

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIAGO - CHILE



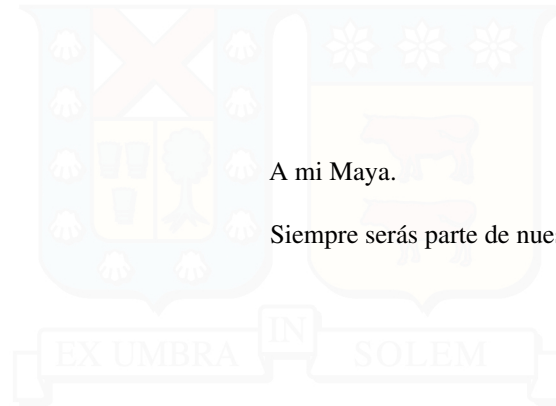
Efecto de campos electromagnéticos de alta intensidad en el funcionamiento de marcapasos implantables

Sebastián Andrés Vicencio Espinoza

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

PROFESOR GUÍA : SR. Jorge Ardila.
PROFESOR CORREFERENTE : SR. Camilo Alvear.
PROFESOR CORREFERENTE : SR. Johnny Rengifo.

12 de noviembre de 2024



A mi Maya.

Siempre serás parte de nuestra familia.

Resiliencia: Capacidad humana de sobreponerse y adaptarse ante las adversidades, transformando los desafíos en oportunidades de crecimiento.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, especialmente a mis padres, quienes me han apoyado, guiado y acompañado a lo largo de todos estos años. Sin importar las circunstancias de nuestras vidas, sé que siempre estarán a mi lado en los momentos buenos y en los difíciles. A mi hermano Felipe, agradezco por ser el mejor hermano que podría haber pedido. Aunque no siempre hemos mantenido un contacto cercano, la evolución de nuestra relación ha sido una fuente constante de inspiración para mejorar cada día y disfrutar de la vida en cada oportunidad que se presenta. A mis abuelos por ser ese espacio de cariño y amor constante desde el día en que nací.

A mis amigos Octavio, Rodrigo, Alan, Gonzalo, Macarena, Camila, Constanza, Daniel, Daniela, Franco, Álvaro, Joaquín, Christopher, Leandro, Pablo y Scarlet, gracias por hacer de esta etapa universitaria una experiencia inolvidable. Sin ustedes, sus risas, consejos, apoyo y diferentes perspectivas, este logro habría sido mucho más difícil de alcanzar sino imposible. También quiero agradecer a Sebastián Peña por sus invaluable consejos y apoyo en modelado 3D, y a Jonathan por brindarme los equipos necesarios para llevar a cabo esta investigación y demostrarme una dedicación a la ciencia invaluable.

A mis profesores, gracias por ser una fuente constante de conocimiento y motivación a lo largo de estos años. A mi familia lejana, les agradezco por ser un apoyo incondicional, sin importar la distancia, y por los momentos que hemos compartido desde mi infancia.

Finalmente, quiero agradecer a mi querida mascota Maya. Aunque estuviste con nosotros solo por cuatro años, esos años se sintieron como décadas. Aprendí de ti lo que es el amor más puro e incondicional que una mascota como tú puede brindar. Tu recuerdo siempre vivirá en mí.

Resumen Ejecutivo

La presente memoria de título se centra en el análisis exhaustivo del comportamiento de los marcapasos implantables cuando se encuentran expuestos a interferencias electromagnéticas externas, con un enfoque especial en la comparación de los efectos provocados por campos eléctricos de corriente alterna (AC), corriente continua (DC) y de pulsos electromagnéticos. Esta investigación, realizada en el contexto de la compatibilidad electromagnética, tiene como objetivo principal identificar y comprender los mecanismos mediante los cuales estas interferencias pueden afectar el funcionamiento de los marcapasos (principalmente en la aplicación de la terapia cardíaca), dispositivos fundamentales para la regulación del ritmo cardíaco en pacientes con diversas afecciones cardíacas.

El estudio se desarrolló mediante la implementación de experimentos controlados, en los cuales se expuso un marcapasos a distintos niveles de intensidad de campos electromagnéticos, incluyendo corriente alterna, corriente continua y pulsos electromagnéticos generados por ensayos de impulso. Estos experimentos se realizaron bajo un estricto protocolo de medición que define los diferentes niveles de exposición del dispositivo. Además, se utilizó el programa FEMM (Finite Element Method Magnetics) para simular el campo eléctrico mediante el método de elementos finitos, con el fin de corroborar los niveles de tensión necesarios, y se establecieron configuraciones específicas de circuitos para la generación de campos eléctricos y pulsos electromagnéticos.

Los resultados obtenidos revelan que, a pesar de que los marcapasos están diseñados con diversas medidas de protección, como carcasas apantalladas y filtros electrónicos, aún presentan una susceptibilidad significativa a las interferencias electromagnéticas. Se observó que las señales de tensión del pulso del marcapasos pueden experimentar acoplamientos por inducciones electromagnéticas y por radiación que, aunque no alteran de manera crítica la forma de onda programada, generan tensiones inducidas en diversos rangos de frecuencia. Estas interferencias presentan el potencial de alterar el rendimiento del marcapasos, lo que destaca la importancia de realizar un análisis exhaustivo en entornos que reproduzcan condiciones reales.

A pesar de los avances logrados, el estudio identifica varias áreas de mejora. Se sugiere aumentar el número de dispositivos de ensayo y considerar una gama más amplia de variables internas del marcapasos. Asimismo, se recomienda llevar a cabo investigaciones en condiciones que reproduzcan con mayor fidelidad el entorno interno del cuerpo humano, incluyendo factores como salinidad, humedad y presión interna. Esto permitirá obtener datos más representativos de las condiciones reales a las que se enfrentan los marcapasos implantables.

Profundizar en la comprensión de estos fenómenos permitirá mejorar el diseño y la protección de estos dispositivos, garantizando un funcionamiento más seguro y eficaz frente a los escenarios de exposición indeseados. Este conocimiento contribuirá a la evolución de los marcapasos, asegurando una mayor confiabilidad y seguridad para los pacientes que dependen de estos dispositivos para mantener una función cardíaca estable y saludable.

Índice de Contenidos

1. Introducción	1
2. Objetivos	3
3. Marco Teórico	4
3.1. Marcapasos Implantables	4
3.1.1. Normativa de Marcapasos Implantables	4
3.2. Campo Eléctrico	6
3.2.1. Potencial Eléctrico	7
3.2.2. Normativa de Campo Eléctrico	8
3.3. Leyes de Maxwell	8
3.4. Ley de Continuidad de Carga	10
3.5. Pulso Electromagnético	11
3.6. Compatibilidad Electromagnética	11
3.6.1. Propagación de Campo Electromagnético	11
3.6.2. Acoplamiento electromagnético proveniente de campos externos	12
3.6.3. Mediciones de Interferencias Electromagnéticas (específicamente uso de antenas)	15
4. Estado del Arte	18
4.1. Marcapasos Cardíaco	18
4.1.1. Evolución de la Tecnología en Marcapasos Implantables	18
4.1.2. Afección a Interferencias Eléctricas Externas Típicas	19
4.1.3. Afección ante Pulsos Electromagnéticos	20
4.2. Medición de Pulsos Electromagnéticos	21
5. Montaje Experimental	22
5.1. Protocolo y Procedimiento de Medición	22
5.1.1. Simulación Finite Element Method Magnetics (FEMM) para Campo Eléctrico	23
5.1.2. Protocolo de Medición para Valores de Norma de Marcapasos	25
5.2. Circuitos de Generación de Interferencias	25
5.2.1. Circuito de Generación de Campo Eléctrico AC	25
5.2.2. Circuito de Generación de Campo Eléctrico DC	26
5.2.3. Circuito de Generación de Pulsos Electromagnéticos	27
5.2.3.1. Medición de Pulso Electromagnético	28
5.3. Conexión Marcapasos a Circuito de Medición	29
5.4. Configuración de Equipos	31
5.4.1. Configuración de Osciloscopio de Medición.	31
5.4.2. Configuración de Marcapasos Implantable	32
5.4.3. Configuración de Medidor de Campo Eléctrico	32
6. Resultados Experimentales	33
6.1. Registros de Mediciones	33

6.2.	Forma de Onda Marcapasos Implantable	35
6.2.1.	Resultados Espectrograma y Mapa TF	37
6.2.1.1.	Resultados de Espectrograma	38
6.2.1.2.	Resultados de Mapas TF	43
6.3.	Resultados Norma Marcapasos	48
6.3.1.	Forma de Onda Norma BS EN ISO 14708-2:2022	48
6.3.2.	Parametrización Forma de Onda	49
6.4.	Forma de Onda Campos Eléctricos y Pulsos Electromagnéticos	54
6.4.1.	Campo Eléctrico	55
6.4.2.	Pulsos Electromagnéticos	57
7.	Conclusión	60
A.	ANEXO	64
A.1.	Gráficas Completas Campo Eléctrico	64
A.2.	Resultados Experimentales	65
A.2.1.	Tablas Estadísticas Parametrización Forma de Onda y Variables exigidas por Norma	65
A.2.2.	Gráficas Power BI	67
A.2.2.1.	Exposición AC	67
A.2.2.2.	Exposición DC	69
A.2.2.3.	Exposición Impulso	72
A.2.3.	Diagramas de Caja	74
A.2.3.1.	Exposición AC	74
A.2.3.2.	Exposición DC	77
A.2.3.3.	Exposición PEM	79
A.2.3.4.	Tablas de Datos de Exposición	82
A.2.4.	Valores de Campo Eléctrico para Exposición Impulso	83
A.2.5.	Formas de Onda Canal 1 Exposición AC	84
A.2.6.	Formas de Onda Canal 1 Exposición Impulso	86
A.2.7.	Formas de Onda Canal 3 Exposición Impulso	89

Índice de Tablas

5.1. Configuración de mediciones a realizar para exposición a campo eléctrico AC, DC e Impulso.	22
5.2. Campo eléctrico obtenido por simulación y errores porcentuales al comparar con valores esperados. . .	24
5.3. Especificaciones del transformador de prueba para generación de campo eléctrico AC.	26
5.4. Especificaciones de los componentes del circuito de generación campo eléctrico DC.	27
5.5. Especificaciones de los componentes del circuito ensayo Impulso.	28
5.6. Configuración marcapasos implantable	32
6.1. Primeras 5 mediciones de exposición AC.	34
6.2. Primeras 5 mediciones de exposición DC.	34
6.3. Registro de error porcentual de tensión para mediciones de exposición AC.	34
6.4. Registro completo de error porcentual de tensión de mediciones de exposición DC.	34
6.5. Error porcentual en Amplitud de Subida con respecto al configurado previamente.	53
6.6. Error porcentual en Amplitud de Bajada con respecto al configurado previamente.	53
6.7. Error porcentual en Tiempo Meseta con respecto al configurado previamente.	53
6.8. Error porcentual en Frecuencia con respecto al configurado previamente.	54
6.9. Valores estadísticos entre exposiciones para datos parametrizados.	54
6.10. Valores estadísticos entre exposiciones para datos de Norma.	54
6.11. Datos de Campo Eléctrico en punto de origen y distancia de exposición.	55
6.12. Errores porcentuales entre valores de $E_{rms\text{teorico}}$ y $E_{rms\text{distancia}}$	56
6.13. Error porcentual de campo eléctrico AC en comparación con medidor.	56
A.1. Promedio y desviación estándar para parametrización de forma de onda de datos obtenidos por Norma de Marcapasos para exposición AC.	65
A.2. Promedio y desviación estándar para datos exigidos por norma de marcapasos para exposición AC. . .	65
A.3. Promedio y desviación estándar para parametrización de forma de onda de datos obtenidos por norma de marcapasos para exposición DC.	65
A.4. Promedio y desviación estándar para datos exigidos por norma de marcapasos para exposición DC. . .	66
A.5. Promedio y desviación estándar para parametrización de forma de onda de datos obtenidos por norma de marcapasos para exposición Impulso.	66
A.6. Promedio y desviación estándar para datos exigidos por norma de marcapasos para exposición Impulso.	66
A.7. Registro completo mediciones de exposición AC	82
A.8. Registro completo de mediciones de exposición DC.	82
A.9. Valores de campo eléctrico a exposición impulso	83

Índice de Figuras

3.1. Diagrama circuital por norma para la obtención de las variables a observar [9].	5
3.2. Forma de onda esperada al realizar ensayo de duración, amplitud e intervalo de pulso. Tal como se indica en la norma [9].	5
3.3. Representación gráfica de la interacción entre varias cargas y el punto de observación. Adaptado de [10].	7
3.4. Representación de los caminos posibles de a a b dentro de un entorno cerrado. Tal como se muestra en [10]	7
3.5. Representación gráfica de una onda electromagnética [10].	12
3.6. Diagrama utilizado como caso de estudio en [16].	12
3.7. Circuito representativo de acople del campo externo donde V_s e I_s representan la incidencia del campo [16].	14
3.8. Representación de una antena circular teórica [16].	15
3.9. Circuitos Thevenin utilizados para el calculo del factor de antena [16].	16
4.1. Asistolia producida por efecto de ruido intermitente. Como se muestra en [19].	19
5.1. Configuración simulación esferas en FEMM.	23
5.2. Gráficas de campo eléctrico con diferentes condiciones de borde.	24
5.3. Circuito AC utilizado para la exposición a campo eléctrico AC. Elaboración propia.	26
5.4. Circuito DC utilizado para la exposición a campo eléctrico DC. Modificado de [23].	27
5.5. Circuito acoplado a generación de campo eléctrico DC, donde A y B corresponden a los puntos de conexión. Este circuito fue extraído y modificado del documento [23].	28
5.6. Imagen de antena DEEPACE para toma de mediciones de PEM. Obtenida de [24].	29
5.7. Fotografía extremo alimentador de cable marcapasos. Elaboración propia.	29
5.8. Fotografía montura de marcapasos y cable conectados a punta diferencial y pieza adaptadora. Elaboración propia.	30
5.9. Esquema de conexión para medición completo.	30
5.10. Osciloscopio InfiniiVision MSO-X 3014 A utilizado para la experimentación. Imagen obtenida de [25].	31
5.11. Detector de radiaciones electromagnéticas.	32
6.1. Pulso de tensión de salida de marcapasos en exposición AC.	35
6.2. Pulso de salida de marcapasos en exposición DC.	36
6.3. Pulso de salida de marcapasos en exposición DC para ventana de 2 millones de datos.	36
6.4. Pulso de salida de marcapasos en exposición AC para ventana de 2 millones de datos.	37
6.5. Ventana Hanning y ejemplo de su aplicación en una señal sinusoidal de 50 Hz.	38
6.6. Espectrograma N°1 exposición AC.	39
6.7. Espectrograma N°2 exposición AC.	39
6.8. Espectrograma N°3 exposición AC.	40
6.9. Espectrograma N°1 exposición DC.	40
6.10. Espectrograma N°2 exposición DC.	41
6.11. Espectrograma N°2 exposición Impulso de Baja Magnitud.	42
6.12. Espectrograma N°1 exposición Impulso de Alta Magnitud.	42
6.13. Detección visual de PEM inducida en diferentes señales de marcapasos.	43
6.14. Mapa TF para exposición DC con ventana de 20000 datos.	44

6.15. Mapa TF para exposición DC con ventana de 2 millones de datos.	45
6.16. Mapa TF para exposición AC con ventana de 20000 datos.	46
6.17. Mapa TF para exposición AC con ventana de 2 millones de datos.	47
6.18. Mapas TF para exposición Impulso.	47
6.19. Formas de Onda obtenidas según [9]	48
6.20. Forma de onda completa para caso base sin resistencia aplicada.	49
6.21. Parametrización de la forma de onda obtenida al realizar ensayo por norma.	50
6.22. Diagramas de Caja de Amplitud de Subida y Bajada en exposición AC.	50
6.23. Diagramas de Caja de Amplitud de Subida y Bajada en exposición DC.	51
6.24. Diagramas de Caja de Amplitud de Subida y Bajada en exposición PEM.	51
6.25. Plantilla Power BI para Tiempo de Subida y de Bajada a exposición AC.	52
6.26. Plantilla Power BI para Tiempo de Subida y de Bajada a exposición DC.	52
6.27. Plantilla Power BI para Tiempo de Subida y de Bajada a exposición Impulso.	53
6.28. Formas de onda de salida de circuito generador de exposición para primera y ultima exposición AC.	55
6.29. Formas de onda Impulso 20 kV a 80 cm con diferentes resoluciones	57
6.30. Comparación de señales de tensión y campo eléctrico obtenidos por antena.	58
A.1. Gráfica de campo eléctrico con respecto a la distancia a 20 [kV] de tensión de borde en esfera interna.	64
A.2. Gráfica de campo eléctrico con respecto a la distancia a 60 [kV] de tensión de borde en esfera interna.	64
A.3. Diagramas de caja de amplitud subida y bajada AC.	74
A.4. Diagramas de caja de tiempo de subida y bajada AC.	75
A.5. Diagramas de caja de tiempo meseta y pendiente AC.	75
A.6. Diagramas de caja de frecuencia y duraciones AC.	76
A.7. Diagramas de caja amplitudes norma y amplitud subida AC.	76
A.8. Diagramas de caja de amplitud subida y bajada DC.	77
A.9. Diagramas de caja de tiempo de subida y bajada DC.	77
A.10. Diagramas de caja de tiempo meseta y pendiente DC.	78
A.11. Diagramas de caja de frecuencia y duraciones DC.	78
A.12. Diagramas de caja amplitudes norma y amplitud subida DC.	79
A.13. Diagramas de caja de amplitud subida y bajada PEM.	79
A.14. Diagramas de caja de tiempo de subida y bajada PEM.	80
A.15. Diagramas de caja de tiempo meseta y pendiente PEM.	80
A.16. Diagramas de caja de frecuencia y duraciones PEM.	81
A.17. Diagramas de caja de amplitudes norma y amplitud subida PEM.	81
A.41. Formas de onda Canal 3 Exposición Impulso	89
A.42. Formas de onda Canal 3 Exposición Impulso	90
A.43. Formas de onda Canal 3 Exposición Impulso a distintas distancias	90
A.44. Formas de onda Canal 3 Exposición Impulso con diferentes tiempos de exposición	91
A.45. Formas de onda Canal 3 Exposición Impulso para diferentes configuraciones	91
A.46. Formas de onda Canal 3 Exposición Impulso para diferentes configuraciones	92
A.47. Formas de onda Canal 3 Exposición Impulso para diferentes configuraciones	92
A.48. Formas de onda Canal 3 Exposición Impulso para diferentes configuraciones	93
A.49. Formas de onda Canal 3 Exposición Impulso para diferentes configuraciones	93
A.50. Formas de onda Canal 3 Exposición Impulso para diferentes configuraciones	94
A.51. Formas de onda Canal 3 Exposición Impulso para diferentes configuraciones de voltaje y distancia	94
A.52. EEMP Canal 3 - Configuraciones de cable y distancia	95
A.53. EEMP y VEMP Canal 3 - 80cm y 60cm	95
A.54. VEMP Canal 3 - Diferentes tiempos y distancias	96
A.55. VEMP Canal 3 - Cable y distancias	96
A.56. VEMP Canal 3 - Distancias y voltajes	97
A.57. VEMP Canal 3 - Variaciones de voltaje y distancia	97
A.58. VEMP Canal 3 - Diferentes configuraciones	98
A.59. VEMP Canal 3 - 100cm y cable solo	98
A.60. VEMP Canal 3 - 60cm y 80cm	99

A.61.VEMP Canal 3 - 80cm 99
 A.62.VEMP Canal 3 - Variaciones en distancia y cable 100
 A.63.VEMP Canal 3 - 60cm y 80cm 100
 A.64.VEMP Canal 3 - Configuraciones finales 101



1 | Introducción

En la actualidad los avances tecnológicos han permitido extender y mejorar la calidad de vida de la humanidad tanto en el ámbito médico como en el eléctrico. Estas áreas han evolucionado de la mano en cuanto al desarrollo humano se trata, llegando a crear dispositivos que logren tanto monitorear como corregir el latido cardíaco. Uno de estos dispositivos corresponde a los marcapasos implantables.

Un marcapasos implantable es un dispositivo que tiene la capacidad de estimular eléctricamente el corazón. Este dispositivo consta de varios componentes esenciales para su funcionamiento: una fuente de energía, que puede ser una batería o pilas, un sistema electrónico encargado de generar pulsos de tensión y electrodos que transmiten el estímulo de manera directa al corazón [1]. Su finalidad es la de corregir mal funciones en el ritmo cardíaco del paciente producidas por distintas enfermedades tales como bradicardias o arritmias lentas, ambas asociadas a una baja frecuencia cardíaca. Esto siempre acompañado previamente de un electrocardiograma (procedimiento en el cual se registra el ritmo cardíaco del paciente) [2].

Siendo un dispositivo electrónico, es susceptible a diversas influencias electromagnéticas externas, las cuales pueden causar su mal funcionamiento si no se controlan adecuadamente o si el dispositivo carece de restricciones en su interacción con estas perturbaciones.

Un pulso electromagnético se define como una repentina explosión de radiación electromagnética la cual se caracteriza por tener un tiempo de subida de intensidad magnética muy rápida (del orden de los nano segundos) y una amplia banda de frecuencia llegando a presentar una forma de onda de pocos hertz hasta cientos de megahertz [3]. Frecuentemente, los pulsos electromagnéticos (EMP, por sus siglas en inglés) se vinculan con explosiones nucleares o ataques terroristas malintencionados [4]. No obstante, cualquier dispositivo eléctrico que genere un campo electromagnético de gran magnitud podría desencadenar un pulso electromagnético lo bastante peligroso como para afectar a los dispositivos electrónicos en su entorno. Esto presenta un alto riesgo a pacientes con marcapasos implantables que vivan en zonas urbanas en cercanías de transformadores o líneas de transmisión de alta tensión o media tensión.

En un estudio realizado por la Sociedad Española de Cardiología se registra que en los últimos 10 años se ha detectado un incremento de aproximadamente un 45 % en la cantidad de marcapasos implantados en 2021 con respecto al 2010 [5] [6], esta tendencia al alza resulta indicativa de la necesidad a la investigación en la influencia de campos y pulsos electromagnéticos sobre marcapasos implantables. Se han realizado investigaciones previas con respecto a dicha temática, concluyendo en la confiabilidad de estos dispositivos frente a distintas intensidades de campo y pulso electromagnético. Se ha observado un modo de inhibición de campo en donde el dispositivo logra reconocer la influencia externa y la inhibe tal de no afectar al paciente. Sin embargo se considera necesario continuar la investigación tal de obtener un mejor entendimiento de este tipo de interacciones [7]. La investigación ha determinado que un campo magnético de hasta 200 V/m, según las normativas de la Asociación para el Avance de la Instrumentación Médica (AAMI, por sus siglas en inglés), corresponde a un umbral de no afección para los pacientes con marcapasos. Sin embargo, se detectó un caso en el que un paciente experimentó una anomalía en su electrocardiograma al ser expuesto a un campo magnético de prueba. Esta anomalía causó síntomas de mareo y fatiga en el paciente [7].

