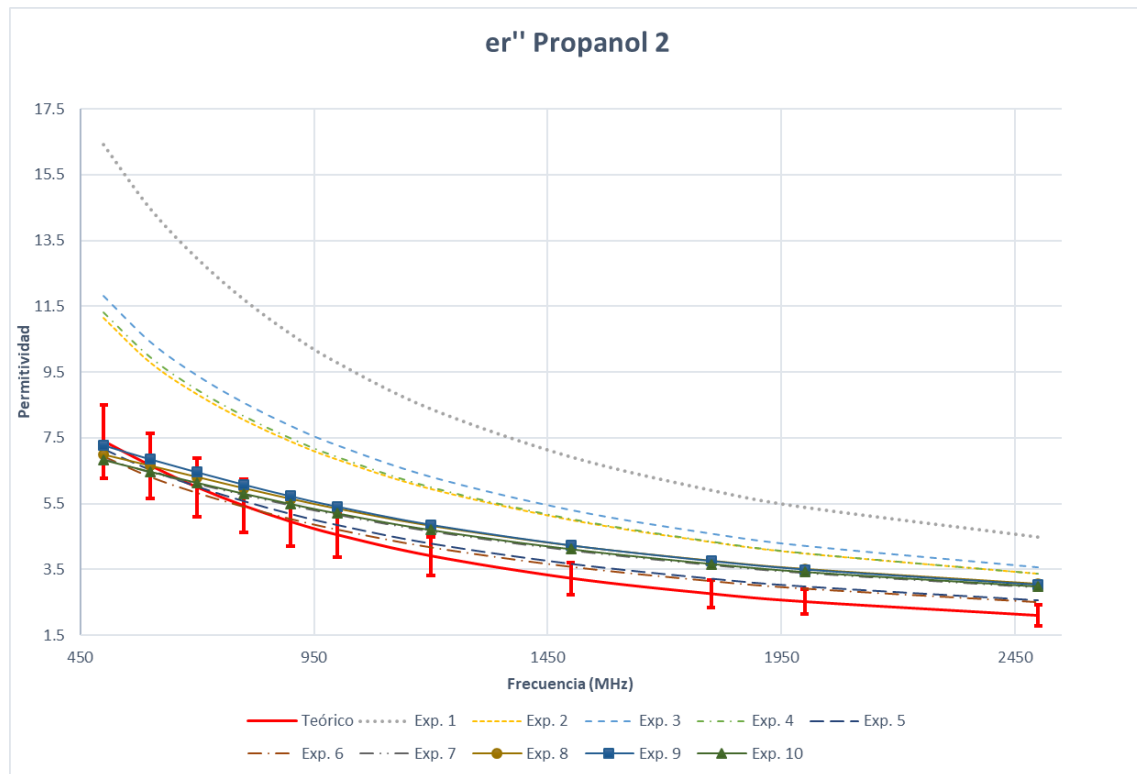


Figura 7.8: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Propanol 2

7.3. Análisis del promedio y la desviación estándar del error porcentual

Para conocer que tan exacta y que tan precisa es la sonda coaxial diseñada, es necesario realizar un análisis del porcentaje de error promedio y la desviación estándar del error promedio, obtenido al calcular la permitividad compleja en 10 mediciones de cada uno de los líquidos. Únicamente en el caso del “Propanol 2” se decidieron eliminar, para el análisis, las 4 primeras mediciones, debido a que presentan datos anómalos que elevan demasiado el error, tal como se puede observar en las Figuras 7.7 y 7.8.

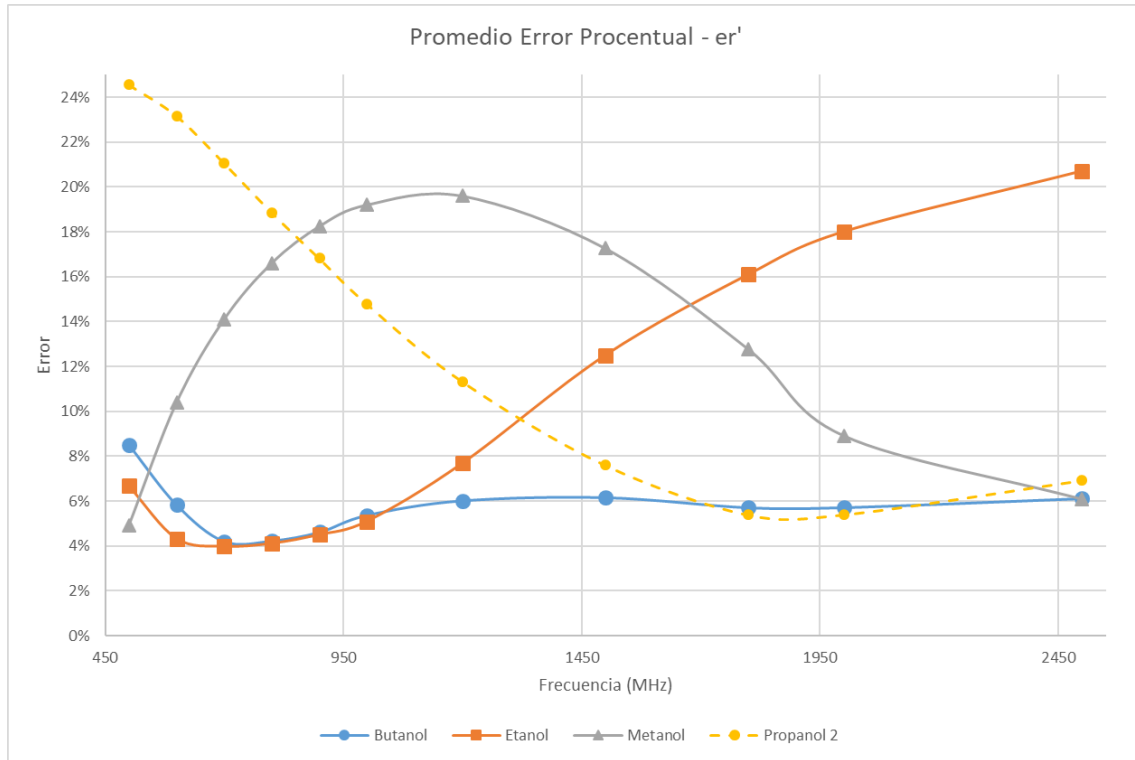


Figura 7.9: Promedio del error porcentual de ε_r' en función de la frecuencia en los 4 líquidos analizados

Tabla 7.1: ε_r' - Error promedio del error porcentual

Frecuencia (MHz)	Líquido			
	Butanol	Etanol	Metanol	Propanol 2
500	8.501 %	6.670 %	4.910 %	24.566 %
600	5.840 %	4.320 %	10.387 %	23.178 %
700	4.211 %	3.971 %	14.104 %	21.069 %
800	4.235 %	4.106 %	16.610 %	18.865 %
900	4.617 %	4.495 %	18.250 %	16.818 %
1000	5.367 %	5.093 %	19.200 %	14.785 %
1200	6.013 %	7.681 %	19.595 %	11.329 %
1500	6.152 %	12.504 %	17.261 %	7.600 %
1800	5.705 %	16.106 %	12.767 %	5.388 %
2000	5.710 %	18.013 %	8.919 %	5.403 %
2500	6.108 %	20.720 %	6.098 %	6.929 %

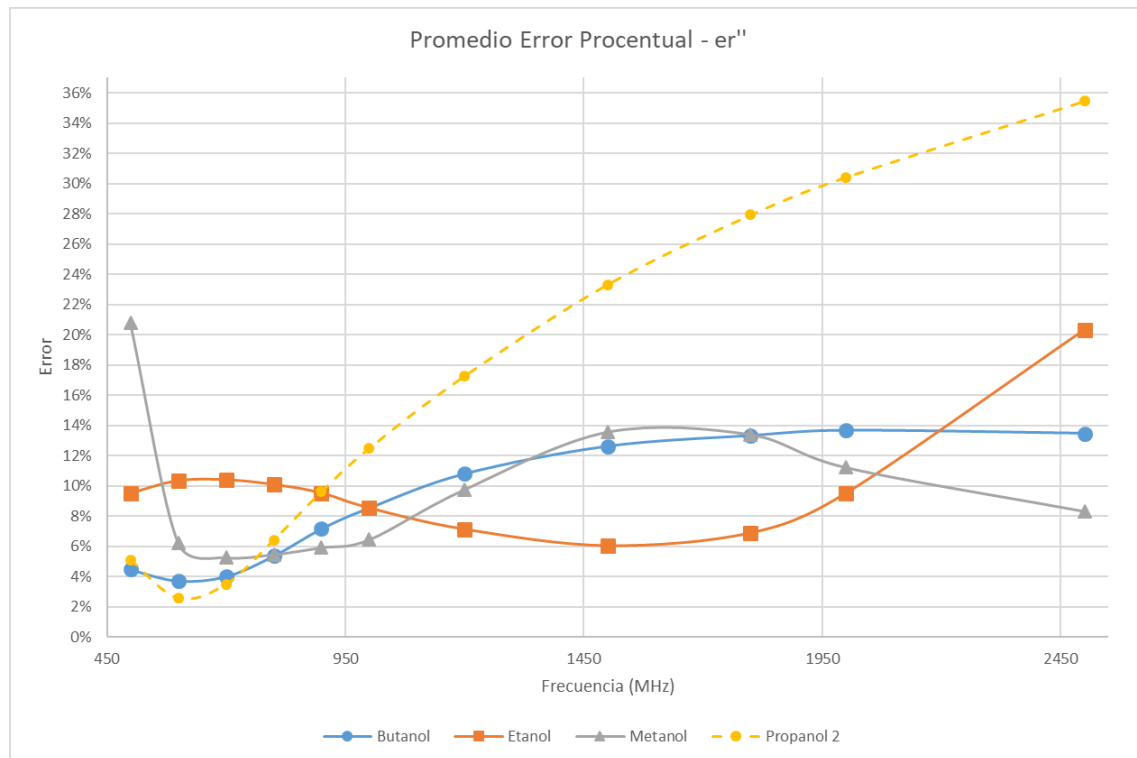


Figura 7.10: Promedio del error porcentual de ε_r'' en función de la frecuencia en los 4 líquidos analizados

Tabla 7.2: ε_r'' - Error promedio del error porcentual

Líquido	Butanol	Etanol	Metanol	Propanol 2
Frecuencia (MHz)				
500	4.471 %	9.511 %	20.767 %	5.105 %
600	3.734 %	10.340 %	6.252 %	2.582 %
700	4.021 %	10.399 %	5.280 %	3.493 %
800	5.368 %	10.094 %	5.469 %	6.405 %
900	7.157 %	9.530 %	5.929 %	9.604 %
1000	8.532 %	8.541 %	6.445 %	12.469 %
1200	10.793 %	7.128 %	9.766 %	17.256 %
1500	12.614 %	6.037 %	13.574 %	23.317 %
1800	13.322 %	6.883 %	13.406 %	27.923 %
2000	13.667 %	9.511 %	11.230 %	30.421 %
2500	13.475 %	20.325 %	8.330 %	35.464 %

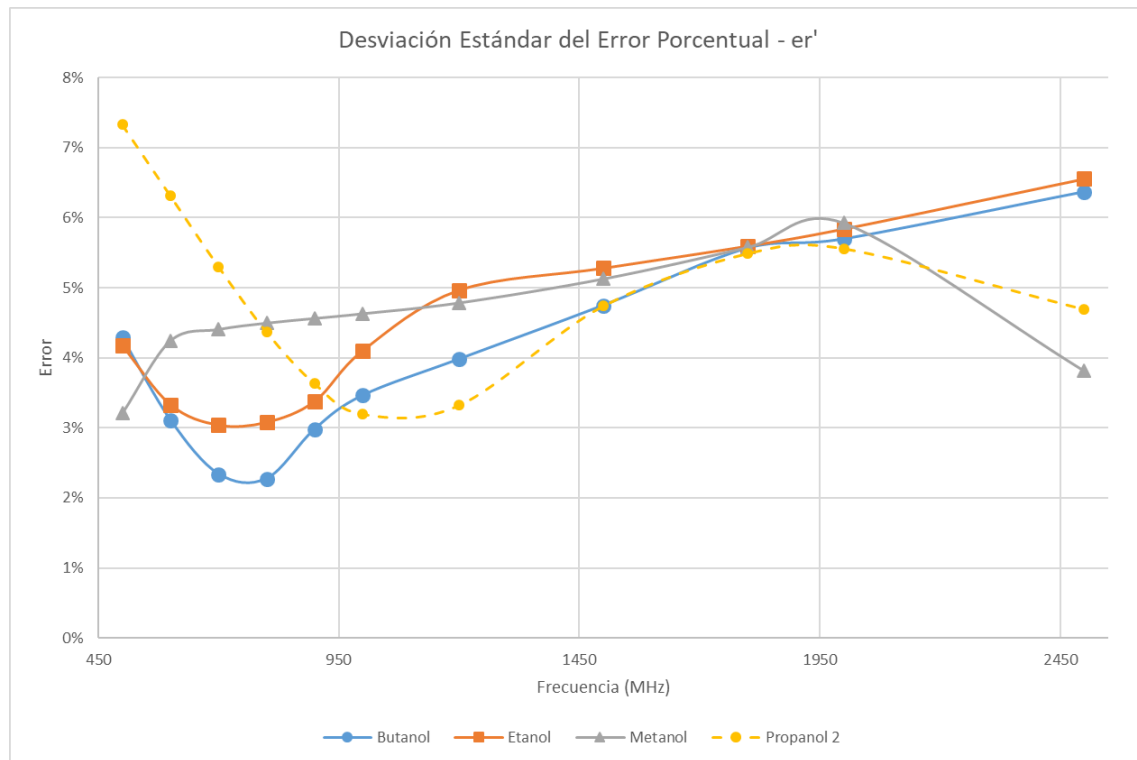


Figura 7.11: Desviación estándar del error porcentual de ϵ_r' en función de la frecuencia en los 4 líquidos analizados

Tabla 7.3: ϵ_r' – Desviación estándar del error porcentual

Frecuencia (MHz)	Líquido			
	Butanol	Etanol	Metanol	Propanol 2
500	4.288 %	4.174 %	3.208 %	7.329 %
600	3.111 %	3.331 %	4.244 %	6.313 %
700	2.340 %	3.037 %	4.409 %	5.303 %
800	2.273 %	3.077 %	4.499 %	4.367 %
900	2.981 %	3.377 %	4.566 %	3.629 %
1000	3.464 %	4.102 %	4.633 %	3.194 %
1200	3.981 %	4.965 %	4.787 %	3.321 %
1500	4.750 %	5.279 %	5.128 %	4.740 %
1800	5.567 %	5.596 %	5.578 %	5.488 %
2000	5.699 %	5.840 %	5.923 %	5.559 %
2500	6.372 %	6.556 %	3.814 %	4.692 %

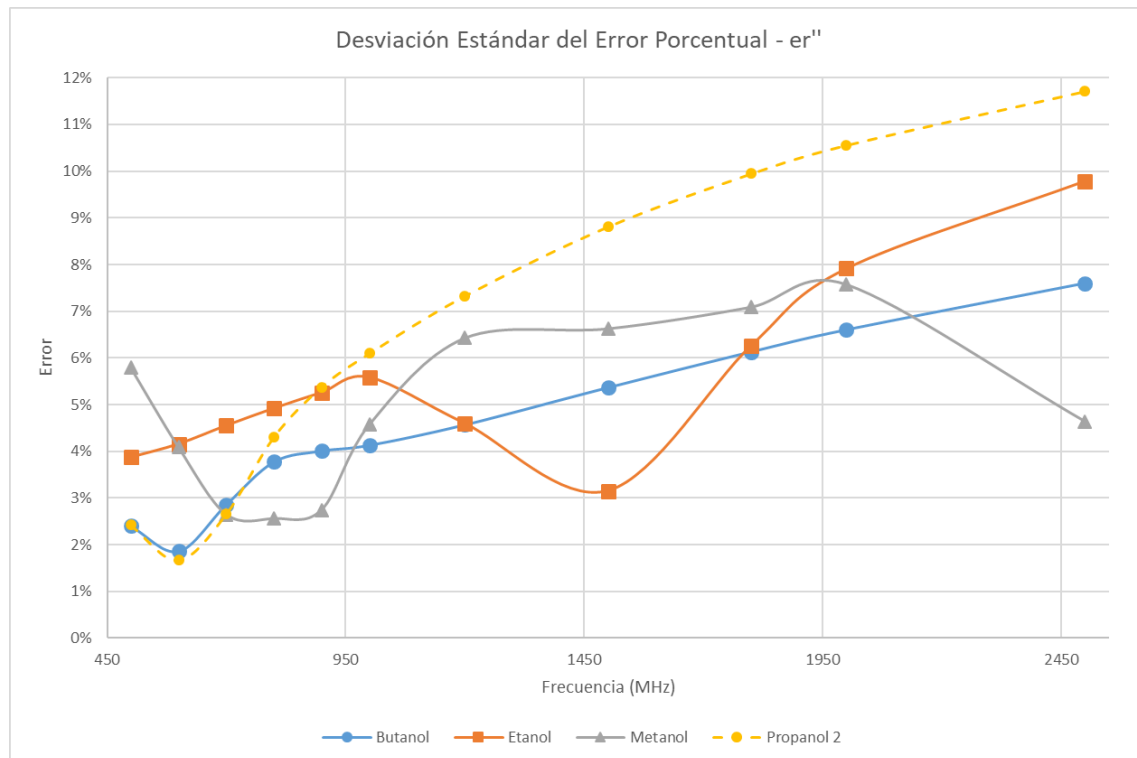


Figura 7.12: Desviación estándar del error porcentual de ε_r'' en función de la frecuencia en los 4 líquidos analizados

Tabla 7.4: ε_r'' – Desviación estándar del error porcentual

Frecuencia (MHz) \ Líquido	Butanol	Etanol	Metanol	Propanol 2
500	2.402 %	3.869 %	5.792 %	2.419 %
600	1.860 %	4.153 %	4.086 %	1.668 %
700	2.854 %	4.548 %	2.646 %	2.652 %
800	3.774 %	4.919 %	2.557 %	4.302 %
900	4.009 %	5.257 %	2.742 %	5.375 %
1000	4.130 %	5.581 %	4.566 %	6.094 %
1200	4.567 %	4.594 %	6.422 %	7.325 %
1500	5.365 %	3.150 %	6.624 %	8.809 %
1800	6.130 %	6.260 %	7.087 %	9.945 %
2000	6.604 %	7.913 %	7.572 %	10.556 %
2500	7.601 %	9.789 %	4.636 %	11.712 %

7.4. Conclusiones

En esta sección se muestran los resultados obtenidos al realizar un total de 10 mediciones en cada uno de los líquidos analizados (exceptuando el “Agua” como se indica en el capítulo 6) y relacionar el coeficiente de reflexión medido con la permitividad compleja del líquido, mediante el método capacitivo, utilizando como líquido de referencia “Propanol 1”.

En las figuras 7.1 - 7.8 se presentan las curvas de permitividad compleja en función de la frecuencia, obtenidas para: Butanol, Etanol, Metanol y Propanol 2. En estas gráficas se puede apreciar que la tendencia de las curvas en el caso del “Metanol” difieren de las curvas “Teóricas”, así también en el caso de la parte imaginaria de la permitividad compleja del “Etanol”, aunque esta diferencia es más marcada en el caso del “Metanol”. Por su parte, el “Butanol” y “Propanol 2” presentan curvas de permitividad compleja con una tendencia muy similar a las de las curvas “Teóricas”.

Si se analizan las barras de error porcentual al 15 % colocadas sobre la curva “Teórica” de los distintos líquidos, se evidencia que en el caso del “Butanol” y “Etanol” la mayoría de las curvas se mantienen dentro de este porcentaje de error para gran parte del rango de frecuencias, no así para el “Metanol” y “Propanol 2”, que muestran porciones amplias del rangos de frecuencias en las que la mayoría de las curvas presentan un porcentaje de error mayor al 15 %, a pesar de que, en el caso del “Propanol 2”, la tendencia es muy similar a la de la curva “Teórica”.

Además de estas gráficas se ha calculado el promedio y la desviación estándar del error porcentual de la permitividad compleja para cada una de las frecuencias analizadas en los 4 líquidos. El promedio del error porcentual varía de líquido a líquido, al igual que de frecuencia, pero la mayoría se encuentra debajo del 20 % (Tablas 7.1 y 7.2). El “Butanol” es el líquido que mejores resultados tiene en todo el rango de frecuencias sin sobrepasar el 7 % de error promedio para ϵ'_r y 14 % para ϵ''_r , seguido por el “Etanol” que presenta un crecimiento del error en la parte real de la permitividad compleja conforme aumenta la frecuencia (figura 7.9), no así la parte imaginaria que presenta un error superior al 20 % únicamente a 2.5 GHz (figura 7.10). Los líquidos que presentan mayor porcentaje de error en la parte real e imaginaria de la permitividad compleja son el “Metanol” y “Propanol 2”. El “Metanol” presenta un error porcentual que supera el 15 % en ϵ'_r para la mayor parte del rango de frecuencias, mientras que para ϵ''_r el error se mantienen debajo del 14 % entre 600 MHz y 2.5 GHz. En el caso del “Propanol 2” en frecuencias más bajas para ϵ'_r el error es superior al 16 % (figura 7.9), mientras que para frecuencias más altas el error en ϵ''_r es superior al 17 % (figura 7.10).

Los errores obtenidos en el caso del “Propanol 2” pueden ser debidos al proceso de medición, dado que con este líquido precisamente se produjeron problemas al momento de medir el coeficiente de reflexión, debido a la aparición de burbujas que afectan y produce errores de medición. Además que muchas veces presentan datos anómalos, como se puede evidenciar en los primeros 4 experimentos que se muestra en las figuras 7.7 y 7.8.

Por su parte, el valor de la desviación estándar del error porcentual para ϵ'_r se mantienen entre 3 y 6 % (Tabla 7.3) en gran parte del rango de frecuencias y entre los líquidos analizados, mostrando una tendencia relativamente estable en función de la frecuencia (figura 7.11). En el caso del valor de la desviación estándar del error porcentual para ϵ''_r presenta mayores variaciones en función de la frecuencia (figuras 7.12), pero la mayoría de los valores obtenidos se mantienen entre 3 y 6 % (Tabla 7.4), igual que en el caso de ϵ'_r .



CAPÍTULO

Conclusiones y Recomendaciones

8.1. Conclusiones

En este proyecto se ha podido comprobar el funcionamiento no invasivo de la sonda coaxial diseñada y se ha demostrado que este se relaciona con: el modelo matemático utilizado para calcular la permitividad compleja a partir del coeficiente de reflexión, el o los líquidos utilizados para el proceso de calibración, los líquidos que se desean medir y el rango de frecuencias en el que se hará la medición.

De acuerdo a los resultados (Capítulo 7) se puede concluir que entre más parecido sea el líquido de referencia en permitividad compleja a los líquidos analizados, las curvas de permitividad compleja en función de la frecuencia tienen tendencias mucho más parecidas a las de las curvas “Teóricas”, como se puede apreciar en el caso del: “Butanol”, “Propanol 2” y en cierto grado el “Etanol”. Además, el error porcentual promedio obtenido (Tablas 7.1 y 7.2) dentro del rango de frecuencias definido para el análisis (sección 6.6) en su mayoría se encuentra por debajo del 15 % de error. Por otra lado, la desviación estándar mostrada se mantiene, en la mayor parte del rango de frecuencias, entre 3 y 6 %, lo que indica que la sonda es bastante precisa.

Las frecuencias en las que se tienen resultados relativamente aceptables (error porcentual promedio menor a 19 % y desviación estándar menor a 6 %) para todos los líquidos son 800 y 900 MHz. Pero si se deja de lado al “Propanol 2”, las frecuencias con mejores resultados sería 600 y 700 MHz, las cuales presentan un error porcentual promedio menor a 15 % y una desviación estándar que no supera el 5 %.

8.2. Recomendaciones

En el transcurso del proyecto se notaron varios procesos que pueden mejorar los resultados obtenidos. En cuanto al proceso de medición, en futuras implementaciones, se pueden aplicar las siguientes recomendaciones:

- El uso de un escenario adecuado de medición es importante, dado que, al contar con un cable coaxial estandar, es recomendable no realizar movimientos bruscos después de haber realizado la

calibración del [VNA](#) para evitar variaciones significativas en la señal.

- Para evitar anomalías en la señal, es importante, revisar constantemente la estabilidad del contacto entre la sonda y el líquido de prueba antes de realizar la medición. En este punto es importante revisar la existencia de burbujas entre sonda y el líquido, tomando en cuenta que algunos líquidos (Propanol-1 y Propanol-2) son más susceptibles a este problema. En este contexto, al trabajar con “Metanol”, la manipulación del vaso de precipitación, puede generar pequeñas burbujas en los bordes del conenedor, que produce errores pequeños aunque no despreciables.
- Otro punto importante para obtener mediciones precisas, es el continuo control de temperatura en el líquido de prueba, por lo que es recomendable trabajar en un ambiente de temperatura relativamente constante, para facilitar este proceso.
- Se recomienda que la manipulación de los líquidos de prueba sea realizada con todas las precauciones necesarias, es decir, utilizando el instrumental básico de protección de un laboratorio químico (guantes, mascarilla).
- Es importante mantener los líquidos en un contenedor sellado y ambiente seco, dado a que, dependiendo del caso, pueden cambiar facilmente su estado físico o químico y por ende sus propiedades dieléctricas pueden verse afectadas.
- Se recomienda, secar muy bien la humedad de la sonda entre las mediciones de cada líquido para que no se altere su composición química y por ende, sus propiedades dielectricas.
- El *MegiQ VNA*, como se menciona en la sección [6.2.2](#) es un equipo sofisticado calibrado totalmente para la medición precisa de coeficiente de reflexión en sus puertos RF. Sin embargo, el uso prolongado del mismo puede generar anomalías en la toma de datos. En algunos casos este problema es solucionado simplemente recalibrando el cable coaxial. De no ser suficiente, es necesario apagar el equipo durante unos minutos.

8.3. Trabajos futuros

Ya que la medición de la permitividad compleja depende de varios parámetros a analizar, se podrían realizar distintas modificaciones a futuro con el objetivo de mejorar los resultados obtenidos en este proyecto:

- Modificar las dimensiones de la sonda y hacerla más pequeña. Según la referencia [\[3\]](#) se suelen utilizar sondas de 3.5mm de diámetro de conductor interno para aplicar la metodología de sonda coaxial abierta.
- La hipótesis que llevó a plantear este proyecto es la medición, a futuro, de glucosa mediante métodos no invasivos, por lo cual, sería una buena idea utilizar soluciones salinas como líquidos de prueba, dado que estos asemejan la permitividad de tejidos biológicos [\[6\]](#).
- En este proyecto se utilizó un proceso de calibración utilizando un líquido de calibración de entre el conjunto de analisis, por ello, sería adecuado aplicar un método de calibracion como se describe en la referencia [\[9\]](#) en el que el sensor se corto circuita, y se realiza una medición en el aire y sobre un líquido de referencia.
- Se podría realizar un estudio detallado de como afecta la longitud de la sonda coaxial en la medición de la permitividad compleja, dado que en realidad en las referencias citadas no se habla sobre la incidencia de este parámetro.



Resultados con los 3 modelos matemáticos

En este anexo se presentan los resultados obtenidos con cada uno de los tres modelos matemáticos, al medir el coeficiente de reflexión utilizando la sonda coaxial de 5mm sobre los 6 líquidos planteados a 15° C y 20° C de temperatura.

Los resultados se presentan mediante gráficas de las curvas de permitividad compleja en función de la frecuencia. Para cada líquido analizado se muestra una gráfica para la parte real y otra para la parte imaginaria de la permitividad compleja, en la que se comparan los resultados obtenidos con distintos líquidos de referencia (cada curva pertenece a un líquido de referencia diferente que se identifica con la leyenda “Ref. + nombre del líquido”). A estas curvas se le suman también las curvas obtenidas con el equipo Keysight ENA E5071C (“ENA E5071C”) y de la referencia (“Teórico”) [13].

A.1. Líquidos a 15° C

Los líquidos fueron llevados a una temperatura de 15° C para realizar las mediciones.

A.1.1. Modelo Capacitivo

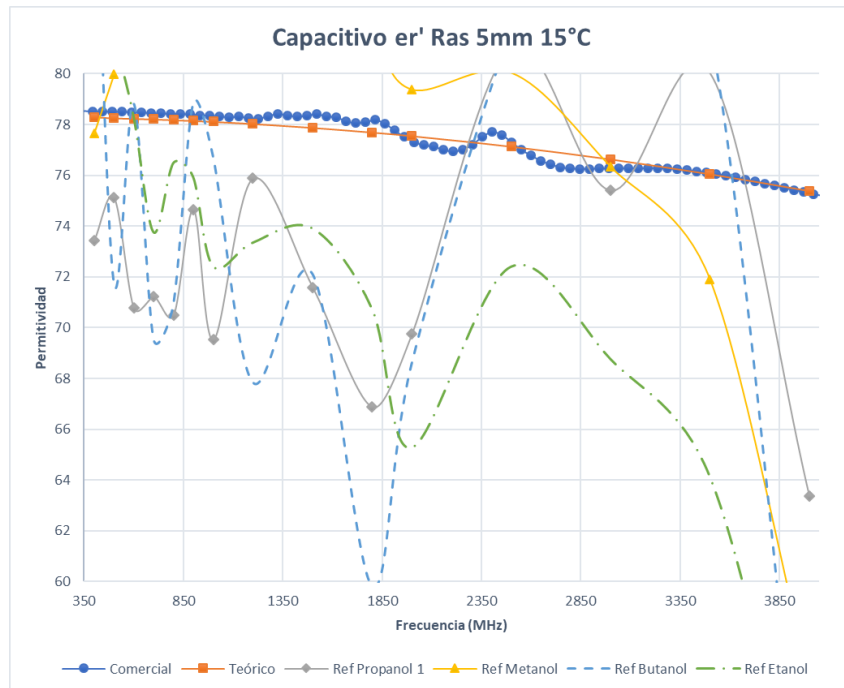


Figura A.1: Parte real de la permitividad compleja del Agua (Modelo Capacitivo - 15° C)

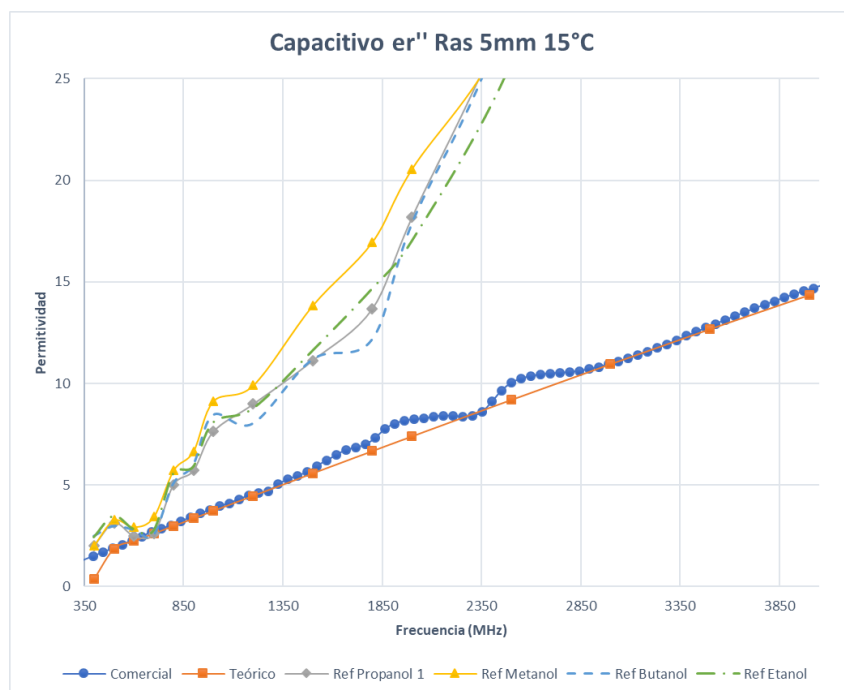


Figura A.2: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Agua (Modelo Capacitivo - 15° C)

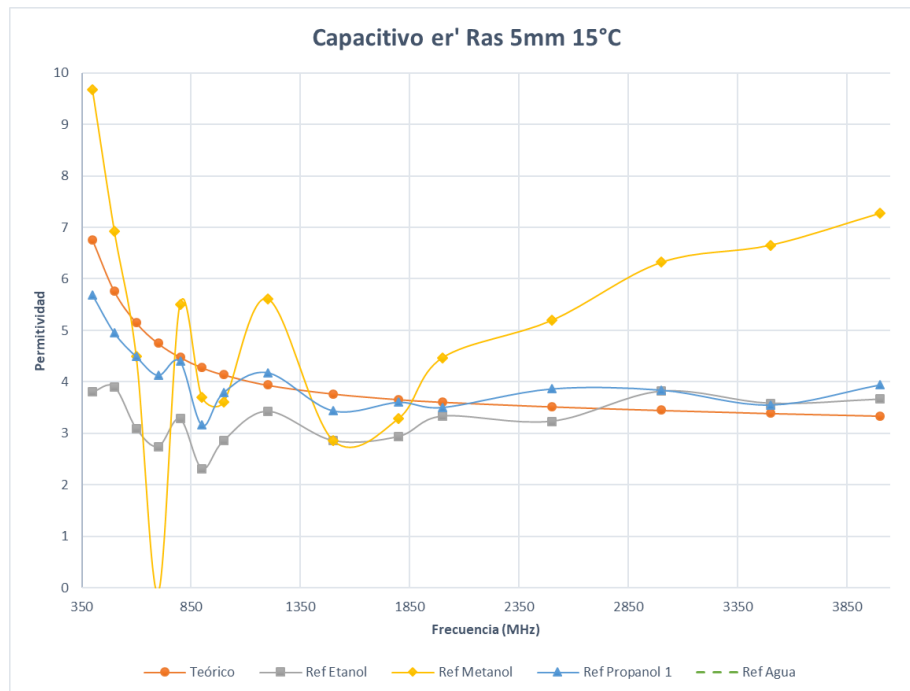


Figura A.3: Parte real de la permitividad compleja del Butanol (Modelo Capacitivo - 15° C)