En resumen, y considerando todo lo mencionado anteriormente, los marcapasos eléctricos resultan ser un dispositivo imprescindible para la medicina moderna. Su función permite tratar a pacientes con enfermedades cardíacas específicas, permitiéndoles regularizar su ritmo cardíaco. Sin embargo, la influencia de factores eléctricos externos resulta una amenaza para la funcionalidad de dicho dispositivo. Con el objetivo de proporcionar cierto grado de guía y apoyo a la investigación actual, esta memoria tiene como objetivo verificar la influencia de campos y pulsos

electromagnéticos en un marcapasos implantable bicameral previamente retirado de un paciente debido a reemplazo por agotamiento de batería, sometiéndolo a distintas configuraciones de pulsos y campo electromagnético generados mediante circuitos eléctricos previamente configurados para dicho fin y analizando de forma visual y estadística su influencia en la salida eléctrica del marcapasos. Cabe mencionar que por razones de seguridad médica del paciente los recambios de marcapasos no se realizan al agotar la totalidad de su batería sino, que llegado cierto porcentaje generalmente el 30 % de batería, se comienza el protocolo de recambio de marcapasos.



2 | Objetivos

- Objetivo General:
 - Determinar el comportamiento de marcapasos bicamerales implantables frente a interferencias electromagnéticas provocadas por campos y pulsos electromagnéticos de alta intensidad.
- Objetivos Específicos:
 1. Realizar un análisis del estado del arte sobre marcapasos bicamerales, enfocándose en la respuesta a campos y pulsos electromagnéticos de alta intensidad, y comprendiendo cómo estos afectan las variables eléctricas asociadas a la generación de pulsos del dispositivo.
 2. Medir la intensidad del campo electromagnético en el entorno de laboratorio durante ensayos de alta tensión y comparar con las especificaciones técnicas del dispositivo.
 3. Intervenir un marcapasos implantable para llevar a cabo mediciones de pulsos, sensibilidad, tiempo de respuesta, ritmo de pulso, periodo refractario, modulación de ritmo, etc. De acuerdo con las pautas establecidas por la BSI (British Standards Institution).
 4. Analizar el impacto en las variables eléctricas medidas (definidas por la BSI) por exposición a campos y pulsos electromagnéticos, al variar la intensidad del campo y los parámetros de tiempo del pulso. Comparar los valores previos y posteriores a la exposición con los límites permitidos por la BSI para verificar interferencias en el dispositivo.

3 | Marco Teórico

3.1. Marcapasos Implantables

Tal como se menciona en la Sección 1, un marcapasos implantable es un dispositivo médico diseñado para estimular eléctricamente el corazón y corregir disfunciones del ritmo cardíaco, como las bradicardias o arritmias. Su estructura incluye una fuente de energía, un sistema electrónico generador de pulsos y electrodos que transmiten el estímulo al corazón.

Del punto de vista eléctrico, se tienen tres elementos de gran importancia al analizar un marcapasos:

1. El uso de cables que lleven la señal eléctrica del dispositivo al corazón.
2. La presencia de material conductor que puede ser influenciado por fuentes externas.
3. La forma de onda que genera el dispositivo mediante la programación de componentes electrónicos.

3.1.1. Normativa de Marcapasos Implantables

En la actualidad existen normas que regulan la forma de onda que genera y transmite un marcapasos implantable, esto tal de resguardar la sensibilidad eléctrica de un órgano tan importante como es el corazón ya que *“la presencia de señales extrañas o ruido, procedente de fuentes eléctricas o magnéticas externas, es causa de comportamientos no deseados, en el mejor de los casos, pudiendo en otros producir respuestas del aparato que originen asistolias o tratamientos de arritmias inexistentes”*[8]. La norma a utilizar corresponde a la “BS EN ISO 147082:2022” de la British Standards Institution (o BSI), en ella se explican los procedimientos de distintas pruebas que se deben realizar al dispositivo para asegurar su correcto funcionamiento, de las cuales este estudio se centrará en cuatro variables:

- Duración de Pulso (D)
- Amplitud de Pulso (A)
- Intervalo de Pulso (t_p)
- Frecuencia de Pulso

Para la obtención de estas cuatro variables se presenta el siguiente diagrama circuital según norma:

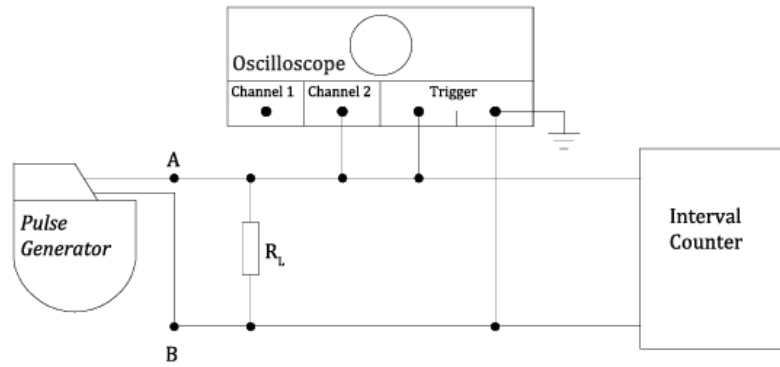


Figura 3.1: Diagrama circuital por norma para la obtención de las variables a observar [9].

Esta configuración permitirá medir en el osciloscopio la señal generada por el marcapasos ante una resistencia de $500\Omega \pm 1\%$, se deberán registrar en el osciloscopio al menos 20 pulsos generados y luego repetir el mismo procedimiento con R_L de $240\Omega \pm 1\%$ y de $2k\Omega \pm 1\%$. Se deberían observar pulsos de aproximadamente la siguiente forma de onda:

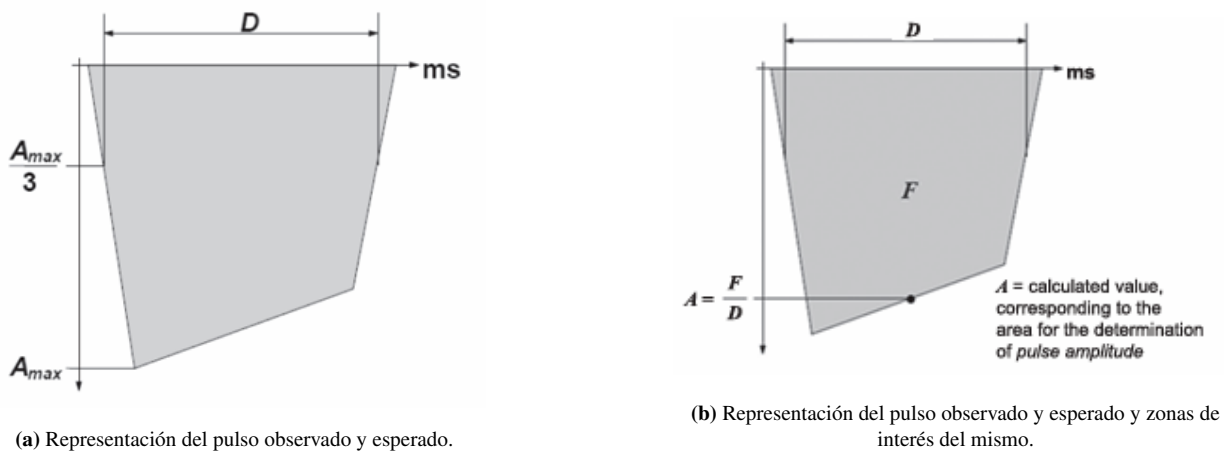


Figura 3.2: Forma de onda esperada al realizar ensayo de duración, amplitud e intervalo de pulso. Tal como se indica en la norma [9].

Luego de registrar los pulsos se obtiene la altura máxima (A_{max}) y el tercio de la misma, luego se define la duración de pulso (D) como el tiempo de subida y bajada del pulso dentro de los tercios de la altura máxima del pulso. Para la obtención de la amplitud de pulso se debe obtener el área total del pulso (F) dividida por la duración de pulso, o sea, $A = \frac{F}{D}$ y la frecuencia de pulso será medida desde cada detección de pulso con el trigger del osciloscopio hasta el inicio del siguiente pulso. Las unidades de cada variable son las siguientes:

- Duración de Pulso: Milisegundos en ms .
- Amplitud de Pulso: Volts o Miliamperios en V o mA .
- Intervalo de Pulso: Milisegundos en ms .
- Frecuencia de Pulso: Minutos Recíprocos en min^{-1} .

3.2. Campo Eléctrico

En resumidas cuentas se puede definir la variable campo eléctrico como “*la propiedad del espacio que rodea una carga eléctrica y que se manifiesta como una fuerza sobre otras cargas eléctricas*” [10].

Esta línea de pensamiento nos lleva a buscar una forma matemática para entender el fenómeno. En 1785, el matemático y físico Charles-Augustin de Coulomb, mediante experimentos, descubrió la relación entre las cargas y la distancia entre ellas, y así estableció la ecuación que describe la fuerza generada por su interacción.

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q \cdot q'}{r^2} \hat{r} \quad (3.1)$$

Donde \mathbf{F} es la fuerza eléctrica con unidades de N , q y q' son las cargas de prueba que interactúan entre sí con unidades de C , ϵ_0 corresponde a la constante dieléctrica del medio (por defecto vacío) con unidades de F/m , r la distancia entre las dos cargas, unidad de m y \hat{r} corresponde al vector unitario en la dirección de la interacción de las dos cargas y por ende resulta adimensional.

Ahora, si llevamos a términos más generales se tendrá que el campo eléctrico se define como la fuerza por unidad de carga que una carga de prueba q' experimenta debido a una fuente de carga q , por ello se tendrá la siguiente relación:

$$E = \frac{F}{q'} \quad (3.2)$$

Obteniéndose la ecuación de campo eléctrico que depende de la carga de la fuente y de la distancia al punto de observación:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \hat{r} \quad (3.3)$$

Si ahora, en vez de pensar en cargas puntuales, se consideran distribuciones continuas de cargas eléctricas se deberá utilizar calculo integral para obtener el campo eléctrico generado por dicha distribución con la siguiente relación:

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \int \frac{dq}{|r - r'|^2} \hat{r}' \quad (3.4)$$

Donde r' corresponde a la posición del elemento de carga y r es la posición de observación del campo eléctrico.

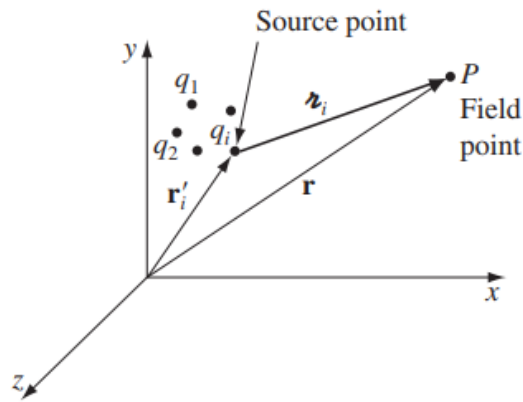


Figura 3.3: Representación gráfica de la interacción entre varias cargas y el punto de observación. Adaptado de [10].

3.2.1. Potencial Eléctrico

Debido a que el campo eléctrico corresponde a una variable vectorial se requiere, por simplicidad, reducir dicha magnitud a una variable escalar, o sea, sin dirección. Según se explica en [10], el campo eléctrico es conservativo, lo que implica que la integral del campo a lo largo de un camino cerrado es siempre cero. Esto significa que el valor de la integral entre dos puntos no depende del trayecto seguido, ya sea de a a b o en sentido contrario. Para una visualización de este concepto, consulte la Figura 3.4.

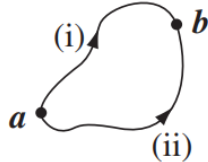


Figura 3.4: Representación de los caminos posibles de a a b dentro de un entorno cerrado. Tal como se muestra en [10]

Se puede considerar que el campo eléctrico corresponde al gradiente de una variable que consideraremos como V , obteniéndose:

$$E = -\nabla V \quad (3.5)$$

Al integrar con respecto al camino, se obtiene:

$$V(\mathbf{r}) = -\int_O^r E \cdot d\mathbf{l} \quad (3.6)$$

En esta ecuación se presenta la variable V la cual corresponde al potencial eléctrico, con unidad de Volt, y se define como la energía por unidad de carga requerida para mover una carga desde un punto O , que actúa como punto de referencia, hasta un punto r , que generalmente se utiliza como el radio en que el campo eléctrico actúa.

Para el caso en donde se tiene un campo eléctrico uniforme en todo el espacio, o sea, independiente de la distancia, se logra observar que, en la ecuación (3.6), al integrar un distancia d , el potencial eléctrico resulta:

$$V = \int_0^d E \cdot dl \quad (3.7)$$

$$V = E \cdot d \quad (3.8)$$

Con lo cual se puede despejar el campo eléctrico obteniendo:

$$E = \frac{V}{d} \quad (3.9)$$

Esta igualdad resulta sumamente importante ya que, al momento de realizar mediciones de campo eléctrico se utilizan elementos y dispositivos que miden el potencial eléctrico generado y de dicha medición se obtiene el campo eléctrico de forma indirecta.

3.2.2. Normativa de Campo Eléctrico

Debido a la incorporación de líneas de transmisión de alta tensión en zonas urbanas resultó necesario el tener una normativa que regule el campo eléctrico generado por estos elementos tal que no afecten al entorno ¹. Es por ello que existen distintas normativas que buscan regular este valor.

En Chile existe una normativa específica dada en el Pliego Técnico Normativo RPTD N° 07 de $5kV/m$, este valor varía en algunas normas internacionales pero la mayoría converge en que $5kV/m$ es un valor de campo eléctrico suficiente para resguardar la seguridad ante campos eléctricos.

En otras normativas como la europea [12], la de la comisión internacional para la protección ante la radiación no ionizante (ICNIRP por sus siglas en inglés) [13] y la normativa española [14] el valor de campo eléctrico puede llegar hasta los $10 kV/m$ en cortos periodos de tiempo.

3.3. Leyes de Maxwell

Las leyes de Maxwell son un conjunto de ecuaciones fundamentales de la física electromagnética que describen el comportamiento de los campos eléctricos y campos magnéticos [10]. Estas ecuaciones pueden ser escritas de forma diferencial y de forma integral.

Estas cuatro ecuaciones corresponden a:

1. **Ley de Gauss para el campo eléctrico:** Describe la relación entre el campo eléctrico y la carga eléctrica.

Forma diferencial:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3.10)$$

donde $\nabla \cdot \mathbf{E}$ corresponde a la divergencia del campo eléctrico \mathbf{E} , ρ es la densidad de carga y ϵ_0 es la permitividad del vacío.

La forma diferencial de la ley de Gauss establece que la divergencia del campo eléctrico en un punto es igual a la densidad de carga en ese punto dividida por la permitividad del vacío.

Forma integral:

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q_{enc}}{\epsilon_0} \quad (3.11)$$

donde Q_{enc} corresponde a la carga encerrada por el diferencial de área dA .

¹Como por ejemplo otras líneas de alta tensión u otros dispositivos electrónicos. Incluso, según [11], el ruido electromagnético puede desorientar a las aves migratorias al afectar su brújula magnética.

La forma integral de la ley de Gauss establece que el flujo total del campo eléctrico a través de una superficie cerrada es proporcional a la carga total encerrada dentro de esa superficie.

2. **Ley de Gauss para el campo magnético:** Establece que no existen monopolos magnéticos.

Forma diferencial:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.12)$$

donde \mathbf{B} es el campo magnético.

La forma diferencial de la ley de Gauss para el campo magnético indica que la divergencia del campo magnético es cero, lo que implica que no hay puntos de inicio o fin de las líneas de campo magnético en el espacio.

Forma integral:

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad (3.13)$$

La forma integral de esta ley establece que el flujo total del campo magnético a través de una superficie cerrada es siempre cero, indicando que las líneas de campo magnético forman bucles cerrados.

3. **Ley de Faraday de la inducción:** Describe cómo un campo magnético variable en el tiempo puede inducir un campo eléctrico.

Forma diferencial:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.14)$$

La forma diferencial de la ley de Faraday indica que la rotación del campo eléctrico es igual a la tasa de cambio negativa del campo magnético con respecto al tiempo.

Forma integral:

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (3.15)$$

La forma integral de esta ley establece que la circulación del campo eléctrico alrededor de un contorno cerrado es igual a la tasa de cambio negativa del flujo magnético a través de la superficie delimitada por el contorno.

4. **Ley de Ampère-Maxwell:** Relaciona el campo magnético con la corriente eléctrica y el campo eléctrico variable.

Forma diferencial:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (3.16)$$

donde μ_0 es la permeabilidad del vacío y \mathbf{J} es la densidad de corriente.

La forma diferencial de la ley de Ampère-Maxwell establece que la rotación del campo magnético es igual a la densidad de corriente multiplicada por la permeabilidad del vacío más el producto de la permitividad del vacío y la tasa de cambio del campo eléctrico.

Forma integral:

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \iint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{A} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \iint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} \quad (3.17)$$

La forma integral de esta ley establece que la circulación del campo magnético alrededor de un contorno cerrado es igual a la corriente total que atraviesa la superficie delimitada por el contorno más la tasa de cambio del flujo eléctrico a través de la misma superficie multiplicada por la permeabilidad y la permitividad del vacío.

Siendo la ecuación 3.11 y la ecuación 3.15 las más importantes para esta investigación.

3.4. Ley de Continuidad de Carga

La ley de continuidad de carga es un principio fundamental en electromagnetismo que describe la conservación de la carga eléctrica. Esta ley establece que la cantidad total de carga eléctrica en un sistema cerrado no cambia con el tiempo. Matemáticamente, la ley de continuidad de carga se expresa mediante la siguiente ecuación integral:

$$\oint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV \quad (3.18)$$

Donde:

- \vec{J} es la densidad de corriente eléctrica.
- S es una superficie cerrada que delimita el volumen V .
- ρ es la densidad de carga eléctrica.
- $d\vec{S}$ es un vector diferencial de superficie que apunta hacia afuera de la superficie S .
- dV es un elemento diferencial de volumen.

La ecuación integral de la ley de continuidad de carga puede interpretarse de la siguiente manera: la integral de la densidad de corriente \vec{J} sobre una superficie cerrada S es igual a la tasa de cambio temporal negativa de la carga total dentro del volumen V encerrado por dicha superficie. En otras palabras, cualquier variación en la carga dentro del volumen V debe estar acompañada por un flujo de corriente a través de la superficie S .

Para derivar la ecuación integral de la ley de continuidad de carga, comenzamos con la ecuación de continuidad en forma diferencial:

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3.19)$$

Aplicando el teorema de Gauss a la divergencia de la densidad de corriente, obtenemos:

$$\oint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} = \int_V \nabla \cdot \vec{J} dV \quad (3.20)$$

Sustituyendo la ecuación diferencial de continuidad en la ecuación anterior, tenemos:

$$\oint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} = \int_V -\frac{\partial \rho}{\partial t} dV \quad (3.21)$$

Finalmente, cambiando el orden de la derivada parcial y la integral, llegamos a la ecuación integral de la ley de continuidad de carga:

$$\oint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV \quad (3.22)$$

Esta ecuación destaca la interrelación entre la corriente eléctrica y la distribución de la carga eléctrica en un sistema, asegurando la conservación de la carga en cualquier volumen cerrado.

3.5. Pulso Electromagnético

Tal como se menciona en la Sección 1 un pulso electromagnético se define como una repentina explosión de radiación electromagnética la cual se caracteriza por tener un tiempo de subida de intensidad magnética muy rápida y una amplia banda de frecuencia llegando a presentar una forma de onda tanto de pocos hertz hasta cientos de megahertz [3].

Debido a la naturaleza dinámica y repentina de su generación, la variabilidad en frecuencia y amplitud de estas ondas electromagnéticas no solo generan un riesgo en pacientes con elementos electrónicos implantados, como lo es un marcapasos, sino que también dificultan la medición de la señal propagada por el tiempo y el espacio ya que las altas frecuencias de estos pulsos generan conflictos en varios aparatos de mediciones eléctrica debido a que sus frecuencias superan con creces la frecuencia de muestreo del instrumento de medición. Para lograr medir de forma correcta una señal se debe tener una frecuencia de muestreo de al menos dos veces la frecuencia de la señal original [15], es por esto que al buscar medir señales de pulso electromagnético, las cuales presentan altas frecuencias en su composición, se requieren equipos de frecuencias de muestreo extremadamente altas en comparación a las de los equipos de medición convencionales.

3.6. Compatibilidad Electromagnética

La compatibilidad electromagnética (CEM o EMC por sus siglas en ingles) es una rama de la ciencia e ingeniería que se ocupa del diseño y operación de equipos eléctricos en una manera de hacerlos inmunes a cierto grado de interferencia electromagnética [16]. Debido a que gran mayoría de los aparatos y estructuras de hoy en día dependen de electricidad para su funcionamiento se ha vuelto cada vez más relevante esta área de la ingeniería eléctrica ya que se hace presente en todos los grados de uso de la electricidad, desde dispositivos simples como relojes a baterías hasta estructuras complejas como subestaciones eléctricas o líneas de alta tensión. Dentro del gran rango de áreas que la compatibilidad electromagnética estudia, este documento se centra en tres:

- Propagación de campo electromagnético.
- Acoplamiento electromagnético proveniente de campos externos.
- Mediciones de interferencias electromagnéticas, más específicamente uso de antenas.

3.6.1. Propagación de Campo Electromagnético

Para entender cómo se propaga el campo electromagnético en el espacio y el tiempo se requiere una mirada ondulatoria del fenómeno. Para ilustrar como esto se representa, se considerará la propagación de una onda en el eje x , y y z a través del vacío. En la Figura 3.5 se ilustra la propagación de una onda electromagnética a través del eje z . Considerando las componentes no nulas del campo eléctrico y magnético y por ende, utilizando las leyes de Maxwell, ecuaciones (3.14) y (3.17), se tendrá las siguientes igualdades:

$$-\frac{\partial H_z}{\partial x} = \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \quad (3.24)$$

Diferenciando la primera ecuación con respecto a t , la segunda con respecto a x y combinándolas se obtiene:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \mu\varepsilon \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \quad (3.25)$$

Como se logra observar en la ecuación (3.25) la interacción del campo magnético y campo eléctrico presentan el comportamiento típico de una onda que viaja a través del espacio y el tiempo. Esto implica que, al momento de generarse un cambio en un campo eléctrico o magnético se provoca la aparición de una onda electromagnética la cual tiene las propiedades de incidencia, reflexión y transmisión. Cabe mencionar que la ecuación (3.25) muestra el comportamiento ondulatorio del campo eléctrico mas, utilizando la ley de Faraday de inducción, ecuación (3.14), se infiere que el campo magnético es siempre perpendicular en dirección al campo eléctrico y por ende tendrá un comportamiento similar pero girado en 90° en el eje de propagación.

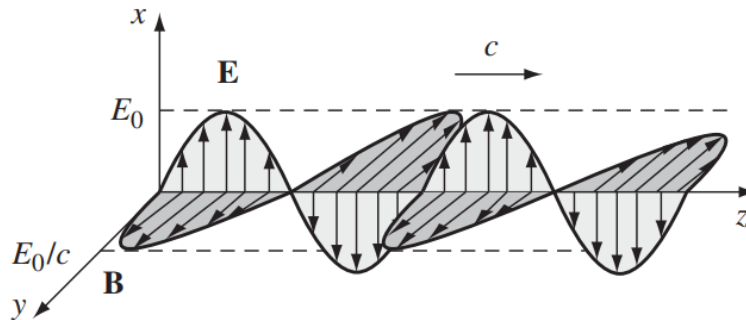


Figura 3.5: Representación gráfica de una onda electromagnética [10].

3.6.2. Acoplamiento electromagnético proveniente de campos externos

Tal de llevar la teoría presente en [16] al objeto de estudio se considerará el siguiente caso: línea de transmisión portadora de corriente bajo la influencia de un campo externo, Figura 3.6, la cual se asemeja, en distintos términos de magnitud, al caso de estudio de este documento: marcapasos (incluyendo cables) bajo influencia de campos eléctricos externos.

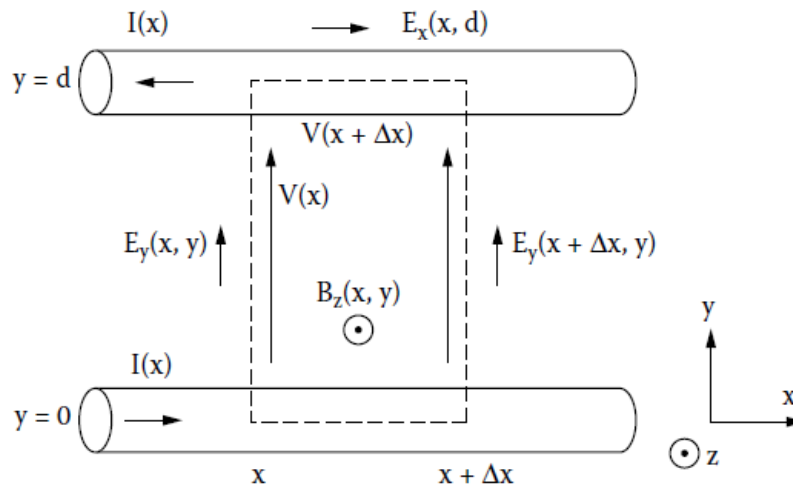


Figura 3.6: Diagrama utilizado como caso de estudio en [16].

Para comenzar se requiere realizar un análisis a la ley de Faraday de la inducción expresada en las leyes de Maxwell vistas en la Sección 3.3. Al observar la configuración mostrada en la Figura 3.6 se tiene que el lado derecho de la ley de Faraday de inducción se puede manipular de la siguiente forma:

$$\int E \cdot dl = \int_x^{x+\Delta x} E_x(x, 0)dx + \int_0^d E_y(x + \Delta x, y)dy - \int_x^{x+\Delta x} E_x(x, d)dx - \int_0^d E_y(x, y)dy \quad (3.26)$$

$$(3.27)$$

Se asume que el conductor corresponde a un conductor perfecto y por ende se asume que el campo eléctrico a lo largo del cable es 0, o sea, $E_x = 0$, obteniéndose:

$$\int E dl = \int_0^d E_y(x + \Delta x, y)dy - \int_0^d E_y(x, y)dy \quad (3.28)$$

$$\int E dl = V(x) - V(x + \Delta x) \quad (3.29)$$

Similarmente se tiene:

$$-\mu \frac{\partial}{\partial t} \int H ds = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \int_x^{x+\Delta x} \int_{y=0}^d H_z(x, y) dy dx \quad (3.30)$$

$$-\mu \frac{\partial}{\partial t} \int H ds \approx -\mu \frac{\partial}{\partial t} \int_0^d H_z(x, y) dy \Delta x \quad (3.31)$$

Donde la integral doble de la ecuación (3.30) corresponde al área de la línea punteada en la Figura 3.6.

Substituyendo (3.29) y (3.31) en la ecuación (3.15) se obtiene:

$$V(x) - V(x + \Delta x) = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \int_0^d H_z(x, y) dy \Delta x \quad (3.32)$$

La cual, dividiendo por Δx , se transforma en:

$$\frac{\partial V(x)}{\partial x} = \mu \frac{\partial}{\partial t} \int_0^d H_z(x, y) dy \quad (3.33)$$

Ahora, la componente del campo magnética H_z se puede separar en dos partes: H_z^i que corresponde a la incidencia del campo electromagnético y H_z^s que corresponde al campo generado por la corriente inducida. Por lo tanto, reemplazando esta igualdad ($H_z = H_z^i + H_z^s$) en la ecuación 3.33 y, considerando que el flujo magnético que atraviesa el circuito de la línea es igual por definición a $-L_d \cdot I(x)$ siendo L_d la inductancia por longitud de línea e $I(x)$ la corriente que fluye a través del circuito, se tiene lo siguiente:

$$\frac{\partial V(x)}{\partial x} + L_d \frac{\partial I(x)}{\partial x} = \mu \frac{\partial}{\partial t} \int_0^d H_z^i(x, y) dy \quad (3.34)$$

Como se observa en la ecuación (3.34), la componente derecha de la igualdad corresponde a un termino de fuente del campo externo dentro del circuito, obteniéndose:

$$\frac{\partial V(x)}{\partial x} + L_d \frac{\partial I(x)}{\partial x} = V_s(x) \quad (3.35)$$

Utilizando la ley de continuidad de carga en superficies cerradas, ecuación (3.22), se tiene la siguiente igualdad:

$$I(x + \Delta x) - I(x) = -\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV \quad (3.36)$$

En donde el termino de la derecha corresponde a la tasa de cambio de la carga dentro del volumen V , por lo tanto usando la ecuación (3.11), ley de Gauss para campo eléctrico, se tiene:

$$\int_V \rho dV = \int_S D dS = \int_S D^s dS = q \quad (3.37)$$

Por definición esta carga es igual a la capacitancia de los cables (de longitud Δx multiplicada por la diferencia de potencial asociada al campo.

$$q = C_d \Delta x V_{(x)}^s \quad (3.38)$$

$$q = -C_d \int_0^d E_y^s(x, y) dy \Delta x \quad (3.39)$$

$$q = -C_d \int_0^d E_y(x, y) dy \Delta x + C_d \int_0^d E_y^i(x, y) dy \Delta x \quad (3.40)$$

Combinando las ecuaciones (3.36) y (3.40) se obtiene:

$$\frac{\partial I(x)}{\partial x} + C_d \frac{\partial V(x)}{\partial t} = -C_d \frac{\partial}{\partial t} \int_0^d E_z^i(x, y) dy \quad (3.41)$$

Donde, al igual que en la ecuación (3.34), el termino de la derecha puede ser representado como el acoplamiento del campo en la línea y por ende se presenta la siguiente igualdad:

$$\frac{\partial I(x)}{\partial x} + C_d \frac{\partial V(x)}{\partial t} = I_s(x) \quad (3.42)$$

Gráficamente estos fenómenos, ecuaciones (3.35) y (3.42), se pueden representar como una fuente de tensión y de corriente inducida dentro del circuito respectivamente. A continuación se muestra una representación gráfica del circuito acoplado.

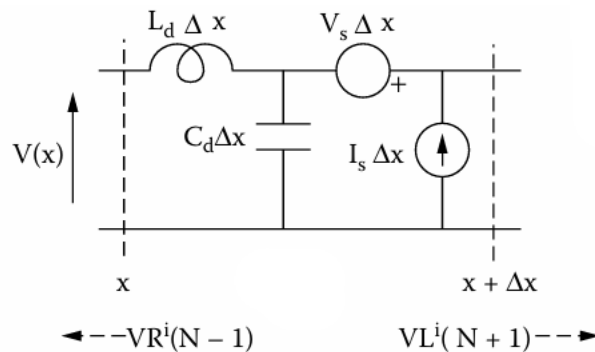


Figura 3.7: Circuito representativo de acople del campo externo donde V_s e I_s representan la incidencia del campo [16].

Como se puede observar en la Figura 3.7 el campo externo se acopla dentro del circuito en el cual incide presentándose como una fuente de tensión y de corriente afectando la salida del mismo.

Además de la inducción electromagnética, el dispositivo puede experimentar acoplamiento por radiación, donde las ondas electromagnéticas radiadas se acoplan directamente a los conductores del dispositivo, actuando como antenas receptoras. Este fenómeno se vuelve predominante en el campo lejano, donde la distancia a la fuente de radiación es significativa y las ondas captadas son menos dependientes del campo magnético local [17].

3.6.3. Mediciones de Interferencias Electromagnéticas (específicamente uso de antenas)

Una de las formas más simples y eficientes de medir ondas electromagnéticas corresponde al uso de antenas [16]. Una antena, básicamente, corresponde a un devanado de cable de una sola vuelta el cual puede tener forma rectangular, circular, ovalada, etc.

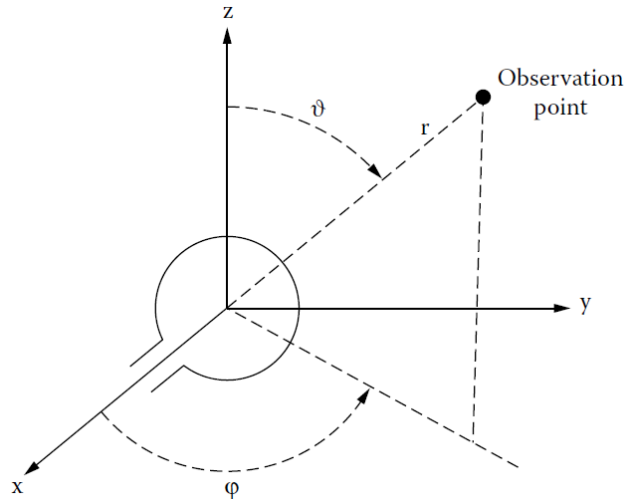


Figura 3.8: Representación de una antena circular teórica [16].

En resumidas cuentas una antena funciona como un receptor de la onda electromagnética incidente y transforma el campo electromagnético en señales de tensión que pueden ser medidas. Tal de no profundizar en la teoría de antenas se enfocará en una variable específica, el Factor de Antena (FA o AF por sus siglas en inglés).

El AF corresponde a la razón entre el valor del campo eléctrico incidente sobre la tensión medida en el receptor, o sea, la salida de la antena. Su ecuación corresponde a la siguiente:

$$AF = \frac{E_i}{V_L} \quad (3.43)$$

Donde E_i corresponde al valor del campo eléctrico incidente, en V/m y V_L corresponde a la tensión medida en el receptor, en V . Esta variable resulta de suma importancia, ya que es la que permite medir transformar la medición de tensión en la salida de la antena y convertirla en una medición indirecta de campo eléctrico. Normalmente el factor de antena se expresa con unidades de decibeles (o dB), por ello se utiliza la siguiente ecuación para obtener el campo eléctrico de la señal de tensión.

$$AF = E_i - V_L \quad (3.44)$$

Donde AF tiene unidades en dB , E_i unidades en $dB\mu V/m$ y V_L en $dB\mu V$.

Para determinar el AF, es necesario calcular el equivalente de Thevenin del circuito.

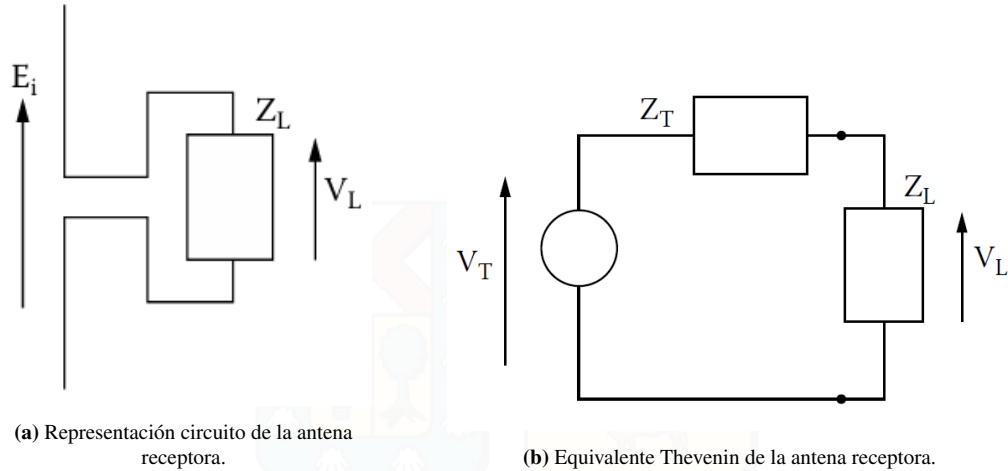


Figura 3.9: Circuitos Thevenin utilizados para el cálculo del factor de antena [16].

En la Figura 3.9 se presentan las variables Z_L y Z_T las cuales corresponden a la impedancia de carga conectada al objeto de medición e impedancia de transferencia respectivamente. Ambas impedancias son sumamente importantes, ya que afectan de forma significativa a la toma de mediciones. Para el caso de máxima transferencia de potencia se requiere que $Z_L = Z_T^*$ y por ende se obtiene:

$$P_{max} = \frac{|\bar{V}_T|^2}{4R_T} \quad (3.45)$$

Donde R_T corresponde a la parte real de la impedancia de transferencia Z_T y $|\bar{V}_T|$ corresponde a un valor *rms*.

Asumiendo que la antena es orientada para la máxima respuesta posible se tiene:

$$P_{max} = \frac{|\bar{E}_i|^2}{Z_0} \cdot A_e \quad (3.46)$$

En la ecuación (3.46) se tiene que $|\bar{E}_i|$ corresponde a un valor *rms*, el cual corresponde al valor cuadrático medio de la señal, Z_0 corresponde a la impedancia del medio que rodea la antena y A_e corresponde al área efectiva de la antena, que indica cuánta energía puede captar de una onda electromagnética incidente. Este valor depende de dos factores: G , que representa la ganancia de la antena, y λ , la longitud de onda de la onda incidente.

$$A_e = \frac{G\lambda^2}{4\pi} \quad (3.47)$$

Ahora, igualando los términos de la derecha de la ecuación (3.45) y (3.46), y substituyendo la ecuación (3.47) se obtiene lo siguiente:

$$|\bar{V}_T| = |\bar{E}_i| l_e \quad (3.48)$$

Donde $l_e = \lambda \sqrt{\frac{GR_T}{\pi Z_0}}$ y se describe como la longitud efectiva de la antena.

Ahora, y observando la Figura 3.9b, se presenta la siguiente ecuación:

$$|\bar{V}_L| = |\bar{E}_i| l_e \left| \frac{Z_L}{Z_L + Z_T} \right| \quad (3.49)$$

Por ende, el factor de antena queda:

$$AF = \frac{1}{l_e} \cdot \left| 1 + \frac{Z_T}{Z_L} \right| \quad (3.50)$$

Esta seguidilla de ecuaciones nos permite dar cuenta de varias relaciones:

- El factor de antena depende de parámetros constructivos de la antena en sí y por ello existen varias formas dependiendo de las necesidades de la medición.
- El factor de antena también se ve afectado por las propiedades físicas de la onda incidente debido a que la longitud efectiva de antena es proporcional a la longitud de onda de incidente y por ende a su frecuencia.
- Ondas incidentes de alta frecuencia disminuyen el valor del factor de antena ya que, como la frecuencia es indirectamente proporcional a la longitud de onda ($\lambda = c/f$), al tener altas frecuencias se tienen bajas longitudes de onda y por ende bajos valores de factor de antena. Esto provoca que la medición se vea afectada en mayor grado a problemas como interferencia, menor calidad de la señal medida y recepción de señal deficiente.



4 | Estado del Arte

4.1. Marcapasos Cardíaco

Como se mencionó en la Sección 3, un marcapasos implantable es un dispositivo electrónico diseñado para estimular eléctricamente el corazón y aplicar terapia cardíaca, utilizado en el tratamiento de diversas afecciones cardíacas.

Y este al ser un dispositivo electrónico, y estar compuesto por elementos eléctricos como cables y materiales conductores, se encuentra influenciado por los principios de la compatibilidad electromagnética. A continuación, se realizará una revisión de los estudios que han investigado la interacción entre campos electromagnéticos externos, pulsos electromagnéticos, y la respuesta de marcapasos implantables.

Encontrar estudios previos sobre este tema presenta complicaciones debido a la naturaleza extremadamente delicada y sensible de los marcapasos implantables. Las empresas que diseñan y fabrican estos dispositivos protegen legalmente la tecnología utilizada, lo que limita el acceso a la información interna del dispositivo. Como resultado, los estudios disponibles generalmente no incluyen datos internos del dispositivo, excepto aquellos verificables por cardiólogos mediante el uso de herramientas proporcionadas por la misma empresa para acceder a la programación del marcapasos.

4.1.1. Evolución de la Tecnología en Marcapasos Implantables

Desde la invención de los marcapasos implantables, y en continuo desarrollo tecnológico, se han resuelto varios problemas que han ido apareciendo a lo largo de los años, siendo uno de los principales el disminuir el tamaño y el peso del aparato. En la actualidad, existen varios tipos de marcapasos, que incluyen dispositivos unicamerales, bicamerales, con estimulación ventricular, auricular o biventricular, con sistemas de fijación activa o de anclaje, programables y no programables, entre otros. En [18] se presenta un estudio realizado por la Sociedad Española de Cardiología en el que se describe a pacientes con marcapasos registrados en múltiples hospitales de España. Este estudio, junto con su actualización en 2021, ofrece datos sobre las diferentes tecnologías empleadas y el porcentaje de la población que utiliza cada tipo de marcapasos, con el objetivo de analizar las tendencias que se mantienen a lo largo del tiempo.

De aquellas necesidades básicas que se han resuelto las siguientes son las más importantes a día de hoy:

- Tamaño y peso.
- Duración de batería.
- Capacidad de responder ante necesidades del cuerpo humano.
- Blindaje estructural ante corrosión, humedad e interferencias electromagnéticas.
- Capacidad de monitoreo, programación de estimulación cardíaca y registro de eventos anormales.
- Diferentes tipos de estimulación para diferentes necesidades según la patología cardíaca a tratar.

Avances en todos estos ámbitos y otros han permitido a los marcapasos ser un dispositivo confiable y seguro para tratar a pacientes con malversaciones cardíacas y permitirles llevar una vida cotidiana bajo precauciones mínimas y necesarias.

4.1.2. Afección a Interferencias Eléctricas Externas Típicas

Tal de comprobar cómo afectan las interferencias externas al funcionamiento de un marcapasos implantable Juan B. Tur realizó un experimento en el cual se hace cruzar a personas usuarias de marcapasos implantables a través de un umbral de campo magnético hasta los $0,25\text{ mT}$, como se explica en [19], tal de generar interferencias eléctricas por acoplamiento electromagnético. Esta experimentación se realizó con constante vigilancia de las variables médicas de los pacientes siendo la medición más observada el electrocardiograma de cada persona involucrada. Además de casos de experimentación en entornos controlados, el documento “Interferencias eléctricas y electromagnéticas en los marcapasos y desfibriladores automáticos implantables” también considera distintos casos de la vida real a modo de servir como ejemplo, el de un operario de soldadura con un desfibrilador automático implantable (el cual es otro dispositivo médico que cumple un rol parecido al de un marcapasos implantable), el caso de un paciente que se encuentra reparando un horno eléctrico y resulta afectado por una corriente de fuga, el de un paciente con marcapasos afectado por una corriente de fuga al manipular el sistema eléctrico de un auto a gasolina, etc.

De dicha experimentación, y de los casos analizados, se obtuvo que, dependiendo de la intensidad del campo, del tiempo de exposición y de la programación del dispositivo, se podían dar casos en los que el electrocardiograma mostraba alteraciones en el tratamiento implementado al paciente, en el peor de los casos se podía generar una **asistolia** (ausencia o inhibición de actividad eléctrica cardíaca), como se observa en la Figura 4.1, afectando en gran medida al latido y la frecuencia cardíaca.

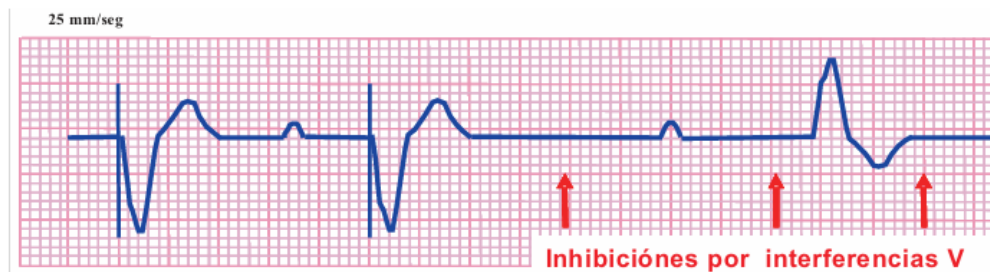


Figura 4.1: Asistolia producida por efecto de ruido intermitente. Como se muestra en [19].

Ahora, a pesar de que resultó evidente que las interferencias eléctricas afectaron a los dispositivos implantados, en la gran mayoría de los casos los síntomas de estas interferencias desaparecieron luego de disminuir la exposición de los pacientes a dichas interferencias, de los casos de la vida real se menciona que todos los afectados sintieron, mayoritariamente, síntomas de mareos y náuseas al momento de la exposición incorporándose, sin consecuencias permanentes, luego de terminada la exposición. Mientras que en los casos de estudio controlados se observaron distintas respuestas del dispositivo desde un reinicio del “conteo de pulsos” hasta una inhibición de la terapia cardíaca programada.

A modo de resumen, en [19], se muestran diferentes consecuencias, en dispositivos implantables, causadas por interferencias eléctricas externas considerando un rango amplio de exposición: Desde ondas de radiofrecuencia hasta exposición a campos magnéticos. Aun así los resultados arrojan que estas exposiciones presentan una aflicción temporal al paciente quien luego de los síntomas causados por la exposición preceden a reincorporar su terapia cardíaca programada por su cardiólogo. Esto da cuenta de la tecnología actual de los dispositivos implantables.

Junto con esto, el documento fija valores límites de no afectación dentro de los cuales no se percibió cambio alguno en la terapia administrada por los dispositivos: De 200 V/m de peak para campos eléctricos en rango de frecuencias utilizados para las telecomunicaciones (siguiendo el límite establecido por la Comisión Internacional de la Protección a la Radiación No Ionizante) y de $0,1\text{ mT}$ para campo magnético.

Otro estudio realizado corresponde a “Study of Interaction of Pacemaker Electrode with High Frequency RF Fields” realizado por Michal Wiktor. En él se expone un marcapasos a distintas ondas electromagnéticas de alta frecuencia (ondas de radiofrecuencias) con la idea de verificar qué tanto se comporta el sistema marcapasos - cables a una antena receptora de señales transitorias, también busca evaluar si la forma en que se dispone el cableado dentro del paciente y si la composición electroquímica interna del cuerpo humano (solución salina) afecta o no a la interacción con dichas ondas electromagnéticas [20].

En resumen, el estudio incurre en las siguientes conclusiones:

- No existe una respuesta definitiva de si el marcapasos eléctrico se ve afectado por ondas de radiofrecuencia, por ende, no se podría definir si dicha interacción es riesgosa para el paciente.
- Se observó que el acoplamiento de la bobina del marcapasos (el cableado) puede resultar significativo especialmente para bandas de frecuencia por encima de las comúnmente utilizadas para redes celulares.
- En el ámbito de la solución electroquímica en que se encuentra sumergido el dispositivo se presentó que independiente de si se encontraba en una solución salina o en el aire, el comportamiento en ambos resultaba de forma similar.
- Y por último, se mostró que la forma en que estaba dispuesto el cableado no tenía mayor influencia en su operación como antena.

4.1.3. Afección ante Pulsos Electromagnéticos

En el área de la afección ante pulsos electromagnéticos, aumenta la dificultad y complejidad de la experimentación de forma significativa. Sumando a lo anteriormente mencionado, la generación de pulsos electromagnéticos en un ambiente controlado sin recurrir a dispositivos y elementos que pudiesen afectar a la población o al entorno cercano son un desafío para la investigación, se requieren de estructuras aptas para la contención en la propagación de ondas electromagnéticas generadas en la experimentación y de suficiente experiencia como para generar pulsos electromagnéticos con la suficiente energía para observar la respuesta del dispositivo sin comprometer de forma permanente al cualquier dispositivo eléctrico y electrónico cercano.