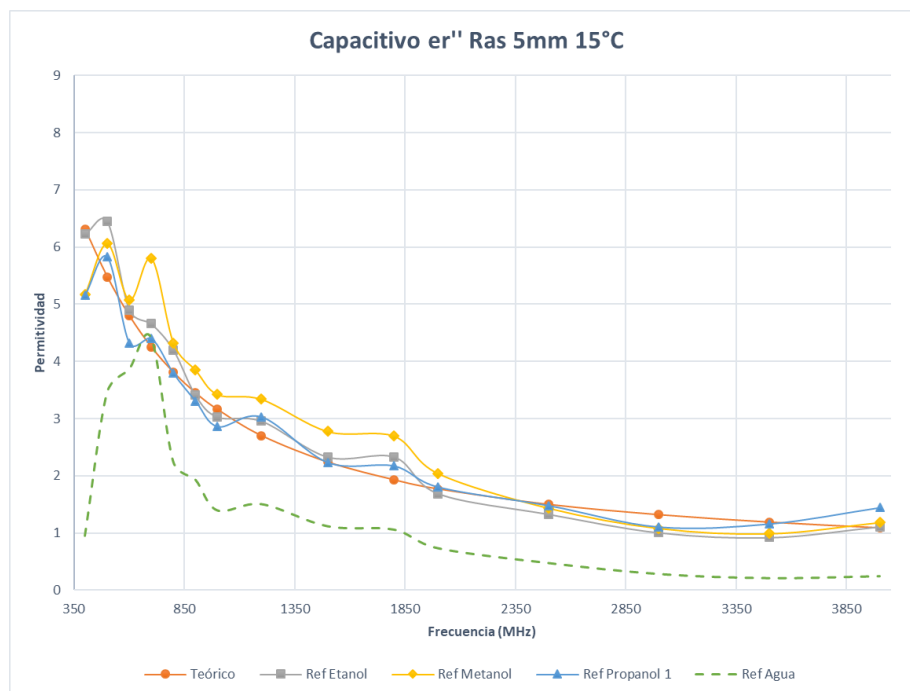


Figura A.4: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Butanol (Modelo Capacitivo - 15° C)

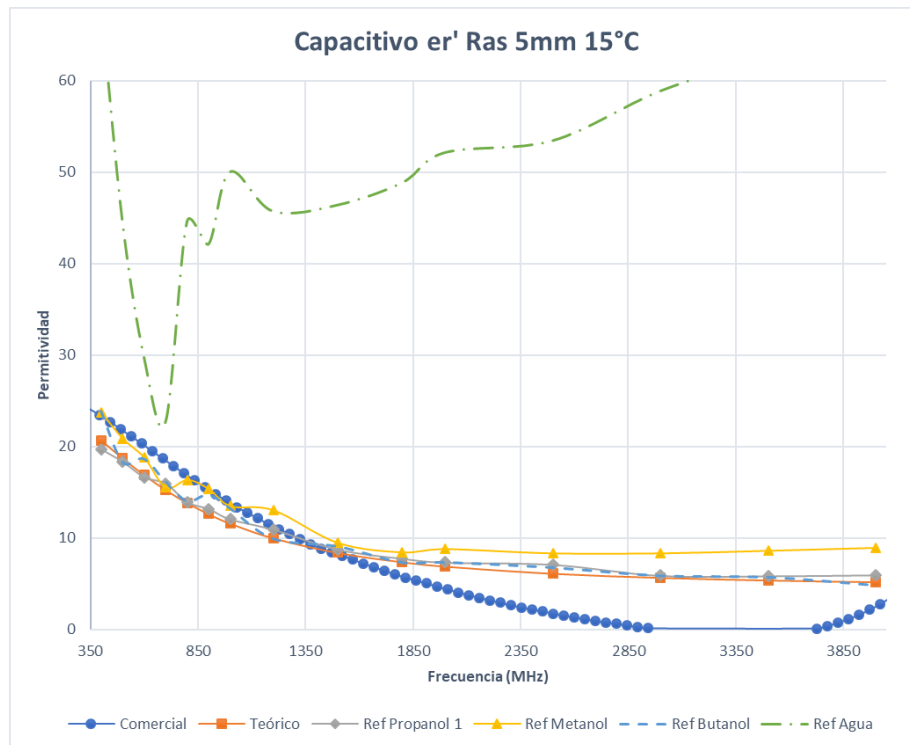


Figura A.5: Parte real de la permitividad compleja del Etanol (Modelo Capacitivo - 15° C)

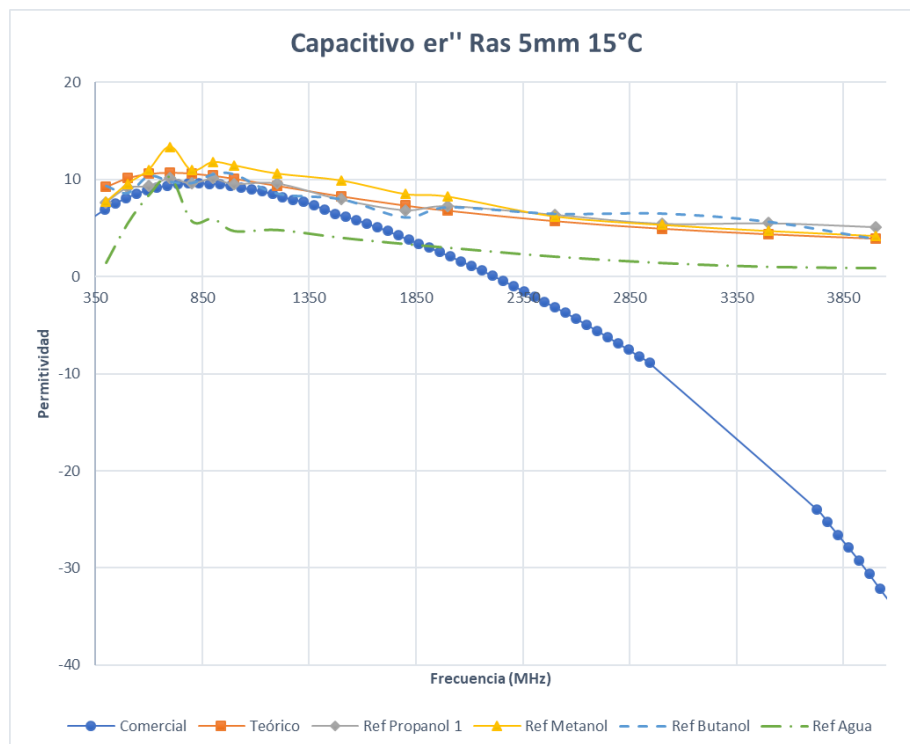


Figura A.6: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Etanol (Modelo Capacitivo - 15° C)

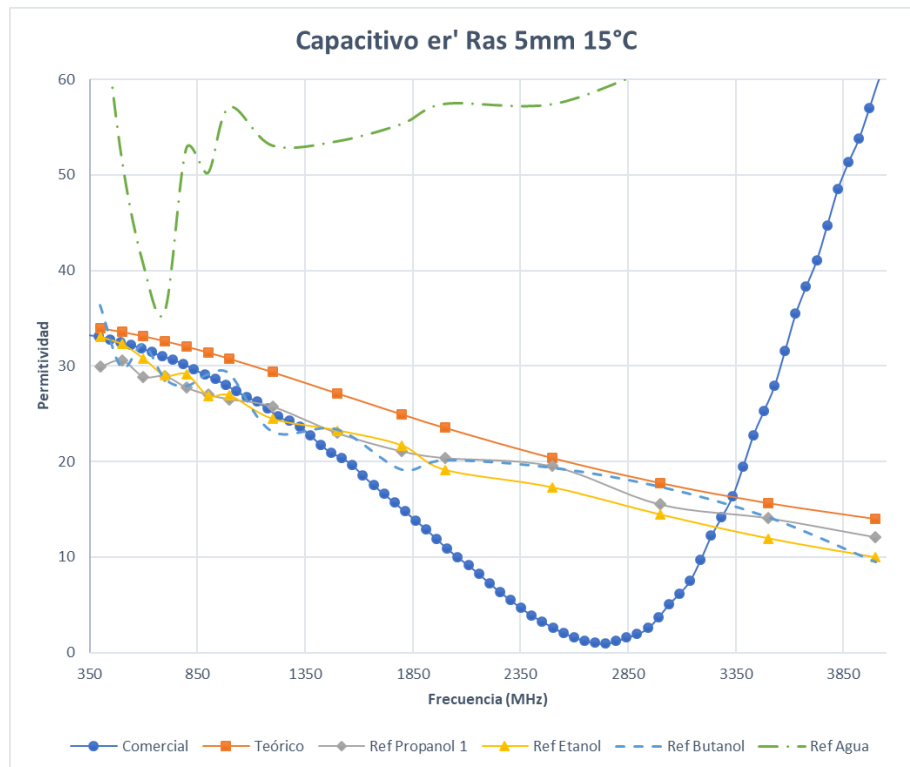


Figura A.7: Parte real de la permitividad compleja del Metanol (Modelo Capacitivo - 15° C)

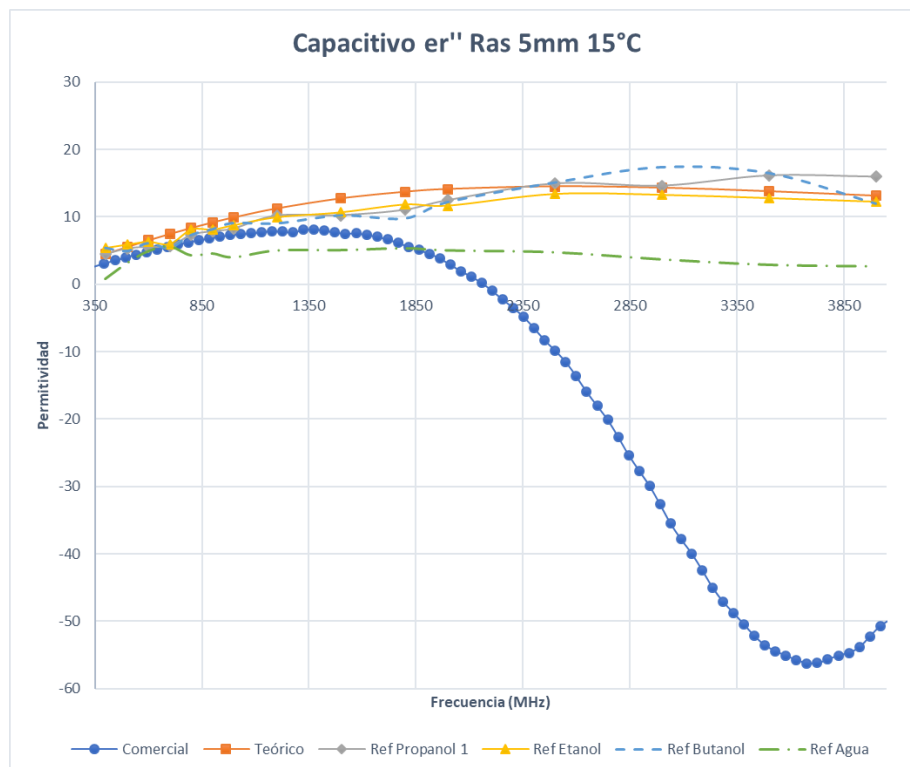


Figura A.8: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Metanol (Modelo Capacitivo - 15° C)

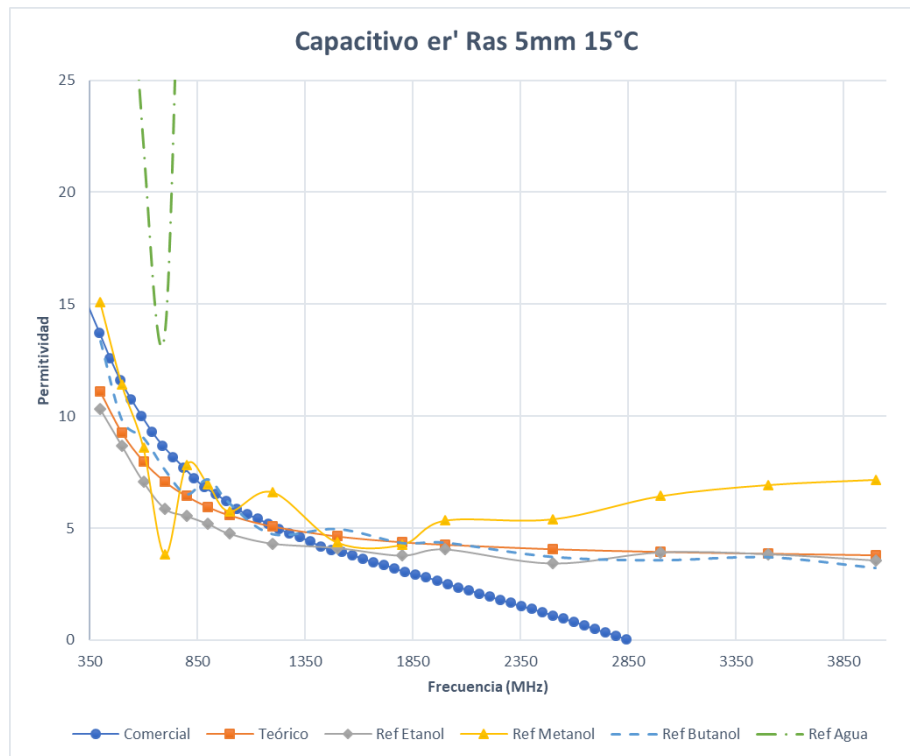


Figura A.9: Parte real de la permitividad compleja del Propanol 1 (Modelo Capacitivo - 15° C)

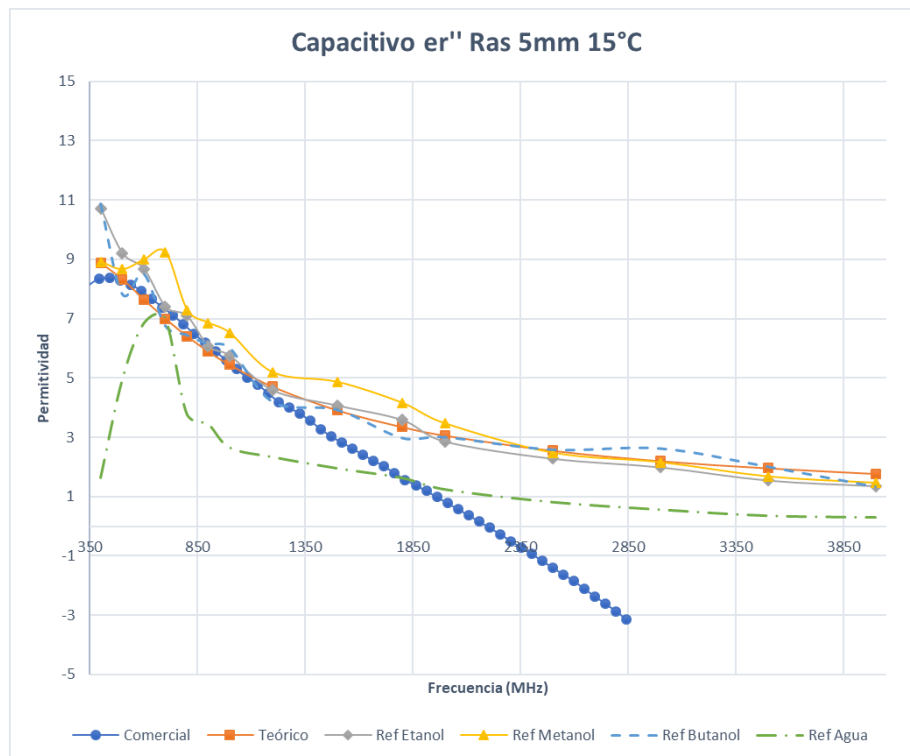


Figura A.10: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Propanol 1 (Modelo Capacitivo - 15° C)

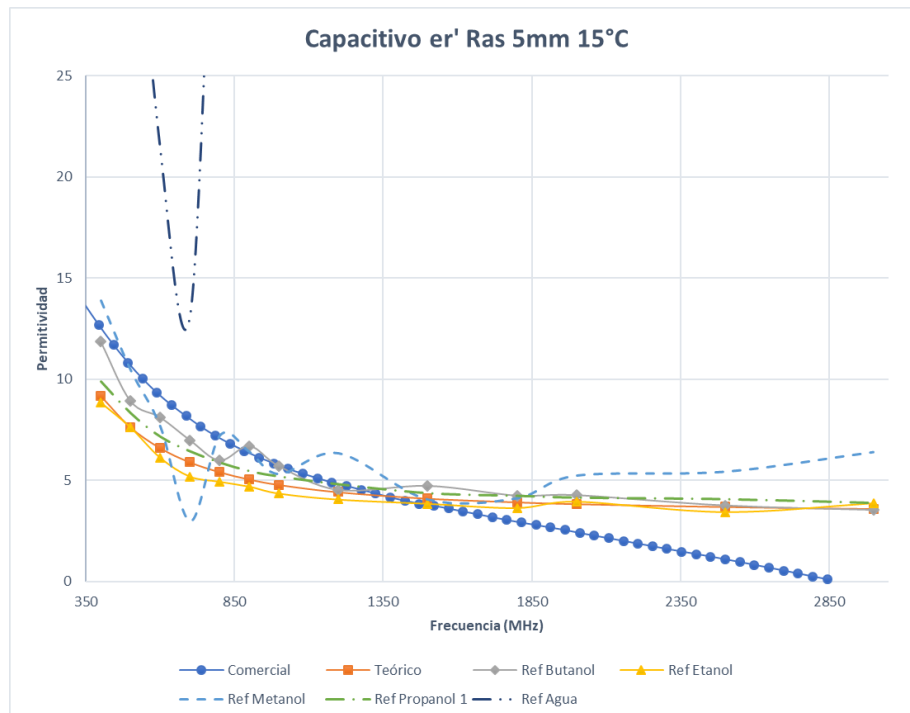


Figura A.11: Parte real de la permitividad compleja del Propanol 2 (Modelo Capacitivo - 15° C)

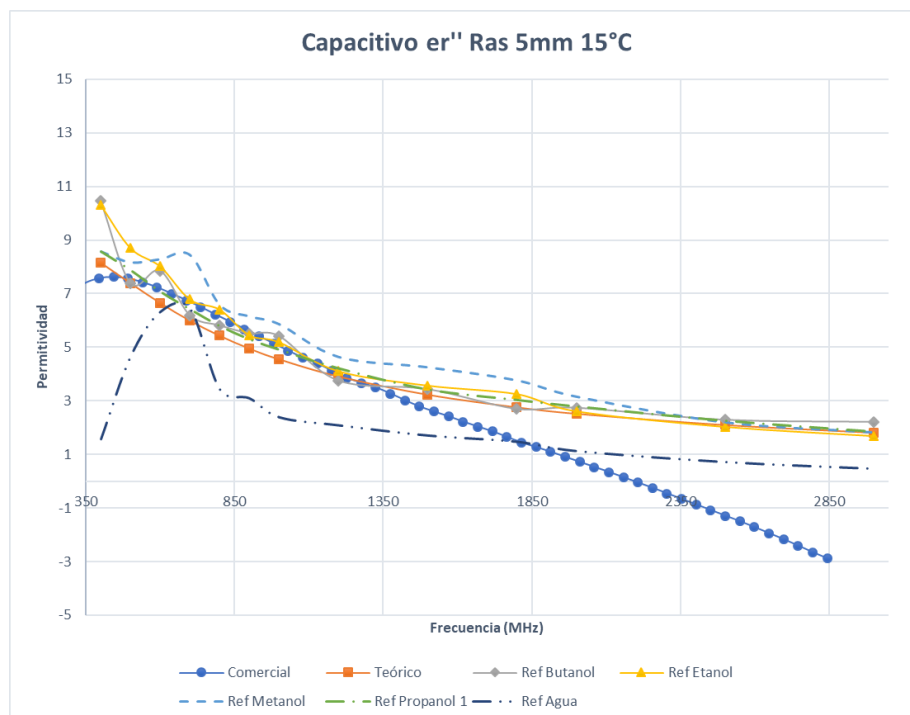


Figura A.12: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Propanol 2 (Modelo Capacitivo - 15° C)

A.1.2. Modelo de Antena

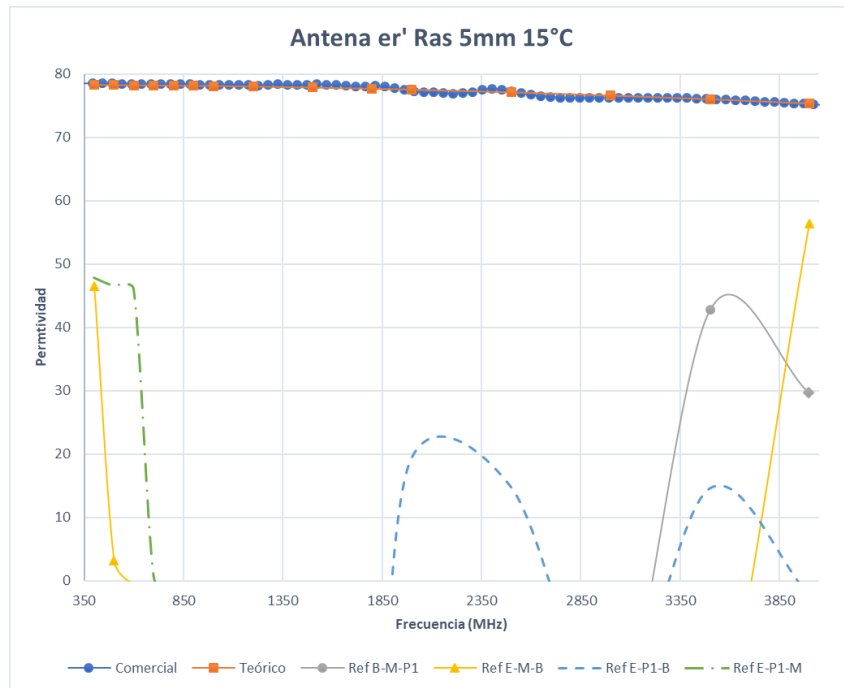


Figura A.13: Parte real de la permitividad compleja del Agua (Modelo de Antena - 15° C)

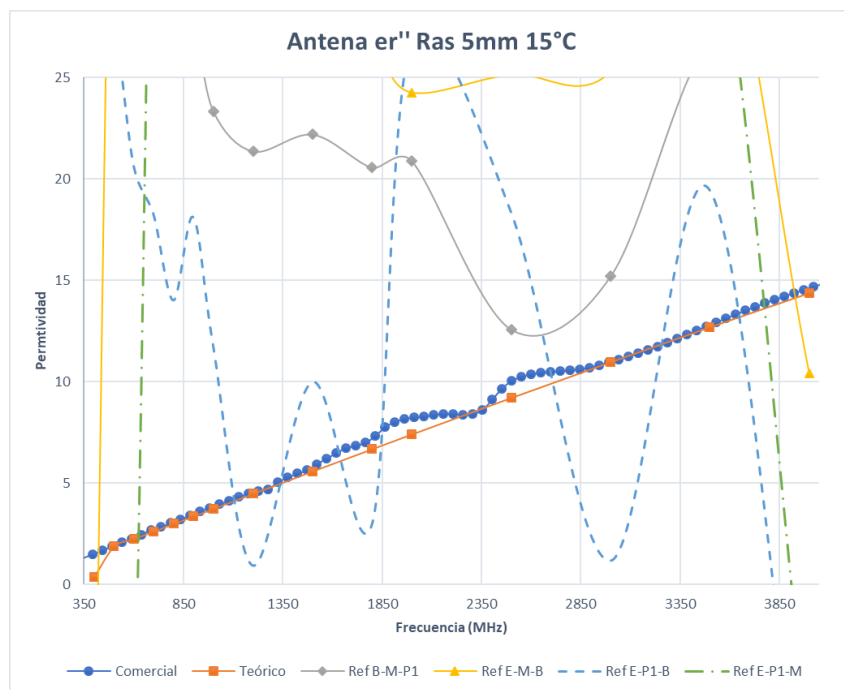


Figura A.14: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Agua (Modelo de Antena - 15° C)

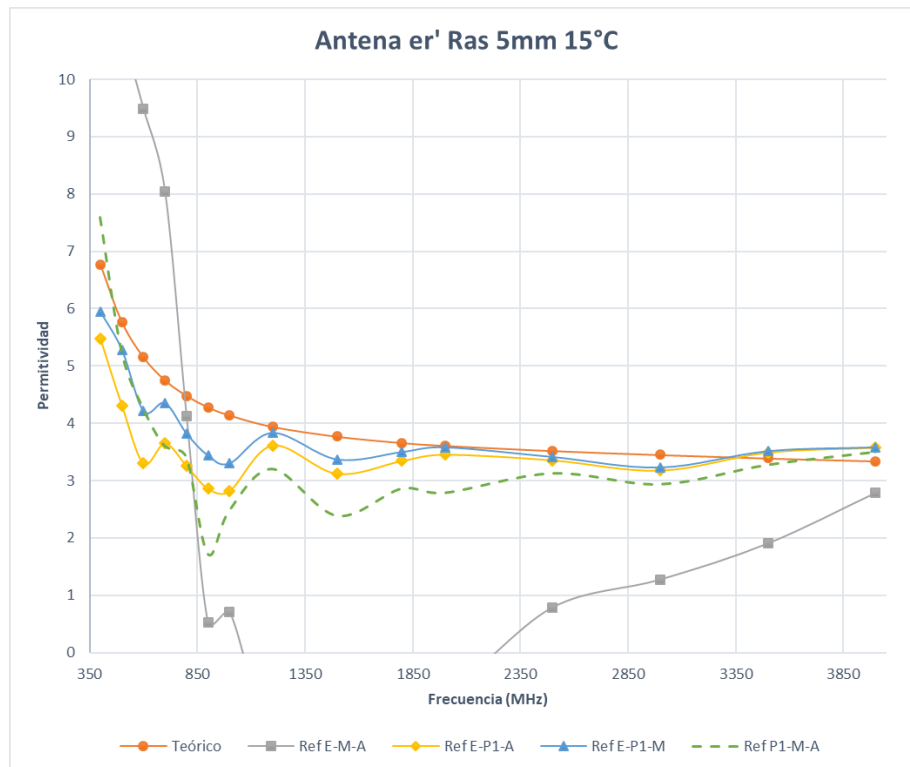


Figura A.15: Parte real de la permitividad compleja del Butanol (Modelo de Antena - 15° C)

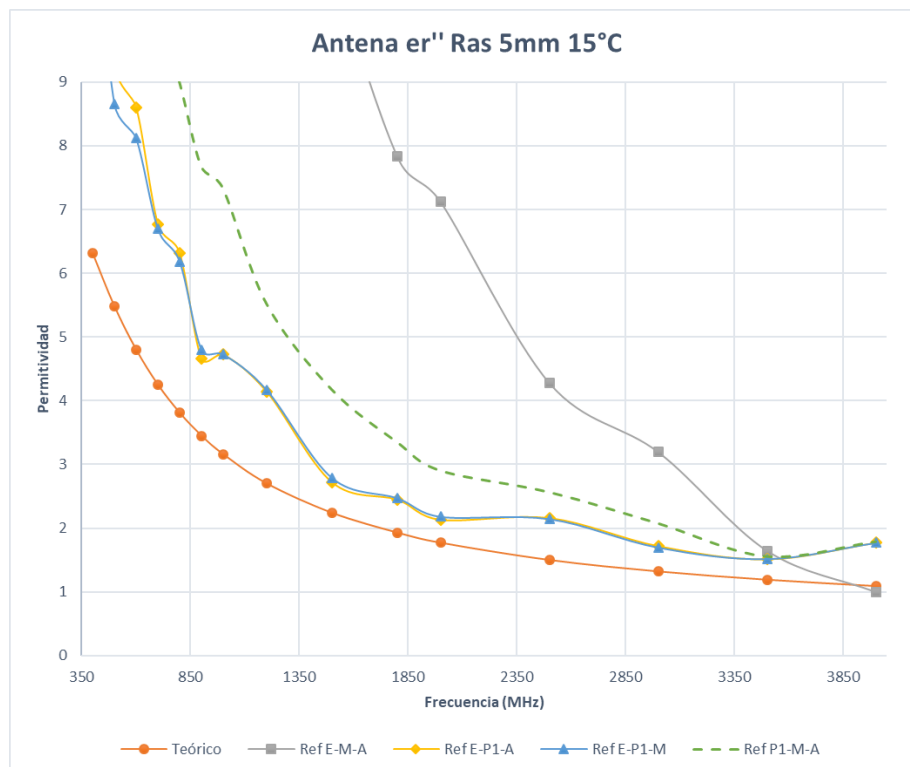


Figura A.16: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Butanol (Modelo de Antena - 15° C)

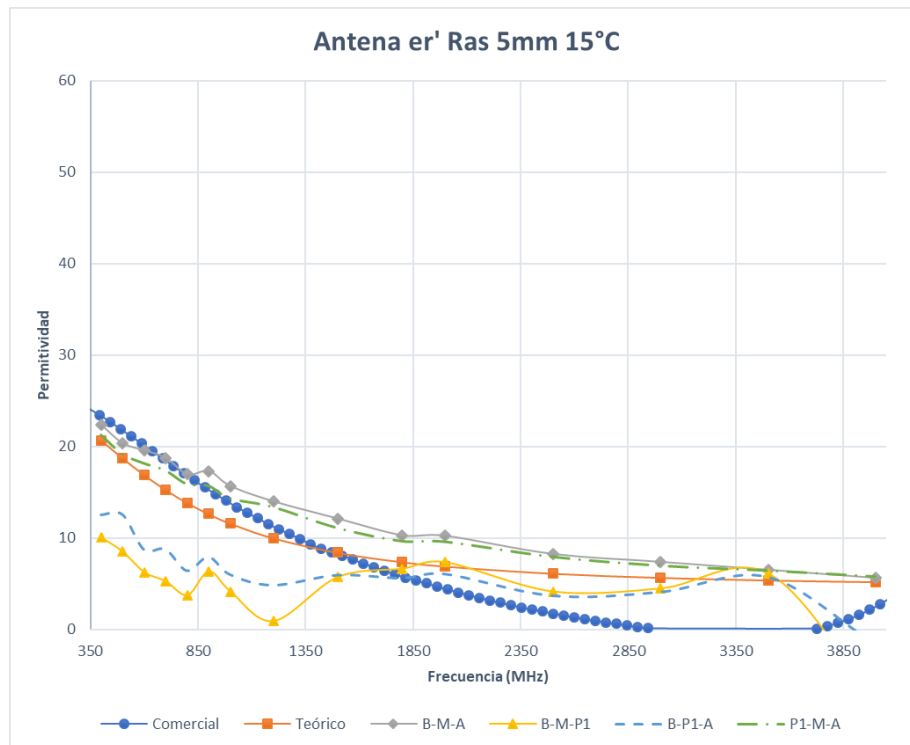


Figura A.17: Parte real de la permitividad compleja del Etanol (Modelo de Antena - 15° C)

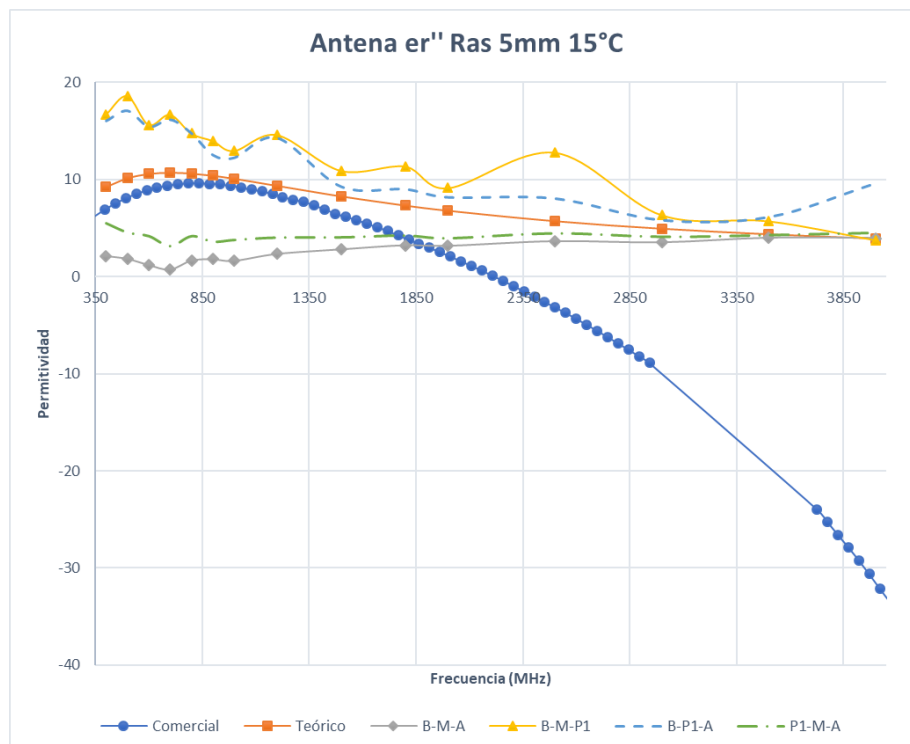


Figura A.18: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Etanol (Modelo de Antena - 15° C)

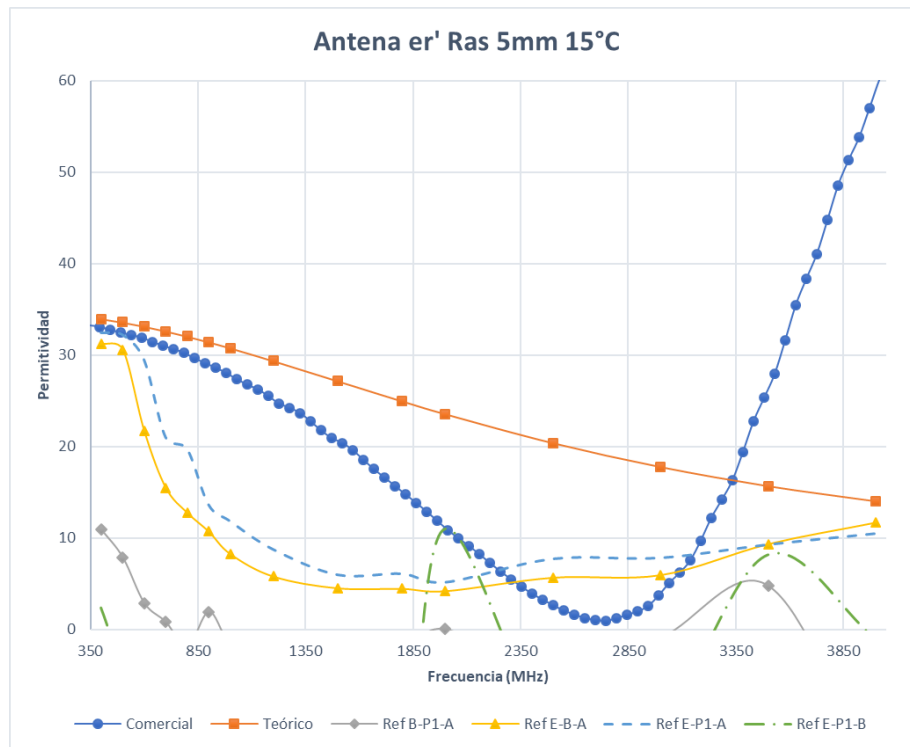


Figura A.19: Parte real de la permitividad compleja del Metanol (Modelo de Antena - 15° C)