Uno de los estudios más concluyentes corresponde a una investigación realizada por Vincent J. Ellis en su reporte “The Effects of Electromagnetic Pulse (EMP) on Cardiac Pacemakers” [7]. Este estudio fue realizado en los laboratorios Harry Diamond de la armada estadounidense donde se utilizaron sus instalaciones para la generación de simulaciones de pulsos electromagnéticos, con la finalidad de corroborar si la exposición a pulsos electromagnéticos afecta de alguna forma o no al paciente con un marcapasos implantable. En él se concluye que los marcapasos sí son susceptibles a interferencias electromagnéticas, se identifica que la vulnerabilidad de estos a pulsos electromagnéticos varía según la intensidad y duración de la exposición y que los tipos de fallas observadas varían entre interrupción del ritmo cardíaco, reinicios en la estimulación de la terapia cardíaca o daños permanentes en el peor de los casos.

Estos tres autores, [7], [19] y [20] abordan el problema de EMC de distintos puntos de vista. Mientras que Ellis enfoca su investigación en los pulsos electromagnéticos, Tur y Wiktor se enfocan en casos más terrenales como lo son las ondas de radiofrecuencia y los campos eléctricos y magnéticos de la vida cotidiana. En común, los tres estudios reconocen la vulnerabilidad de los marcapasos a las interferencias electromagnéticas y subrayan la necesidad de implementar mejoras tecnológicas como medidas de mitigación junto con pruebas rigurosas de EMC tal de asegurar la confiabilidad y seguridad de dichos dispositivos ante situaciones no deseadas.

Ahora, a pesar de que los tres autores confirman la susceptibilidad de los marcapasos ante interferencias electromagnéticas y que estos no deberían provocar consecuencias graves para el paciente, difieren en las recomendaciones realizadas para asegurar dicho escenario (mitigación de interferencias no deseadas) ya que mientras que Ellis recomienda mejorar el blindaje electromagnético del dispositivo y realizar pruebas de compatibilidad electromagnética, Tur recomienda la rigurosidad de una revisión periódica y monitoreo constante, además de recomendaciones a pacientes para evitar áreas con alta radiación electromagnética y Wiktor enfatiza la necesidad de diseñar y probar marcapasos en zonas de alta exposición a campos de radiofrecuencia como lo son zonas cercanas a antenas de redes móviles. Por último, los tres autores vuelven a coincidir en que, a pesar de todo lo observado y concluido, se requiere más investigación tal de comprender completamente el impacto de los EMP en diferentes intensidades y duraciones, según Ellis, tal de actualizar

estándares de diseño y de pruebas, según Tur y de mejora en el diseño bioeléctrico del marcapasos y su cableado, según Wiktor.

4.2. Medición de Pulsos Electromagnéticos

Como se presenta en el Marco Teórico Sección 3.5 los pulsos electromagnéticos representan un desafío para las mediciones de estos mismos, las altas bandas de frecuencias que estos generalmente presentan provocan conflicto con los sistemas de medición que presentan una frecuencia de muestreo mucho menor en comparación.

El problema de medición de los pulsos electromagnéticos no solo reside en el equipo de medición sino que también en el componente que recibe la señal del pulso. En [21] se presenta una solución utilizando una antena con forma de cono la cual se conecta a un sistema de medición eléctrico para poder medir los pulsos electromagnéticos. Mientras que en [22] se diseña, desarrolla y caracteriza una antena de banda ultra ancha para la medición de campos transitorios producidos por pulsos electromagnéticos cortos.

En resumen, para captar los pulsos electromagnéticos de forma efectiva, resulta esencial el uso de antenas específicamente diseñadas para operar en rangos amplios rangos de frecuencia y de una alta precisión. Estas mismas deben estar acopladas a un sistema de medición con una frecuencia de muestreo adecuada para capturar la rápida variación del pulso.

5 | Montaje Experimental

Como se presenta en el Estado del Arte, Sección 4, la investigación se enfoca en los efectos adversos de la exposición a interferencias electromagnéticas en marcapasos implantables, tanto en dispositivos fuera de uso como en pacientes bajo terapia activa y monitoreo cardíaco mediante electrocardiograma. En este documento se busca revisar cómo afectan dichas interferencias al dispositivo enfocado desde una perspectiva eléctrica. Para este propósito, se utilizará un marcapasos con cable conectado a un equipo de medición, que será expuesto a campos eléctricos de naturaleza alterna y continua, así como a pulsos electromagnéticos generados mediante ensayos de impulso.

5.1. Protocolo y Procedimiento de Medición

Para definir las mediciones, niveles de tensión y distancias, se revisó la teoría expuesta en el Marco Teórico, donde se establece teóricamente el valor del campo eléctrico observado en función de la tensión aplicada y la distancia al objeto de ensayo.

Según el Pliego Técnico Normativo RPTD N°07 presente en la Sección 3.2.2, el valor del campo eléctrico normado en zonas urbanas es de 5 kV/m pero, debido a que este es un valor estándar y que existen valores mayores en normas internacionales, se utilizará como criterio el doble del definido por el pliego técnico RPTD N°07, es decir, 10 kV/m . Valor que coincide con la normativa internacional.

Con este valor de campo eléctrico como base se construye la Tabla 5.1, la cual contiene las mediciones a realizar.

Tabla 5.1: Configuración de mediciones a realizar para exposición a campo eléctrico AC, DC e Impulso.

N° Medición	Tensión RMS kV	Distancia m
1	20	1.00
2	30	1.00
3	40	1.00
4	50	1.00
5	60	1.00
6	20	0.80
7	30	0.80
8	40	0.80
9	50	0.80
10	60	0.80
11	20	0.60
12	30	0.60
13	40	0.60
14	50	0.60
15	60	0.60

Como se observa, la idea de estas mediciones es la de exponer al marcapasos a un campo inicial de dos veces el valor de referencia por norma internacional, es decir de 20 kV/m , e ir aumentando de forma gradual el valor de campo eléctrico hasta llegar a un valor de 10 veces el de referencia por norma, es decir 100 kV/m . Se decidió utilizar el doble del valor de referencia debido a la optimización en la toma de mediciones, presentar condiciones más cercanas a la realidad y bajo la consideración de que estos dispositivos presentan una constante mejora y avance tecnológico, y por ende se teoriza que presentan un mejor diseño para soportar niveles de exposición altos sin verse afectados.

Para realizar mediciones de forma eficiente, segura y precisa se define el siguiente protocolo de medición:

1. Obtener mediciones según norma de marcapasos implantables ([9]).
2. Obtener 5 mediciones de pulsos de marcapasos, expuesto a la influencia del campo o impulso generado, aumentando 10 kV de tensión en la salida del circuito.
3. Disminuir distancia entre objeto de exposición y fuente en 20 cm .
4. Repetir secuencia hasta llegar a 60 kV de tensión y 60 cm de distancia.
5. Repetir para exposición AC, DC e Impulso y verificar circuito de generación.

5.1.1. Simulación Finite Element Method Magnetics (FEMM) para Campo Eléctrico

Con el fin de verificar el protocolo de mediciones propuesto, se empleará el programa “Finite Element Method Magnetics”, conocido comúnmente como FEMM. Este software gratuito y de código abierto ofrece diversas herramientas para resolver problemas de elementos finitos, aplicables en electrostática, magnetoestática, flujo de calor, entre otros. A través de simulaciones que analizan la interacción entre dos cargas puntuales, se busca confirmar si los valores de tensión seleccionados son capaces de generar el campo eléctrico deseado a una distancia específica.

Para ello se realizó una configuración de dos esferas concéntricas: una interior de 0.5 cm de radio y otra exterior de radio de 33 m . La esfera interior se modelará como una carga puntual con una condición de borde correspondiente a la tensión configurada en la simulación. Esta esfera se representará como una esfera maciza de cobre. En contraste, la esfera externa, con un radio significativamente mayor que el de la esfera interior para que la esfera interna se perciba como una carga puntual en el punto observado, tendrá una condición de borde de tensión nula, simulando así el punto neutro de un circuito eléctrico. Esta configuración se muestra en la Figura 5.1.

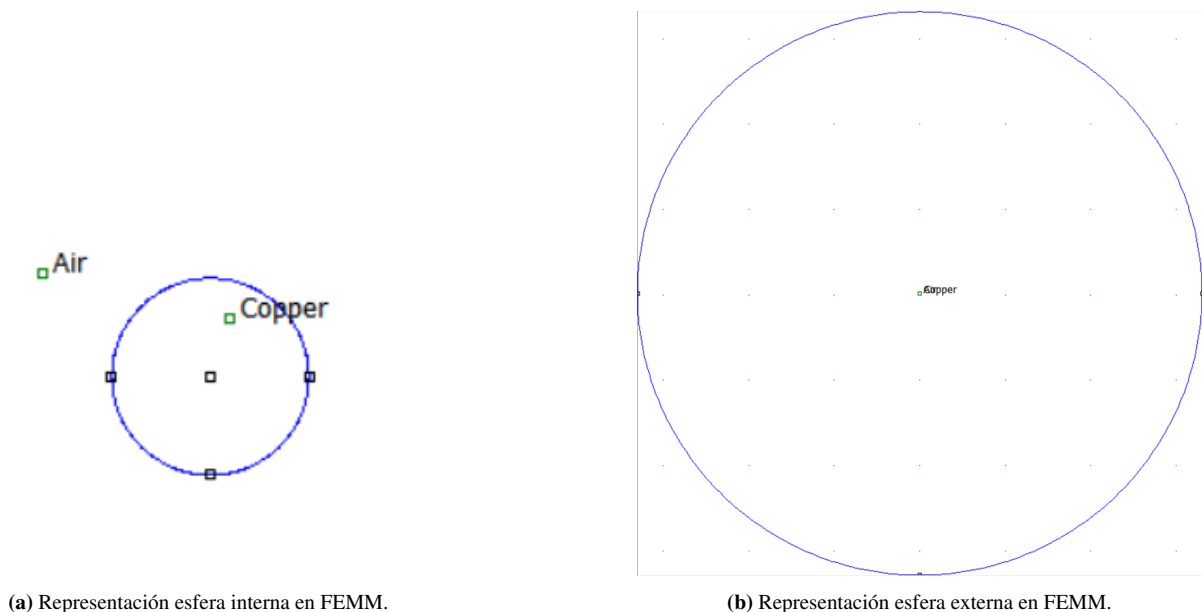


Figura 5.1: Configuración simulación esferas en FEMM.

Luego de realizada la simulación se procede a obtener el valor del campo eléctrico para dos niveles de tensión y distancia: 20 kV a 100 cm y 60 kV a 60 cm . Se utilizaron estas dos configuraciones ya que representan los dos casos extremos de todas las mediciones y, considerando que el presente problema corresponde a un problema de naturaleza lineal, se espera que el comportamiento al aumentar la tensión y variar la distancia sea el mismo. Obteniéndose las siguientes gráficas que representan acercamientos de las Figuras A.1 y A.2 contenidas en el Anexo A.1.

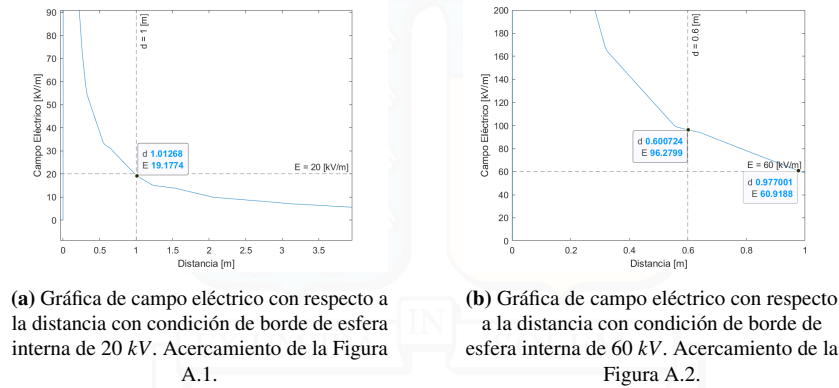


Figura 5.2: Gráficas de campo eléctrico con diferentes condiciones de borde.

Antes de analizar las Figuras 5.2a y 5.2b se requiere realizar un análisis de las Figuras A.1 y A.2. En estas figuras se logra observar el comportamiento del campo eléctrico con respecto a la distancia a la esfera interna. En un principio se presenta que el campo eléctrico toma valores altos, del orden de los 1000 kV , disminuyendo de la forma $1/r^2$ tal como se muestra en la ecuación (3.3) presente en la Sección 3.2. Una vez se comienza a observar el campo eléctrico fuera de la esfera interna se procede a un comportamiento lineal como el expuesto según la ecuación (3.9) presente en la Sección 3.2.1 del Marco Teórico. Este cambio de comportamiento en el campo eléctrico se debe a que en las distancias dentro de la esfera interna el campo eléctrico no presenta un comportamiento homogéneo ya que depende de la distancia del punto de observación a cada punto infinitesimal del borde de la esfera mientras que para el otro caso, fuera de la esfera interna, las diferencias de distancias generan que el campo eléctrico se perciba como un campo homogéneo en el espacio.

Luego de analizado el comportamiento del campo eléctrico, que se corrobora con lo observado en el Marco Teórico, se procede a examinar las Figuras 5.2a y 5.2b. Obteniéndose la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Campo eléctrico obtenido por simulación y errores porcentuales al comparar con valores esperados.

Tensión [kV]	Distancia [cm]	Campo Eléctrico Esperado [kV/m]	Campo Eléctrico FEMM [kV/m]	Error Porcentual [%]
20	100	20	19,1774	8,9272
60	60	100	96,2799	3,7201

Como se observa en la Tabla 5.2 se observa una gran diferencia para la primera configuración de tensión y distancia. Esto puede deberse a que la simulación no simplifica el cálculo del campo eléctrico una vez cambiada la zona de distancia con la carga puntual, por ende el cálculo del campo eléctrico en el punto observado no será representado por la ecuación (3.9) sino que por el cálculo infinitesimal realizado por el software². Aun así el valor esperado en la realidad resulta un buen indicador del nivel de tensión y la distancia necesarias para la obtención del campo eléctrico deseado.

²Al realizar el cálculo en forma manual se asume que la distancia es lo suficiente para considerar una carga puntual en vez de realizar el cálculo infinitesimal entre la interacción de cada carga superficial y el punto en que se observa el campo.

5.1.2. Protocolo de Medición para Valores de Norma de Marcapasos

Tal como se muestra en el Marco Teórico Sección 3.1.1, para la obtención de la duración, amplitud, intervalo y frecuencia de pulso se debe realizar implementar el circuito expuesto en la Figura 3.1, para luego proceder a obtener la forma de onda de al menos 20 pulsos generados. Es por ello que se procede a realizar el siguiente protocolo de medición para obtener estos valores por norma:

1. Desactivar los circuitos de generación de campo y garantizar la descarga de los elementos acumuladores de energía del circuito generador.
2. Conectar carga de $500 \Omega \leq 1\%$ en los puntos de conexión que se muestra en la Figura 3.1.
3. Ajustar ventana de osciloscopio de ser necesario y guardar 25 pulsos muestreados.
4. Repetir desde primer paso desconectando la resistencia utilizada y conectando la de 240 o 2000 Ω . Nótese que si se requiere conectar resistencias en serie o paralelo el error se mantiene constante.

5.2. Circuitos de Generación de Interferencias

Para medir cómo las componentes eléctricas afectan la salida del marcapasos al estar expuesto a campos eléctricos, se necesita un circuito para generar campos eléctricos, ya sean continuos o alternos, que permita ajustar la tensión a los niveles requeridos. Para ello se presentan tres circuitos para generar los distintos campos eléctricos y pulsos electromagnéticos necesarios según la exposición determinada.

Cabe mencionar que, para las mediciones del campo eléctrico en el punto de exposición, se empleará un medidor de campo eléctrico. Aunque este dispositivo proporcionará una estimación de los valores presentes en el objeto de ensayo, es importante señalar que no garantiza una medición precisa del campo eléctrico.

5.2.1. Circuito de Generación de Campo Eléctrico AC

Para el circuito de generación de campo eléctrico alterno, se utilizó el transformador HV 9105 para elevar la tensión en el devanado secundario a los niveles fijados en la Sección 5.1. A continuación se presenta el modelo circuital y sus especificaciones técnicas:

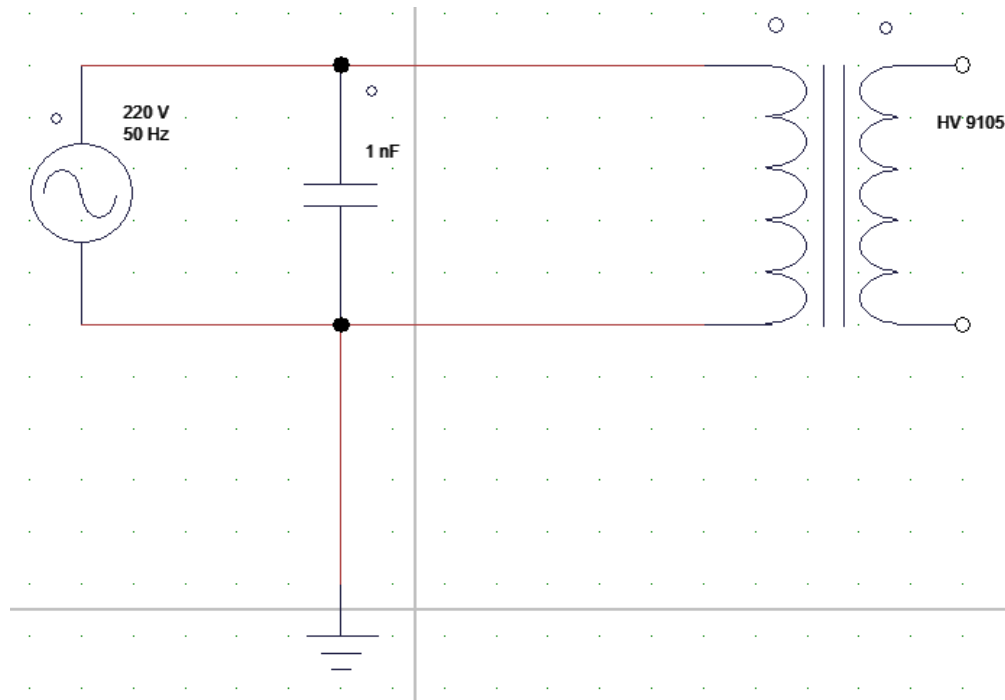


Figura 5.3: Circuito AC utilizado para la exposición a campo eléctrico AC. Elaboración propia.

Tabla 5.3: Especificaciones del transformador de prueba para generación de campo eléctrico AC.

Transformador de Prueba	
Código	HV 9105
Nº Fases	Monofásico
Frecuencia	50/60 Hz
Tensión Nominal	100 kV
Potencia Nominal	10 kVA
Corriente Nominal	0,1 A
Impedancia de CC	$\leq 10 \%$
DP bajo Voltaje Nominal	$\leq 5[pC]$
Relación de Transformación	1:1 / 2:1 (depende de la conexión en el primer bobinado, paralelo o serie respectivamente)

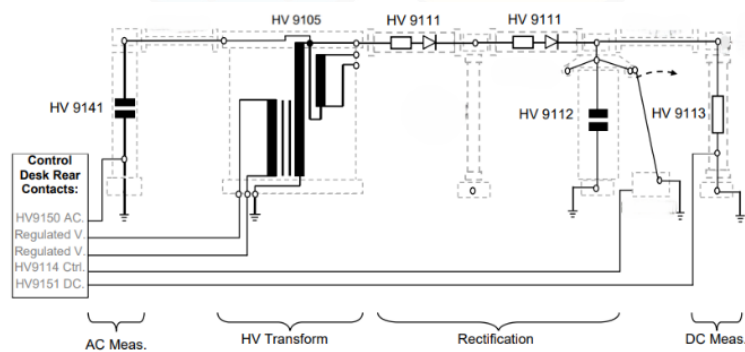
5.2.2. Circuito de Generación de Campo Eléctrico DC

Para el circuito de generación de campo eléctrico continuo se requiere un circuito de rectificación de media onda para obtener, de una señal de fuente alterna obtenida desde el transformador utilizado en la generación de campo alterno, una señal continua. Para ello se utilizaron los siguientes elementos presentes en el laboratorio:

Tabla 5.4: Especificaciones de los componentes del circuito de generación campo eléctrico DC.

Componentes del Circuito			
Transformador de Prueba Código: HV 9105 N° Fases: Monofásico Frecuencia: 50/60 Hz Tensión Nominal: 100 kV Potencia Nominal: 10 kVA Corriente Nominal: 0,1 A Impedancia de CC: $\leq 10\%$ DP bajo Voltaje Nominal: $\leq 5pC$ Relación de Transformación: 1:1 / 2:1 (depende de la conexión en el primer bobinado, paralelo o serie respectivamente)		Diodo Rectificador de Silicio Código: HV 9111 Tensión Peak Inversa: 140 kV R: 280 M Ω Resistencia de Protección: 100 k Ω Unidades: 2 un	Capacitor de Impulso Código: HV 9112 Tensión DC y de Impulso: 140 kV Capacitancia: 25 nF Unidades: 1 [un]
Resistor de Medida Código: HV 9113 Tensión DC: 140 kV R: 280 M Ω Corriente Continua Nominal: 0,5 mA		Capacitor Código: HV 9141 Tensión DC y de Impulso: 140 kV Capacitancia: 1 nF	

A continuación se presenta el circuito de rectificación de media onda utilizado:

**Figura 5.4:** Circuito DC utilizado para la exposición a campo eléctrico DC. Modificado de [23].

5.2.3. Circuito de Generación de Pulsos Electromagnéticos

A continuación se presenta el montaje experimental para la generación de pulsos electromagnéticos. Como se detalla en la Sección 3, un pulso electromagnético se origina a partir de una súbita explosión de radiación electromagnética. En términos simples, esto ocurre debido a una rápida y violenta variación en los campos eléctrico y magnético en un instante específico, provocada por un evento determinado.

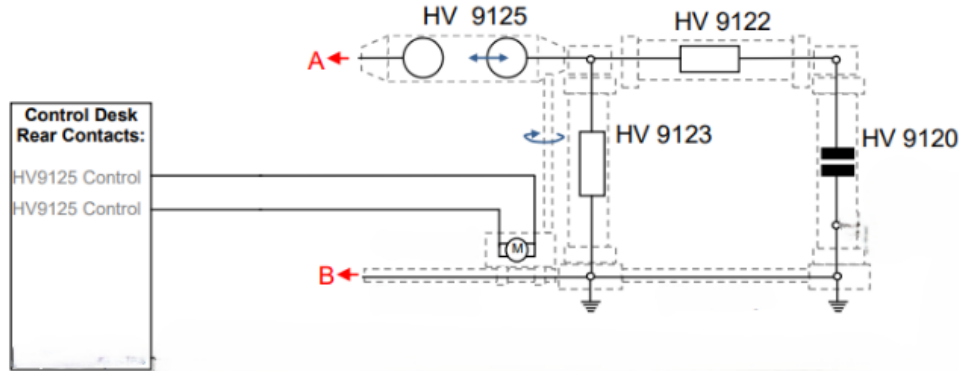
Este fenómeno se puede provocar al generar la ruptura de un material debido a un valor de tensión que supere su rigidez dieléctrica y provoque un camino conductor.

Para lograr este objetivo de manera simple y eficiente, se acoplará un circuito generador de campo eléctrico continuo (ver Figura 5.4) junto con un circuito de ensayo por impulso. Este último permitirá generar una forma de onda impulso conforme a la norma IEC 60060, con ciertas modificaciones necesarias para ajustarse a las mediciones de tensión requeridas. El material destinado a provocar la ruptura será el aire.