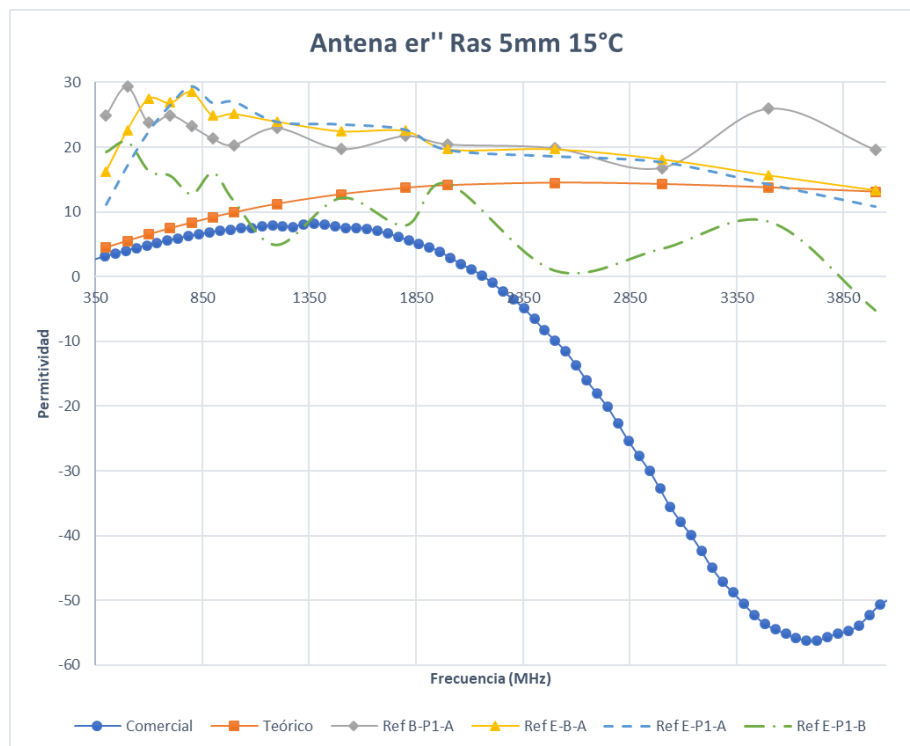


Figura A.20: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Metanol (Modelo de Antena - 15° C)

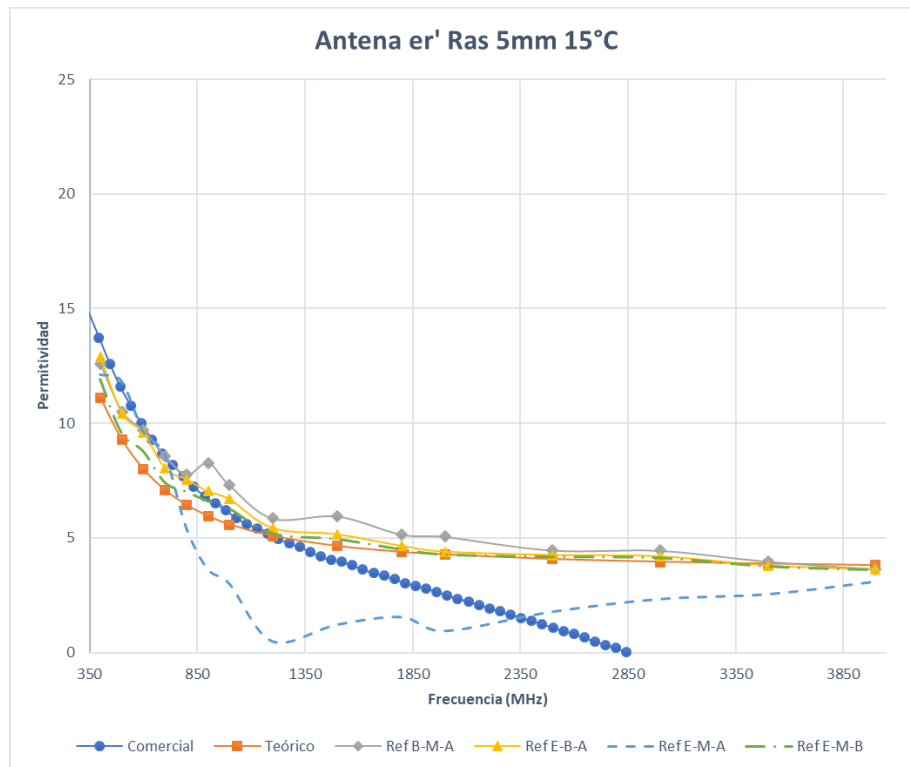


Figura A.21: Parte real de la permitividad compleja del Propanol 1 (Modelo de Antena - 15° C)

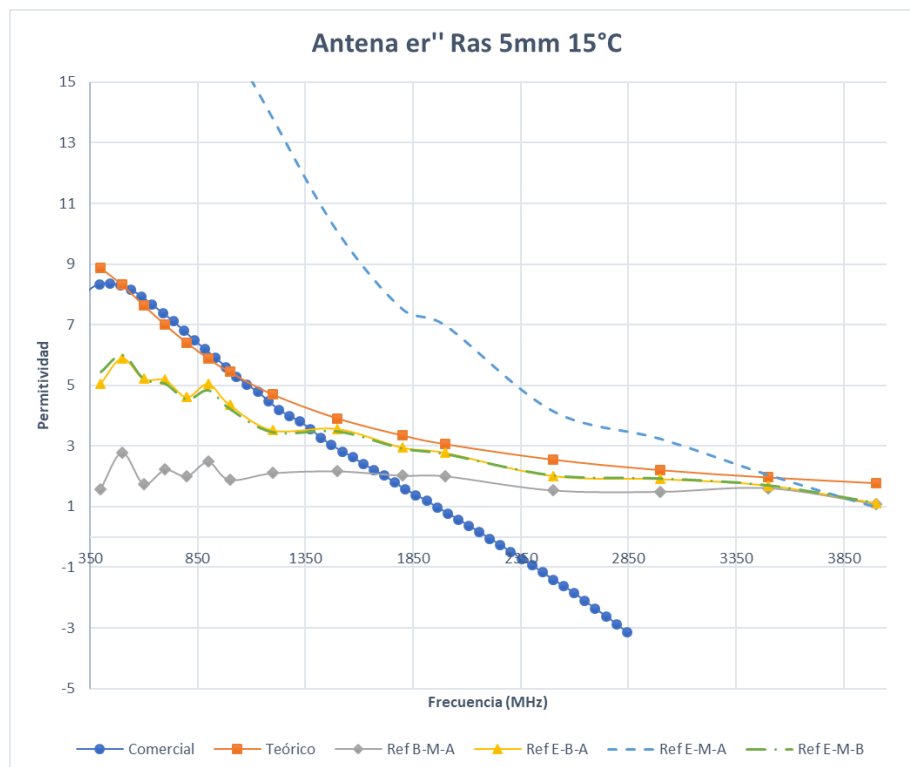


Figura A.22: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Propanol 1 (Modelo de Antena - 15° C)

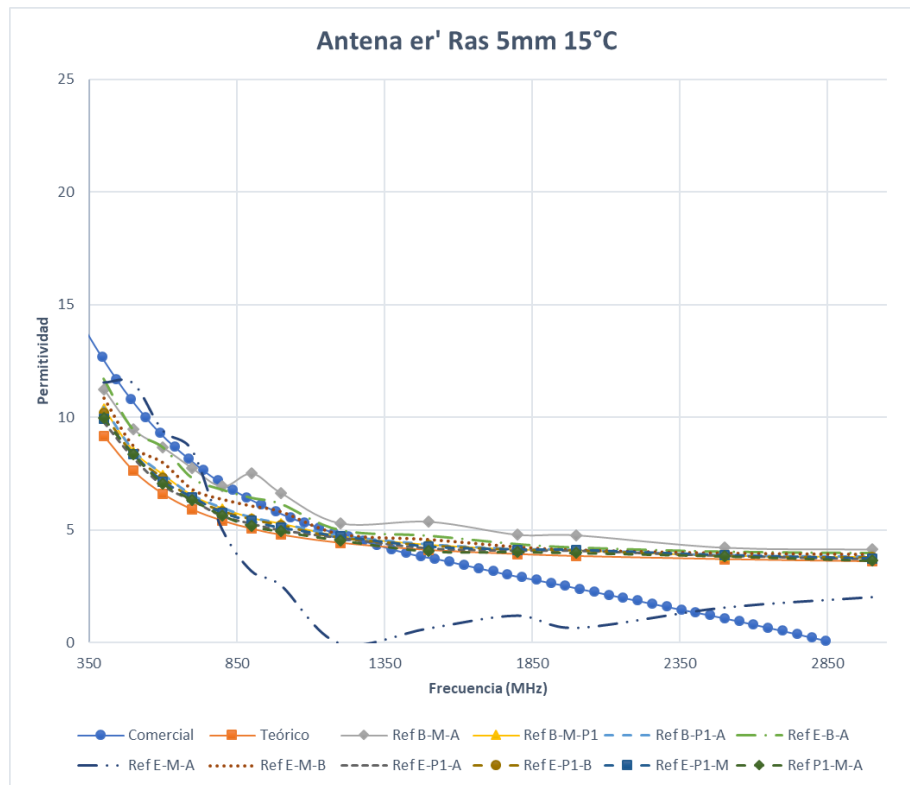


Figura A.23: Parte real de la permitividad compleja del Propanol 2 (Modelo de Antena - 15° C)

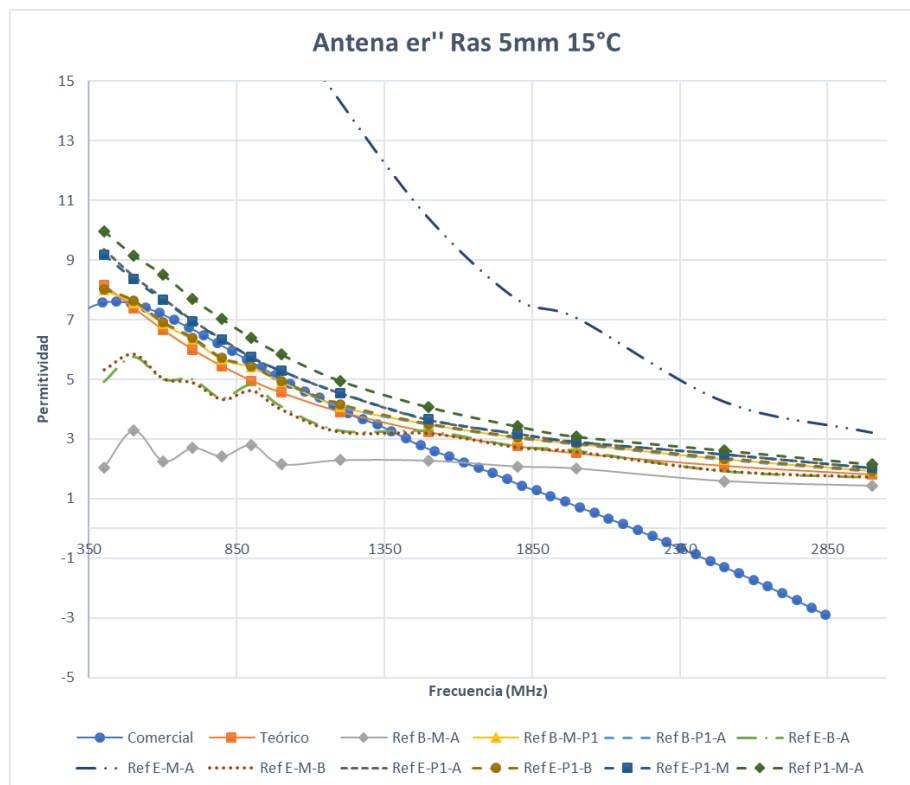


Figura A.24: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Propanol 2 (Modelo de Antena - 15° C)

A.1.3. Modelo de Línea Virtual

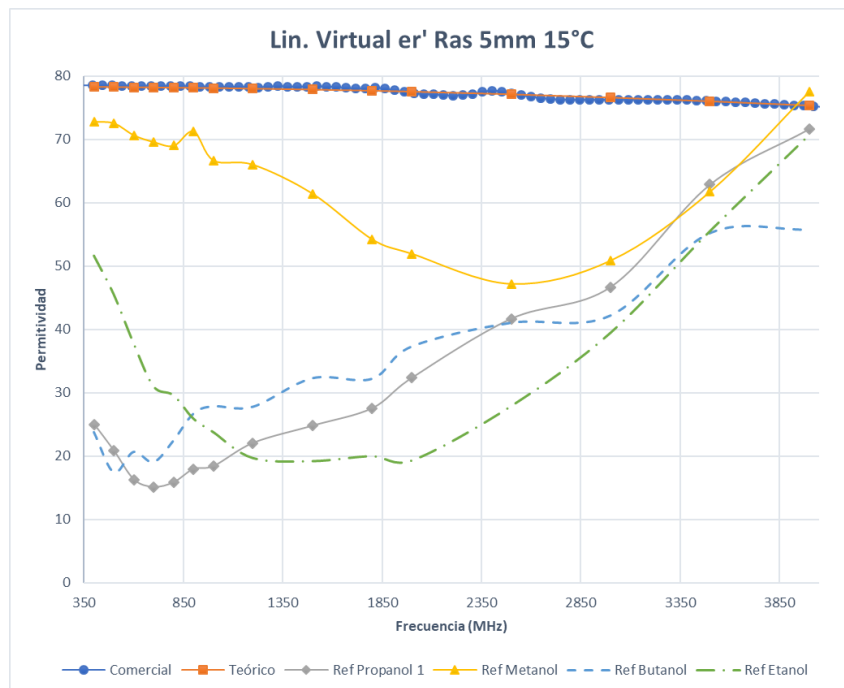


Figura A.25: Parte real de la permitividad compleja del Agua (Modelo de Línea Virtual - 15° C)

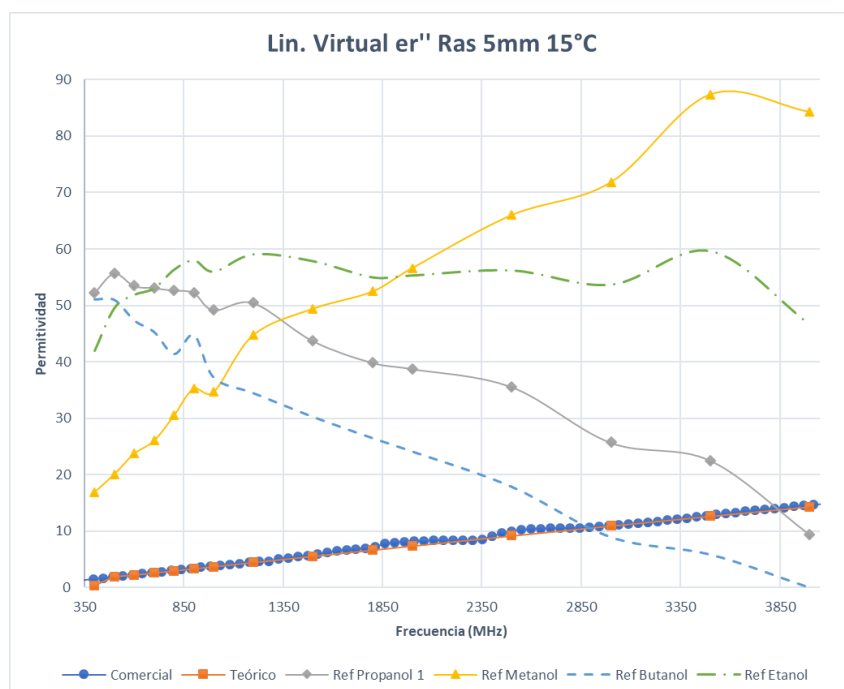


Figura A.26: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Agua (Modelo de Línea Virtual - 15° C)

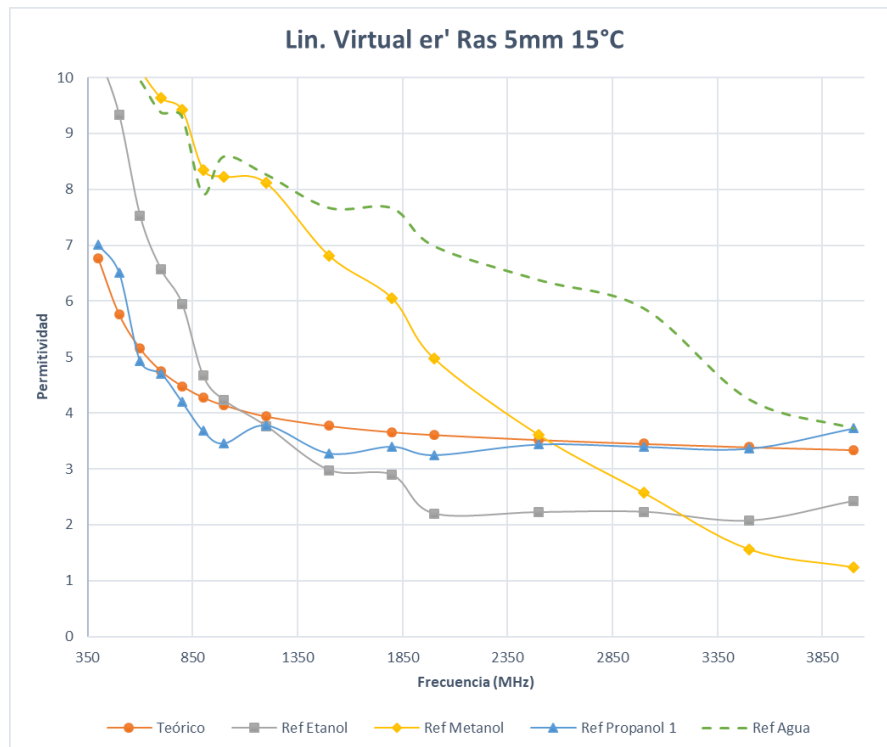


Figura A.27: Parte real de la permitividad compleja del Butanol (Modelo de Línea Virtual - 15° C)

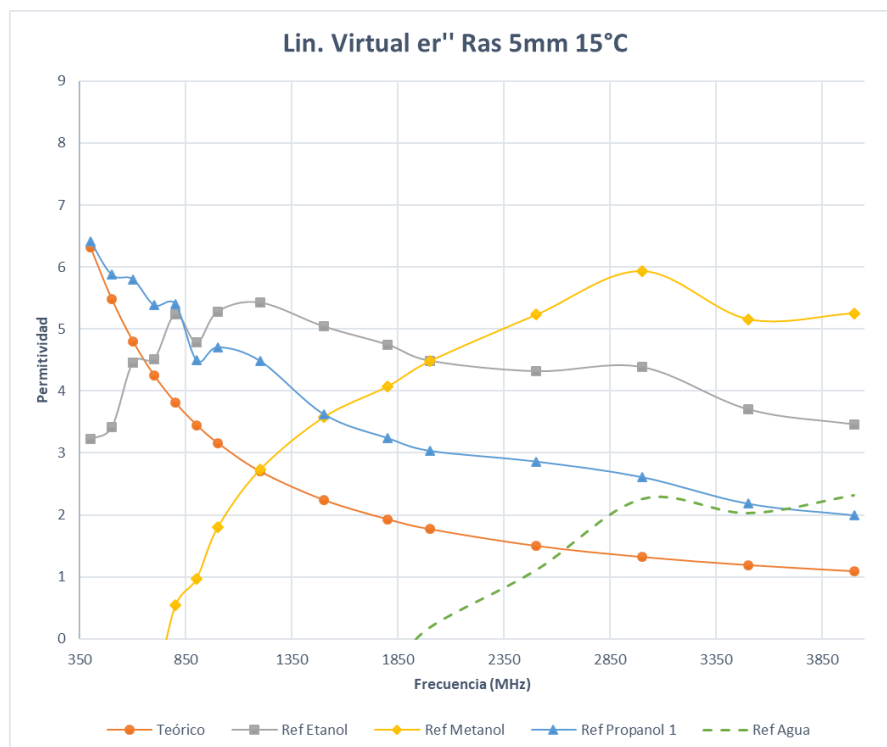


Figura A.28: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Butanol (Modelo de Línea Virtual - 15° C)

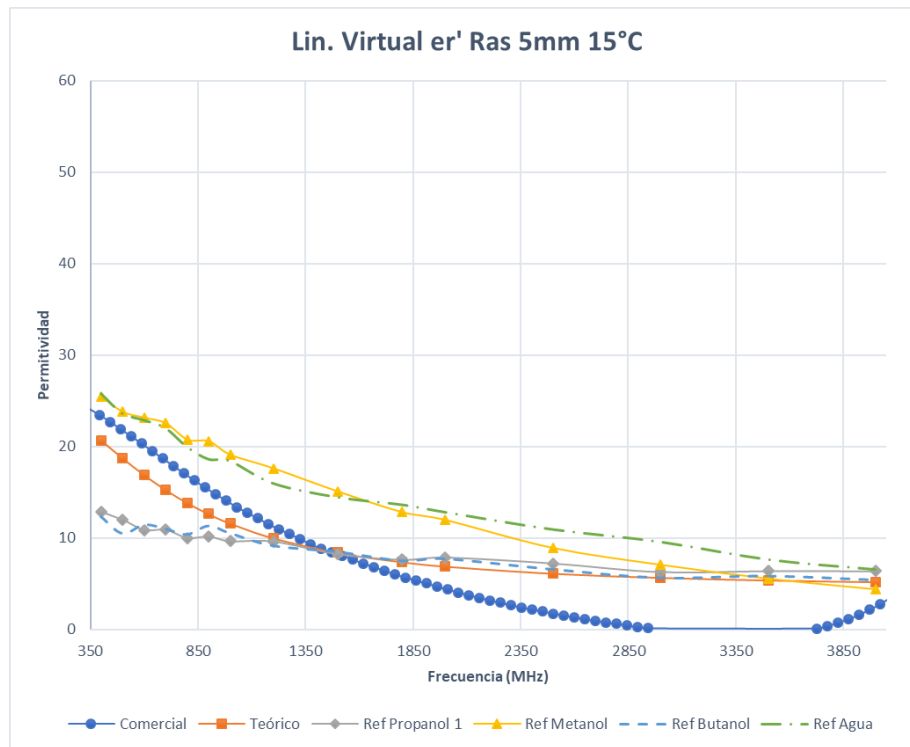


Figura A.29: Parte real de la permitividad compleja del Etanol (Modelo de Línea Virtual - 15° C)

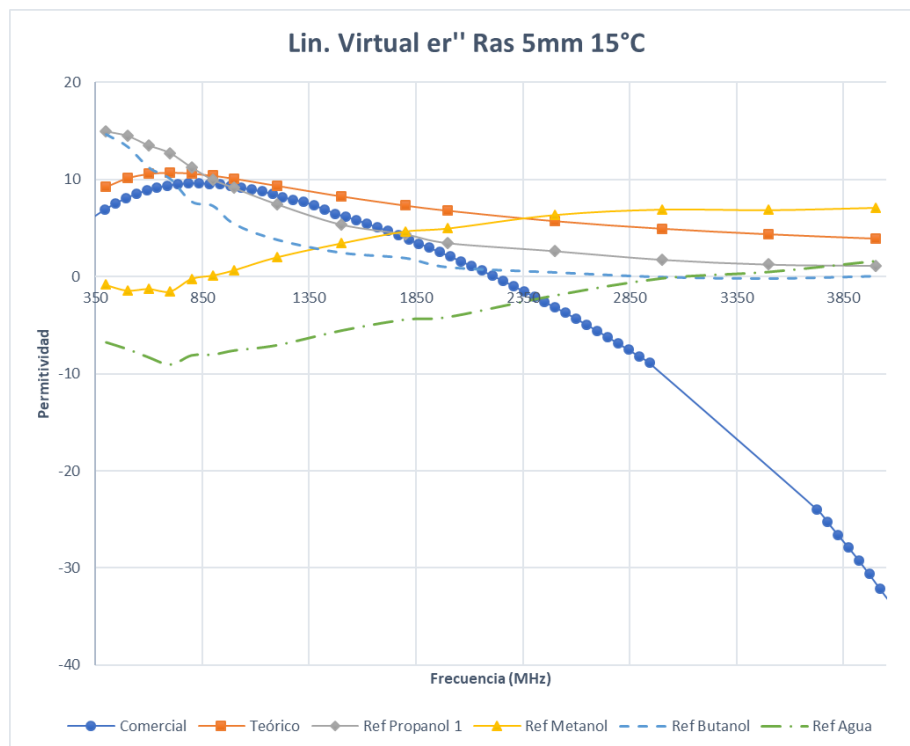


Figura A.30: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Etanol (Modelo de Línea Virtual - 15° C)

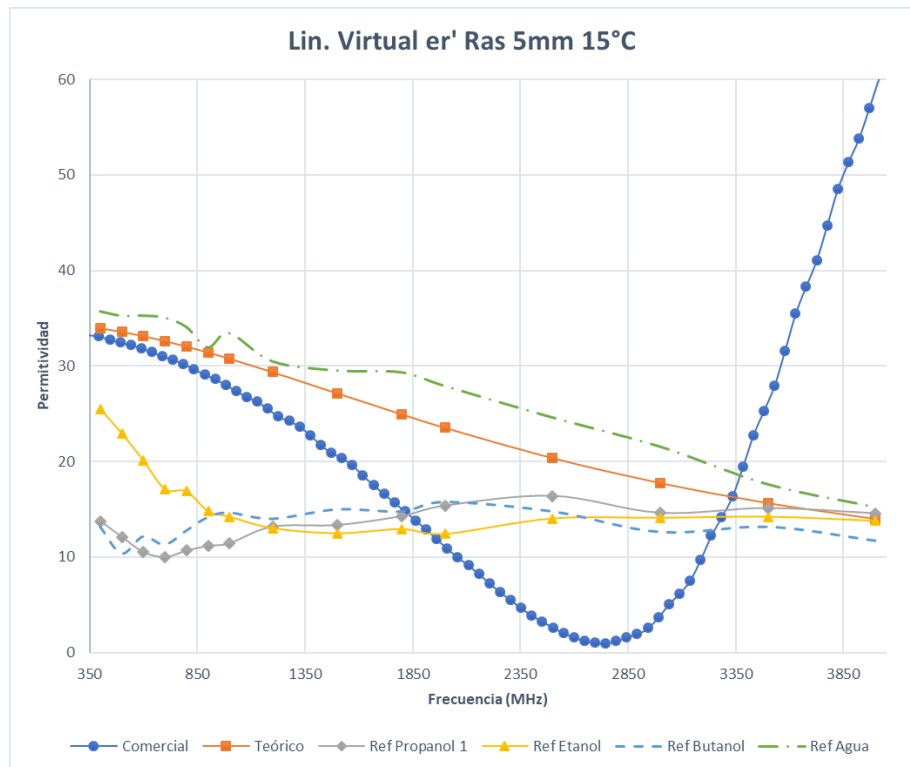


Figura A.31: Parte real de la permitividad compleja del Metanol (Modelo de Línea Virtual - 15° C)

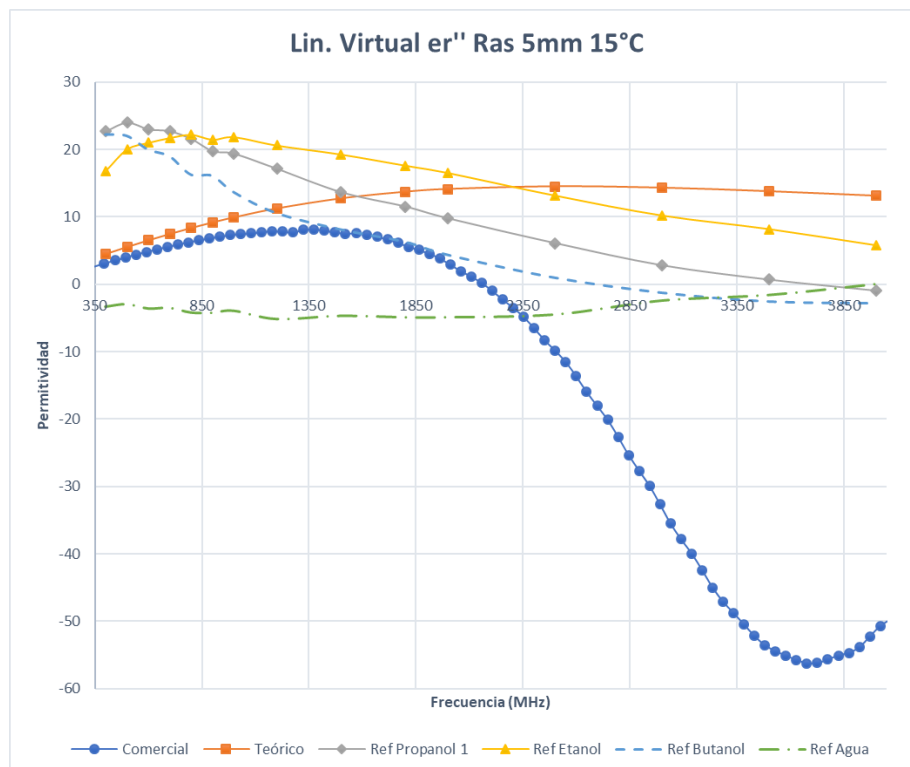


Figura A.32: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Metanol (Modelo de Línea Virtual - 15° C)

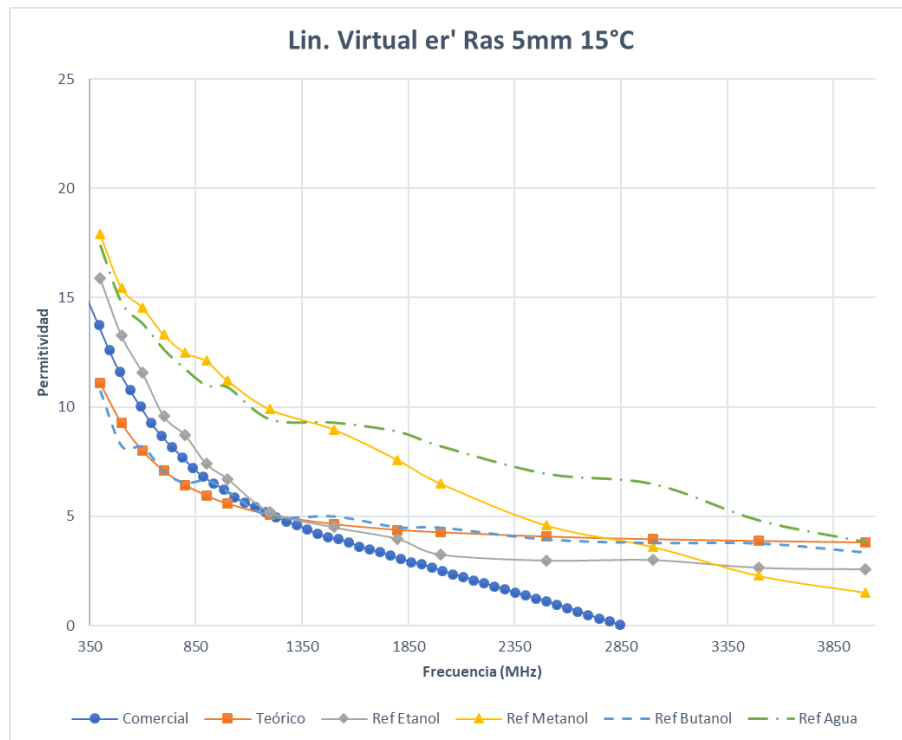


Figura A.33: Parte real de la permitividad compleja del Propanol 1 (Modelo de Línea Virtual - 15° C)

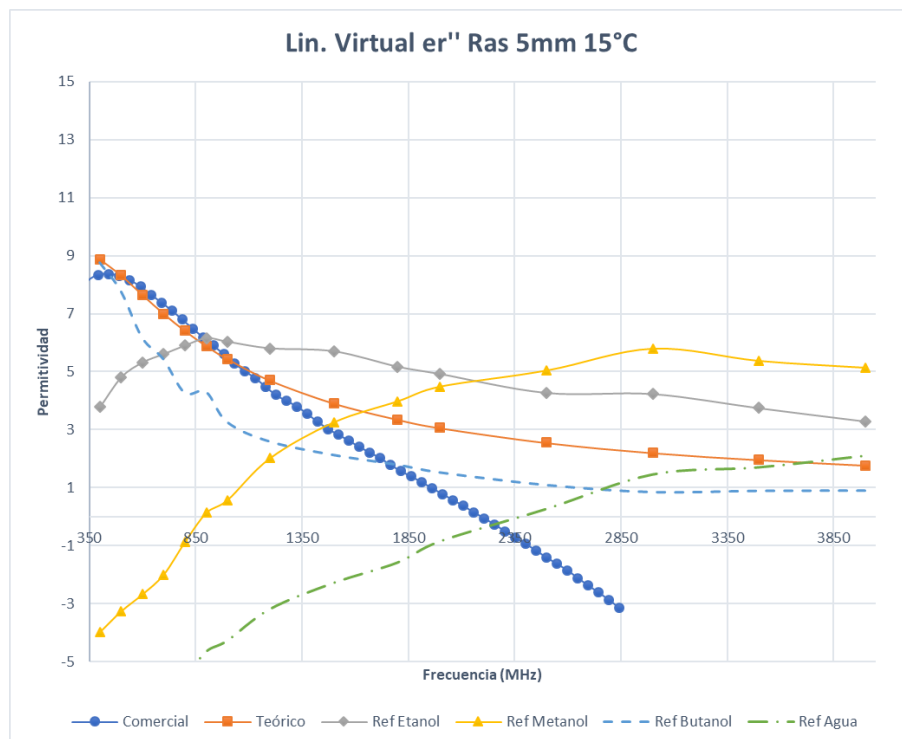


Figura A.34: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Propanol 1 (Modelo de Línea Virtual - 15° C)

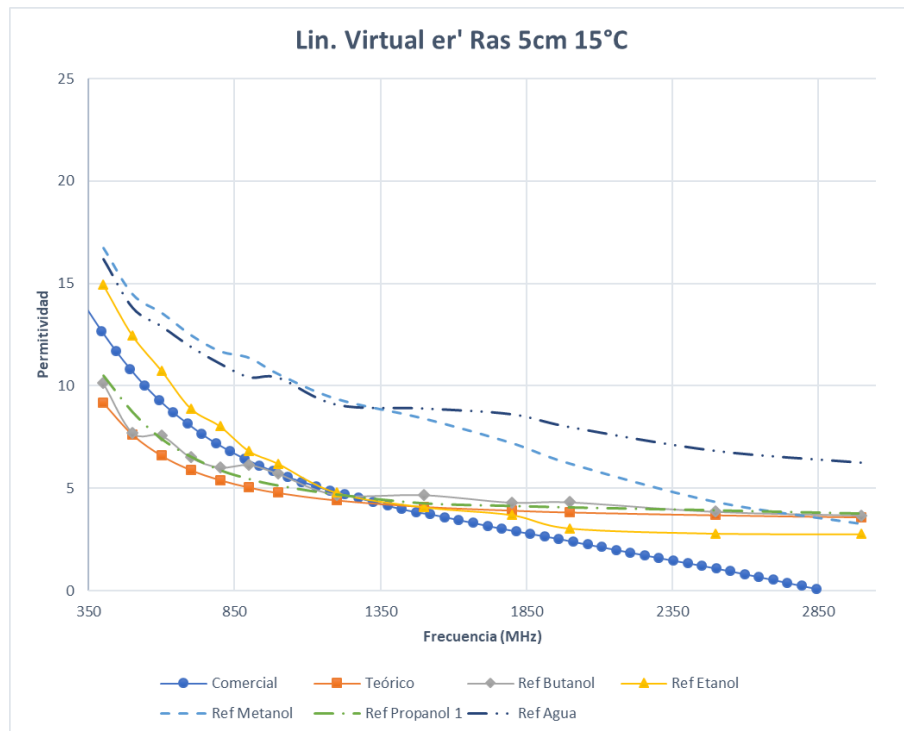


Figura A.35: Parte real de la permitividad compleja del Propanol 2 (Modelo de Línea Virtual - 15° C)

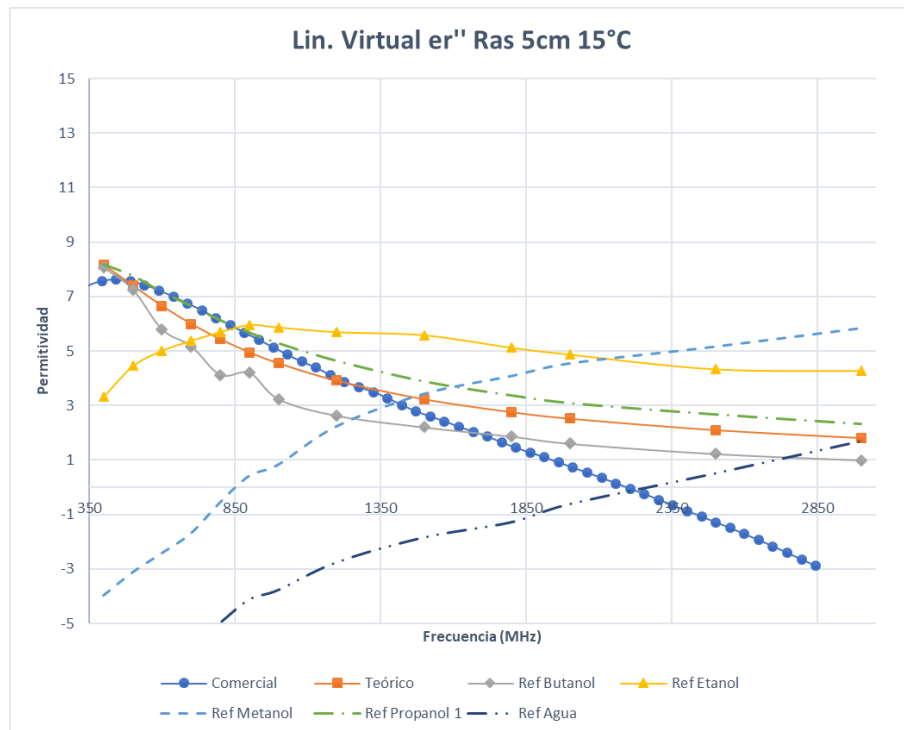


Figura A.36: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Propanol 2 (Modelo de Línea Virtual - 15° C)

A.2. Líquidos a 20° C

A.2.1. Modelo Capacitivo

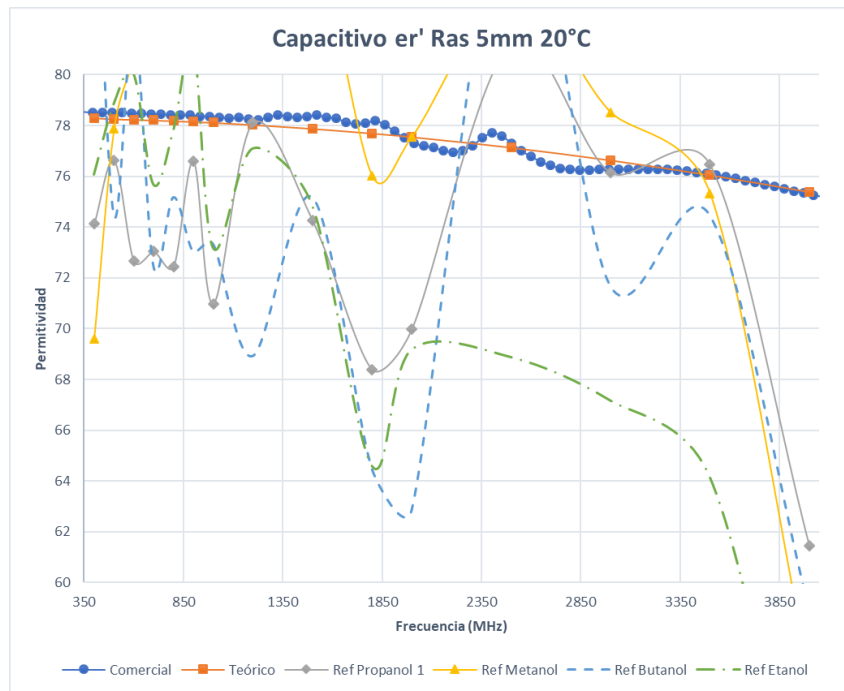


Figura A.37: Parte real de la permitividad compleja del Agua (Modelo Capacitivo - 20° C)

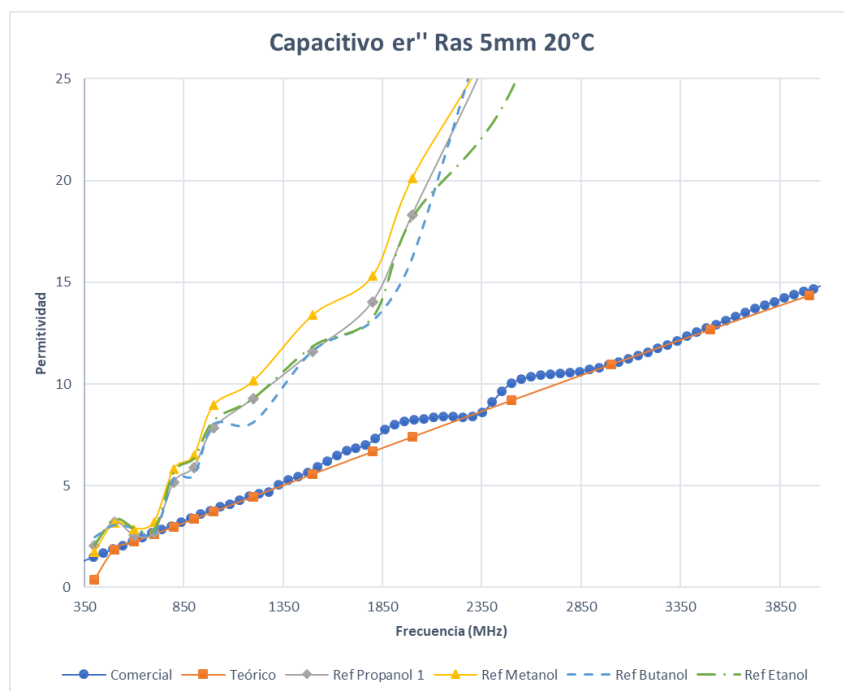


Figura A.38: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Agua (Modelo Capacitivo - 20° C)

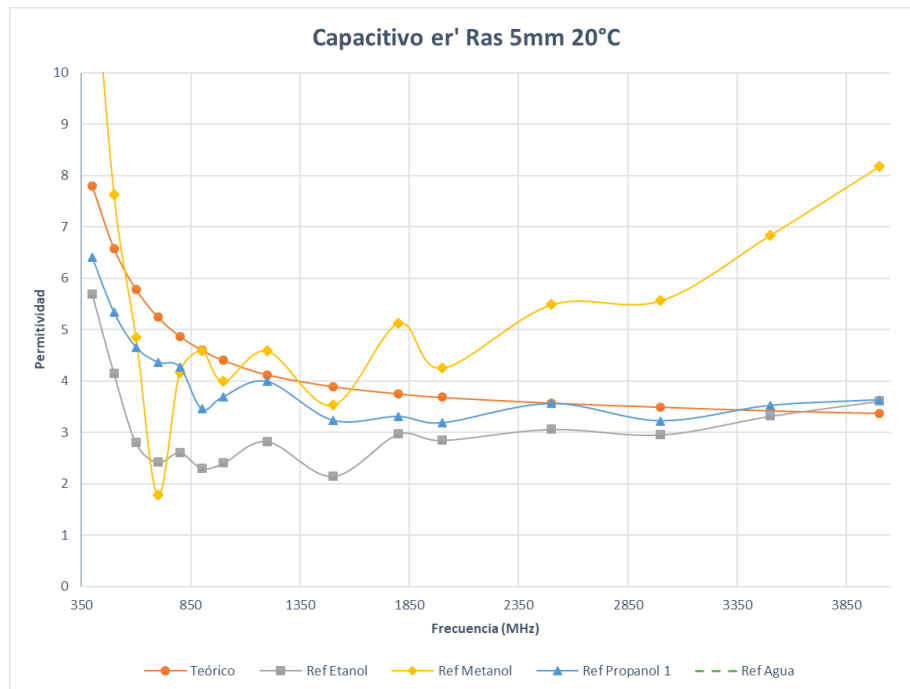


Figura A.39: Parte real de la permitividad compleja del Butanol (Modelo Capacitivo - 20° C)

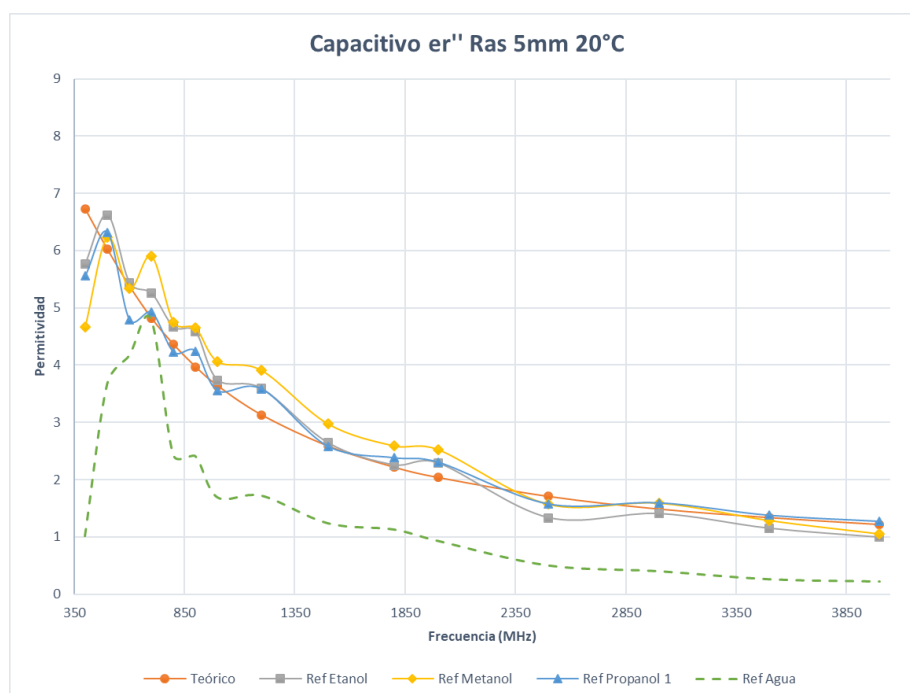


Figura A.40: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Butanol (Modelo Capacitivo - 20° C)

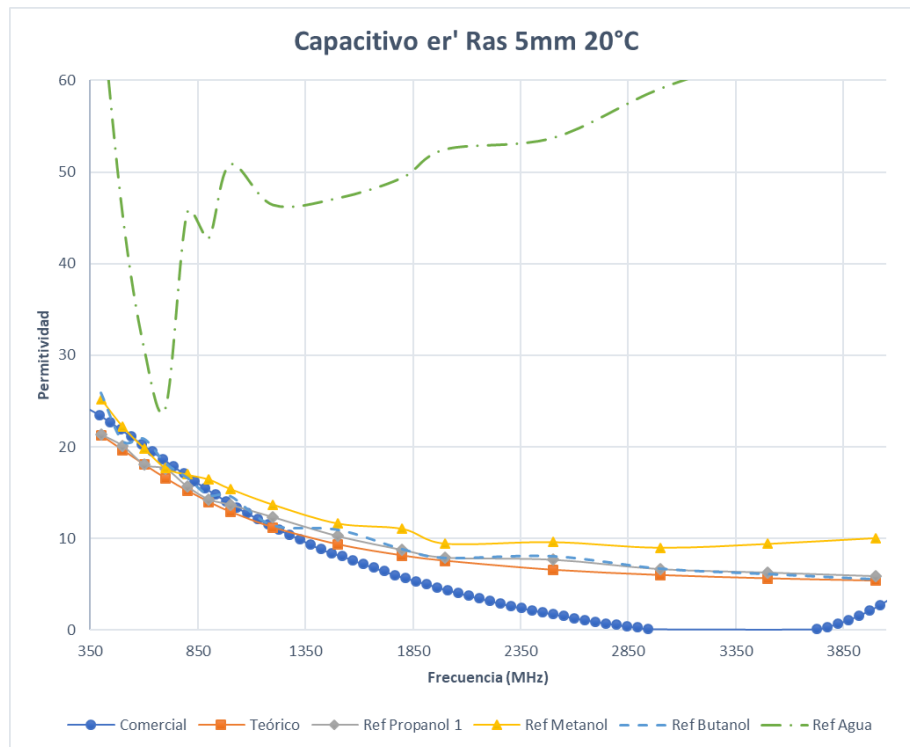


Figura A.41: Parte real de la permitividad compleja del Etanol (Modelo Capacitivo - 20° C)

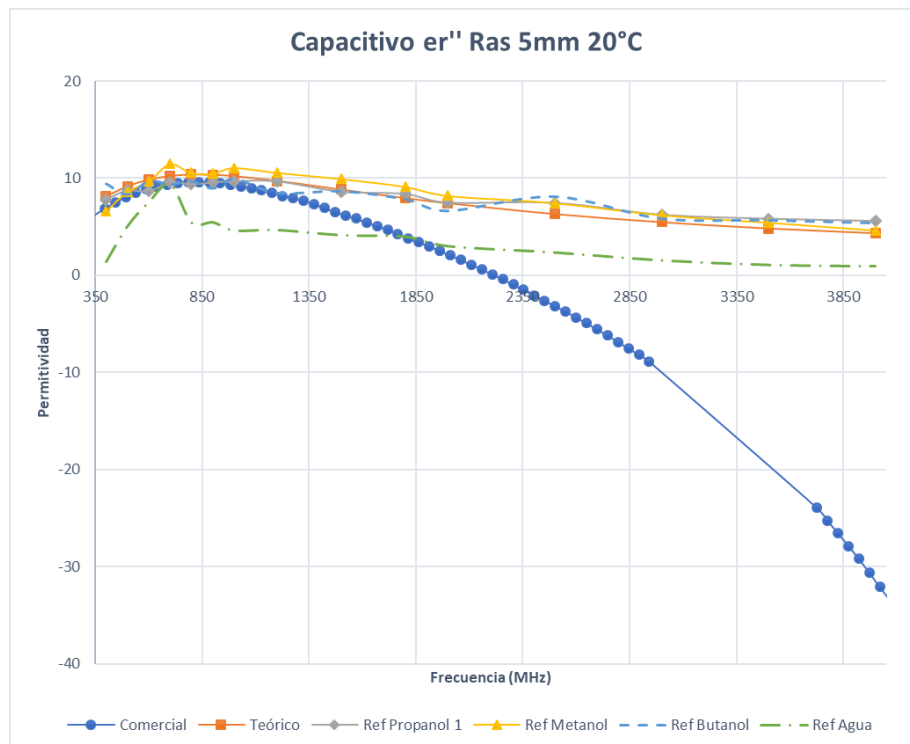


Figura A.42: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Etanol (Modelo Capacitivo - 20° C)

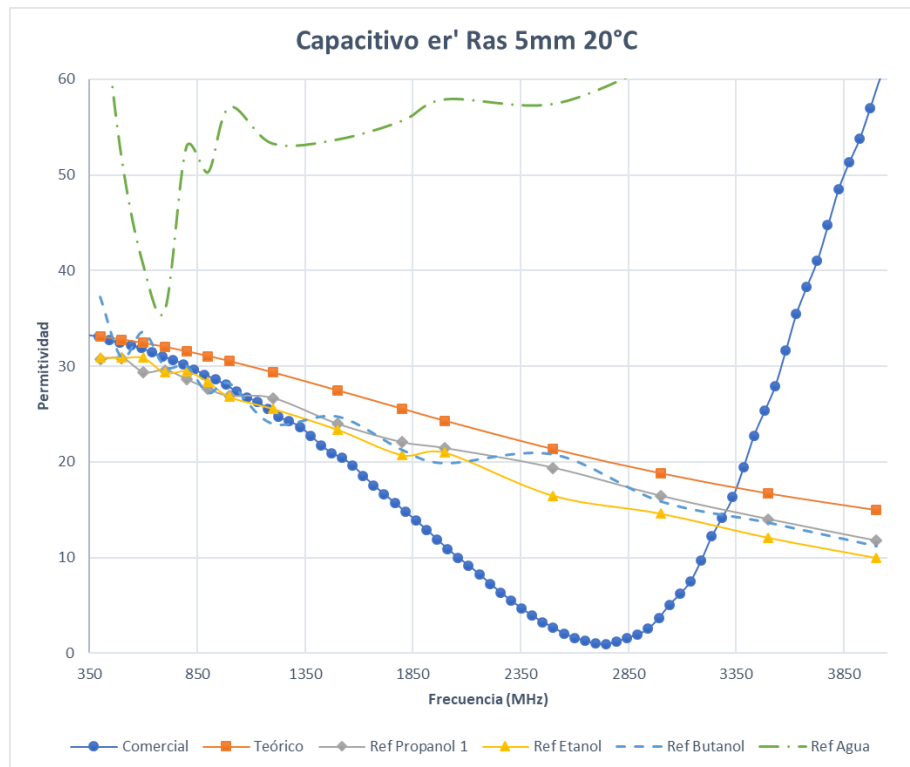


Figura A.43: Parte real de la permitividad compleja del Metanol (Modelo Capacitivo - 20° C)

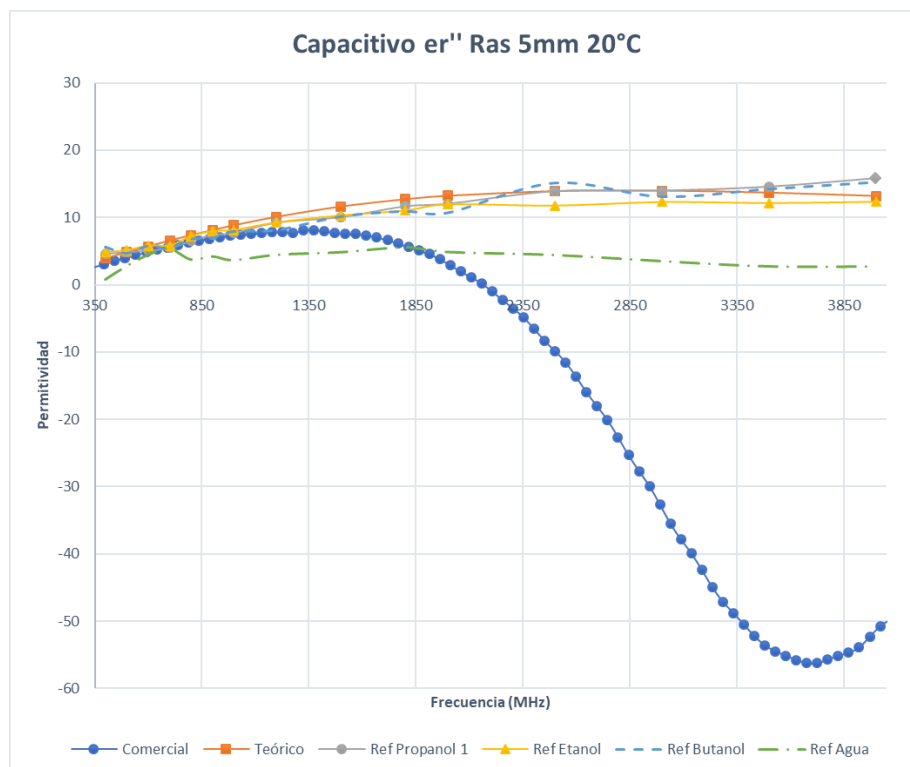


Figura A.44: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Metanol (Modelo Capacitivo - 20° C)

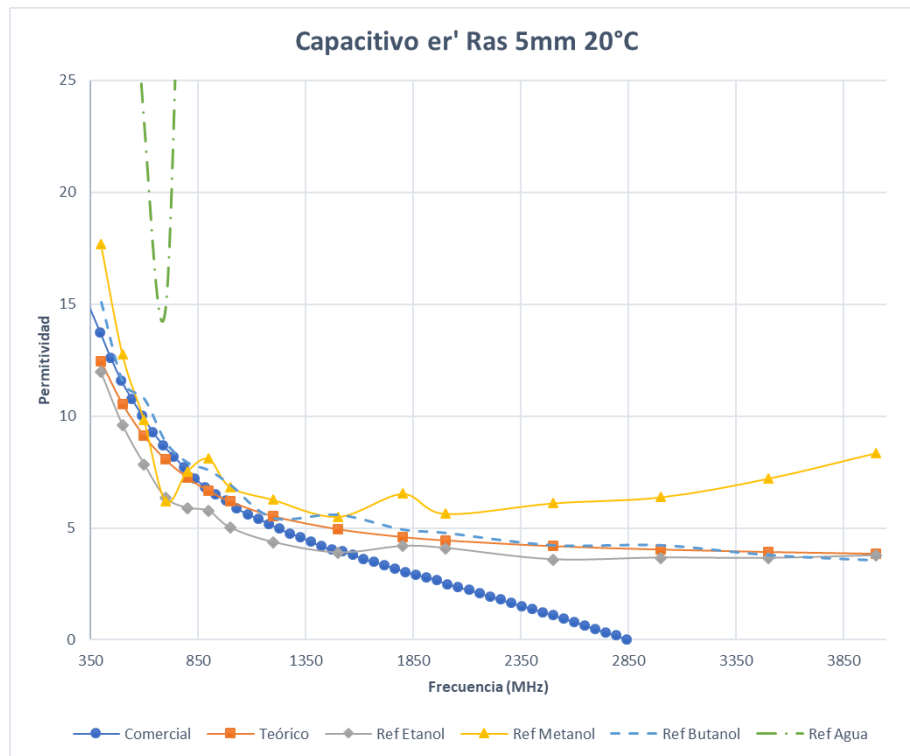


Figura A.45: Parte real de la permitividad compleja del Propanol 1 (Modelo Capacitivo - 20° C)

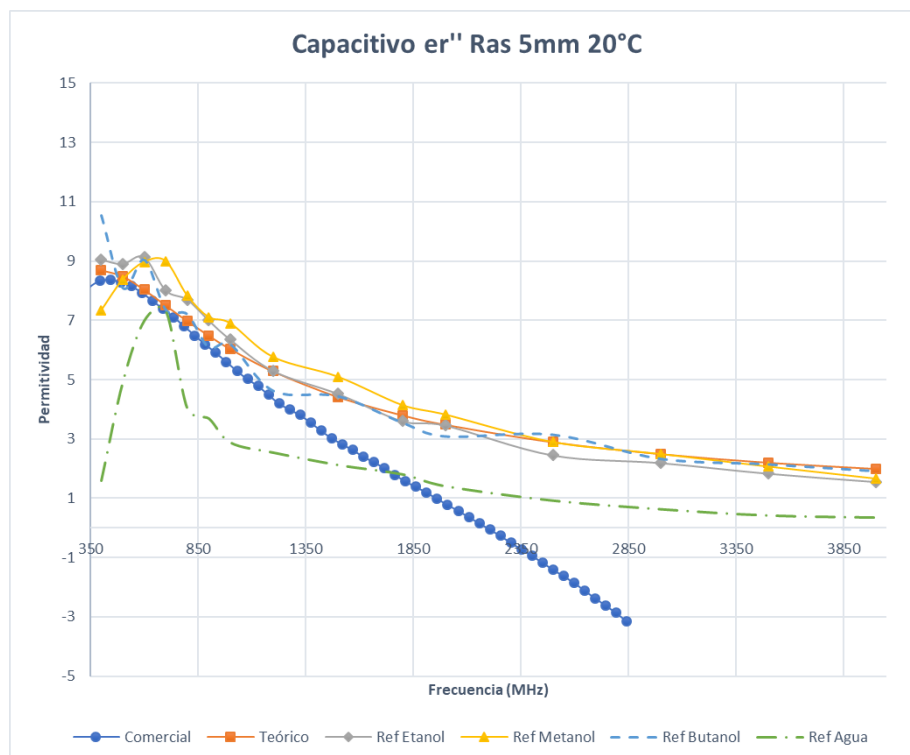


Figura A.46: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Propanol 1 (Modelo Capacitivo - 20° C)

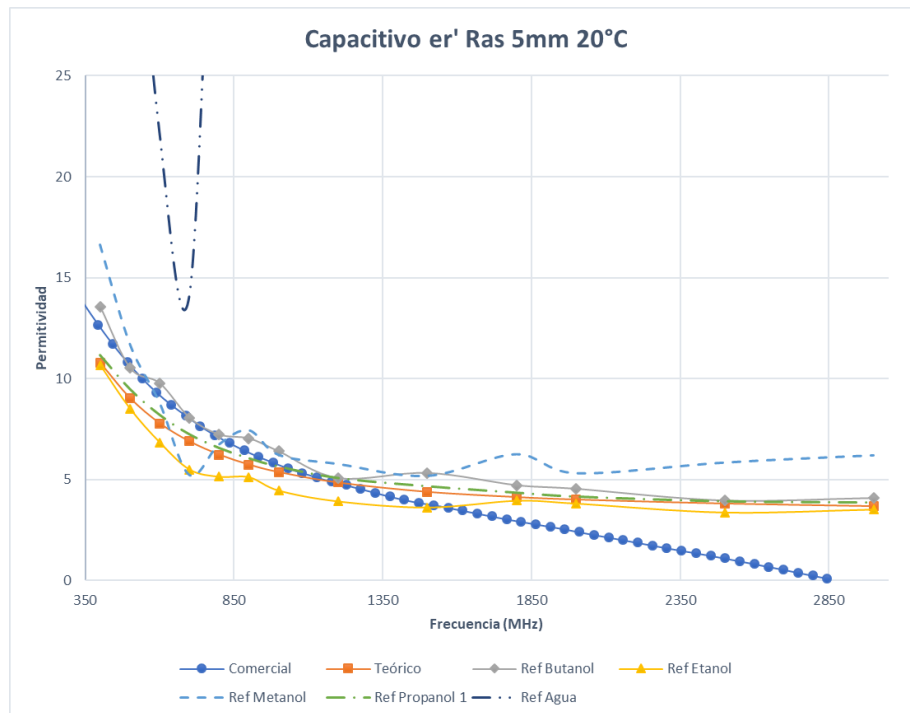


Figura A.47: Parte real de la permitividad compleja del Propanol 2 (Modelo Capacitivo - 20° C)

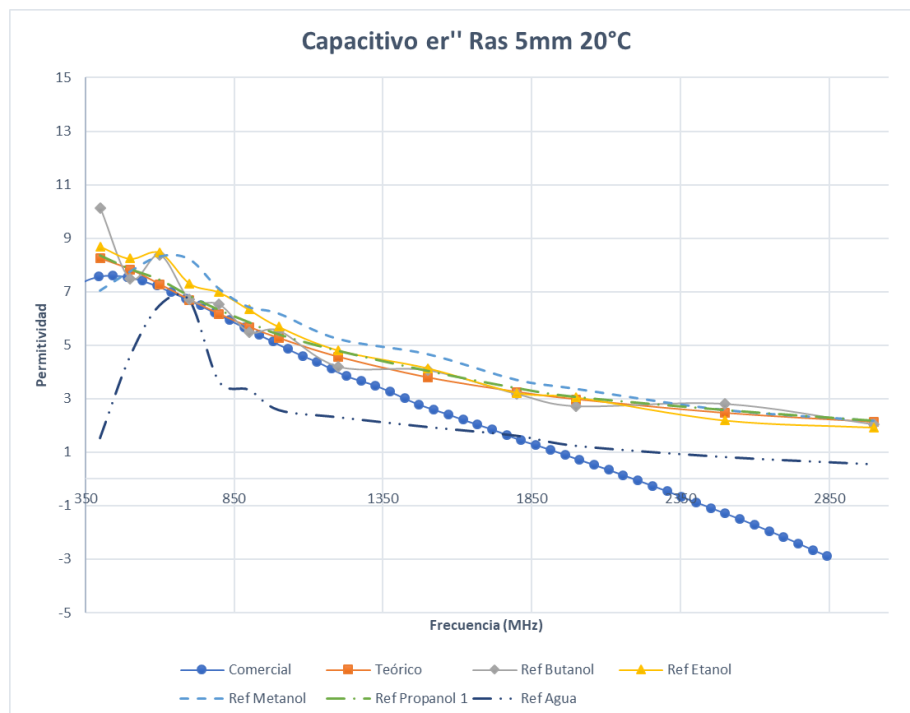


Figura A.48: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Propanol 2 (Modelo Capacitivo - 20° C)

A.2.2. Modelo de Antena

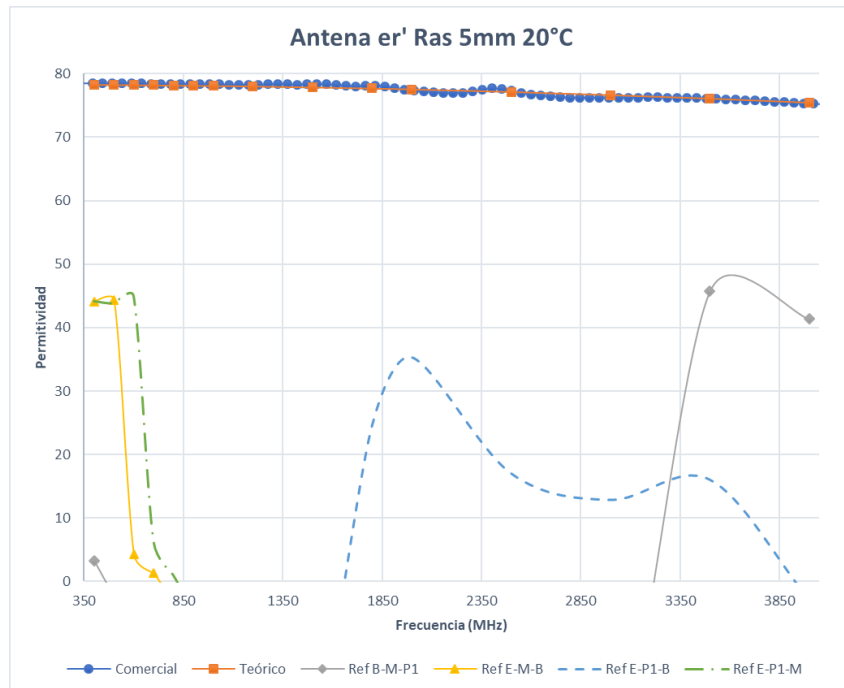


Figura A.49: Parte real de la permitividad compleja del Agua (Modelo de Antena - 20° C)

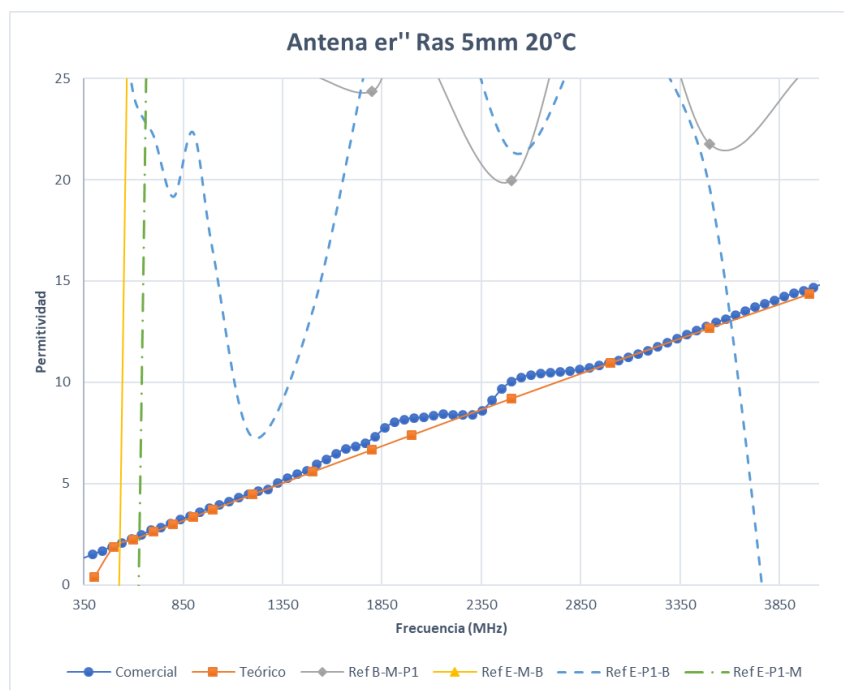


Figura A.50: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Agua (Modelo de Antena - 20° C)