A continuación se presentan los materiales a utilizar para ensayo Impulso el cual se encuentra detallado en la Figura 5.5.

Tabla 5.5: Especificaciones de los componentes del circuito ensayo Impulso.

Componentes del Circuito		
Transformador de Prueba Código: HV 9105 N° Fases: Monofásico Frecuencia: 50/60 Hz Tensión Nominal: 100 kV Potencia Nominal: 10 kVA Corriente Nominal: 0,1 A Impedancia de CC: $\leq 10\%$ DP bajo Voltaje Nominal: $\leq 5[pC]$ Relación de Transformación: 1:1 / 2:1 (depende de la conexión en el primer bobinado, paralelo o serie respectivamente)	Diodo Rectificador de Silicio Código: HV 9111 Tensión Peak Inversa: 140 kV R: 280 M Ω Resistencia de Protección: 100 k Ω Unidades: 2 [un]	Capacitor de Impulso Código: HV 9112 Tensión DC y de Impulso: 140 kV Capacitancia: 25 nF Unidades: 1 [un]
Resistor de Medida Código: HV 9113 Tensión DC: 140 kV R: 280 M Ω Corriente Continua Nominal: 0,5 mA	Capacitor Código: HV 9141 Tensión DC y de Impulso: 140 kV Capacitancia: 1 nF	Separador de esferas Código: HV 9125 Tensión de impulso: 140 kV Diámetro de esferas: 100 [mm] Separación máxima: 80 [mm]
Resistor de frente de onda Código: HV 9122 Tensión DC: 140 kV R: 350 Ω	Resistor de cola de onda Código: HV 9123 Tensión DC: 140 kV R: 2400 Ω	Capacitor de carga Código: HV 9120 Tensión DC y de Impulso: 140 kV C: 1200 pF
Medidor de Chispa Código: HV 9133 Tensión de Impulso DC: 140 kV		

**Figura 5.5:** Circuito acoplado a generación de campo eléctrico DC, donde A y B corresponden a los puntos de conexión. Este circuito fue extraído y modificado del documento [23].

5.2.3.1. Medición de Pulso Electromagnético

En el Estado del Arte se describen diversos métodos para medir pulsos electromagnéticos. Sin embargo, todos ellos se reducen al uso de una antena con un ancho de banda de frecuencia amplio, capaz de captar la señal incidente de pulsos electromagnéticos, y con una baja impedancia. Además, se requiere un osciloscopio con una alta frecuencia de muestreo para reconstruir la señal en forma de datos.

La antena a utilizar corresponde a la **DEEPACE Wideband Directional Antenna R102**. Esta antena presenta las siguientes especificaciones:

- Rango de Frecuencia: 1.5 - 9 GHz
- Ganancia nominal: 7 dBi
- Capacidad de Potencia: 5 W



Figura 5.6: Imagen de antena DEEPACE para toma de mediciones de PEM. Obtenida de [24].

Debido a que no se podrá predecir exactamente el valor de la tensión inducida en la antena, la cual llegará al canal del osciloscopio pudiendo ser dañina para el mismo, se utilizará un atenuador de 20 dB a la salida de la antena.

En el manual de este documento se puede apreciar como la antena responde ante las distintas frecuencias y ángulos de incidencia de las ondas electromagnéticas siendo la primera respuesta la que otorga el factor de antena necesario para obtener la señal de campo eléctrico según la tensión medida de la antena, utilizando la ecuación (3.43).

5.3. Conexión Marcapasos a Circuito de Medición

Al momento de querer conectar la salida del conjunto marcapasos - cable de conexión cardíaca al sistema de medición se presentó una anomalía en la conexión, la salida de la señal de pulsos del marcapasos no presenta una forma convencional y por ende se requiere la modificación de una pieza específica para la conexión al sistema de medición.

El cable de conexión cardíaca consiste en dos secciones: La primera sección previa a las aletas de anclaje cardíaca y la segunda sección corresponde al extremo del cable. Cada sección presenta un punto de conexión para la medición, en la primera se presenta el cátodo y en la segunda el ánodo por ende la medición debe ser realizada con una punta diferencial entre estos dos tramos del cable. Las diferencias entre estos dos tramos recaen en dos: La forma del cátodo o ánodo y el material del cual realizar la conexión. Mientras que para el primer tramo el material resulta ser un material tenaz, robusto y con forma cilíndrica, el segundo tramo consiste en un material de baja rigidez, alta flexibilidad y la forma de conexión corresponde al área entre la separación de dos cilindros concéntricos.



Figura 5.7: Fotografía extremo alimentador de cable marcapasos. Elaboración propia.

Es por esto que se requirió modificar un adaptador de conexión para antenas con la finalidad de que, aumentando la abertura de esta pieza (donde va la antena) justo lo necesario para que la punta del cable quede empotrada en el adaptador, el material de la pieza adaptadora logre transmitir la señal a los cables de medición.

En cuanto a la punta diferencial para medir la señal entre el ánodo y el cátodo del cable, se utilizó la punta MICSIG “High Voltage Differential Probe” con su rango de atenuación en 50 y una impedancia de $10\text{ M}\Omega$.

Junto con la conexión de esta punta de medición se requirió el diseño e impresión de una pieza 3D que pudiese contener el dispositivo de manera firme y segura. A continuación se presenta una fotografía de la montura del marcapasos en la pieza impresa, la conexión a la pieza adaptadora y la punta de tenaza para realizar la medición con la punta diferencial. Cabe mencionar que la montura del marcapasos se encontró en todo momento dentro de la jaula del laboratorio y por ende se debió transmitir las señales medidas a través de cables de baja impedancia, los cuales al medir su resistencia se obtuvo una medida de 50Ω y, al medir la impedancia de la pieza adaptadora se obtuvo una medición de $0,5\Omega$.



Figura 5.8: Fotografía montura de marcapasos y cable conectados a punta diferencial y pieza adaptadora. Elaboración propia.

Finalmente se logra obtener el siguiente esquema de conexión que considera mediciones del circuito de generación, mediciones del marcapasos y mediciones del pulso electromagnético generado:

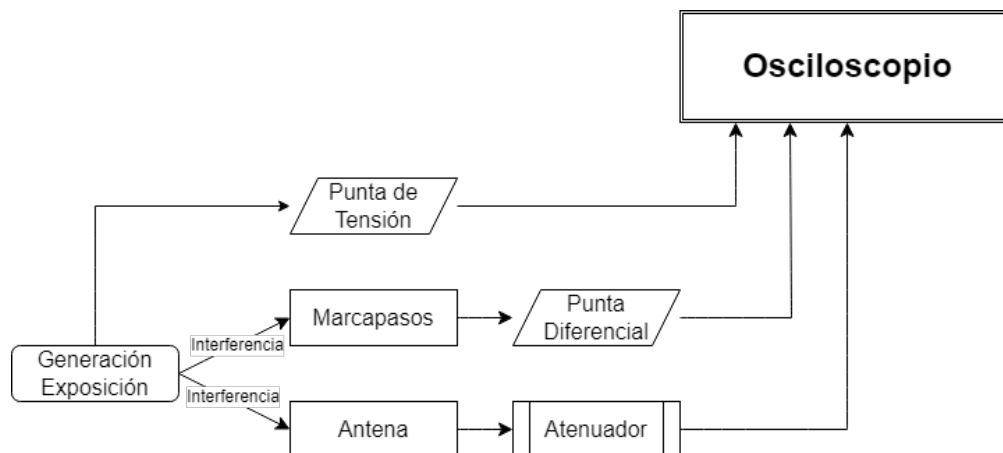


Figura 5.9: Esquema de conexión para medición completo.

5.4. Configuración de Equipos

Una vez ya definidos los circuitos y el protocolo de las mediciones se requiere definir las configuraciones de los dispositivos de medición y del marcapasos. En la presente Sección se presenta el equipo de obtención y visualización de las señales medidas, junto con su configuración. También se presenta la configuración del marcapasos predefinida para la generación de los pulsos de excitación cardíaca.

5.4.1. Configuración de Osciloscopio de Medición.

Según el Marco Teórico y el Estado del Arte, el osciloscopio a utilizar debe presentar una frecuencia de muestreo lo suficientemente alta como para muestrear los PEM. Es por ello que se utilizará el osciloscopio **InfiniiVision MSO-X 3014 A** el cual presenta una frecuencia de muestreo máxima de 4 GSa/s .

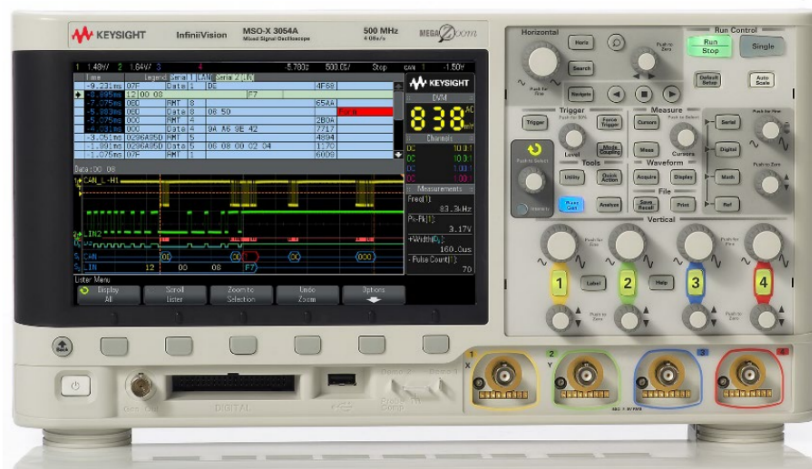


Figura 5.10: Osciloscopio InfiniiVision MSO-X 3014 A utilizado para la experimentación. Imagen obtenida de [25].

A continuación se presenta la configuración base para la toma de mediciones del osciloscopio:

- Frecuencia de Muestreo: 2 MSa/s .
- N° de Segmentos = 5 segmentos .
- Profundidad de Memoria = 10.00000 Mpts .
- Impedancia de Entrada = $1\text{ M}\Omega$.
- División Temporal = 500 ms/div .
- División Magnitud = 50 mV/div .
- Offset = 4 mV .
- Trigger = 84 mV de subida.

Donde el canal 1 corresponde a la medición de tensión de salida de los circuitos generadores de exposición, el canal 2 corresponde a la medición de los pulsos de salida del marcapasos y el canal 3 corresponde a la medición de tensión obtenida con la antena.

5.4.2. Configuración de Marcapasos Implantable

Debido a que el marcapasos utilizado corresponde a un marcapasos programable bi cameral se requiere que un experto en el área lo haya configurado con anterioridad. A continuación se presenta la configuración programada para ambas cámaras de excitación cardíaca (para el área auricular y ventricular). La Tabla 5.6 contiene la información relevante para este documento sobre la configuración del dispositivo:

Tabla 5.6: Configuración marcapasos implantable

Cable/Cámara		
Variable	Auricular	Ventricular
Amplitud V	3.5	3.5
Duración Imp. ms	0.4	0.4
Sensibilidad mV	0.5	2.8
Modos/Frecuencia		
Frecuencia Mínima min^{-1}	60	
Intrínseca AV		
AV estimulado ms	150	
AV detectado ms	120	

5.4.3. Configuración de Medidor de Campo Eléctrico

Se empleó un medidor de radiación electromagnética, además de los instrumentos mencionados anteriormente, el cual fue ubicado en las proximidades del marcapasos para garantizar que la medición sea lo más representativa posible de la exposición real del dispositivo.



Figura 5.11: Detector de radiaciones electromagnéticas.

Este dispositivo tiene un rango máximo de 1999 V/m y permite detectar radiaciones de campo eléctrico con una sensibilidad de 1 V/m , campo magnético con una sensibilidad de 0.1 mG y campos de radiofrecuencias con una sensibilidad de 0,01 a 19,99 mW/m^2 .

6 | Resultados Experimentales

En esta sección se presenta un extracto de todas las mediciones realizadas (las distintas formas de ondas, gráficas y tablas podrán ser encontrados en el Anexo Sección A.2). Siendo las que se presentan las más típicas y significativas de la muestra de mediciones realizadas. Se considerarán las siguientes técnicas de análisis de datos para observar el fenómeno de compatibilidad electromagnética:

- Parametrización de Formas de Onda.
- Análisis Estadístico por Promedio y Variación Estándar.
- Espectrograma.
- Mapas TF.

6.1. Registros de Mediciones

Debido al uso del circuito de la Figura 5.4 se tiene la medición de los valores de tensión del circuito presentes en el escritorio de control del transformador. En él se presentan tres mediciones: tensión rms de la señal AC, tensión de la bobina primaria y tensión de la bobina secundaria del transformador.

Al iniciar la experimentación, se realizaron ajustes en el protocolo de mediciones debido a desafíos en la conexión de los equipos. Esto resultó en una reducción en la cantidad de mediciones en comparación con lo propuesto en la Tabla 5.1. Como consecuencia, se adaptaron los procedimientos para las exposiciones a campo eléctrico de corriente continua y pem, asegurando que se mantuvieran los objetivos del estudio. En lugar de aumentar la tensión de salida del circuito en 10 kV , se incrementó en 20 kV , reduciendo el número de mediciones de 15 a 9 (manteniendo las mediciones requeridas por norma sin cambios). Para las exposiciones a impulsos, se introdujo una tercera variable: la ventana de tiempo de la muestra. Esta variable fue necesaria porque la calidad de la señal observada en el osciloscopio dependía del rango de tiempo seleccionado. Si el rango de tiempo era inadecuado, la señal podía estar mal muestreada. El osciloscopio posee una capacidad fija de memoria predefinida que determina el número de puntos que puede capturar. Al aumentar la cantidad de puntos en la medición, la frecuencia de muestreo disminuye, lo que conduce a una reducción en la resolución temporal de la señal. Esto puede resultar en la pérdida de detalles importantes y, por lo tanto, en la falta de datos relevantes para el análisis. Por lo tanto, se utilizarán las siguientes ventanas de tiempo para las mediciones en exposiciones a impulsos:

- 500 ms , siendo esta la usada en las exposiciones anteriores y como valor predeterminado para la medición.
- 200 ms
- 150 ms
- $10\text{ }\mu\text{s}$

A continuación se presentan las primeras 5 mediciones para exposición AC y DC. Las Tablas completas se presentan en el Anexo Sección A.2.3.4. Cabe mencionar que el trigger fue configurado en EUT o “Equipment Under Test” lo cual significa que el disparo se activará en respuesta a un evento o cambio en el equipo bajo prueba.

Tabla 6.1: Primeras 5 mediciones de exposición AC.

Mediciones campo eléctrico AC									
#	Tensión Teórica kV	Tensión rms kV	Tensión Primario kV	Tensión Secundario kV	Distancia cm	N° Segmentos	Trigger	Canales	Medidor Campo [V/m]
1	20	20,21	39	0	100	5	EUT	Tablero,EUT	1791
2	30	30,21	62	0	100	5	EUT		1815
3	40	40,03	89	0	100	5	EUT		1831
4	50	50,32	106	0	100	5	EUT		1832
5	60	60,02	128	0	100	5	EUT		1852

Tabla 6.2: Primeras 5 mediciones de exposición DC.

Mediciones campo eléctrico DC									
#	Tensión Teórica kV	Tensión rms kV	Tensión Primario kV	Tensión Secundario kV	Distancia cm	N° Segmentos	Trigger	Canales	Medidor Campo [V/m]
1	20	17,87	34	20,1	100	5	EUT	Tablero,EUT	1512
2	40	35,56	73	40,26	100	5	EUT		1683
3	60	53,02	112	60,2	100	5	EUT		1743
4	20	17,95	34	20,16	80	5	EUT	Tablero,EUT	1589
5	40	35,66	73	40,3	80	5	EUT		1687

Como se observa en la Tabla 6.2 el incremento de tensión resulta diferente al de la Tabla 6.1, esto debido a la modificación al protocolo de medición previamente mencionado. A continuación se presenta el error porcentual calculado entre la tensión teórica y la tensión rms medida para AC y DC.

Tabla 6.3: Registro de error porcentual de tensión para mediciones de exposición AC.

#	Tensión Teórica [kV]	Tensión rms [kV]	Error porcentual [%]
1	20	20,21	1,050
2	30	30,21	0,700
3	40	40,03	0,080
4	50	50,32	0,640
5	60	60,02	0,030
6	20	20,22	1,100
7	30	30,17	0,570
8	40	40,17	0,430
9	50	50,12	0,180
10	60	60,33	0,550
11	20	20,06	0,300
12	30	30,02	0,070
13	40	40,13	0,320
14	50	50,19	0,380
15	60	60,24	0,400

Tabla 6.4: Registro completo de error porcentual de tensión de mediciones de exposición DC.

#	Tensión Teórica [kV]	Tensión rms [kV]	Error porcentual [%]
1	20	17,87	6,150
2	40	35,56	11,10
3	60	53,02	11,63
4	20	17,95	10,25
5	40	35,66	10,85
6	60	53,02	11,63
7	20	17,96	10,20
8	40	35,38	12,05
9	60	52,91	11,82

De las Tablas 6.3 y 6.4, se observa que el error porcentual se mantiene bajo el 1,1 % en la primera tabla (AC), mientras que en la segunda (DC) tiende a aumentar. Este comportamiento puede atribuirse a las diferentes complejidades de los circuitos de generación: en el caso de AC, la generación se realiza a través de un transformador, mientras que en DC intervienen múltiples componentes que pueden introducir variaciones en las lecturas de tensión. Estas variaciones pueden derivarse de factores como la resistencia del circuito, la calidad de los componentes y la integridad de las conexiones, lo que a su vez afecta la precisión de los datos obtenidos.

6.2. Forma de Onda Marcapasos Implantable

A continuación se presenta la forma de onda de un pulso del marcapasos obtenido de exposición AC, DC e Impulso respectivamente:

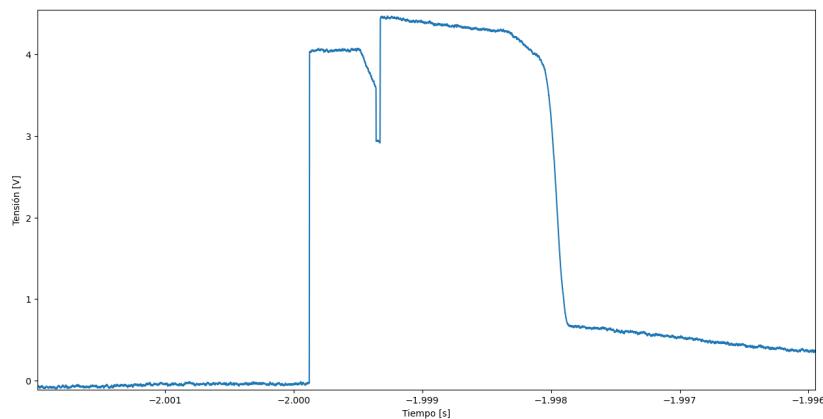


Figura 6.1: Pulso de tensión de salida de marcapasos en exposición AC.

En la Figura 6.1 se muestra la forma de onda del pulso eléctrico generado por el marcapasos implantable al encontrarse expuesto a un campo eléctrico AC. Esta señal de tensión se compone de dos pulsos cuadrados, los cuales presentan similitudes con la señal cuadrada ilustrada en la Figura 3.2 del Marco Teórico. La diferencia radica en que la norma únicamente especifica un único pulso cuadrado. Este comportamiento se debe a dos factores. En primer lugar, el marcapasos emite dos pulsos eléctricos: el primero destinado a la detección del tejido a estimular, y el segundo responsable de generar la contracción cardíaca. En segundo lugar, la forma de la señal también se ve influenciada por la falta de una resistencia en el circuito, lo que altera la "percepción" del dispositivo y modifica la respuesta esperada en comparación con condiciones de carga más controladas, como las definidas en la norma.

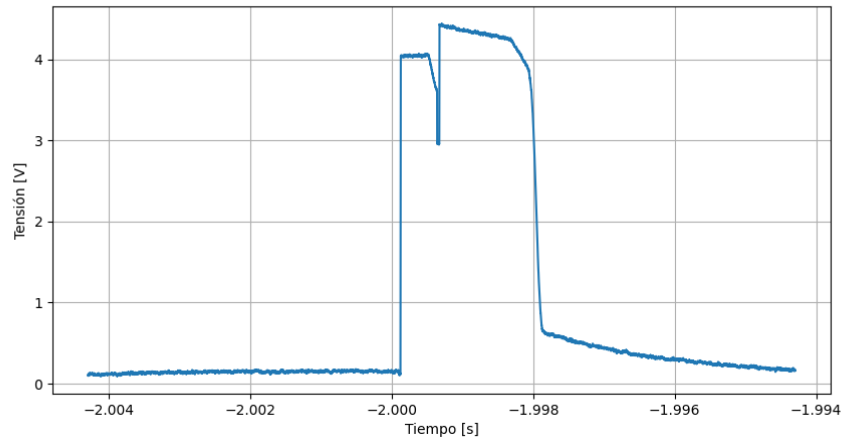


Figura 6.2: Pulso de salida de marcapasos en exposición DC.

Al someter al marcapasos a un campo eléctrico DC, se observa una señal casi idéntica a la obtenida bajo exposición a un campo eléctrico AC. No obstante, es posible detectar una influencia oscilatoria en la señal bajo exposición AC, aunque resulta prácticamente imperceptible a simple vista. Para lograr una inspección visual más detallada, se aumentará la ventana de datos de la muestra con el fin de resaltar posibles fluctuaciones o comportamientos sutiles en la señal que no son evidentes en una observación inicial, lo que permitirá una mejor caracterización de las posibles interferencias o perturbaciones.

Las Figuras 6.1 y 6.2 corresponden a ventanas de 10.000 datos, tal de poder observar de forma detallada los pulsos medidos, si se aumenta la ventana a 2 millones de datos se obtienen las siguientes gráficas:

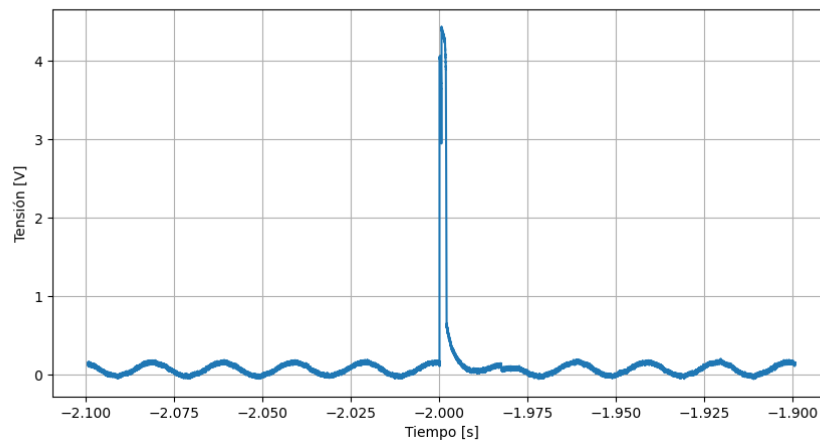


Figura 6.3: Pulso de salida de marcapasos en exposición DC para ventana de 2 millones de datos.