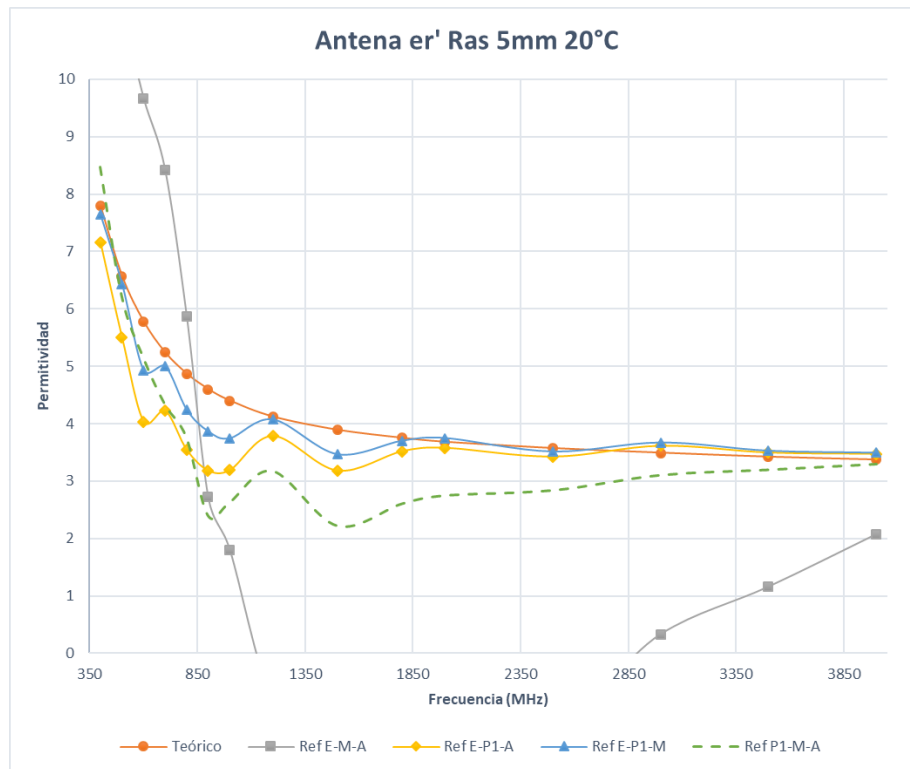


Figura A.51: Parte real de la permitividad compleja del Butanol (Modelo de Antena - 20° C)

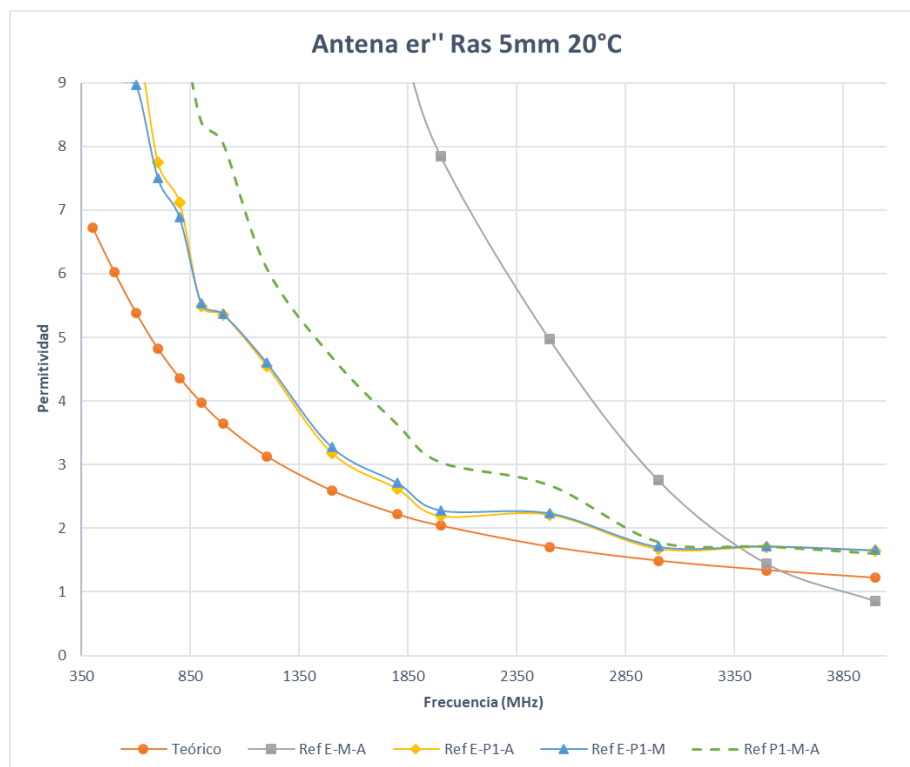


Figura A.52: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Butanol (Modelo de Antena - 20° C)

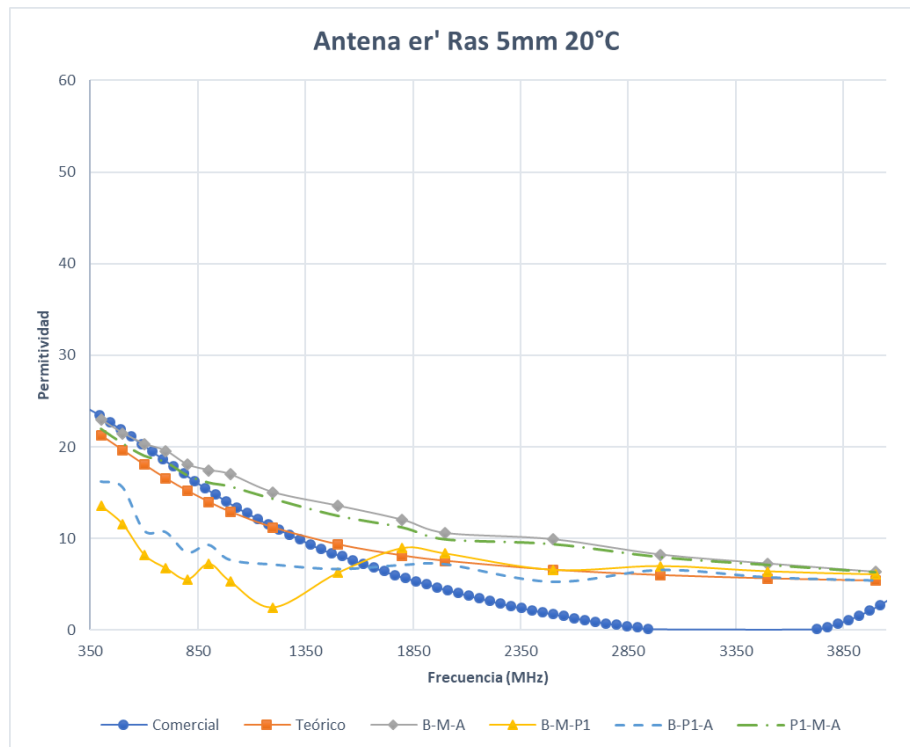


Figura A.53: Parte real de la permitividad compleja del Etanol (Modelo de Antena - 20° C)

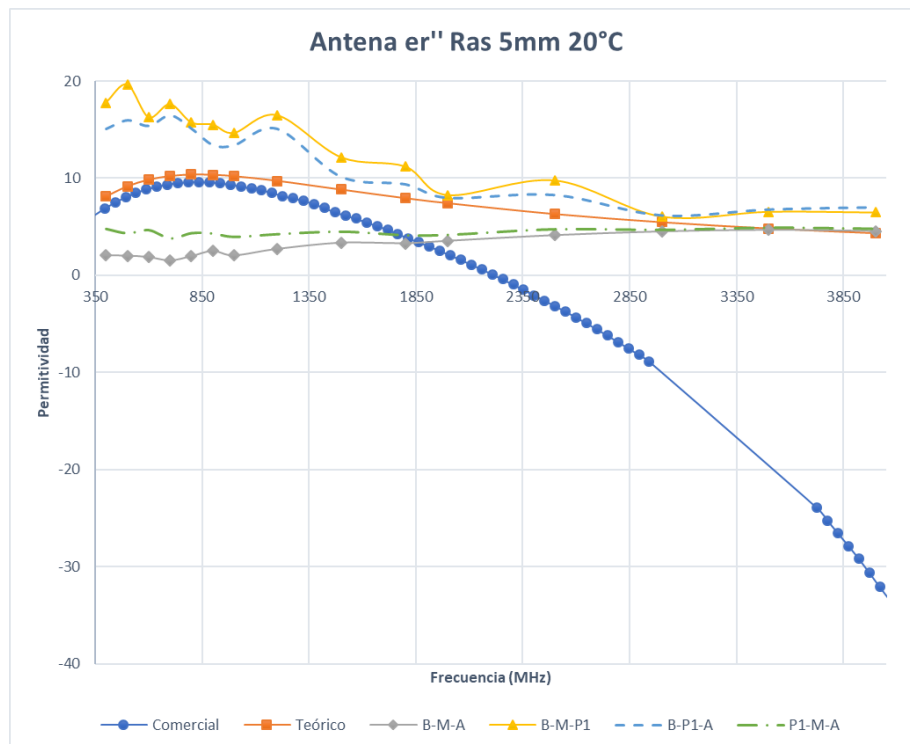


Figura A.54: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Etanol (Modelo de Antena - 20° C)

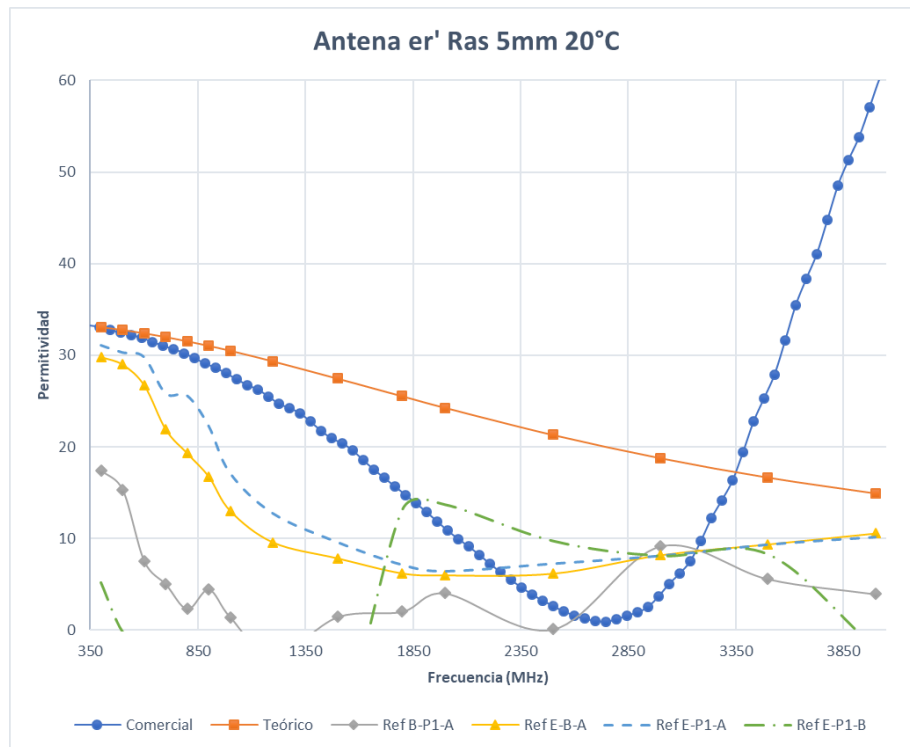


Figura A.55: Parte real de la permitividad compleja del Metanol (Modelo de Antena - 20° C)

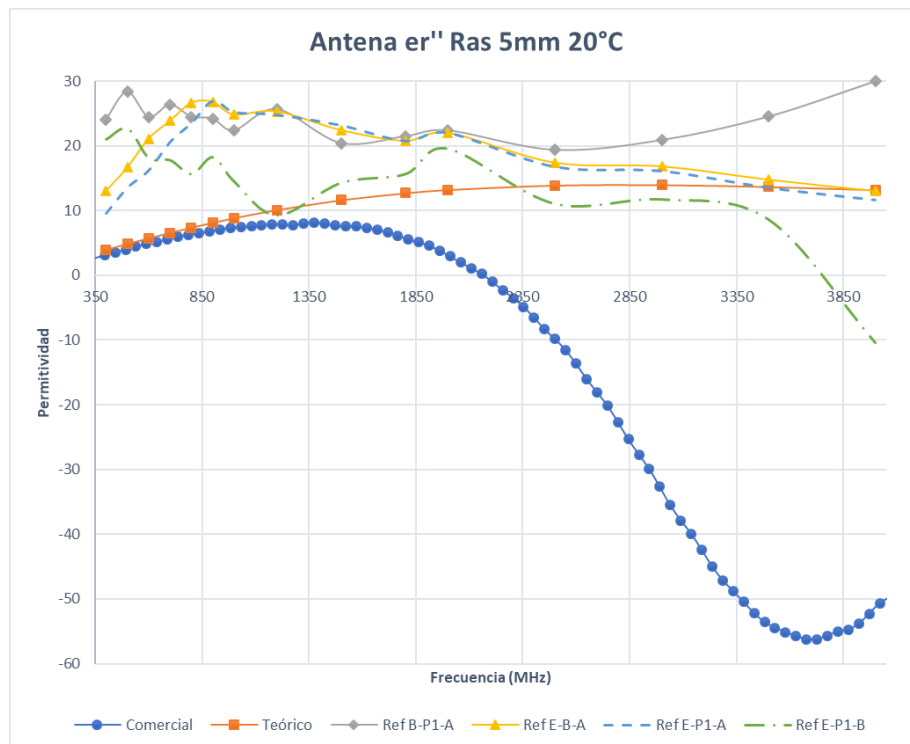


Figura A.56: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Metanol (Modelo de Antena - 20° C)

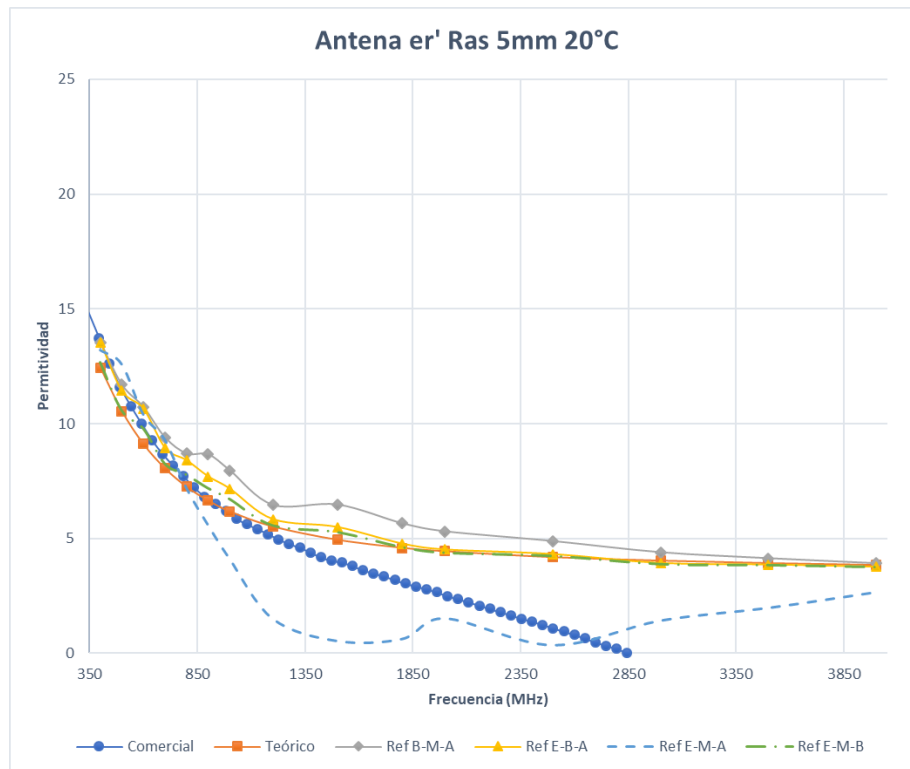


Figura A.57: Parte real de la permitividad compleja del Propanol 1 (Modelo de Antena - 20° C)

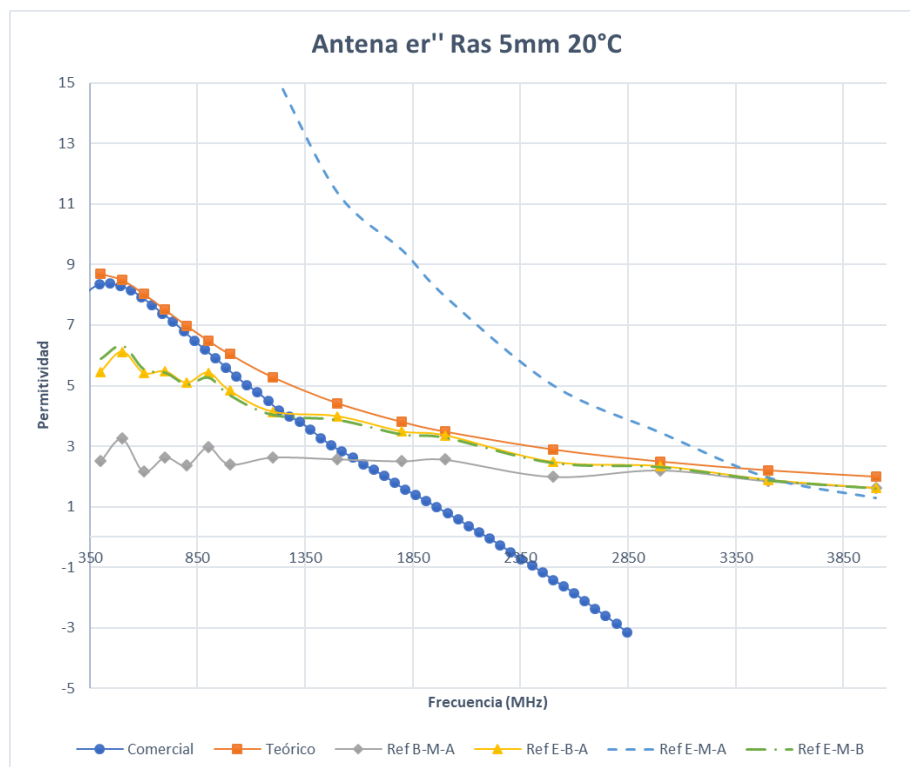


Figura A.58: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Propanol 1 (Modelo de Antena - 20° C)

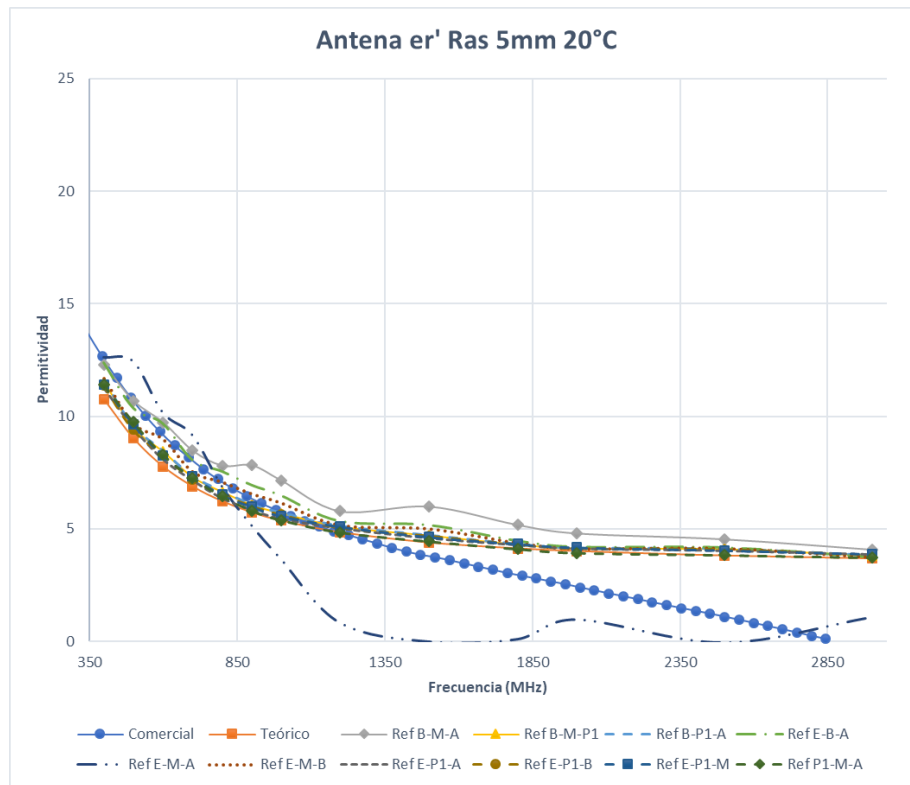


Figura A.59: Parte real de la permitividad compleja del Propanol 2 (Modelo de Antena - 20° C)

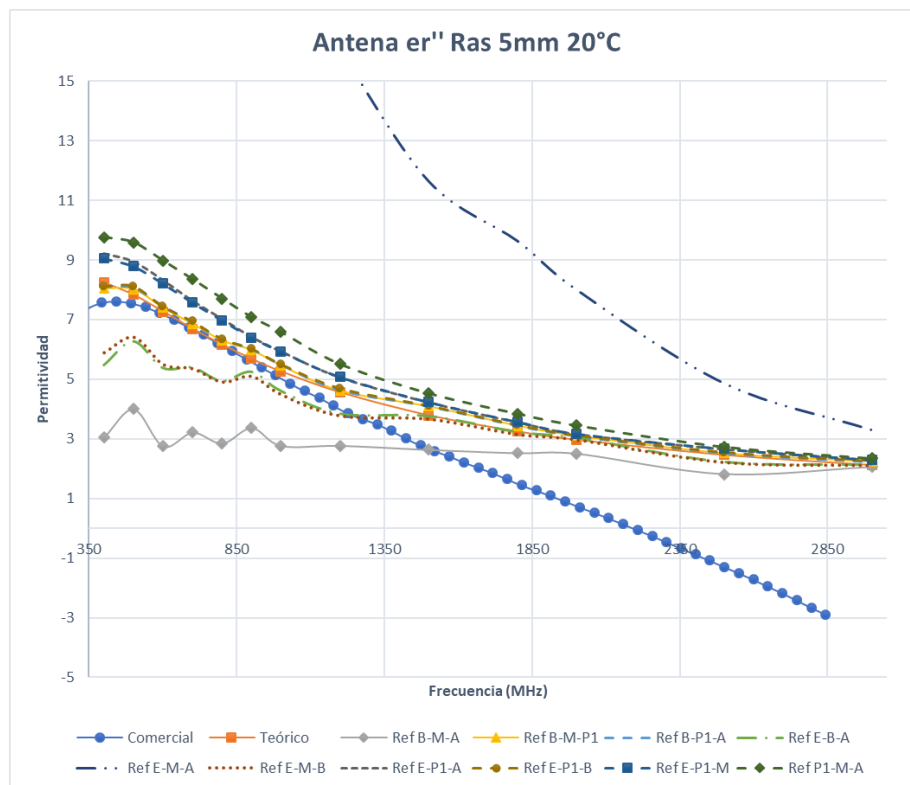


Figura A.60: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Propanol 2 (Modelo de Antena - 20° C)

A.2.3. Modelo de Línea Virtual

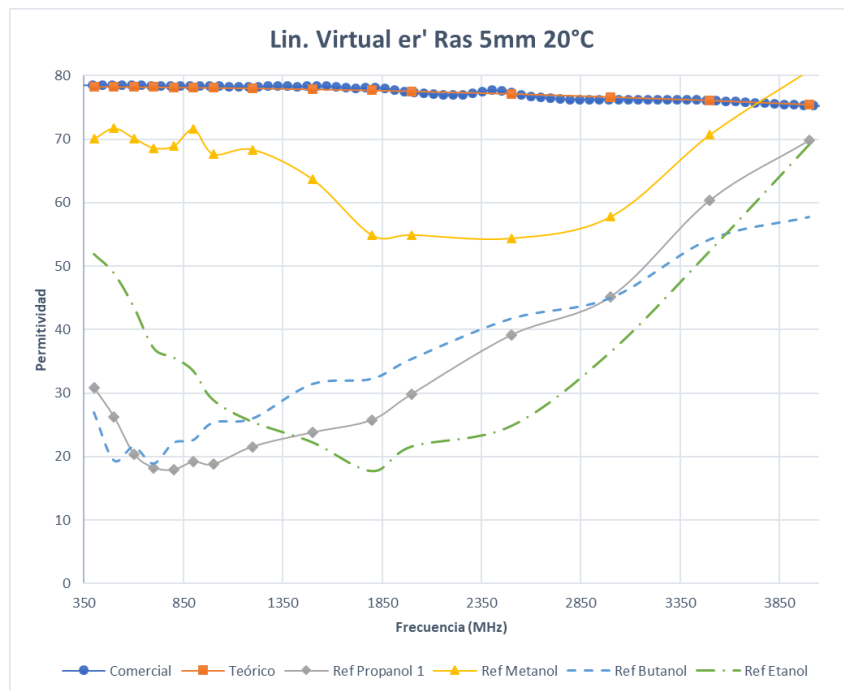


Figura A.61: Parte real de la permitividad compleja del Agua (Modelo de Línea Virtual - 20° C)

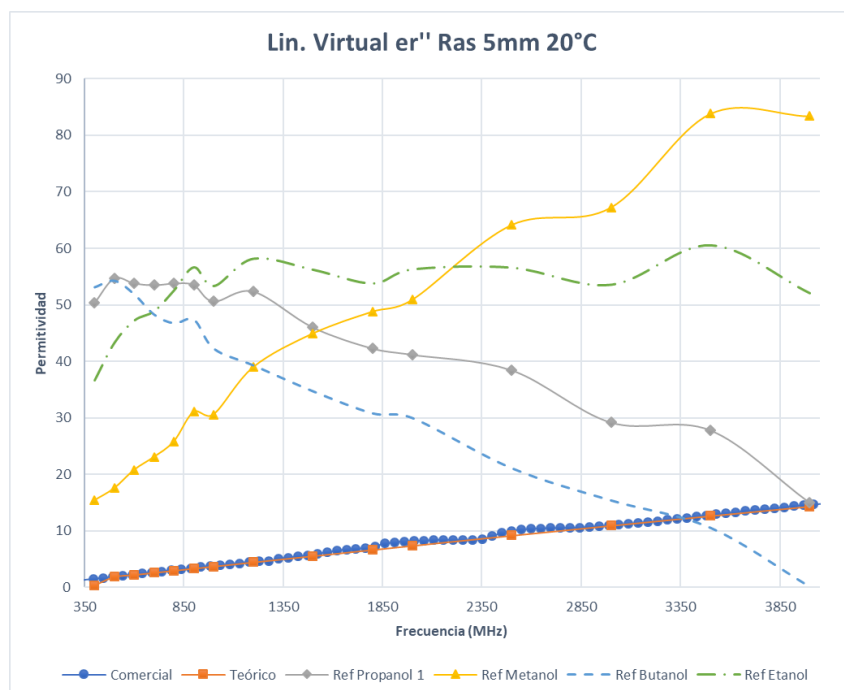


Figura A.62: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Agua (Modelo de Línea Virtual - 20° C)

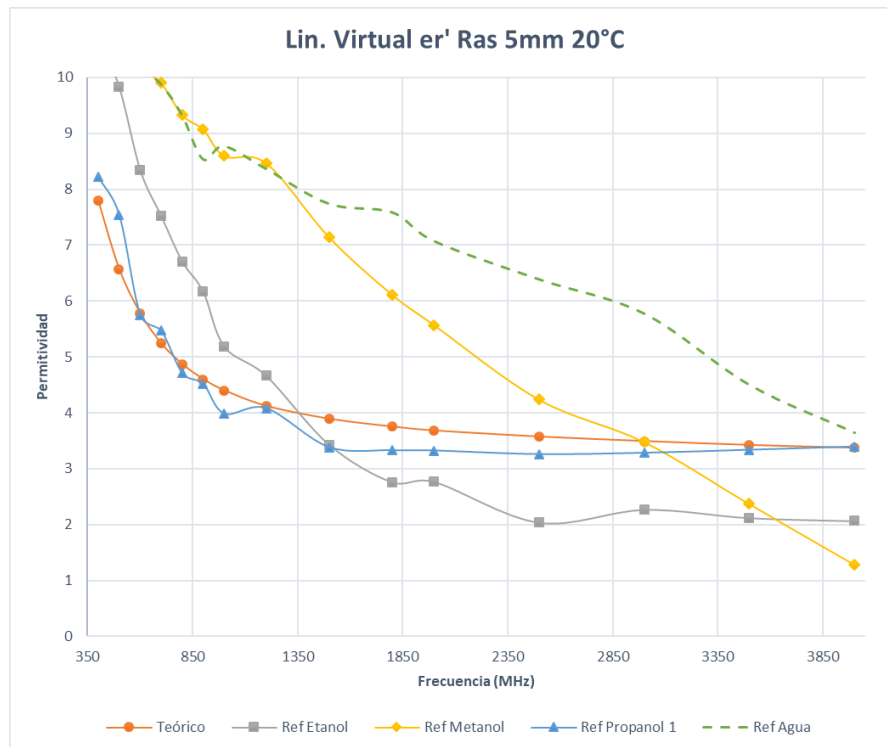


Figura A.63: Parte real de la permitividad compleja del Butanol (Modelo de Línea Virtual - 20° C)

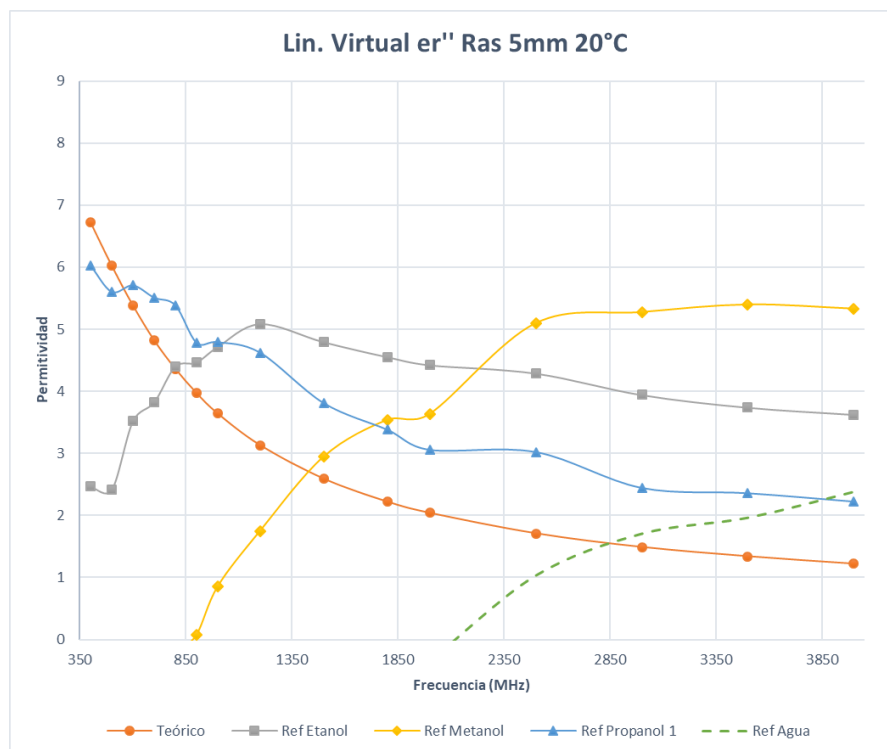


Figura A.64: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Butanol (Modelo de Línea Virtual - 20° C)

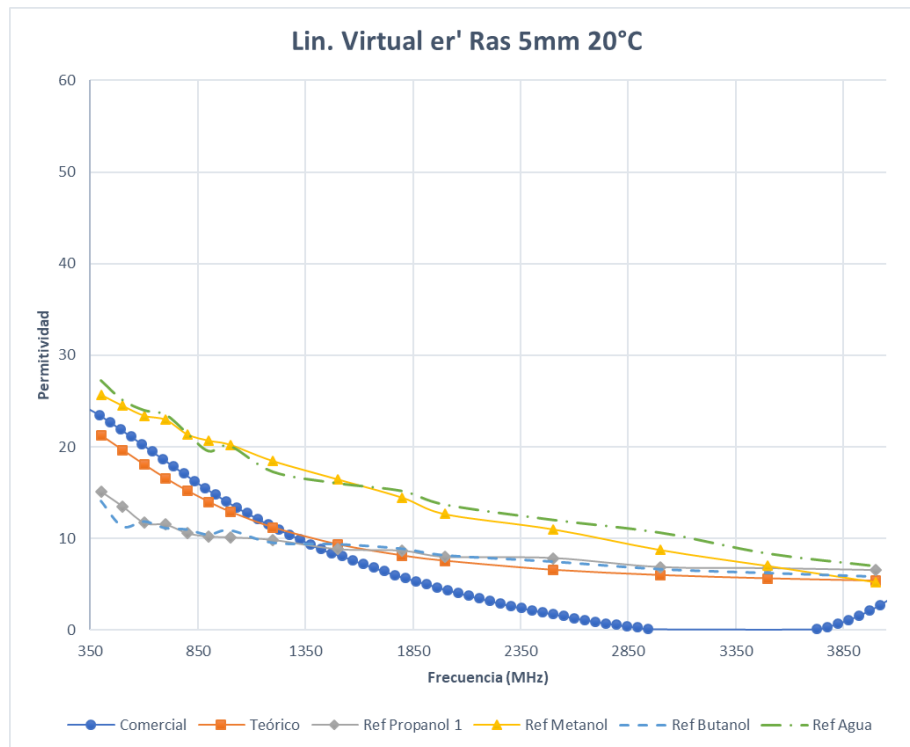


Figura A.65: Parte real de la permitividad compleja del Etanol (Modelo de Línea Virtual - 20° C)