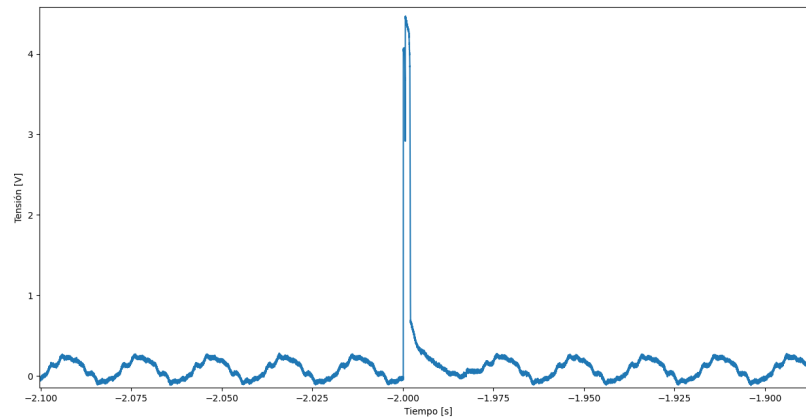


Figura 6.4: Pulso de salida de marcapasos en exposición AC para ventana de 2 millones de datos.

Al aumentar la cantidad de datos en las gráficas de los pulsos, se evidencia una característica notable en la zona inferior de las mismas, la cual denominamos “Banda Nula”. Esta región corresponde a una sección donde la señal parece estabilizarse temporalmente antes de continuar con su comportamiento oscilatorio. Al comparar las exposiciones a campos eléctricos alternos y continuos en esta banda, se pueden observar diferencias significativas. En la Figura 6.3, la Banda Nula presenta un comportamiento oscilatorio cercano a una señal senoidal pura, lo que indica una menor influencia de perturbaciones externas. Por otro lado, en la Figura 6.4, la forma de onda muestra una oscilación senoidal más deformada, lo que sugiere la presencia de armónicos adicionales. La diferencia en los armónicos inducidos en la banda nula puede explicarse por las variaciones en los circuitos de generación del campo eléctrico. Para la generación del campo eléctrico alterno, se utilizó únicamente un transformador de potencia. También se observa que los datos se presentan en tiempos negativos, esto debido a la configuración del trigger en la ventana temporal del osciloscopio.

6.2.1. Resultados Espectrograma y Mapa TF

Para verificar las armónicas inducidas por la exposición en la señal del marcapasos, se procederá a obtener el espectrograma de cada pulso. Este análisis permitirá observar la distribución de las frecuencias presentes en cada pulso y facilitará la identificación de las armónicas generadas.

Un espectrograma es una representación visual de la energía de las frecuencias de una señal a lo largo del tiempo. Generalmente se presenta en forma de mapas de calor, donde la intensidad del color refleja la magnitud de la frecuencia en cada momento de la señal. Para obtener un espectrograma, se realiza una Transformada de Fourier de Tiempo Corto, que calcula la magnitud de cada componente de frecuencia de la señal en ventanas de tiempo de baja resolución temporal. La resolución temporal en el análisis es crucial: una menor resolución temporal permite una mayor cantidad de información por unidad de tiempo en el espectrograma, aunque requiere mayor capacidad de computación. Este proceso debe aplicarse a cada pulso observado, ya que realizarlo para paquetes de datos completos demandaría una capacidad de memoria y de cálculo excesiva.

A su vez un Mapa TF también corresponde a una representación visual de las frecuencias que componen la señal a lo largo del tiempo, presenta diversos usos de ventanas para su análisis y permite reconocer variaciones más rápidas y complejas en las magnitudes de frecuencia.

Ambas representaciones visuales presentan un desafío: cuando las variaciones de magnitud de las frecuencias en función del tiempo son demasiado rápidas, estas herramientas no permiten observar adecuadamente dichos cambios. Una solución a esto es modificar la ventana de tiempo que se aplica tal de superponer las distintas ventanas junto con la aplicación de una función que permita resaltar un área en especial de la señal. A continuación se presenta la ventana Hanning, y un ejemplo de su aplicación, la cual corresponde a la aplicada en el análisis por espectrograma.

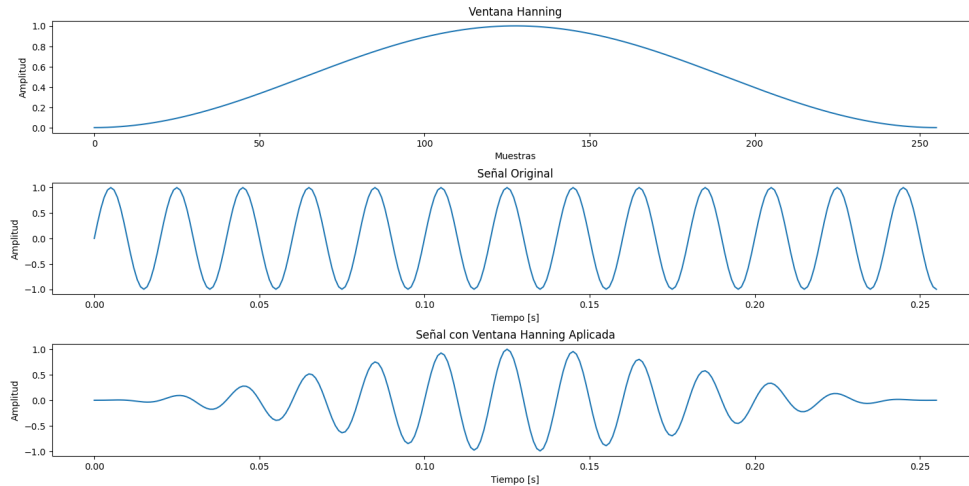


Figura 6.5: Ventana Hanning y ejemplo de su aplicación en una señal sinusoidal de 50 Hz.

Como se observa en la Figura 6.5, la aplicación de la función Hanning resalta las variaciones en la señal, haciendo más evidentes los cambios de frecuencia dentro de la resolución temporal de la ventana. Al introducir superposición en las ventanas aplicadas a la señal, se logra aislar las variaciones de frecuencia, lo que permite un análisis visual mucho más detallado y preciso.

Para el análisis en el Mapa Tiempo-Frecuencia (TF), se implementan técnicas de normalización recomendadas por [26]. Estas técnicas son fundamentales para asegurar que los datos sean comparables y que se minimicen las variaciones que podrían obscurecer el análisis. Las siguientes ecuaciones describen el proceso de normalización:

$$\tilde{s}(t) = \frac{s(t)}{\sqrt{\int_0^T s(t)^2 dt}} \quad (6.1)$$

$$\sigma_T = \sqrt{\int_0^T (t - t_0)^2 \tilde{s}(t)^2 dt} \quad (6.2)$$

$$\sigma_F = \int_0^\infty f^2 |\tilde{S}(f)|^2 df \quad (6.3)$$

En estas ecuaciones, $\tilde{s}(t)$ representa los datos normalizados, mientras que f denota la frecuencia y $\tilde{S}(f)$ es la transformada rápida de Fourier de $\tilde{s}(t)$.

La primera ecuación normaliza la señal, lo que permite comparaciones entre pulsos de diferentes magnitudes. La segunda ecuación, que calcula σ_T , ayuda a evaluar la dispersión temporal de la señal normalizada, proporcionando una medida de la estabilidad temporal. Finalmente, la tercera ecuación calcula σ_F , que describe la dispersión de las frecuencias en el dominio de la frecuencia, esencial para identificar armónicos y características relevantes en el análisis.

Estas técnicas no solo facilitan la identificación de patrones en la señal, sino que también mejoran la capacidad de distinguir entre diferentes comportamientos bajo diversas condiciones de exposición. A continuación, se aplicarán estas técnicas al análisis de los pulsos, destacando su relevancia en el estudio de las características de la señal.

6.2.1.1. Resultados de Espectrograma

Una vez realizada la transformada de Fourier de tiempo corto para cada pulso, se procede a generar los espectrogramas. Estos espectrogramas se representan en un formato tridimensional que incluye frecuencia en Hz, tiempo

en s e intensidad en dB . Para esta visualización, se emplearán gráficos de mapa de calor, donde cada punto representa su correspondiente valor de frecuencia, el tiempo asociado en la muestra y la magnitud de la señal en decibeles.

A continuación se presentan siete espectrogramas de toda la muestra de mediciones: Tres para exposición AC, dos para exposición DC y dos para exposición a Impulso.

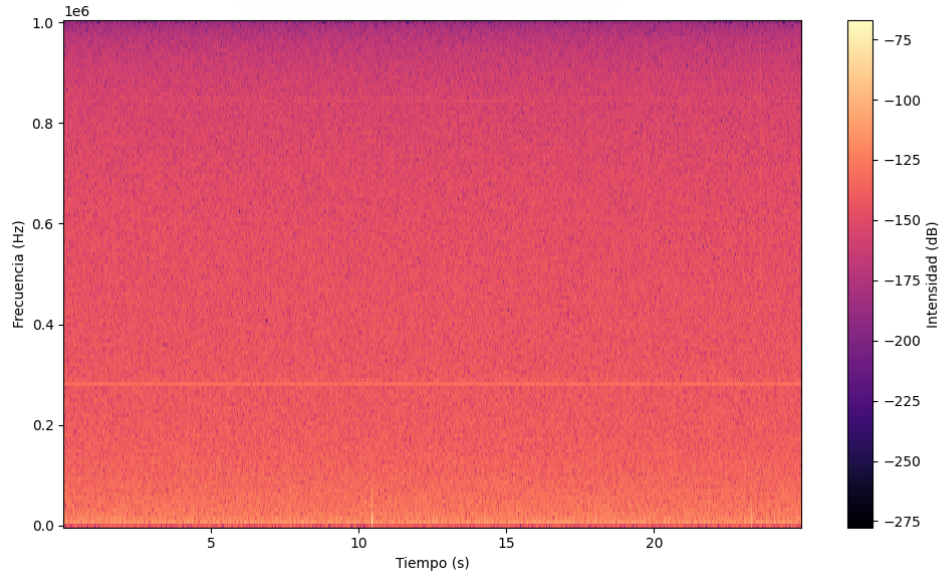


Figura 6.6: Espectrograma N°1 exposición AC.

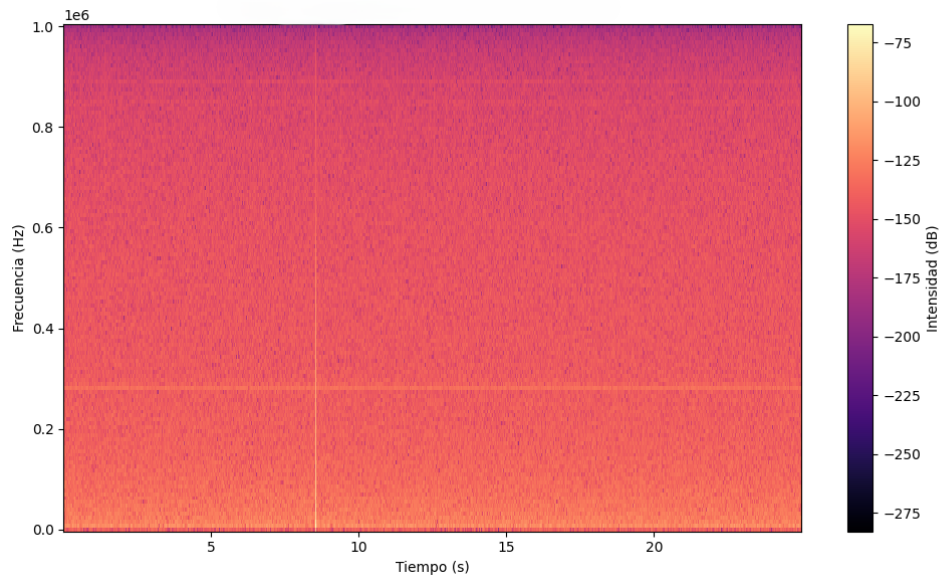


Figura 6.7: Espectrograma N°2 exposición AC.

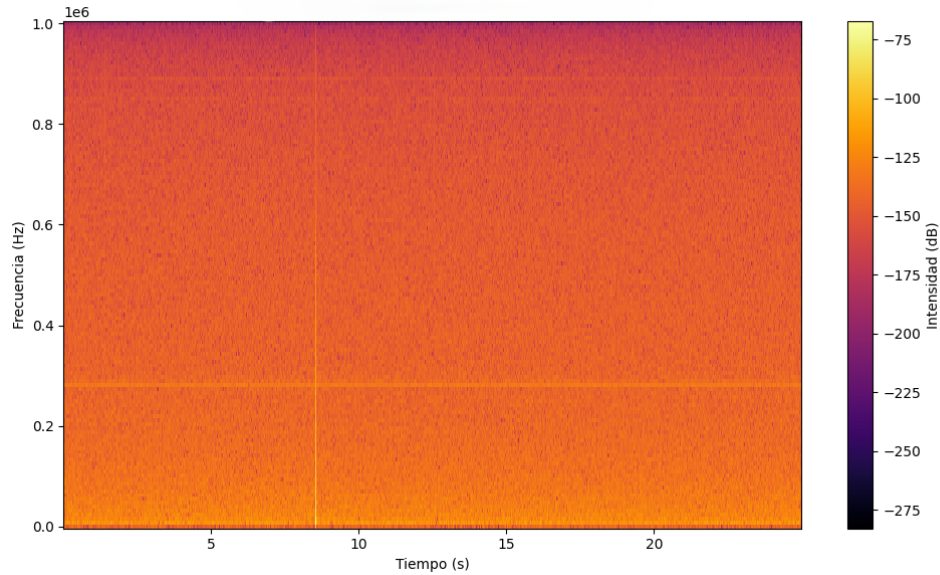


Figura 6.8: Espectrograma N°3 exposición AC.

Al examinar los espectrogramas correspondientes a la exposición a campo AC, se pueden identificar varios fenómenos que reflejan el comportamiento armónico de la señal. Primero, se observa una disminución en la intensidad a medida que aumenta la frecuencia de los armónicos. En segundo lugar, se detectan líneas horizontales y verticales de mayor intensidad que se destacan por encima del espectro armónico. Por último, se aprecia una variación tanto en la intensidad como en la longitud de estas líneas al modificar el valor del campo eléctrico y el pulso observado.

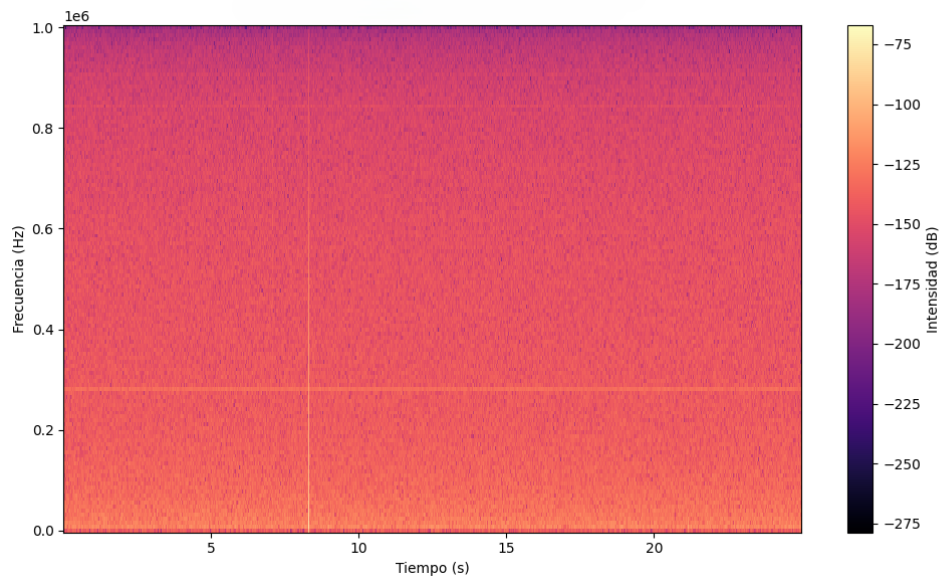


Figura 6.9: Espectrograma N°1 exposición DC.

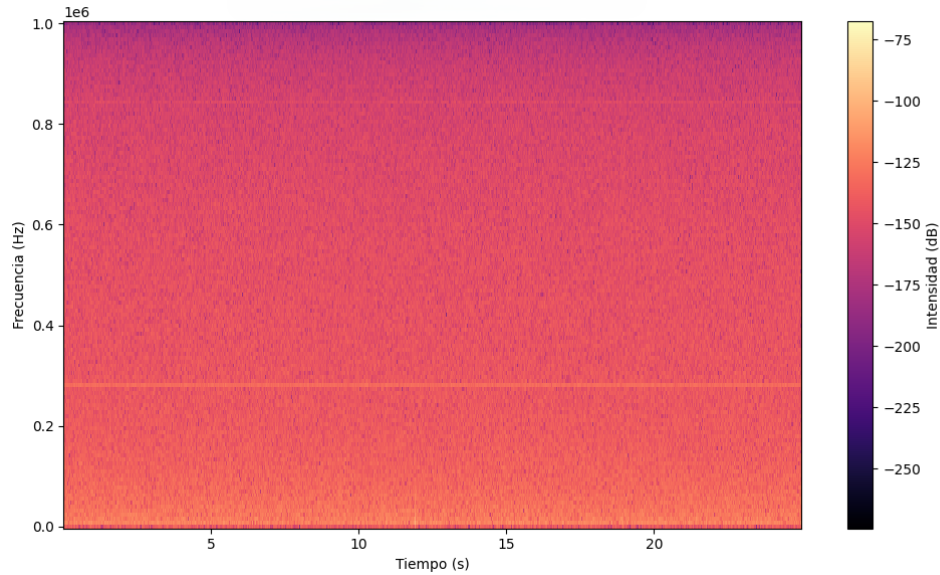


Figura 6.10: Espectrograma N°2 exposición DC.

Al analizar el espectrograma obtenido durante la exposición a un campo DC, se observa un comportamiento similar al registrado en la exposición a un campo AC. Esta similitud sugiere que, a simple vista, no se presentan diferencias evidentes entre las gráficas de ambas exposiciones. Por lo tanto, es necesario llevar a cabo un análisis adicional, como el mencionado anteriormente: el Mapa TF, para identificar y verificar las diferencias subyacentes entre estos dos tipos de exposición.

Las líneas horizontales y verticales en el espectrograma se distinguen claramente sobre el espectro de frecuencia debido a que las magnitudes de sus frecuencias son significativamente mayores en comparación con las demás armónicas presentes. Esta predominancia sugiere que su influencia en la señal es considerablemente más relevante. Las líneas horizontales indican la presencia de una única frecuencia (o un rango de frecuencias en el caso de una banda horizontal) que se mantiene constante a lo largo del intervalo temporal observado. Este fenómeno puede atribuirse a la presencia de ruido o a un desplazamiento inducido constante en la señal, lo que resulta en que la señal inducida tenga un valor medio superior a cero.

Es importante señalar que se identifican dos zonas recurrentes de aparición de las líneas horizontales a lo largo de la muestra: una zona de alta frecuencia donde se presentan dos bandas horizontales, y una zona de menor frecuencia que muestra una línea horizontal. La aparición de las bandas en la zona de alta frecuencia puede estar relacionada con el ruido presente en las mediciones, mientras que la línea horizontal en la zona de menor frecuencia puede ser indicativa de un desplazamiento en la señal inducida.

En contraste, las líneas verticales en el espectrograma reflejan la influencia de un amplio rango de frecuencias en un intervalo temporal específico. Este comportamiento temporal se atribuye a las ondas cuadradas, que requieren la presencia de múltiples armónicas para su generación. Por lo tanto, la aparición de líneas verticales en el espectrograma indica los pulsos generados por el marcapasos.

A continuación se presentan los espectrogramas obtenidos para exposición a ensayo impulso:

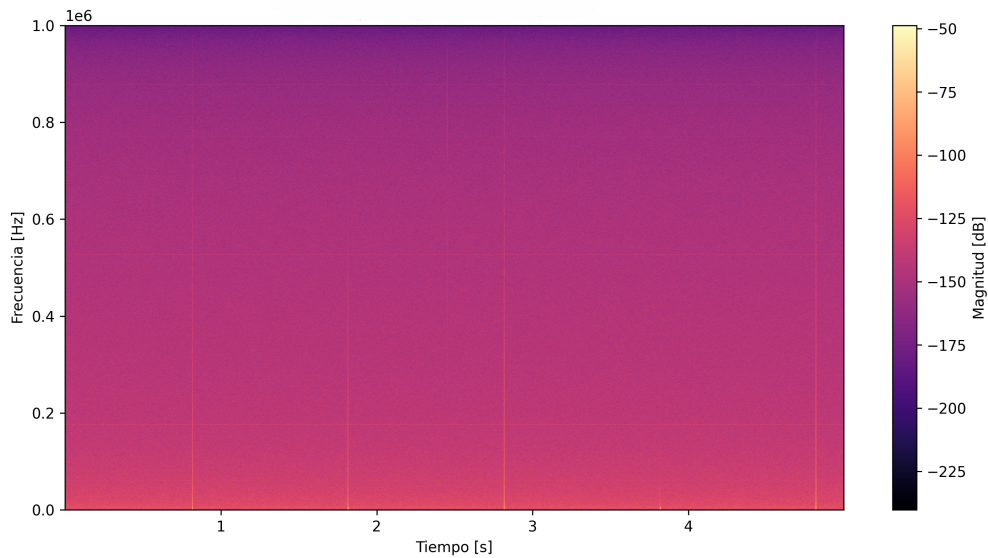


Figura 6.11: Espectrograma N°2 exposición Impulso de Baja Magnitud.

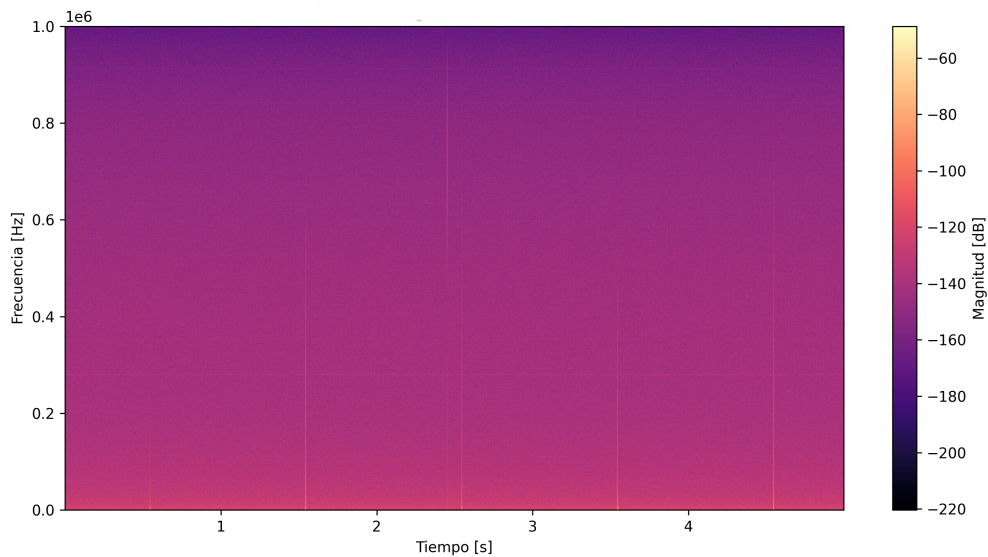


Figura 6.12: Espectrograma N°1 exposición Impulso de Alta Magnitud.

En el caso de la exposición a impulso, como se muestra en las Figuras 6.11 y 6.12, fue necesario realizar un análisis exhaustivo de todos los pulsos presentes en la muestra. Esto se debe a la variabilidad impredecible del pulso electromagnético generado, ya que, a pesar de haber configurado el osciloscopio para su detección en las cercanías del valor de trigger, el pulso puede manifestarse en vecindades de este. Por lo tanto, al enfocarse únicamente en un pulso específico, existe el riesgo de que este no se refleje en el espectrograma.

Al comparar las Figuras 6.12 y 6.11 con los demás espectrogramas, se observa una diferencia notable: la aparición de una banda vertical que se presenta exclusivamente en altas frecuencias. Esta banda no solo incrementa

su magnitud (o intensidad) con el aumento de la magnitud del pulso electromagnético, sino que también potencia el contenido armónico acoplado en la señal del marcapasos. Esto confirma no solo la presencia de tensiones inducidas en la medición del marcapasos, sino también el acoplamiento del pulso electromagnético en la señal, tal como se detalla en el Marco Teórico, Sección 3.6.2.

Este efecto puede detectarse de forma visual al observar la señal del marcapasos ante exposición impulso, como en la siguiente figura:

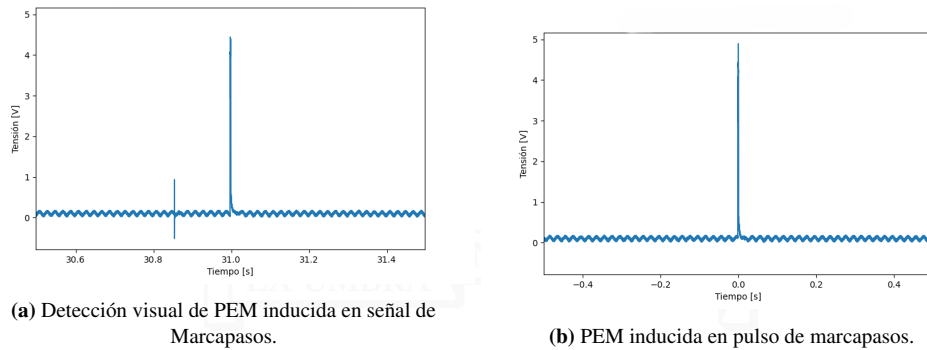


Figura 6.13: Detección visual de PEM inducida en diferentes señales de marcapasos.

La posición en que el pulso electromagnético se induce en la señal del marcapasos presenta un comportamiento aleatorio pudiendo aparecer tanto en cercanías del pulso de marcapasos como en el mismo pulso lo que inevitablemente genera deformaciones en la señal de salida del marcapasos.

6.2.1.2. Resultados de Mapas TF

Hasta ahora se ha observado cómo la exposición actúa en la señal de salida del marcapasos pero no se ha observado como la distancia y el aumento de tensión de la exposición afecta a las señales de pulsos. Para ello se procederá a obtener gráficas de Mapas TF por cada nivel de tensión utilizado en las exposiciones.

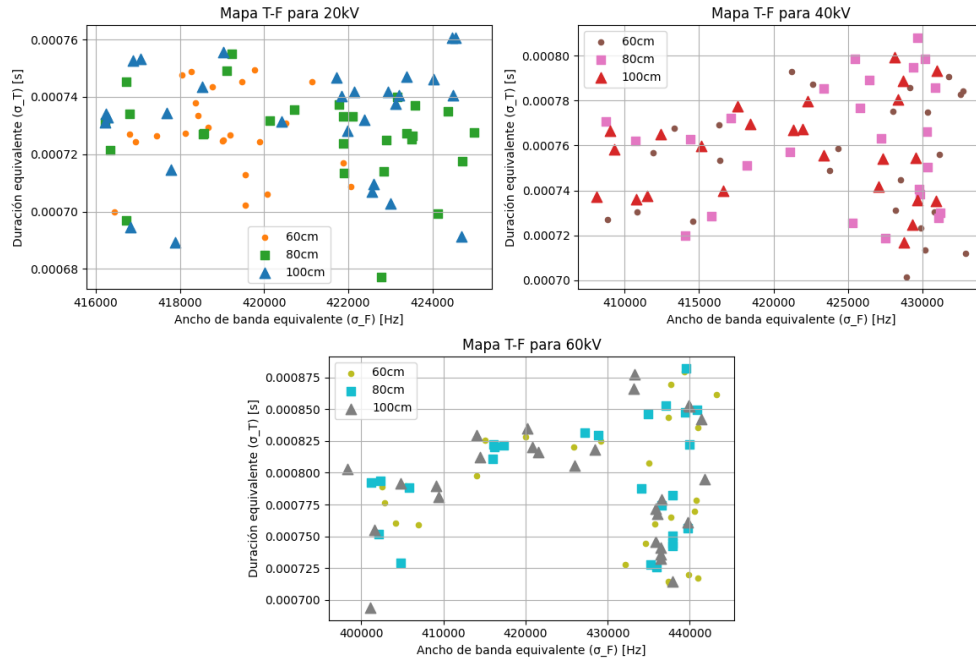


Figura 6.14: Mapa TF para exposición DC con ventana de 20000 datos.

Al analizar el mapa tiempo-frecuencia para la exposición a campo DC presentado en la Figura 6.14, se observa una dispersión de los datos común entre los distintos niveles de tensión aplicada. El rango de frecuencias se encuentra entre 40×10^4 y 44×10^4 hertz, mientras que el intervalo temporal correspondiente oscila entre $6,8 \times 10^{-4}$ y $8,75 \times 10^{-4}$ segundos. A simple vista, los datos no muestran un patrón evidente, excepto en las tensiones de 40 y 60 kV, donde se detecta un comportamiento más definido. En estos casos, los datos tienden a formar dos líneas: una diagonal, que indica un aumento en la frecuencia y la duración del tiempo, y otra vertical, donde la frecuencia se mantiene dentro de un rango específico. Sin embargo, este comportamiento no se observa en la tensión de 20 kV, lo que impide establecer un patrón predecible con la cantidad de datos disponibles.

Este comportamiento aleatorio a mayor distancia podría estar relacionado con el acoplamiento por radiación, donde las ondas electromagnéticas radiadas, captadas por los cables del dispositivo, presentan un efecto menos directo y más variable en la señal del marcapasos.

Por ende, resulta necesario aumentar la cantidad de datos para obtener una mejor comprensión de la distribución en el mapa TF.

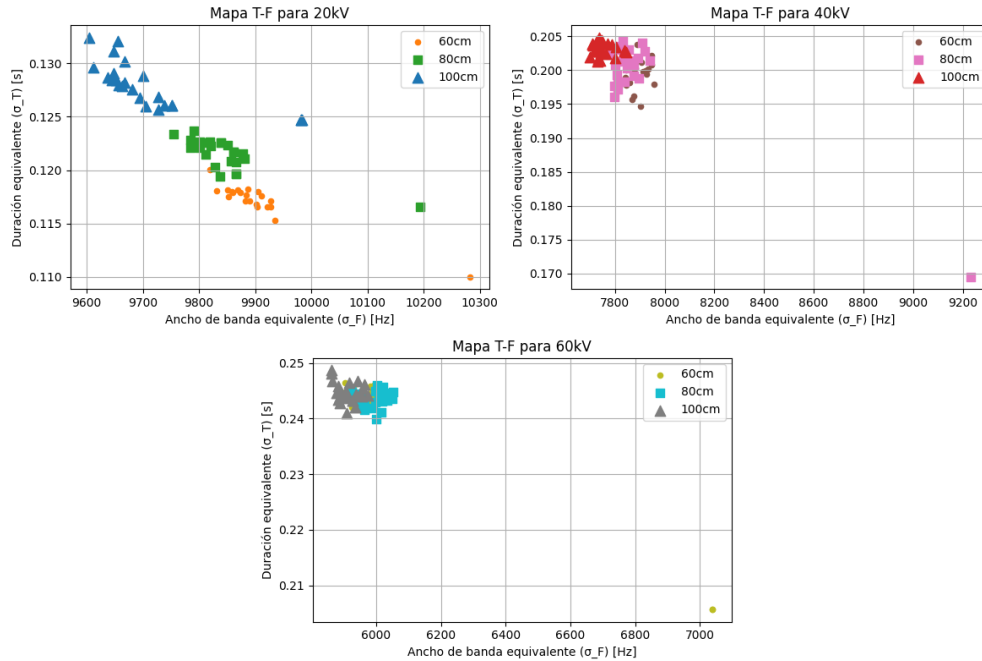


Figura 6.15: Mapa TF para exposición DC con ventana de 2 millones de datos.

En la Figura 6.15 se presenta el mismo mapa tiempo-frecuencia que en la Figura 6.14 con la diferencia que el cálculo de los datos del mapa TF se realizó con una ventana cien veces mayor, o sea de 2 millones de datos.

La principal diferencia observada al incrementar la cantidad de datos radica en la distribución de los mismos en el mapa tiempo-frecuencia. Mientras que en las figuras anteriores los datos se dispersaban dentro de una ventana similar para cada nivel de tensión, al aumentar el volumen de datos, estos tienden a agruparse de manera más definida según la distancia al punto de origen de la exposición. Se detecta un patrón de agrupamiento claro para cada configuración de tensión y distancia, destacando la presencia de un único punto aislado en tiempo y frecuencia que se desvía del resto del conjunto. Este fenómeno es particularmente notable para el nivel de tensión de 20 kV. El comportamiento descrito se atribuye al hecho de que, al aumentar la cantidad de datos, se incluye la banda nula previamente mencionada, lo que provoca una variación en la duración efectiva de las frecuencias capturadas en la muestra.

La segunda diferencia radica en que las ventanas de tiempo y frecuencia ya no son tan similares como en el primer caso. De hecho, se observa que al incrementar la tensión aplicada, el ancho de las bandas de frecuencia disminuye mientras que la duración equivalente de los datos aumenta. Este fenómeno también se manifiesta al aumentar la distancia al punto de origen de la exposición, lo que provoca que los datos se distribuyan en la ventana en dirección a mayores duraciones equivalentes y frecuencias más bajas.

La tercera diferencia radica en que, al incrementar la cantidad de datos analizados, se observa una disminución en las frecuencias y un aumento en las duraciones equivalentes en el mapa tiempo-frecuencia. Este fenómeno se atribuye a la inclusión de la banda nula, que afecta la representación de frecuencias de alta energía, desplazándolas hacia un rango más bajo. Además, la presencia de ruido en el entorno puede interferir con la calidad de la señal, contribuyendo a la dispersión de los datos en el mapa TF. Al aplicar tensiones más altas y considerar la distancia al punto de origen de la exposición, los datos tienden a agruparse en torno a mayores duraciones, lo que está intrínsecamente relacionado con la relación inversa entre frecuencia y tiempo.

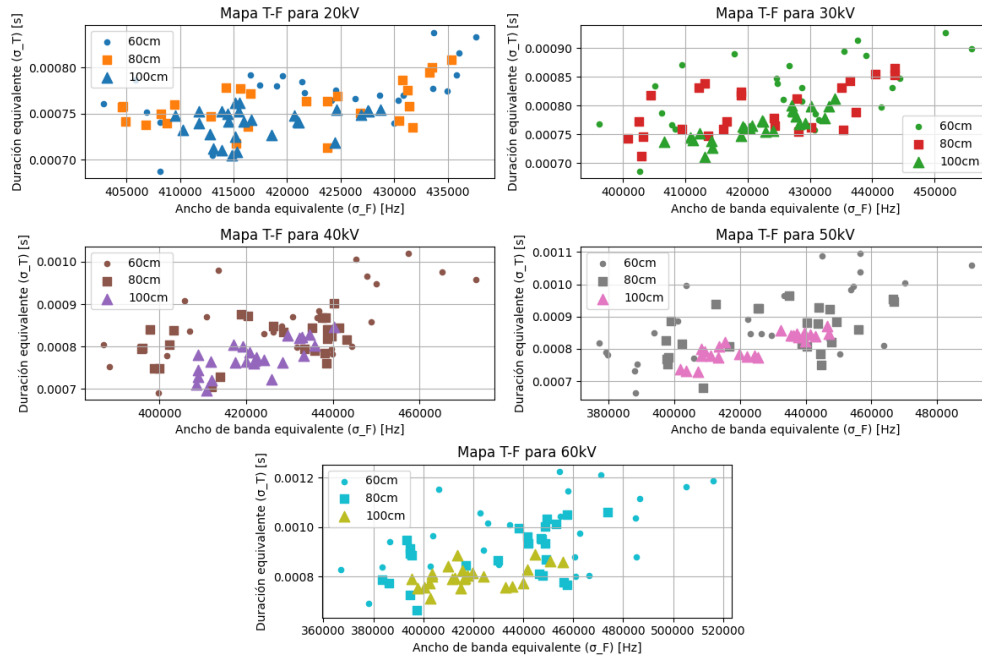


Figura 6.16: Mapa TF para exposición AC con ventana de 20000 datos.

En la Figura 6.16 se presenta el mapa tiempo-frecuencia para la exposición a un campo eléctrico alterno con una muestra de 2 millones de datos. Al comparar los distintos niveles de tensión aplicada, se observa un comportamiento que, a primera vista, parece aleatorio; sin embargo, al contrastar estos datos con las distancias al punto de origen de la exposición, se destacan ciertas similitudes. En el caso de una distancia de 100 cm, se evidencia que, al aumentar el nivel de tensión, los datos tienden a agruparse en dos grupos de frecuencias distintas, aunque sus duraciones equivalentes son similares. Para una distancia de 80 cm, se aprecia un comportamiento similar con una mayor diferencia en el ancho de banda de frecuencias entre cada grupo. Por otro lado, en el caso de 60 cm, no se identifica un patrón que sugiera un comportamiento no aleatorio.

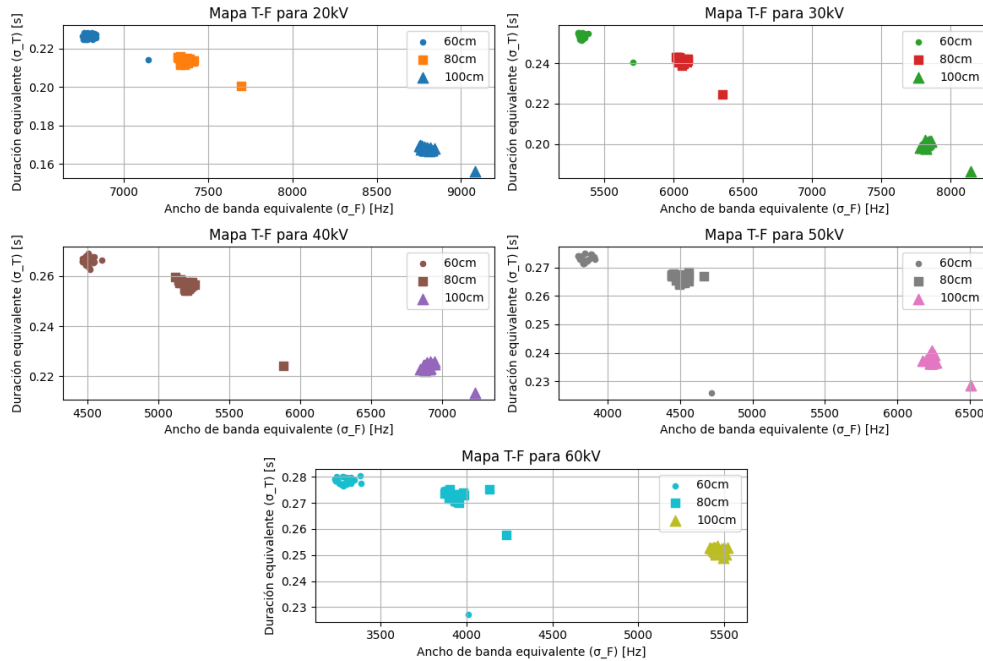


Figura 6.17: Mapa TF para exposición AC con ventana de 2 millones de datos.

Al aumentar la cantidad de datos para el mapa tiempo-frecuencia en la exposición a campo eléctrico alterno (AC), presentado en la Figura 6.17, se observa un comportamiento similar al del caso de exposición a campo DC. Sin embargo, se destaca una diferencia notable en la definición de los grupos de datos y en la ubicación del punto que queda fuera de dichos grupos. Se presenta un comportamiento diagonal en la distribución de los datos, indicando que, al aumentar el nivel de tensión aplicado y reducir la distancia al punto de origen de la exposición, los datos tienden a aumentar la duración equivalente y a reducir el ancho de banda de frecuencias.

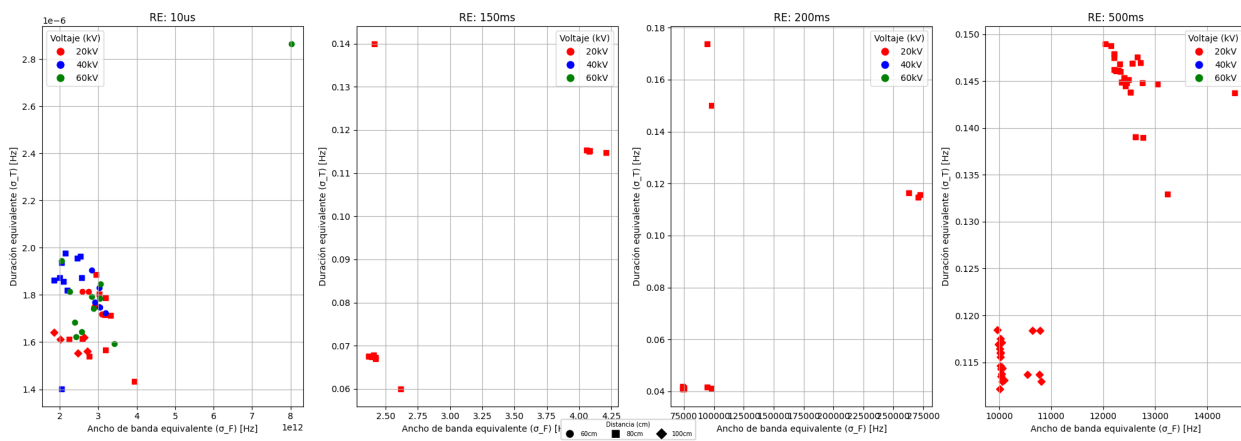


Figura 6.18: Mapas TF para exposición Impulso.

En la Figura 6.18 se presentan los distintos mapas tiempo-frecuencia (TF) correspondientes a cada resolución de ventana. Se observa un comportamiento dispar entre las distintas resoluciones. Para la resolución de $10\mu s$, no se detecta una dependencia clara con respecto a la tensión aplicada ni a la distancia al origen; sin embargo, los datos se agrupan dentro de una banda específica de frecuencias y duraciones temporales, a excepción de un punto que se desvía notablemente del resto de la muestra. En el caso de la resolución de 150 ms, únicamente se presentan datos para una distancia de 80 cm, comportamiento que se repite para la resolución de 200 ms. Por otro lado, en la resolución de 500

ms, se manifiesta un patrón definido en la distribución de datos en función de la distancia, considerando un único nivel de tensión aplicado de 20 kV. En este caso, se observa que a medida que aumenta la distancia al punto de origen de la exposición, tanto el ancho de banda de frecuencias como la duración equivalente tienden a disminuir.

6.3. Resultados Norma Marcapasos

En esta sección se presentarán distintas figuras y datos obtenidos al realizar las mediciones según la norma para marcapasos. Se realizará una parametrización de la forma de onda típica obtenida y se procederá a realizar un análisis estadístico de los datos parametrizados, consistente en dos métodos de inspección visual, tal de lograr identificar la tendencia de los datos ante los diferentes niveles de exposición.

Revisando lo planteado por la norma de marcapasos [9] se espera una forma de onda parecida a la mostrada en la Figura 3.2.

6.3.1. Forma de Onda Norma BS EN ISO 14708-2:2022

A continuación se presentan 4 formas de onda típicas obtenidas por las mediciones, las tres exigidas por norma (las tres resistencias) junto con una obtenida como base sin resistencia aplicada la cual se obtuvo al inicio de la experimentación:

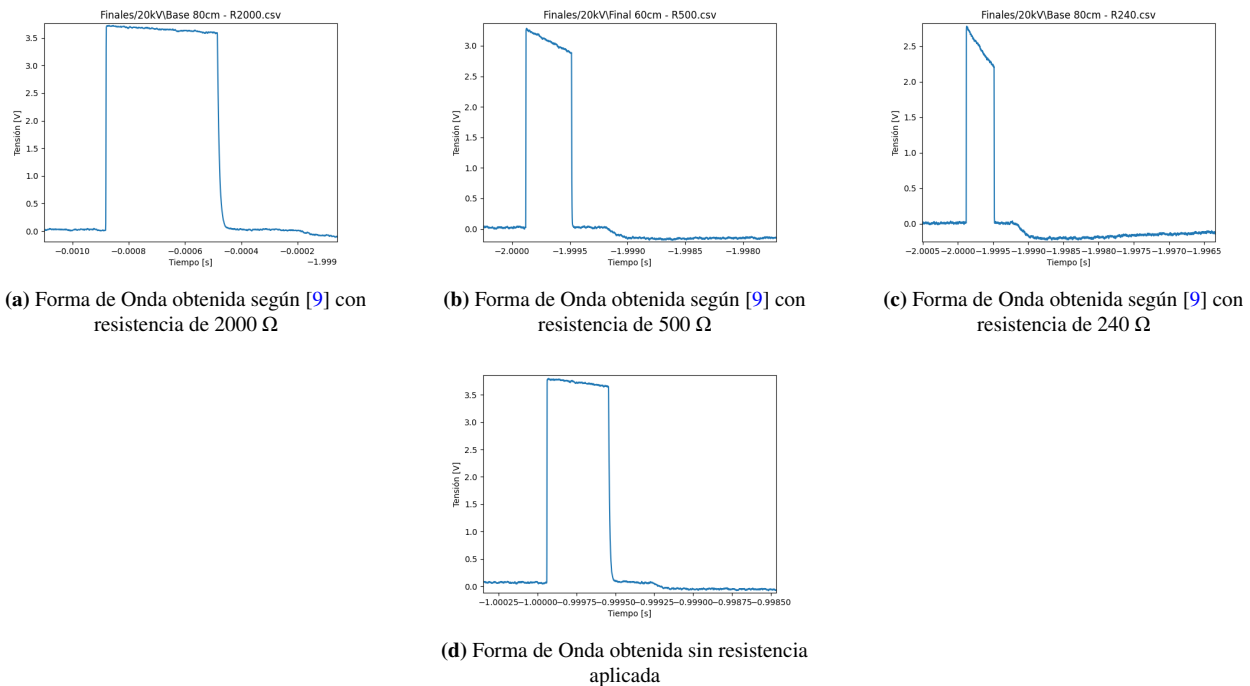


Figura 6.19: Formas de Onda obtenidas según [9]

Como se observa en la Figura 6.19 al aplicar distintos valores de resistencia al circuito dado por norma se presentan tres respuestas diferentes a la forma de onda obtenida, variando las amplitudes, tiempos y variaciones de magnitud con respecto al tiempo en cada una de ellas. Estas diferencias en las formas de onda pueden proceder de dos fuentes: Naturaleza eléctrica inherente del sistema y respuesta del dispositivo ante diferencia de resistencias. El primer punto permite explicar la naturaleza lineal de la ley de Ohm ya que al disminuir el valor de la resistencia disminuye la tensión de amplitud del pulso lo cual denota un comportamiento lineal con corriente constante, mientras que también se puede deber este comportamiento a una reacción del marcapasos ante la variación del valor resistivo

al cual esta conectado permitiéndole variar la tensión aplicada tal de mantener la corriente de salida constante y no afectar al elemento de salida (en un caso real, un corazón). Siendo este último caso el más probable debido a que un marcapasos no actúa como un elemento eléctrico lineal (ya que utiliza electrónica avanzada para la generación de las señales eléctricas).