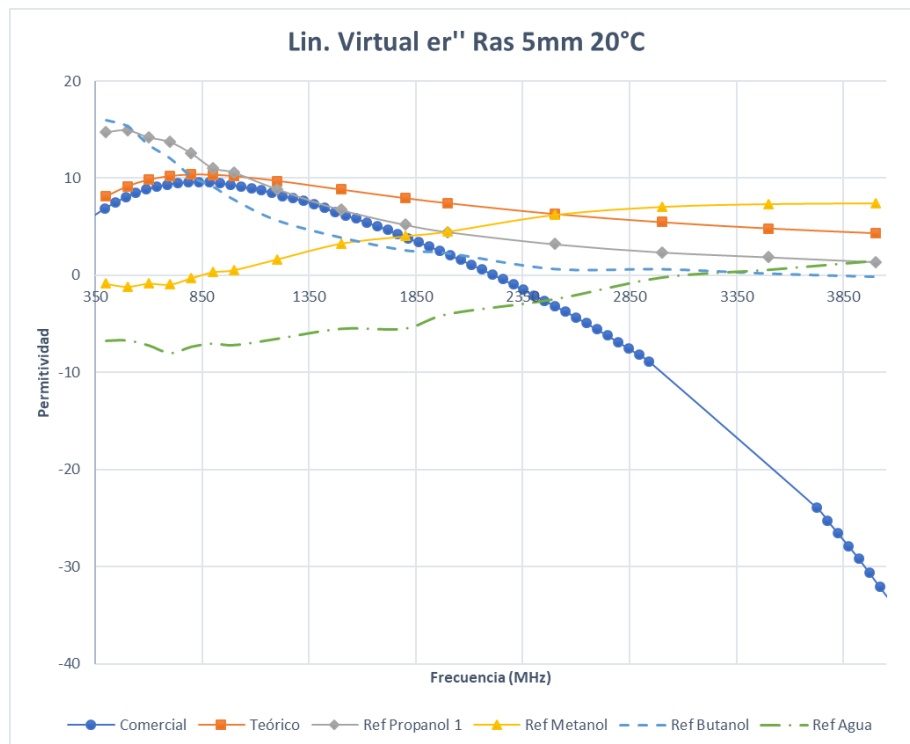


Figura A.66: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Etanol (Modelo de Línea Virtual - 20° C)

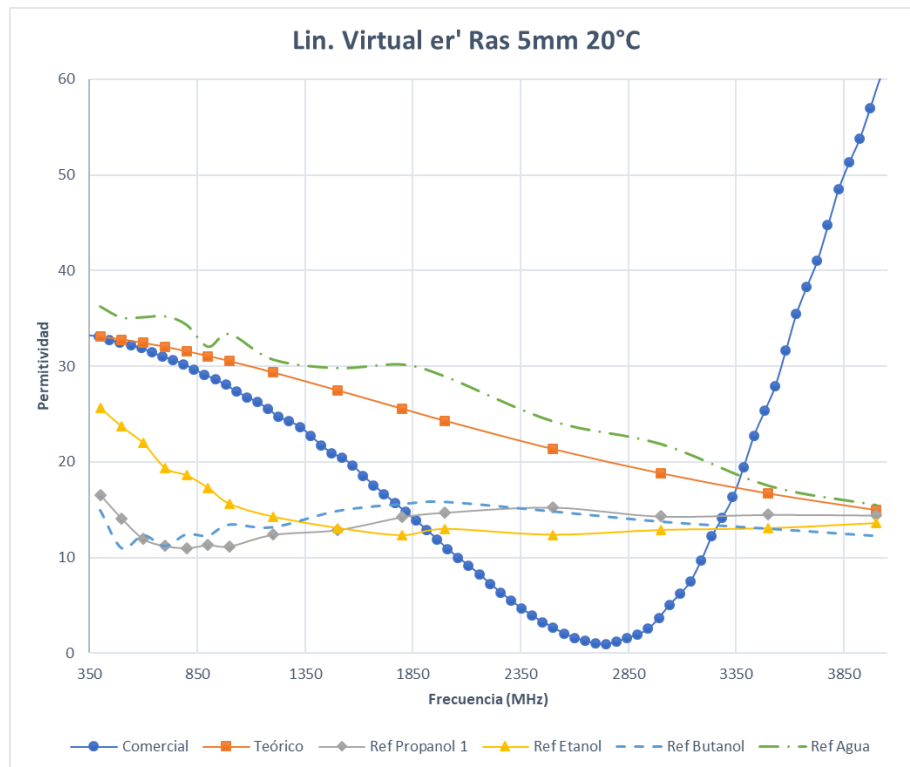


Figura A.67: Parte real de la permitividad compleja del Metanol (Modelo de Línea Virtual - 20° C)

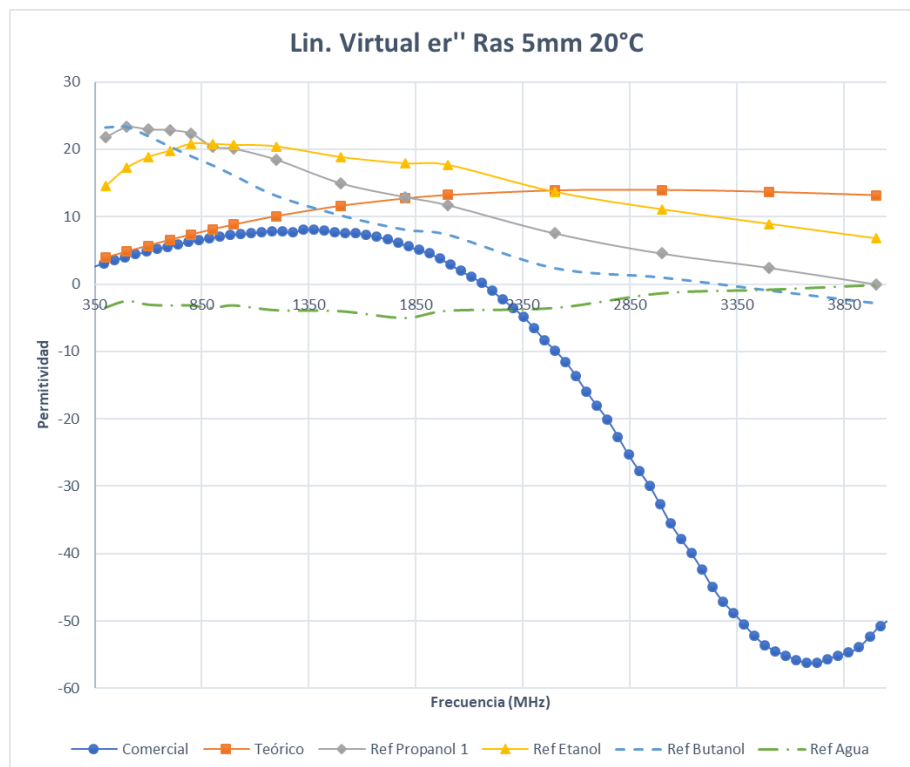


Figura A.68: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Metanol (Modelo de Línea Virtual - 20° C)

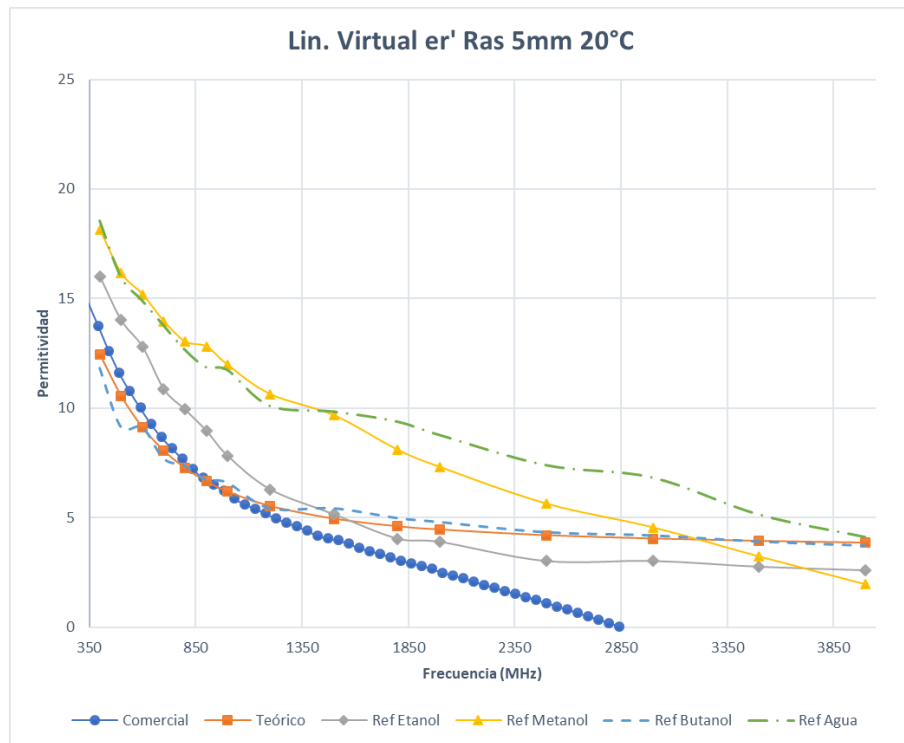


Figura A.69: Parte real de la permitividad compleja del Propanol 1 (Modelo de Línea Virtual - 20° C)

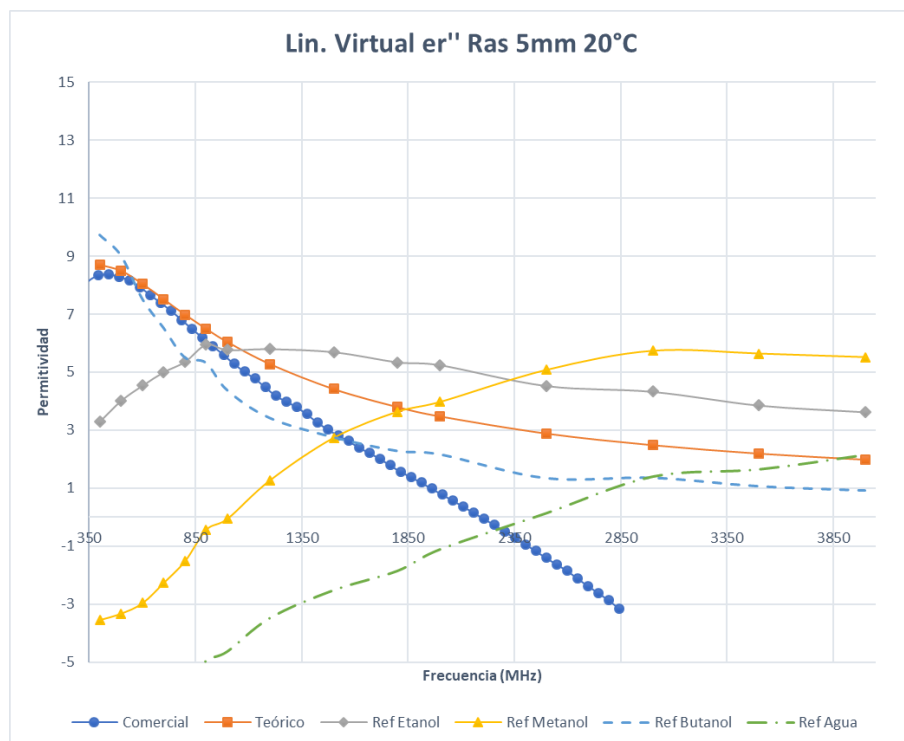


Figura A.70: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Propanol 1 (Modelo de Línea Virtual - 20° C)

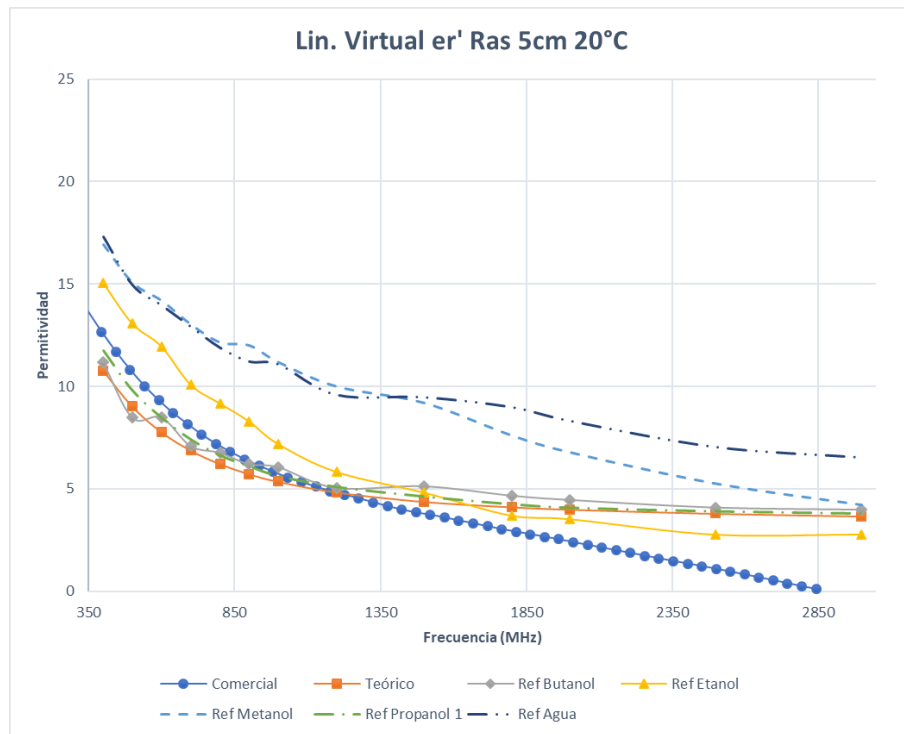


Figura A.71: Parte real de la permitividad compleja del Propanol 2 (Modelo de Línea Virtual - 20° C)

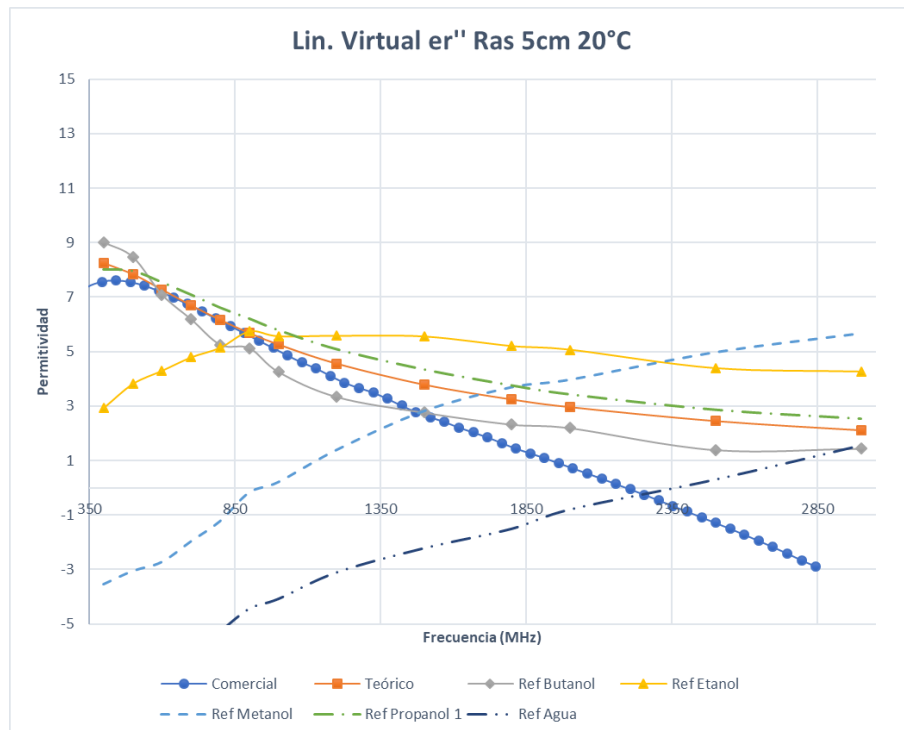


Figura A.72: Parte imaginaria de la permitividad compleja del Propanol 2 (Modelo de Línea Virtual - 20° C)



Comportamiento del error porcentual en función de la frecuencia

En este anexo se muestra, mediante gráficas, el comportamiento que tiene el porcentaje de error de la permitividad compleja en función de la frecuencia que presenta el modelo capacitivo con distintos líquidos de referencia al medir el coeficiente de reflexión utilizando la sonda de 5mm de longitud a una temperatura de 15°C. Cada líquido de referencia tiene dos gráficas asociadas, una para el error porcentual de la parte real y otra para el de la parte imaginaria de la permitividad compleja. De manera que al utilizar dicho líquido para la calibración del modelo matemático se calcula la permitividad compleja de los 5 líquidos restantes.

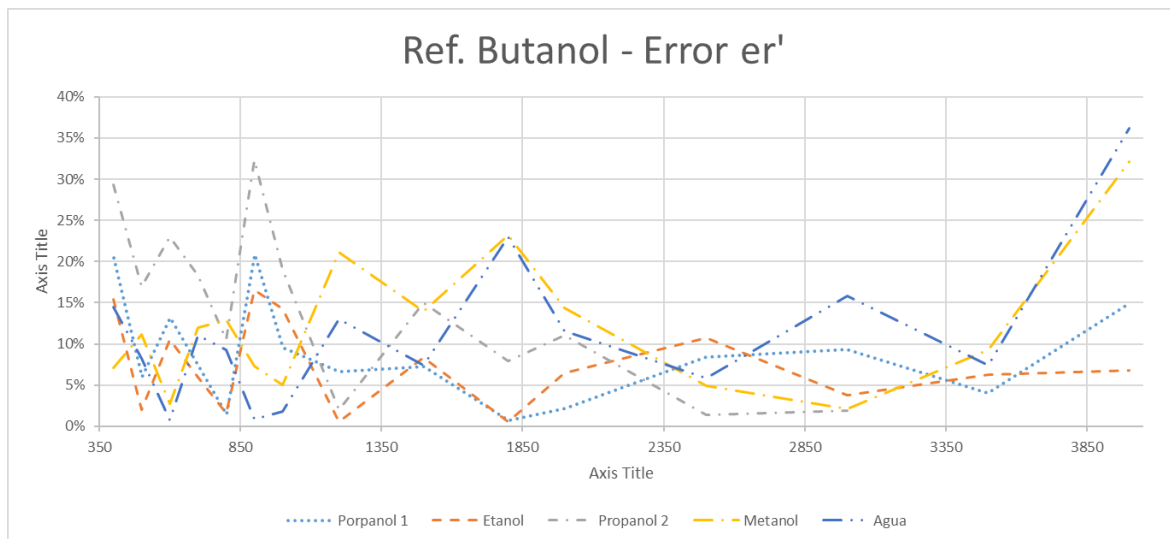


Figura B.1: Porcentaje de error en función de la frecuencia al utilizar el Butanol como líquido de referencia (ϵ_r')

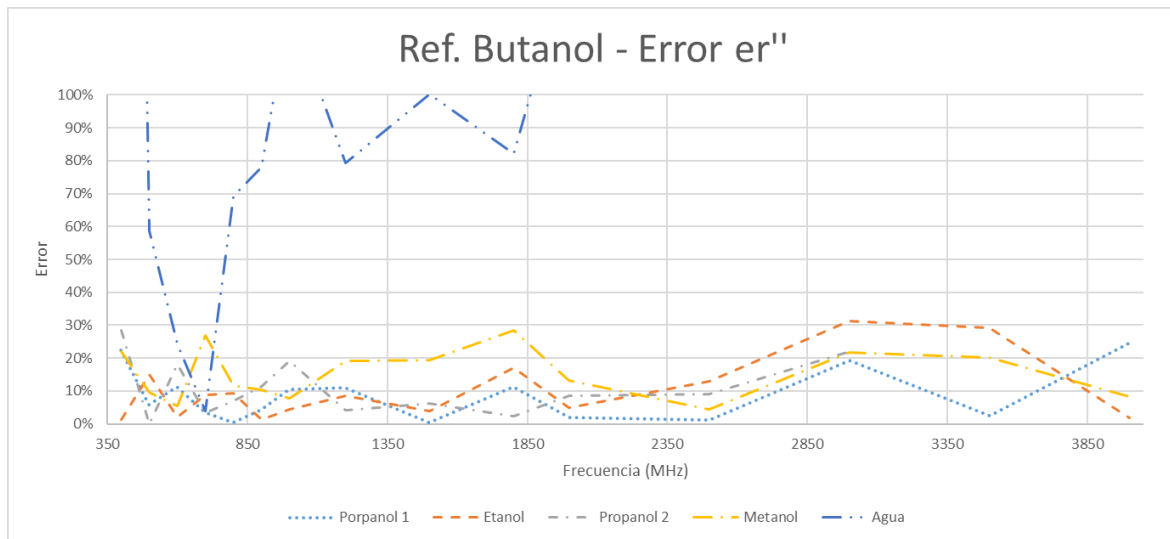


Figura B.2: Porcentaje de error en función de la frecuencia al utilizar el Butanol como líquido de referencia (ε_r'')

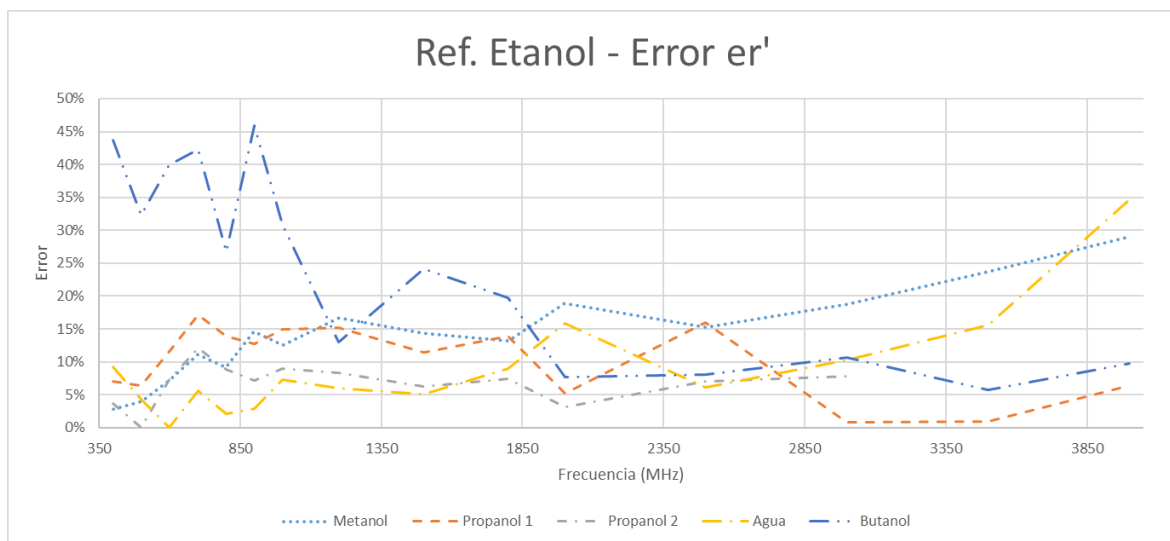


Figura B.3: Porcentaje de error en función de la frecuencia al utilizar el Etanol como líquido de referencia (ε_r')

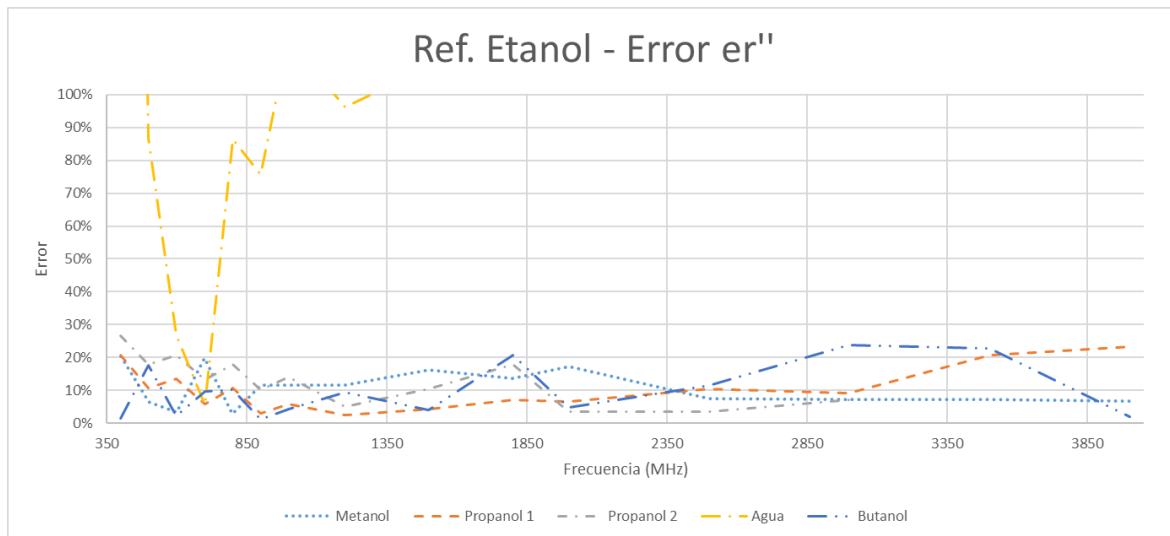


Figura B.4: Porcentaje de error en función de la frecuencia al utilizar el Etanol como líquido de referencia (ϵ_r'')

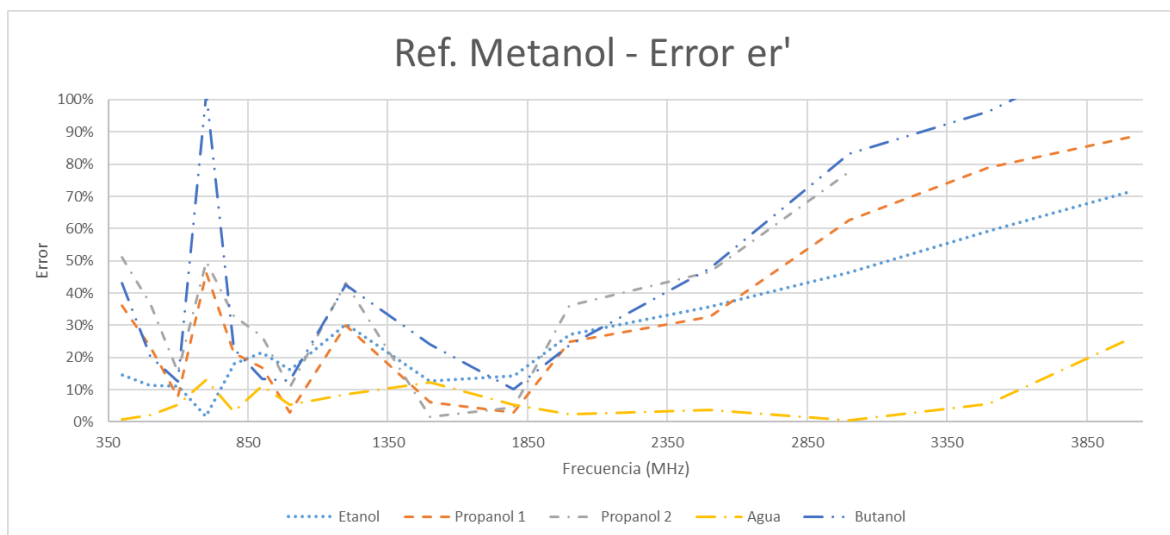


Figura B.5: Porcentaje de error en función de la frecuencia al utilizar el Metanol como líquido de referencia (ϵ_r')

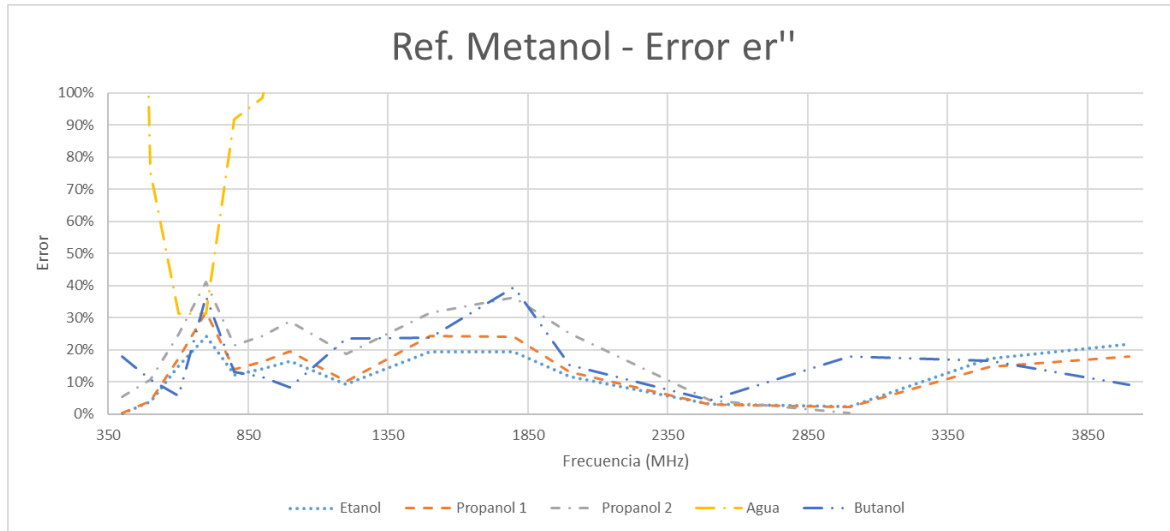


Figura B.6: Porcentaje de error en función de la frecuencia al utilizar el Metanol como líquido de referencia (ε_r'')

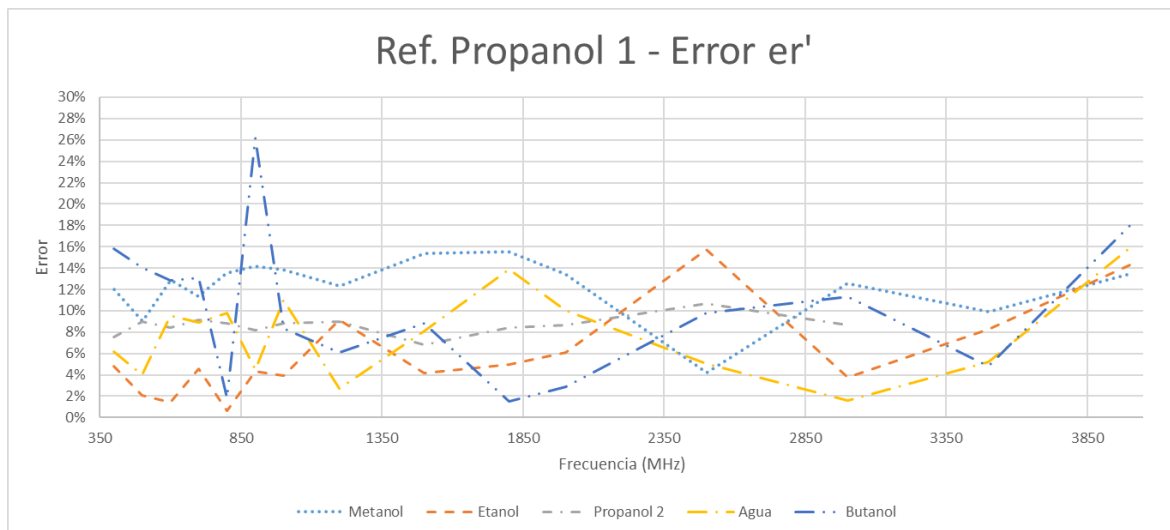


Figura B.7: Porcentaje de error en función de la frecuencia al utilizar el Propanol 1 como líquido de referencia (ε_r')

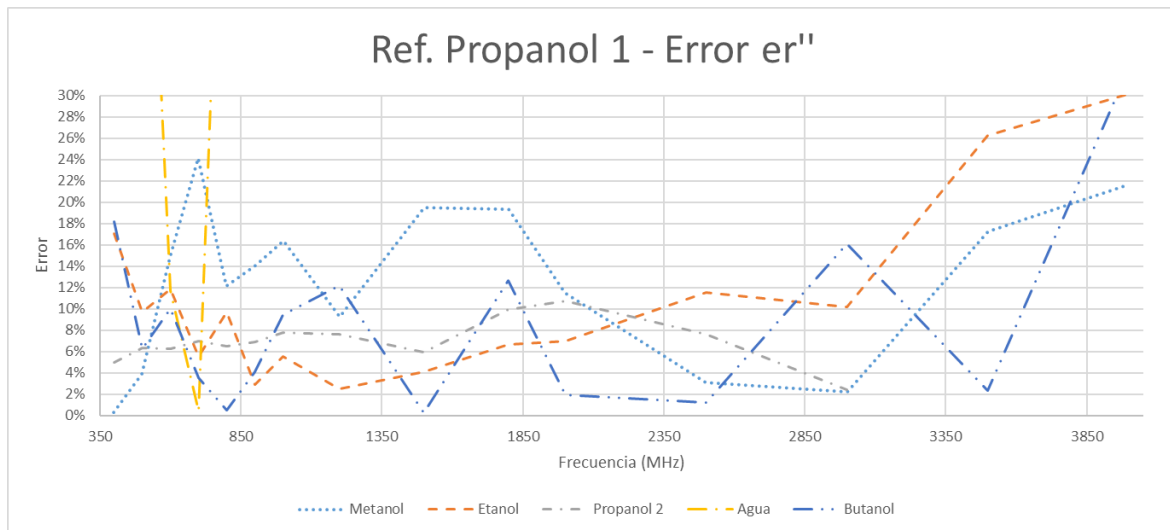


Figura B.8: Porcentaje de error en función de la frecuencia al utilizar el Propanol 1 como líquido de referencia (ϵ_r'')

En las gráficas presentadas en este anexo se muestra una gran dispersión en el porcentaje de error en función de la frecuencia producto de distorsiones que se presentan en la medición del parámetro S11 o parámetro de reflexión.



Resultados del proceso de ajuste de datos

Luego de realizar el proceso de ajuste de datos descrito en la sección 7.1 se han obtenido los resultados que se muestran en las siguientes gráficas, las cuales relacionan la permitividad compleja de cada líquido con la frecuencia.

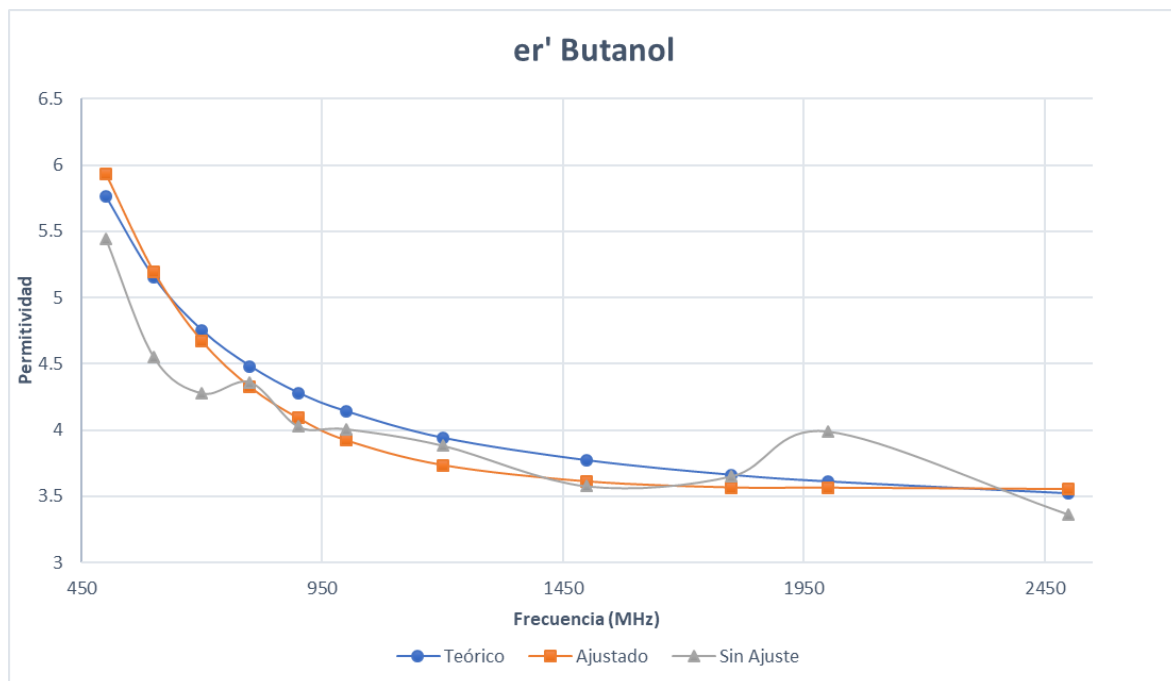
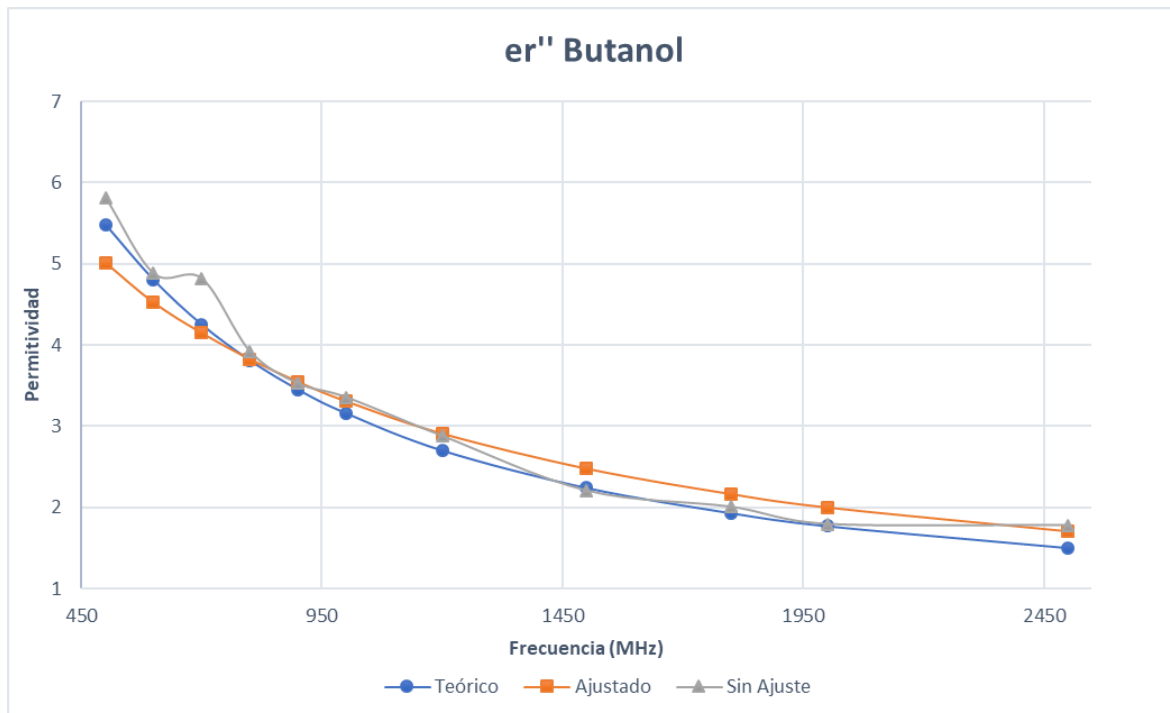
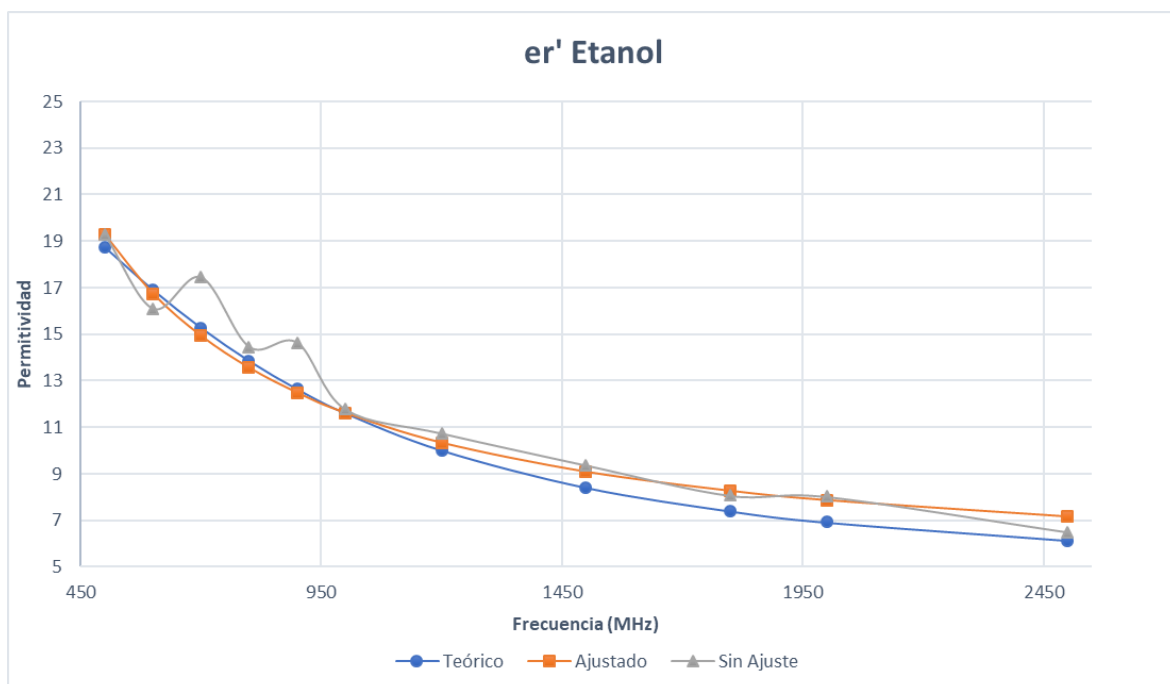


Figura C.1: Resultado del proceso de ajuste en ϵ_r' del Butanol

Figura C.2: Resultado del proceso de ajuste en ϵ_r'' del ButanolFigura C.3: Resultado del proceso de ajuste en ϵ_r' del Etanol

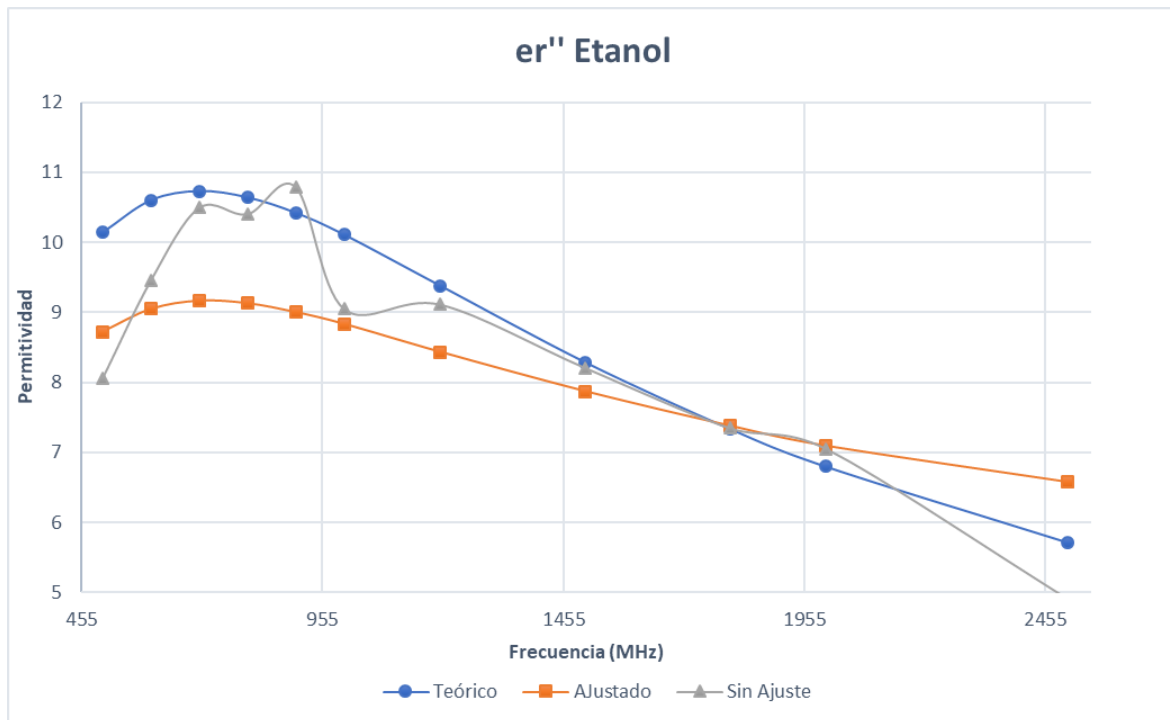


Figura C.4: Resultado del proceso de ajuste en ϵ_r'' del Etanol

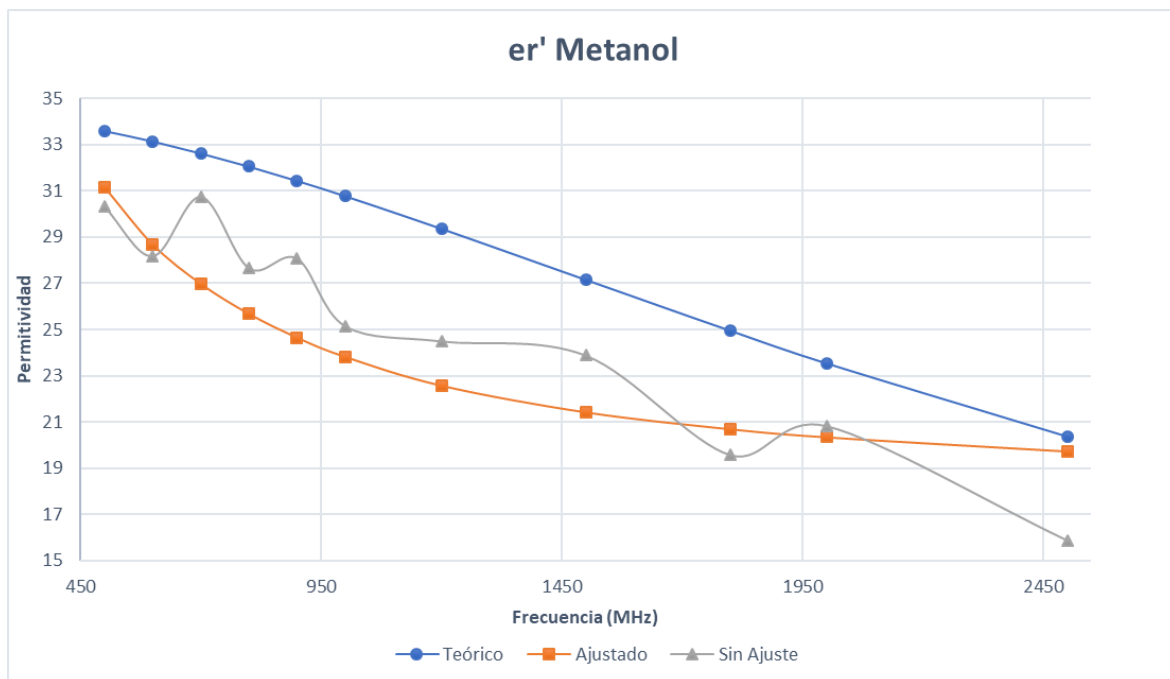


Figura C.5: Resultado del proceso de ajuste en ϵ_r' del Metanol

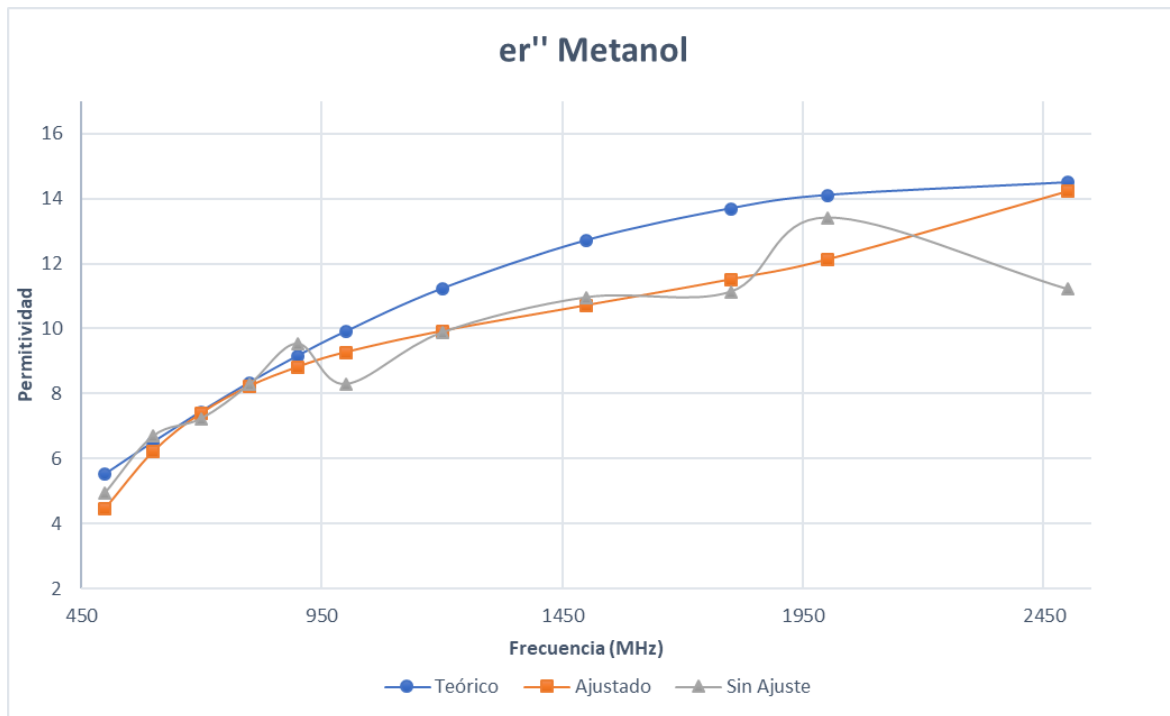


Figura C.6: Resultado del proceso de ajuste en ϵ_r'' del Metanol

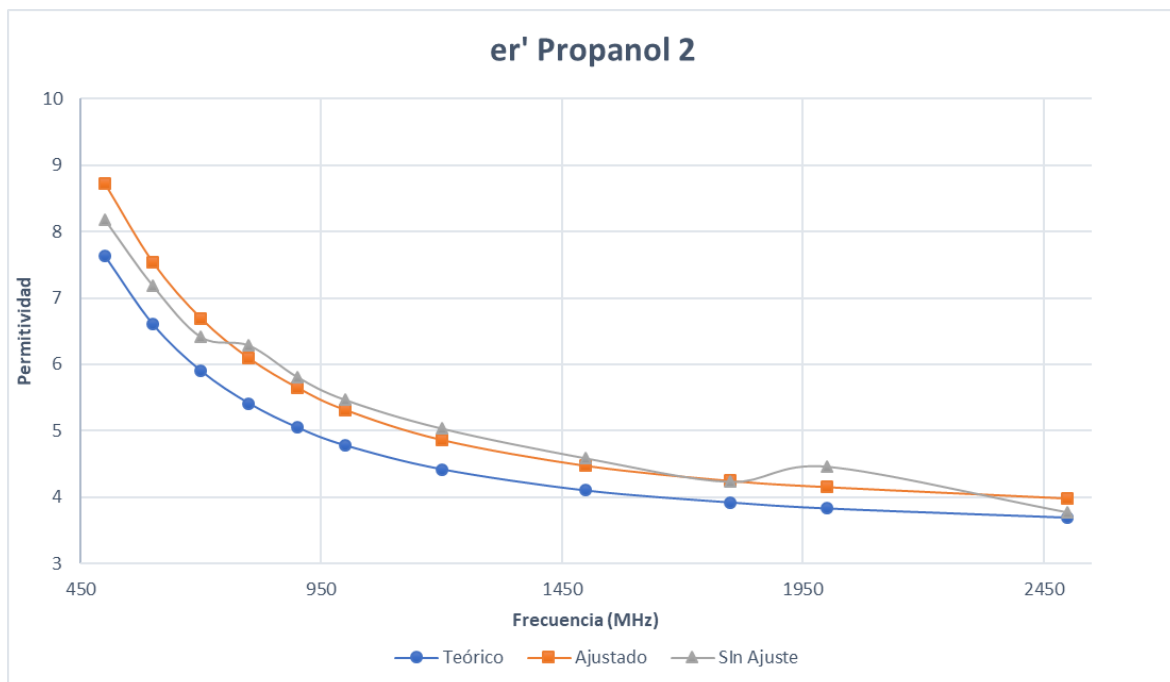


Figura C.7: Resultado del proceso de ajuste en ϵ_r' del Propanol 2

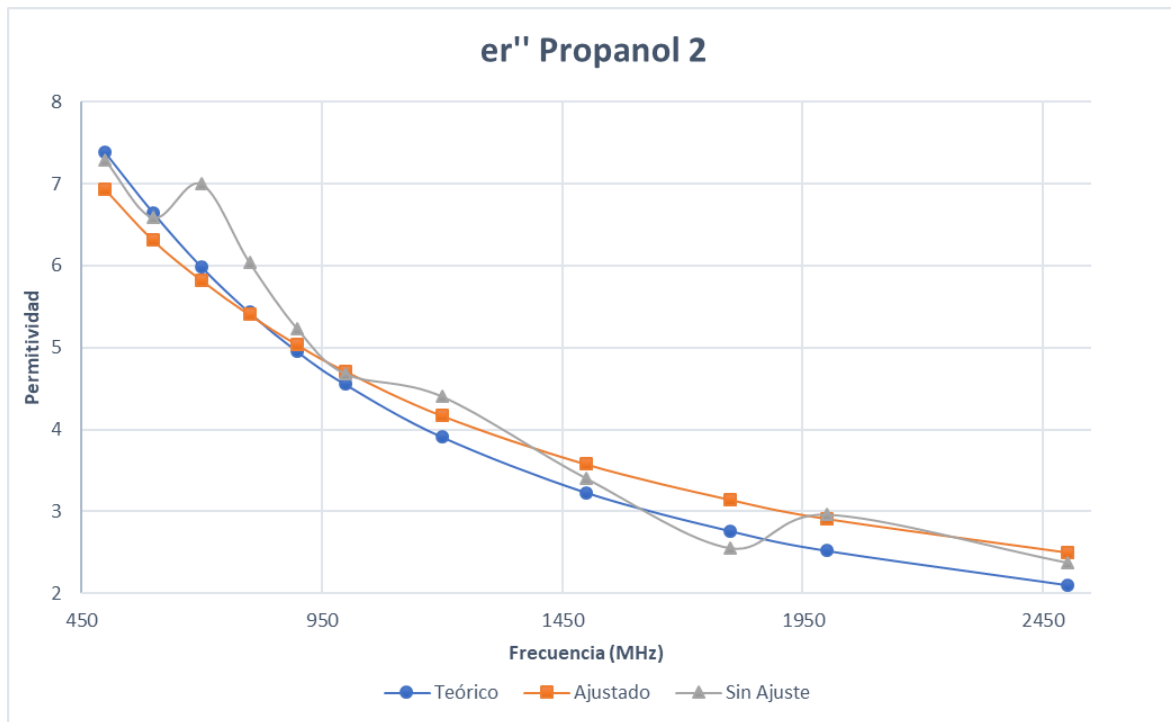


Figura C.8: Resultado del proceso de ajuste en ϵ_r'' del Propanol 2



Comparación entre longitud de sondas

Una vez escogido el modelo de matemático que sería utilizado en el proyecto, se realiza el cálculo de la permitividad de los líquidos de prueba a partir del coeficiente de reflexión medido en cada uno mediante sondas de distinta longitud. Esto se realiza con el objeto de mostrar las variaciones de tendencia que experimenta la permitividad al utilizar una sonda de mayor longitud. Es importante tener en cuenta que los resultados expuestos en este apéndice, no fueron sometidos a ningún tipo de ajuste.

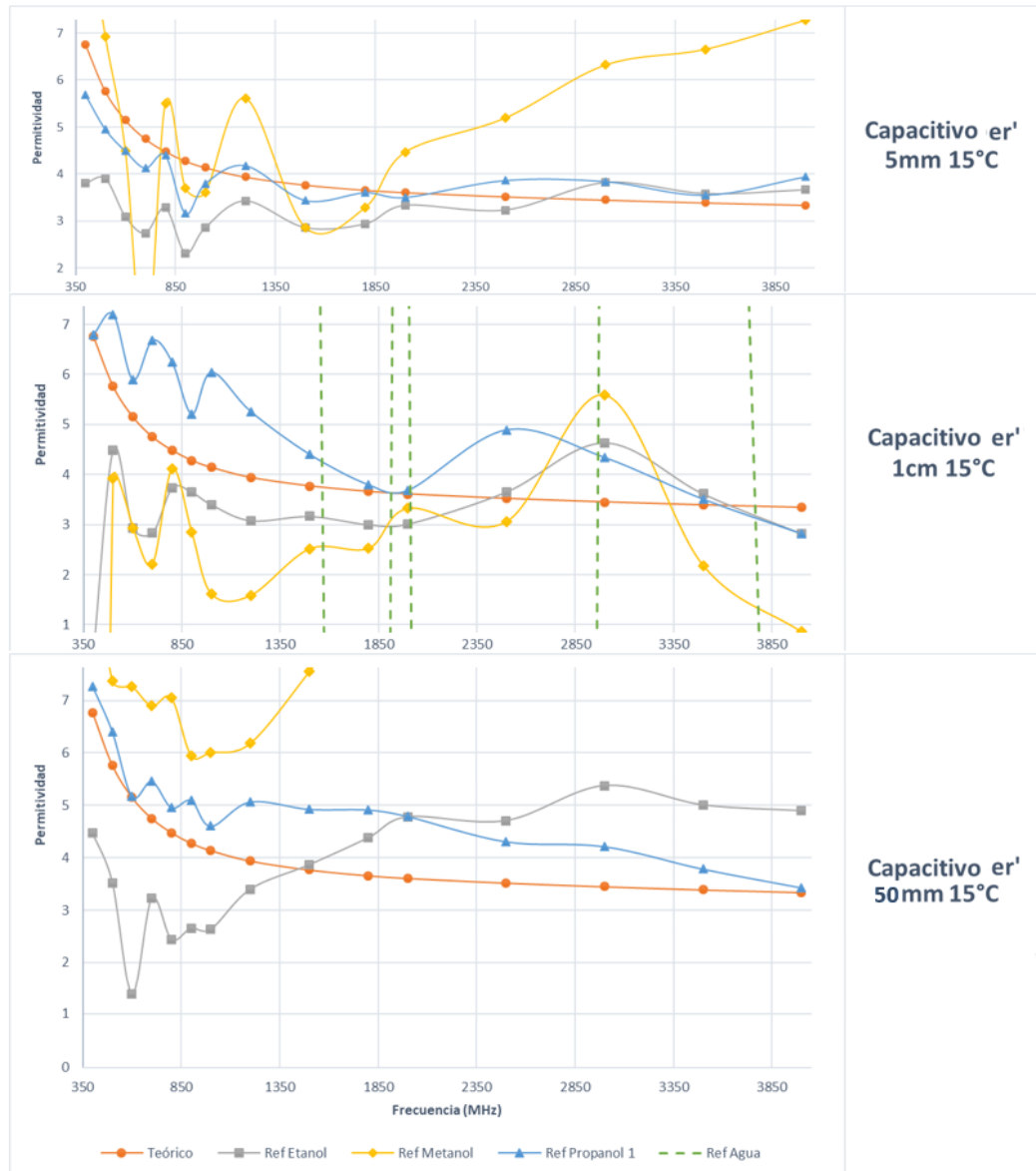


Figura D.1: Butanol - Respuesta de permitividad real para: Sonda de 5mm, Sonda de 13mm, Sonda de 50mm

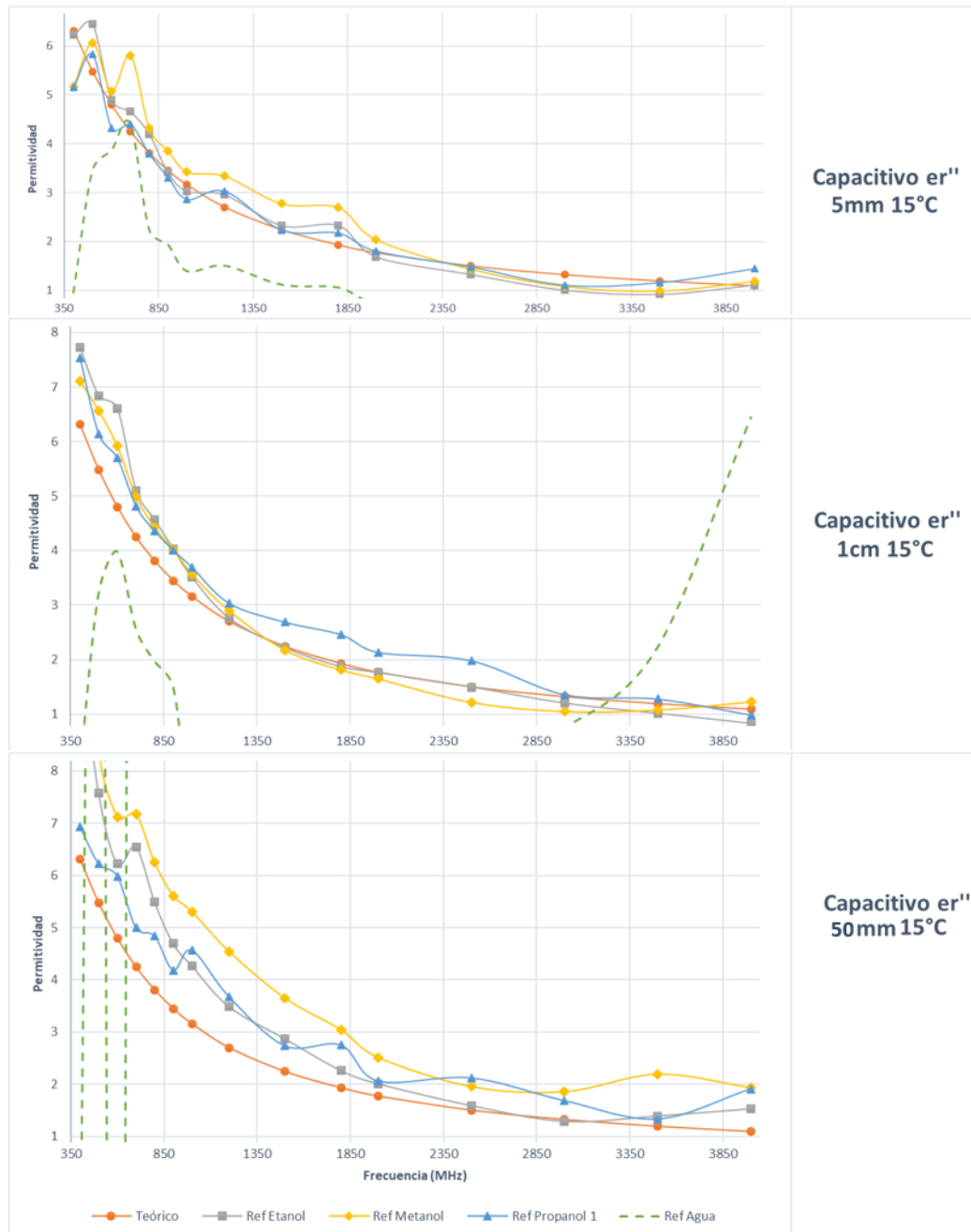


Figura D.2: Butanol - Respuesta de permitividad imaginaria para: Sonda de 5mm, Sonda de 13mm, Sonda de 50mm

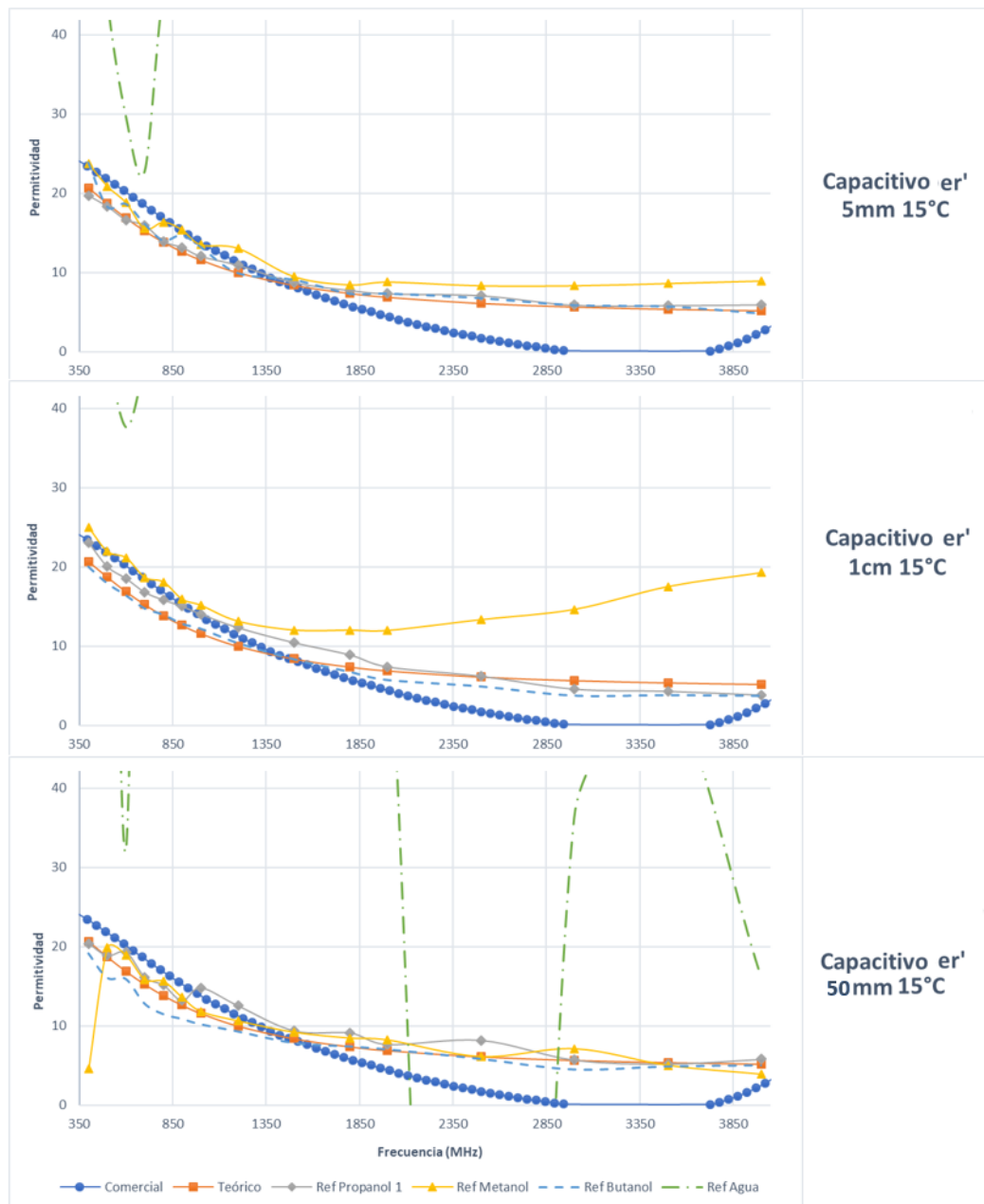


Figura D.3: Etanol - Respuesta de permitividad real para: Sonda de 5mm, Sonda de 13mm, Sonda de 50mm

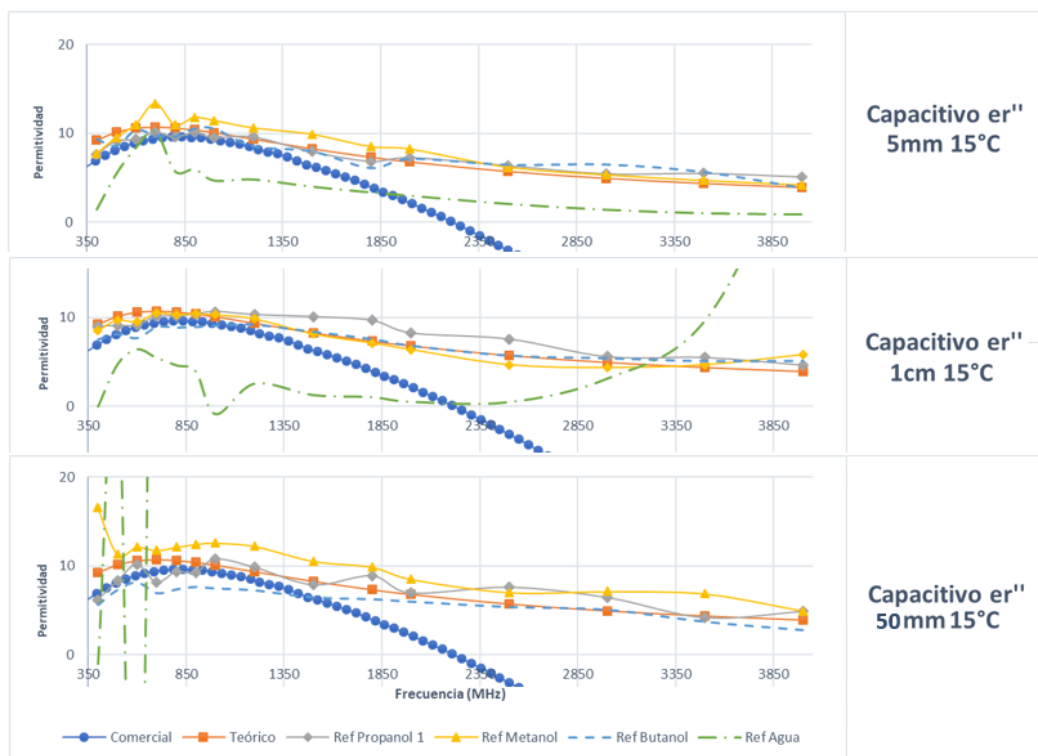


Figura D.4: Etanol - Respuesta de permitividad imaginaria para: Sonda de 5mm, Sonda de 13mm, Sonda de 50mm

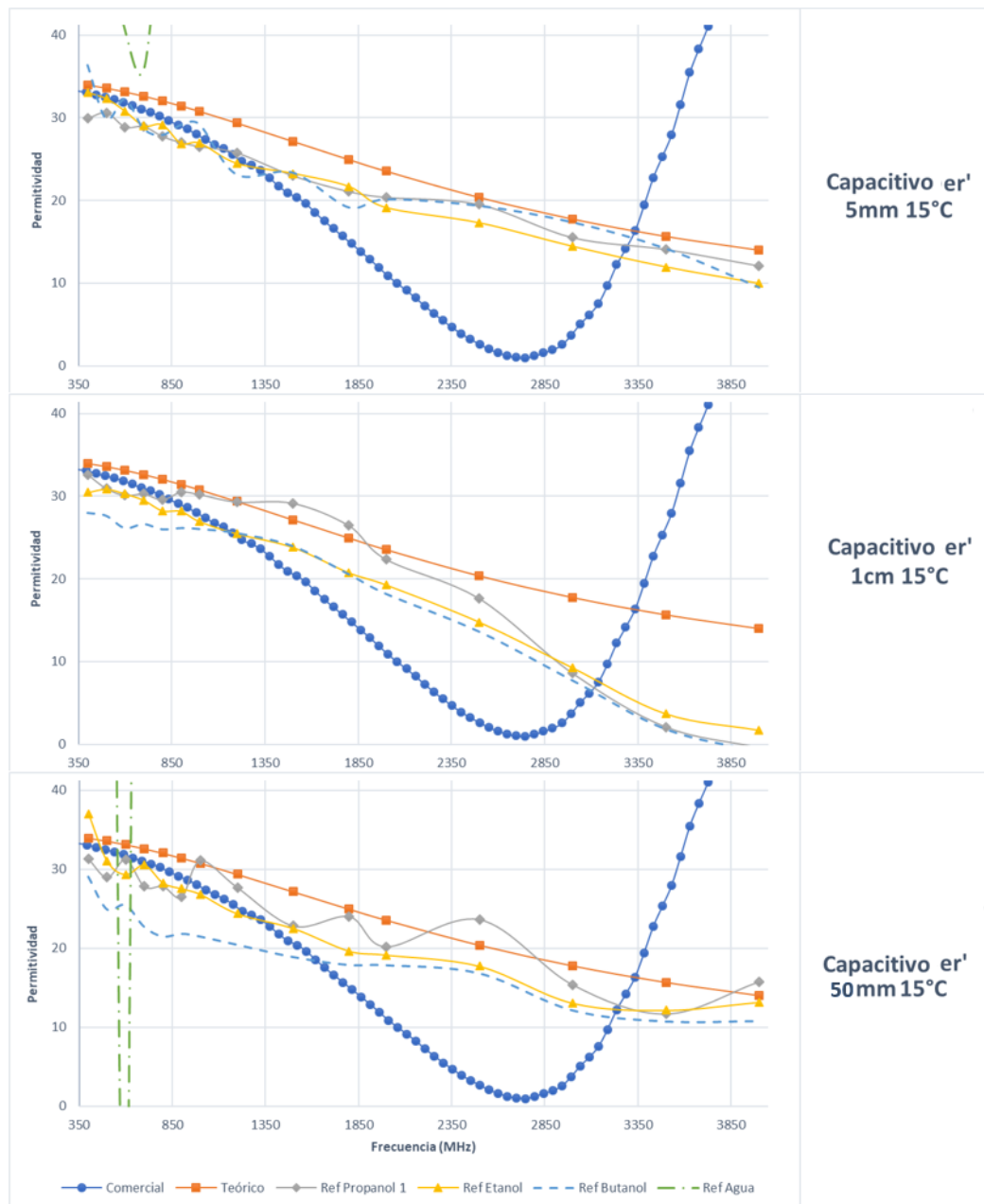


Figura D.5: Metanol - Respuesta de permitividad real para: Sonda de 5mm, Sonda de 13mm, Sonda de 50mm

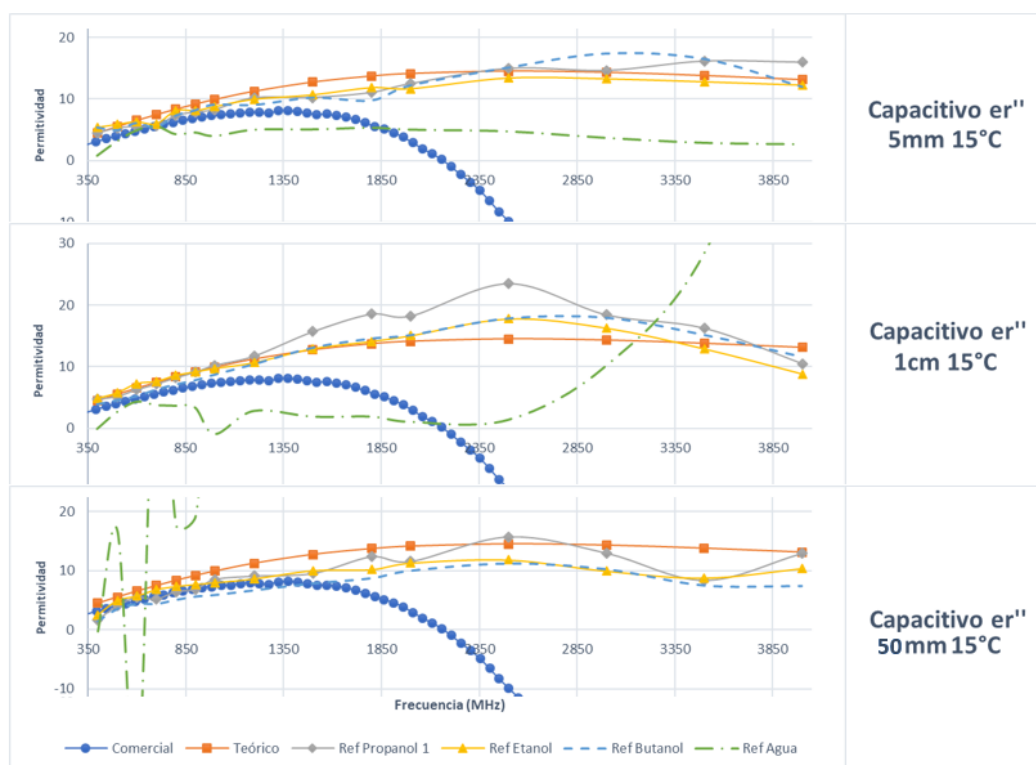


Figura D.6: Metanol - Respuesta de permitividad imaginaria para: Sonda de 5mm, Sonda de 13mm, Sonda de 50mm

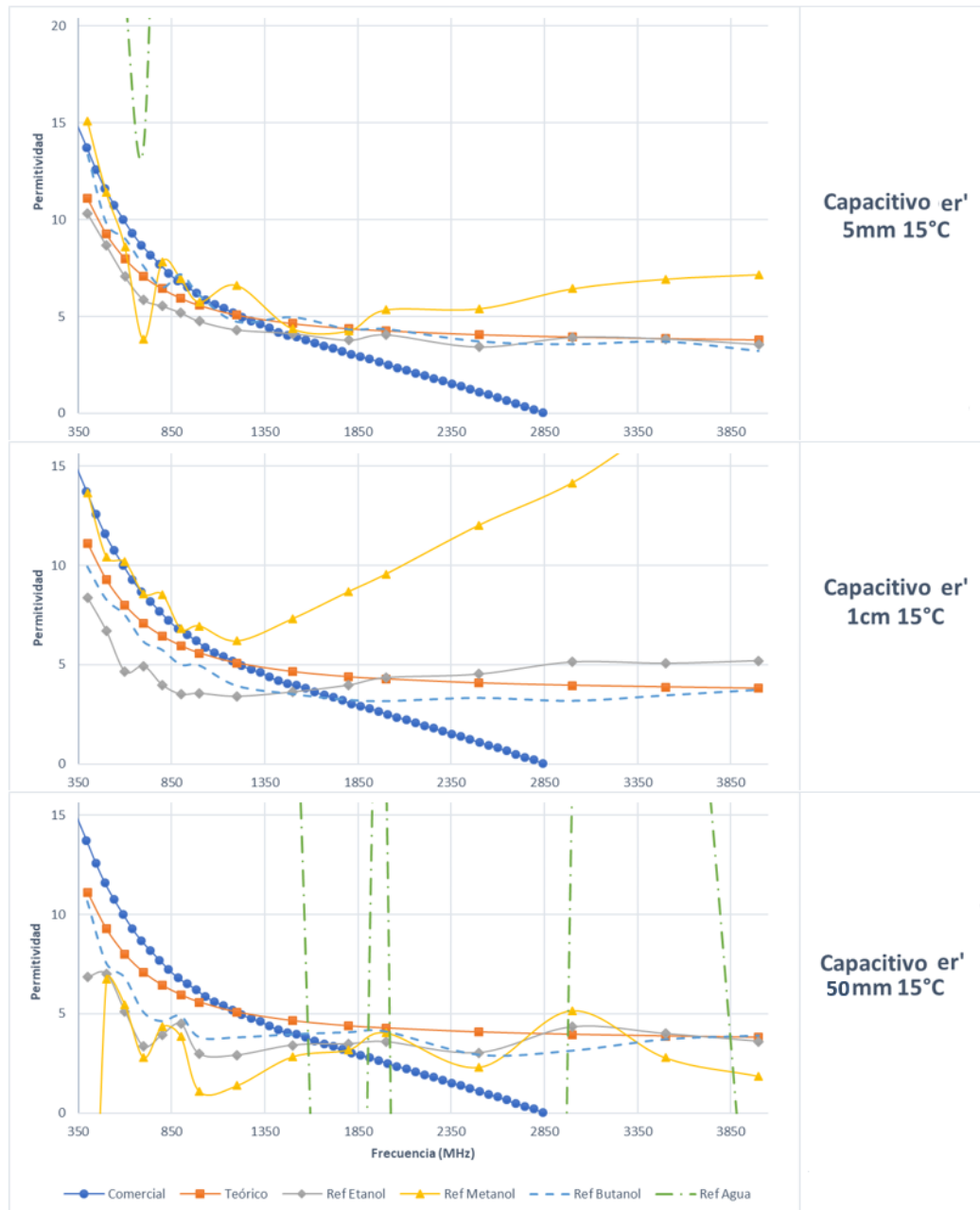


Figura D.7: Propanol1 - Respuesta de permitividad real para: Sonda de 5mm, Sonda de 13mm, Sonda de 50mm

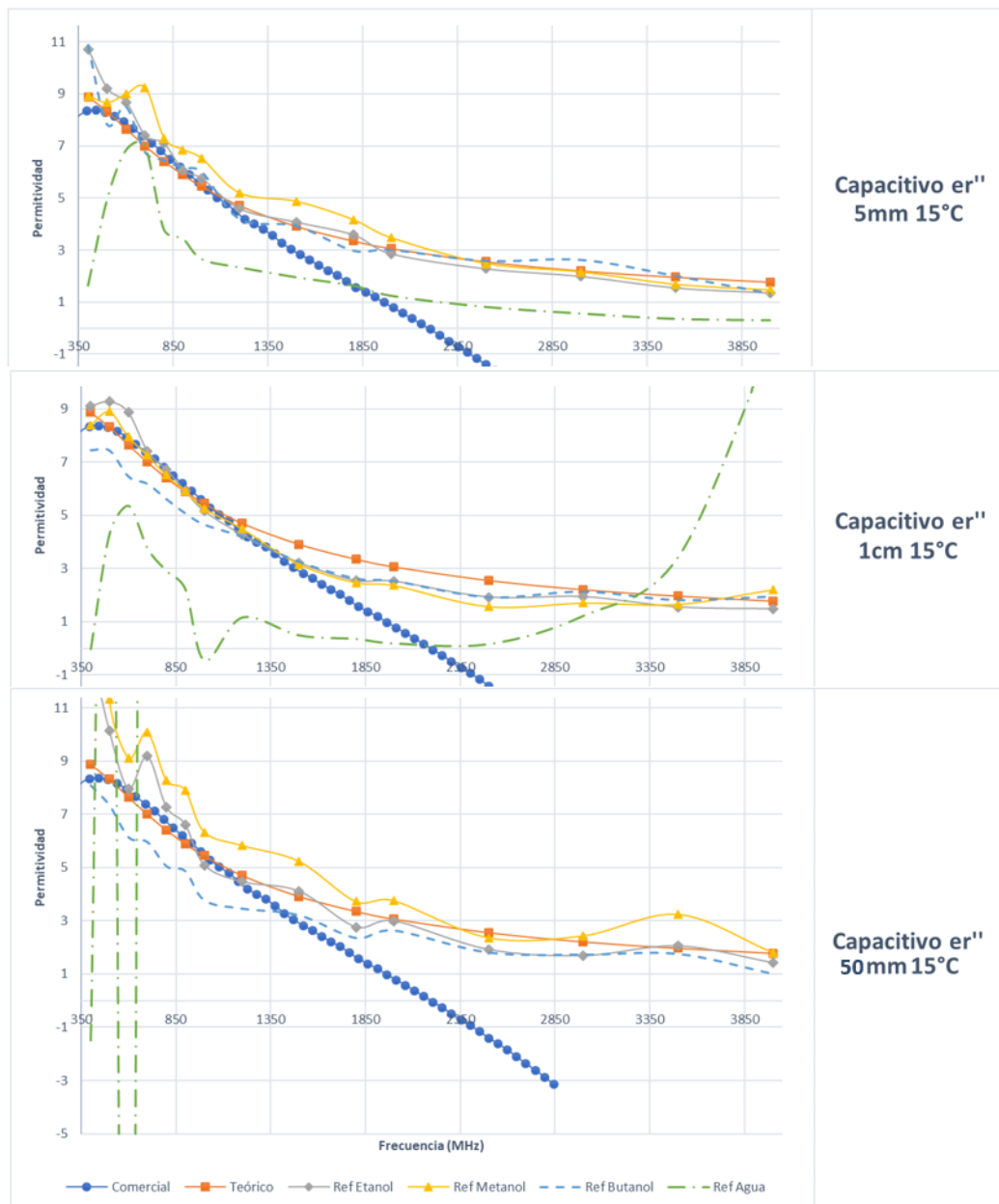


Figura D.8: Propanol1 - Respuesta de permitividad imaginaria para: Sonda de 5mm, Sonda de 13mm, Sonda de 50mm

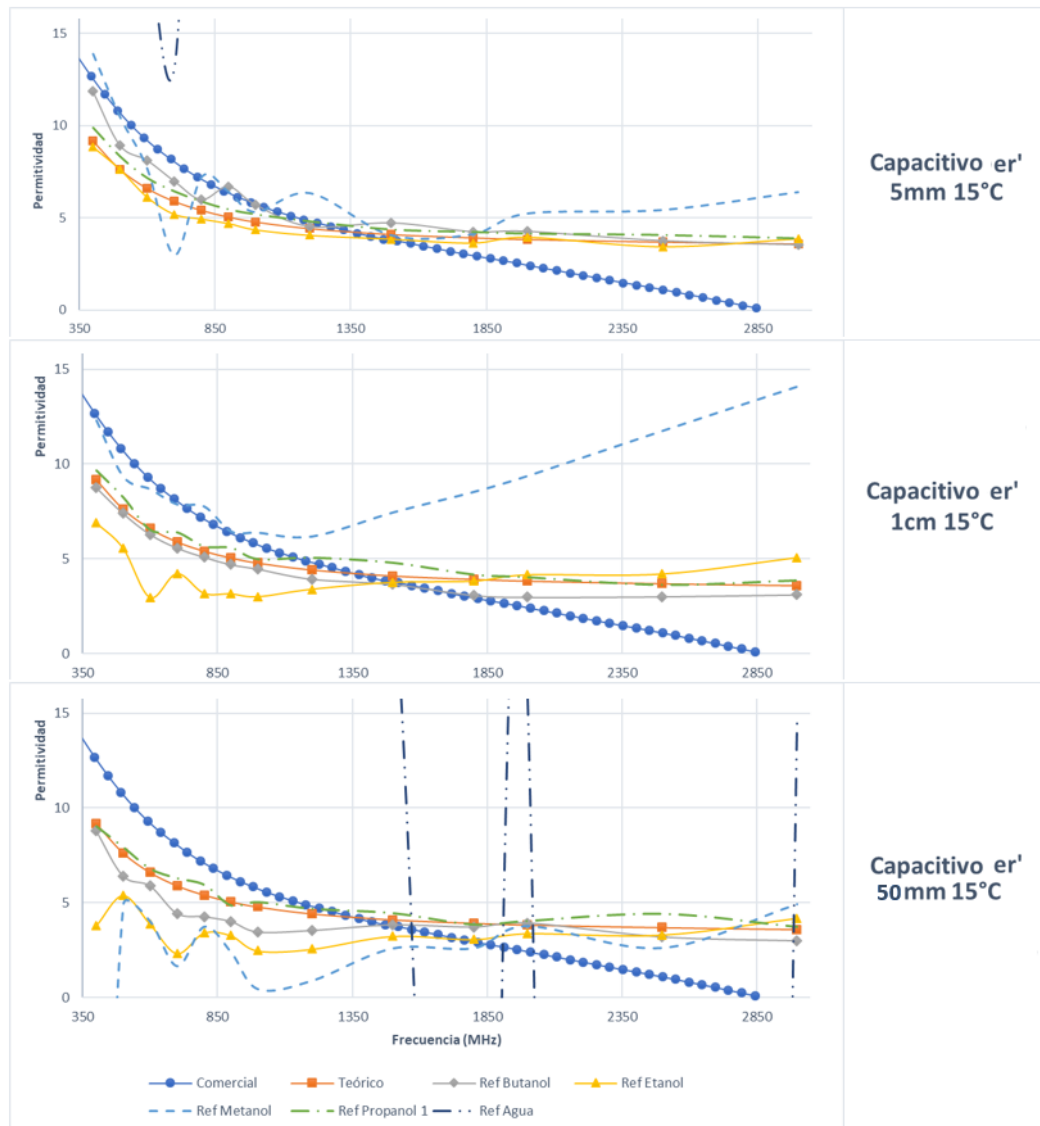


Figura D.9: Propanol2 - Respuesta de permitividad real para: Sonda de 5mm, Sonda de 13mm, Sonda de 50mm

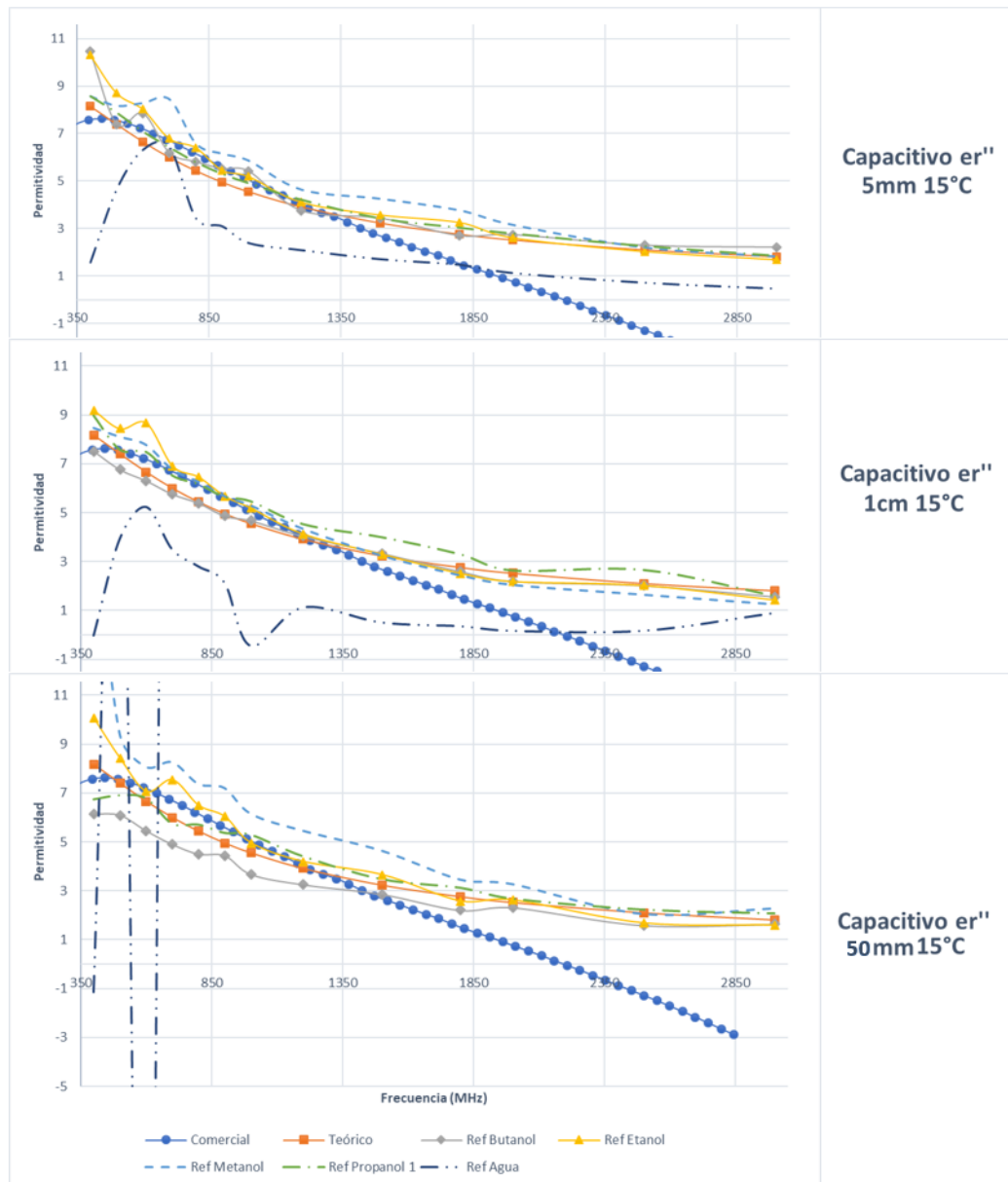


Figura D.10: Propanol2 - Respuesta de permitividad imaginaria para: Sonda de 5mm, Sonda de 13mm, Sonda de 50mm



Bibliografía

- [1] D. M. Pozar, *Microwave engineering*. John Wiley & Sons, 2009.
- [2] M. N. Sadiku, *Elements of electromagnetics*. Oxford university press, 2014.
- [3] M. S. Venkatesh y G. S. Raghavan, “An overview of dielectric properties measuring techniques,” *Canadian Biosystems Engineering / Le Genie des biosystems au Canada*, vol. 47, num. July, 2005.
- [4] B. Hettema y W. Bouwmeester, “Simulation environment for an open-ended coaxial probe and visualisation of permittivity measurements,” 2016.
- [5] B. Oliver Riera, “Permittivity measurements using coaxial probes,” B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2017.
- [6] A. La Gioia, E. Porter, I. Merunka, A. Shahzad, S. Salahuddin, M. Jones, y M. O’Halloran, “Open-Ended Coaxial Probe Technique for Dielectric Measurement of Biological Tissues: Challenges and Common Practices,” *Diagnostics*, vol. 8, num. 2, p. 40, 2018.
- [7] S. N. Jha, K. Narsaiah, A. L. Basediya, R. Sharma, P. Jaiswal, R. Kumar, y R. Bhardwaj, “Measurement techniques and application of electrical properties for nondestructive quality evaluation of foods-a review,” *Journal of Food Science and Technology*, vol. 48, num. 4, pp. 387–411, 2011.
- [8] Agilent, “Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials Application Note,” *Meas. Tech.*, vol. 2007, pp. 1–32, 2005. [En línea]. Disponible: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en{%&}btnG=Search{%&}q=intitle:Basics+of+Measuring+the+Dielectric+Properties+of+Materials{#}2>
- [9] A. P. Gregory y R. N. Clarke, “A review of RF and microwave techniques for dielectric measurements on polar liquids,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 13, num. 4, pp. 727–743, 2006.
- [10] S. Clerjon y J. L. Damez, “Microwave sensing for an objective evaluation of meat ageing,” *Journal of Food Engineering*, vol. 94, num. 3-4, pp. 379–389, 2009. [En línea]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.04.004>
- [11] T. W. Athey, M. A. Stuchly, y S. S. Stuchly, “Measurement of radio frequency permittivity of biological tissues with an open-ended coaxial line: Part i,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 30, num. 1, pp. 82–86, 1982.
- [12] F. H. Wee, P. J. Soh, A. H. Suhaizal, H. Nornikman, y A. A. Ezanuddin, “Free space measurement technique on dielectric properties of agricultural residues at microwave frequencies,” *SBMO/IEEE*



- MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference Proceedings*, num. I, pp. 183–187, 2009.
- [13] A. P. Gregory y R. N. Clarke, “Tables of the Complex Permittivity of Dielectric Reference Liquids at Frequencies up to 5 GHz; NPL Report MAT 23,” *Innovation*, num. March, pp. 1–87, 2009.
- [14] M. A. Stuchly, T. W. Athey, G. M. Samaras, y G. E. Taylor, “Measurement of radio frequency permittivity of biological tissues with an open-ended coaxial line: Part ii-experimental results,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 30, num. 1, pp. 87–92, 1982.
- [15] F. Jaspard, M. Nadi, y A. Rouane, “Dielectric properties of blood: An investigation of haematocrit dependence,” *Physiological Measurement*, vol. 24, num. 1, pp. 137–147, 2003.
- [16] M. Schroeder, S. Anupama, y R. Nelson, “An analysis on the role of water content and state on effective permittivity using mixing formulas,” *Journal of Biomechanics, Biomedical, and ...*, vol. 2, num. 1, pp. 1–11, 2008. [En línea]. Disponible: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en{%&}btnG=Search{%&}q=intitle:An+Analysis+on+the+Role+of+Water+Content+and+State+on+Effective+Permittivity+Using+Mixing+Formulas{#}0>
- [17] R. Pal, “Techniques for measuring the composition (oil and water content) of emulsions - a state of the art review,” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 84, num. 2-3, pp. 141–193, 1994.
- [18] J. L. Schepps y K. R. Foster, “The UHF and microwave dielectric properties of normal and tumour tissues: Variation in dielectric properties with tissue water content,” *Physics in Medicine and Biology*, vol. 25, num. 6, pp. 1149–1159, 1980.
- [19] K. Folgerø y T. Tjomsland, “Permittivity measurement of thin liquid layers using open-ended coaxial probes,” *Measurement Science and Technology*, vol. 7, num. 8, pp. 1164–1173, 1996.
- [20] L. S. Anderson, G. B. Gajda, y S. S. Stuchly, “Analysis of an Open-Ended Coaxial Line Sensor in Layered Dielectrics,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. IM-35, num. 1, pp. 13–18, 1986.
- [21] D. D. Zutter y L. Martens, “Design Rules for an Experimental Setup Using an Open-Ended Coaxial Probe Based on Theoretical Modelling,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 43, num. 6, pp. 810–817, 1994.
- [22] T. P. Marsland y S. Evans, “Dielectric measurements with an open-ended coaxial probe,” *IEE Proceedings H: Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 134, num. 4, pp. 341–349, 1987.
- [23] A. Cataldo, E. De Benedetto, y G. Cannazza, *Broadband reflectometry for enhanced diagnostics and monitoring applications*. Springer Science & Business Media, 2011, vol. 93.
- [24] J. P. Grant, R. N. Clarke, G. T. Symm, y N. M. Spyrou, “A critical study of the open-ended coaxial line sensor technique for RF and microwave complex permittivity measurements,” *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol. 22, num. 9, pp. 757–770, 1989.



-
- [25] S. S. Stuchly, M. A. Rzepecka, y M. F. Iskander, "Permittivity Measurements at Microwave Frequencies Using Lumped Elements," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 23, num. 1, pp. 56–62, 1974.
- [26] M. M. Brady, S. A. Symons, y S. S. Stuchly, "Dielectric Behavior of Selected Animal Tissues in Vitro at Frequencies from 2 to 4 GHz," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. BME-28, num. 3, pp. 305–307, 1981.
- [27] F. M. Ghannouchi y R. G. Bosisio, "Measurement of microwave permittivity using a six-port reflectometer with an open-ended coaxial line," *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, vol. 38, num. 2, pp. 505–508, 1989.
- [28] D. Beruhe, "A comparative study of four open-ended coaxial probe models for permittivity measurements of lossy dielectric/biological materials at microwave frequencies," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, num. 10 PART 2, pp. 1928–1934, 1996.
- [29] F. Gilart, M. Bueno, D. Deas, y R. Vázquez, "Measurement of permittivity of biological tissues from 300 MHz to 3 GHz using an open-ended coaxial line," *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, vol. 39, num. 1, pp. 49–61, 2018.
- [30] D. Misra, M. Chhabra, B. R. Epstein, M. Mirotznik, y K. R. Foster, "Noninvasive Electrical Characterization of materials at microwave frequencies using an open-endes coaxial line," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 38, num. 1, pp. 8–14, 1990.
- [31] M. A. Stuchly, M. M. Brady, S. S. Stuchly, y G. Gajda, "Equivalent Circuit of an Open-Ended Coaxial Line in a Lossy Dielectric," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. IM-31, num. 2, pp. 116–119, 1982.
- [32] Y.-S. Jo y S.-Y. Kim, "FDTD validation on an improved virtual transmission-line conversion model of open-ended coaxial probe," in *IEEE Antennas and Propagation Society Symposium, 2004.*, vol. 4. IEEE, 2004, pp. 4543–4546.
- [33] K. Y. You y M. S. Sim, "Precision Permittivity Measurement for Low-Loss Thin Planar Materials Using Large Coaxial Probe from 1 to 400 MHz," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 2, num. 4, p. 81, 2018.
- [34] C. Gabriel, "Permittivity probe modelling," num. July 1990, p. 41, 1991.
- [35] W. J. Ellison y J. M. Moreau, "Open-ended coaxial probe: Model limitations," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, num. 9, pp. 1984–1991, 2008.
- [36] A. P. Gregory y R. N. Clarke, "Dielectric metrology with coaxial sensors," *Measurement Science and Technology*, vol. 18, num. 5, pp. 1372–1386, 2007.
- [37] M. Okoniewski, J. Anderson, E. Okoniewska, K. Caputa, y S. S. Stuchly, "Further Analysis of Open-Ended Dielectric Sensors," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 43, num. 8, pp. 1986–1989, 1995.
- [38] G. Q. Jiang, W. H. Wong, E. Y. Raskovich, W. G. Clark, W. A. Hines, y J. Sanny, "Open-ended coaxial-line technique for the measurement of the microwave dielectric constant for low-loss solids and liquids," *Review of Scientific Instruments*, vol. 64, num. 6, pp. 1614–1621, 1993.
-



- [39] —, “Measurement of the microwave dielectric constant for low-loss samples with finite thickness using open-ended coaxial-line probes,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 64, num. 6, pp. 1622–1626, 1993.
- [40] G. Chen, K. Li, y Z. Ji, “Bilayered Dielectric Measurement With an Open-Ended Coaxial Probe,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 42, num. 6, pp. 966–971, 1994.
- [41] N. I. Sheen y I. M. Woodhead, “An open-ended coaxial probe for broad-band permittivity measurement of agricultural products,” *Journal of Agricultural and Engineering Research*, vol. 74, num. 2, pp. 193–202, 1999.
- [42] H. P. Schwan, R. J. Sheppard, y E. H. Grant, “Complex permittivity of water at 25 °C,” *The Journal of Chemical Physics*, vol. 64, num. 5, pp. 2257–2258, 1976.
- [43] K. Mathew y U. Raveendranath, “Waveguide cavity perturbation method for measuring complex permittivity of water,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 6, num. 2, pp. 104–106, 1993.
- [44] D. Shee, “E5071C ENA Vector Network Analyzer E5092A Configurable Multiport Test Set.”
- [45] —, “BROCHURE E5071C ENA Vector Network Analyzer E5092A Configurable Multiport Test Set.”
- [46] C. O. A. T. Ion, “CONFIGURATION E5071C Network Analyzer E5092A Configurable Multiport Test Set.”
- [47] “Megi Q VNA0440 – VNA0440e VNA0460 – VNA0460e.”
- [48] B. V. Megiq, “Setup & Installing Software.”
- [49] “MegiQ User Guide,” vol. 31, num. 0, 2017.
- [50] F. M. Ghannouchi y R. G. Bosisio, “A New Six-Port Calibration Method Using Four Standards and Avoiding Singularities,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. IM-36, num. 4, pp. 1022–1027, 1987.