Estas figuras fueron obtenidas con una ventana de datos suficiente como para observar todos los efectos que se observan en la forma de onda junto con lo esperado por la norma de marcapasos dejando ciertos efectos de lado. A continuación se presenta una muestra de toda la forma de onda para el caso base sin resistencia aplicada:

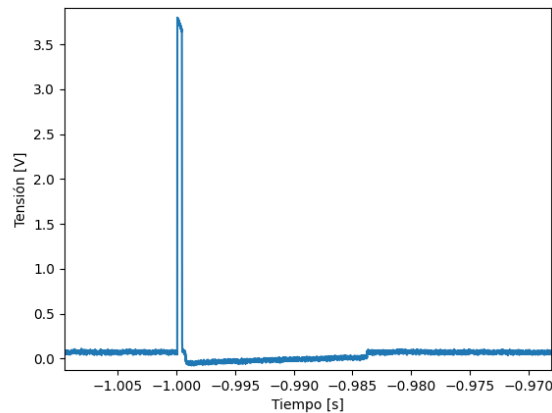


Figura 6.20: Forma de onda completa para caso base sin resistencia aplicada.

Como se observa en la Figura 6.20 luego de terminado el pulso se presenta una tensión residual negativa que, después de unos 0.014 s, disminuye de forma gradual. Esto se puede deber a carga residual contenida en el sistema de medición o en el adaptador de conexión que se descarga a lo largo que transcurre el tiempo o debido a sensores de detección incorporados dentro del dispositivo.

6.3.2. Parametrización Forma de Onda

Debido a que se requiere verificar si el marcapasos implantable se ve afectado por las distintas exposiciones se realizará una parametrización de las formas de onda obtenidas por ensayos de norma. Las variables a parametrizar son las siguientes:

- Tiempo de Subida y de Bajada s
- Amplitud de Subida y de Bajada V
- Pendiente V/s
- Tiempo de Meseta s
- Amplitud Norma V
- Frecuencia Hz

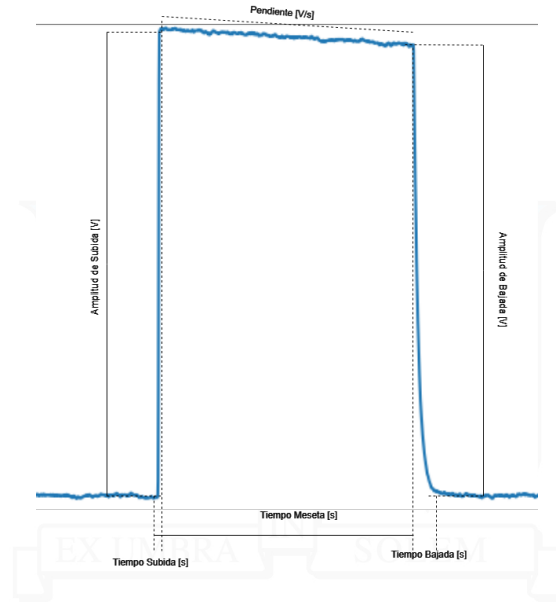
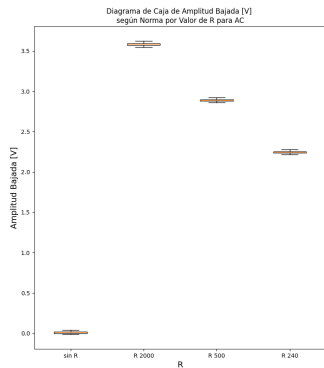


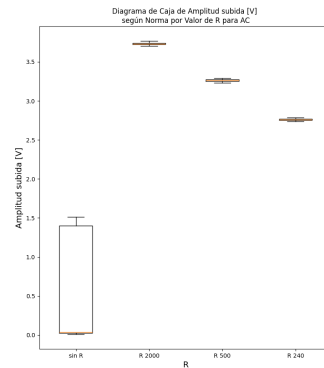
Figura 6.21: Parametrización de la forma de onda obtenida al realizar ensayo por norma.

Para corroborar si estas variables se ven afectadas con las distintas exposiciones se obtendrá el promedio y la desviación estándar para cada tipo de resistencia utilizada en el ensayo, para ello se han realizado dos gráficas que permiten una inspección visual de los datos: Diagramas de caja y plantillas de muestra de datos utilizando Power BI. Se utilizaron estos dos métodos de inspección de datos estadísticos debido a que, en el caso de los diagramas de caja, permiten percibir de forma visual la distribución de la muestra analizada con respecto a su promedio y su desviación estándar mientras que con Power BI se aprovechará la simplicidad de dicho programa para generar graficas de columnas junto con graficas de puntos en un eje para permitir una inspección de la muestra en sí.

A continuación se presentan las gráficas Power BI y diagrama de cajas para exposición AC, DC e Impulso de Amplitud de Bajada y Subida. Las demás variables y se presentan en el Anexo Sección A.2.2 y A.2.3.



(a) Diagrama de Caja de Amplitud de Bajada en exposición AC.



(b) Diagrama de Caja de Amplitud de Subida en exposición AC.

Figura 6.22: Diagramas de Caja de Amplitud de Subida y Bajada en exposición AC.

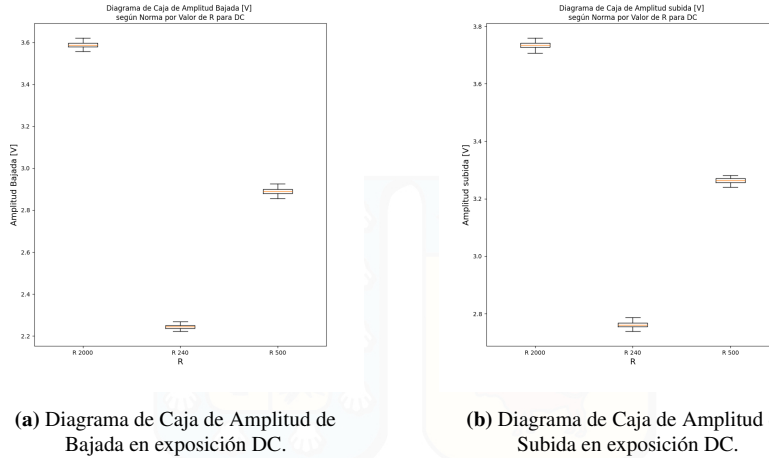


Figura 6.23: Diagramas de Caja de Amplitud de Subida y Bajada en exposición DC.

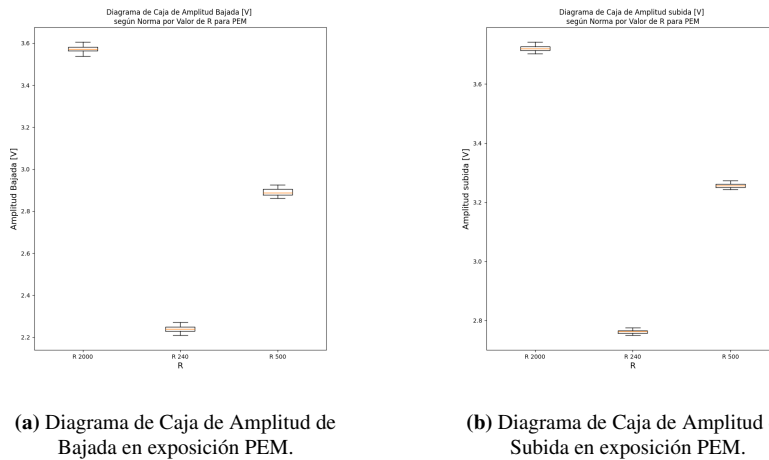


Figura 6.24: Diagramas de Caja de Amplitud de Subida y Bajada en exposición PEM.

De las Figuras 6.22, 6.23 y 6.24 se observa que los valores de la parametrización no presentan diferencias visuales significativas entre sí, ya que los diagramas de caja muestran posiciones y rangos similares para cada variable en cada valor de resistencia. Además, no se detectan valores atípicos ni datos que se desvíen del rango representado en cada diagrama.

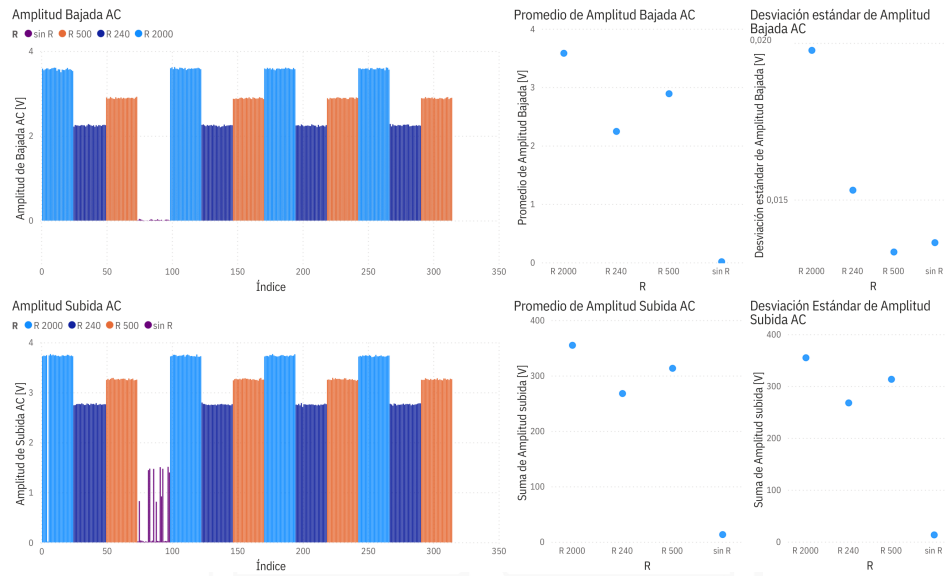


Figura 6.25: Plantilla Power BI para Tiempo de Subida y de Bajada a exposición AC.

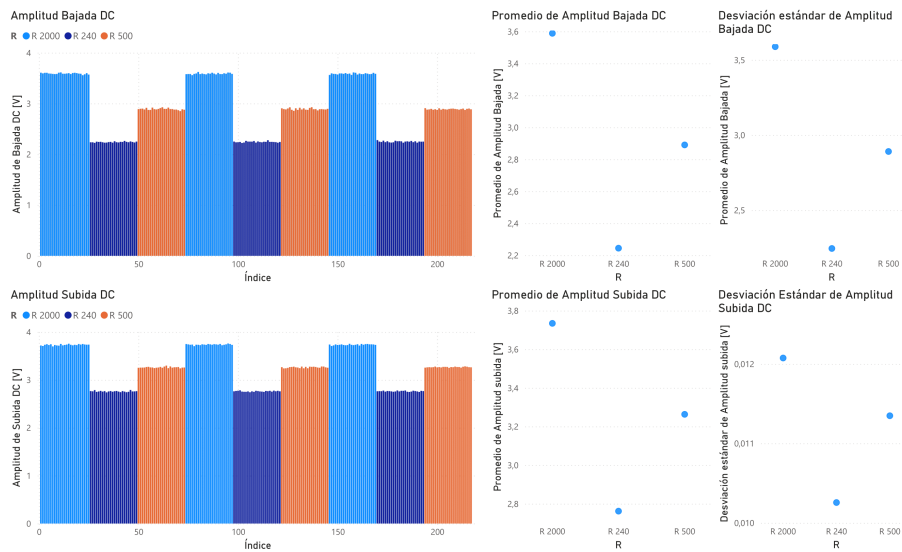


Figura 6.26: Plantilla Power BI para Tiempo de Subida y de Bajada a exposición DC.

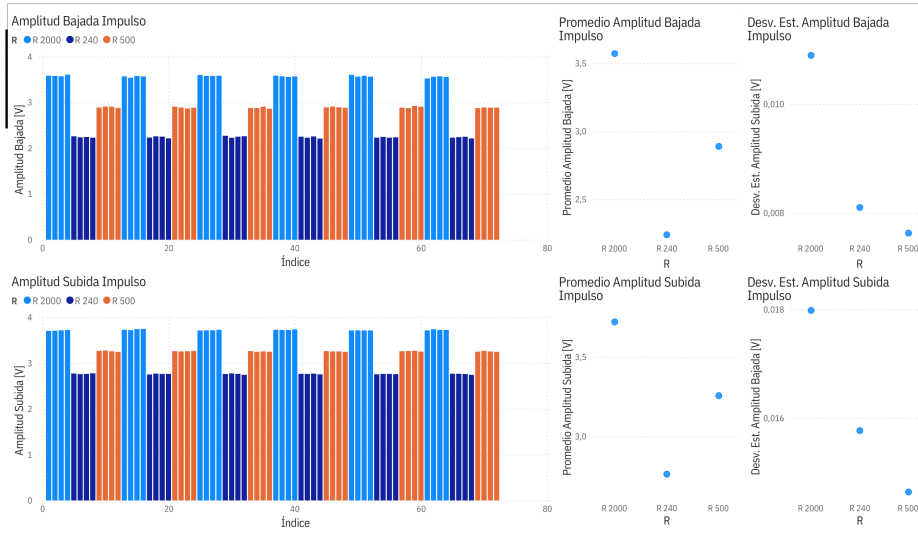


Figura 6.27: Plantilla Power BI para Tiempo de Subida y de Bajada a exposición Impulso.

Las tablas con todos los valores de promedio y desviación estándar de todas las variables obtenidas se encuentran en el Anexo Sección A.2.1.

La primera observación a realizar corresponde al caso base sin resistencia aplicada. En él se logra identificar que las variables de amplitud son las que más se ven afectadas por la ausencia de un valor resistivo entre el ánodo y el cátodo del cable de excitación cardíaca. Bajo esta consideración se presentan dos casos probables: Que el marcapasos no detecte un elemento resistivo a excitar, y por ende, disminuya la tensión de la terapia cardíaca ó que el marcapasos detecte las resistencias de los equipos de medición, la cual como se muestra en el Montaje Experimental Sección 5.4.1 presenta un valor de $1\text{ M}\Omega$, y en consecuencia de ello reduce la tensión de salida debido a la presencia de un valor resistivo demasiado alto. Este fenómeno también afecta a los valores obtenidos por norma.

A continuación se presentan los errores porcentuales de las variaciones medidas con respecto a las variables configuradas en el dispositivo:

Exposición	AC	DC	PEM
Promedio “con Resistencia” (V)	3.253	3.255	3.246
Error Porcentual (%)	7.054	6.989	7.246

Tabla 6.5: Error porcentual en Amplitud de Subida con respecto al configurado previamente.

Exposición	AC	DC	PEM
Promedio “con Resistencia” (V)	2.905	2.911	2.900
Error Porcentual (%)	16.99	16.83	17.14

Tabla 6.6: Error porcentual en Amplitud de Bajada con respecto al configurado previamente.

Exposición	AC	DC	PEM
Promedio “con Resistencia” (s)	$3,373 \times 10^{-4}$	$3,345 \times 10^{-4}$	$3,405 \times 10^{-4}$
Error Porcentual (%)	15.67	16.38	14.88

Tabla 6.7: Error porcentual en Tiempo Meseta con respecto al configurado previamente.

Para la frecuencia se requirió realizar un cambio de unidades, de Hz a min^{-1} obteniéndose:

Exposición	AC	DC	PEM
Promedio “con Resistencia” (min^{-1})	55.00	55.00	60.01
Error Porcentual (%)	8.328	8.328	0.010

Tabla 6.8: Error porcentual en Frecuencia con respecto al configurado previamente.

Como se logra observar en las Tablas 6.5, 6.6, 6.7 y 6.8, se presenta una notable diferencia en la magnitud de los errores porcentuales, siendo la Amplitud de Bajada y el Tiempo de Meseta las variables con mayores errores porcentuales. Para el caso de la Amplitud de Bajada se puede explicar observando la Figura 6.19. En los cuatro casos expuestos, al momento de llegar a la tensión programada, se presenta la pendiente de caída de tensión la cual modifica el valor de amplitud de bajada provocando que la caída de amplitud no sea igual al valor programado mientras que para el Tiempo de Meseta se presentan las diferencias debido a que no se considera el tiempo de la tensión residual. Este último fenómeno puede generar una deformación de la forma de onda provocando que el pulso dure más tiempo del programado. A continuación se presentan las estadísticas entre exposiciones, para ello se obtendrán los promedios de las variables para cada exposición como el valor equivalente de la muestra.

Tabla 6.9: Valores estadísticos entre exposiciones para datos parametrizados.

	Amplitud Subida (V)	Tiempo Subida (s)	Tiempo Meseta (s)	Amplitud Bajada (V)	Tiempo Bajada (s)	Pendiente (V/s)	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)
AC	$3,253 \times 10^0$	$5,292 \times 10^{-5}$	$3,373 \times 10^{-4}$	$2,906 \times 10^0$	$8,717 \times 10^{-5}$	$-9,862 \times 10^2$	$1,166 \times 10^0$	$9,167 \times 10^{-1}$
DC	$3,255 \times 10^0$	$5,682 \times 10^{-5}$	$3,345 \times 10^{-4}$	$2,911 \times 10^0$	$8,942 \times 10^{-5}$	$-9,825 \times 10^2$	$1,161 \times 10^0$	$9,167 \times 10^{-1}$
EMP	$3,246 \times 10^0$	$5,500 \times 10^{-5}$	$3,405 \times 10^{-4}$	$2,900 \times 10^0$	$9,583 \times 10^{-5}$	$-9,707 \times 10^2$	$1,000 \times 10^0$	$1,000 \times 10^0$
Mean	$3,252 \times 10^0$	$5,491 \times 10^{-5}$	$3,374 \times 10^{-4}$	$2,906 \times 10^0$	$9,080 \times 10^{-5}$	$-9,798 \times 10^2$	$1,109 \times 10^0$	$9,445 \times 10^{-1}$
Desv. Std	$4,676 \times 10^{-3}$	$1,954 \times 10^{-6}$	$3,011 \times 10^{-6}$	$5,501 \times 10^{-3}$	$4,498 \times 10^{-6}$	$8,139 \times 10^0$	$9,461 \times 10^{-2}$	$4,814 \times 10^{-2}$

Tabla 6.10: Valores estadísticos entre exposiciones para datos de Norma.

	Duraciones (s)	Áreas (V · s)	Amplitudes (V)
AC	$7,978 \times 10^2$	$1,271 \times 10^{-3}$	$1,592 \times 10^{-6}$
DC	$7,985 \times 10^2$	$1,271 \times 10^{-3}$	$1,592 \times 10^{-6}$
PEM	$7,975 \times 10^2$	$1,232 \times 10^{-3}$	$1,543 \times 10^{-6}$
Mean	$7,979 \times 10^2$	$1,258 \times 10^{-3}$	$1,576 \times 10^{-6}$
Desv. Std	$1,721 \times 10^{-1}$	$2,250 \times 10^{-5}$	$2,790 \times 10^{-8}$

Como se observa en la Tabla 6.9 la desviación estándar de las variables entre exposiciones presenta un valor máximo de 8.1390 para el valor de Pendiente siendo esta variable la única que presenta datos alejados entre sí de forma significativa. Las demás variables no sufren esta variabilidad con respecto a su promedio. Mientras que para los datos por norma, Tabla 6.10, se denota la poca diferencia entre los valores obtenidos ya que, para los tres casos, se presentan valores de duración, de áreas y de amplitudes parecidos lo cual queda expuesto por una desviación estándar del orden de los 10^{-8} volts de amplitud.

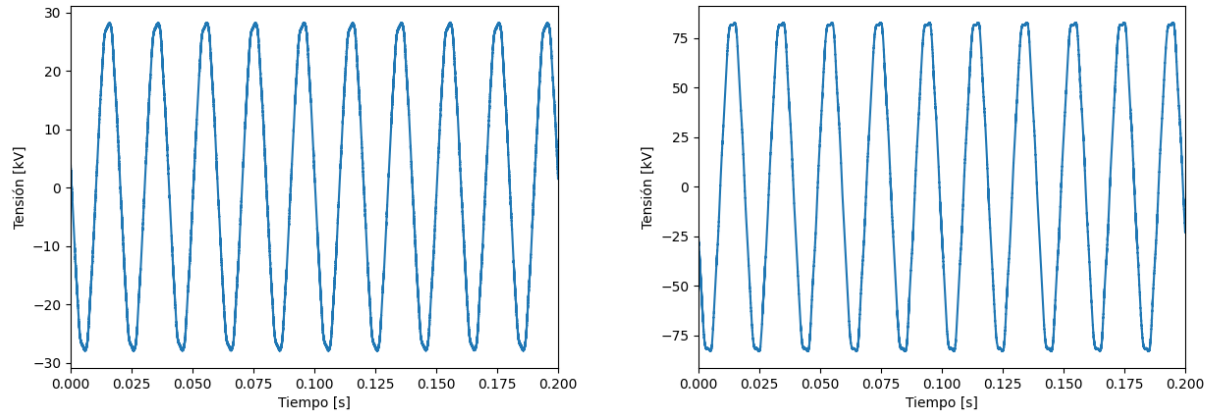
Este último análisis entrega claras luces sobre cómo afectan las distintas exposiciones a la forma de onda del marcapasos ya que, a pesar de variar los niveles y la naturaleza de la exposición, los valores obtenidos siguiendo lo expuesto en la norma [9] no presentan grandes diferencias entre sí manteniéndose relativamente iguales en magnitud.

6.4. Forma de Onda Campos Eléctricos y Pulsos Electromagnéticos

Para terminar la sección de Resultados Experimentales se requiere verificar la normativa de campo eléctrico o, mejor dicho, que los valores de campo eléctrico sean acorde a lo definido por el protocolo de medición, Montaje Experimental Sección 5.1.

6.4.1. Campo Eléctrico

A continuación se presentan gráficas del canal 1, el cual contiene la señal de salida del circuito generador de exposición. Cabe mencionar que solo se obtuvieron datos de salida del circuito para exposición AC e Impulso.



(a) Forma de onda campo eléctrico 20 kV a 60 cm.

(b) Forma de onda campo eléctrico 60 kV a 100 cm.

Figura 6.28: Formas de onda de salida de circuito generador de exposición para primera y ultima exposición AC.

A continuación se presentan los valores peak y rms de campo eléctrico en el origen (considerando una distancia muy pequeña) y a la distancia de exposición. Para obtener el campo eléctrico se calcula la tensión peak y rms del canal 1 para luego dividir por la distancia, utilizando la ecuación (3.9).

Tabla 6.11: Datos de Campo Eléctrico en punto de origen y distancia de exposición.

Tensión Teórica (kV)	Distancia a Origen (cm)	E_{rms} teórico (kV/m)	E_{rms} origen (kV/m)	E_{rms} distancia (kV/m)
20	100	20.00	2.016	20.16
20	60	33.33	2.007	33.45
20	80	25.00	2.027	25.33
30	100	30.00	3.023	30.23
30	60	50.00	3.005	50.09
30	80	37.50	3.019	37.74
40	100	40.00	3.998	39.98
40	60	66.66	4.022	67.04
40	80	50.00	4.028	50.34
50	100	50.00	5.039	50.39
50	60	83.33	5.030	83.84
50	80	62.50	5.013	62.66
60	100	60.00	6.012	60.12
60	60	100.0	6.026	100.4
60	80	75.00	6.047	75.59

Obteniéndose los siguientes errores porcentuales:

Tabla 6.12: Errores porcentuales entre valores de $E_{rms_{teorico}}$ y $E_{rms_{distancia}}$

Tensión Teórica <i>kV</i>	Distancia a origen <i>cm</i>	Error Porcentual [%]
20	100	0.7973
20	60	0.8062
20	80	1.1087
30	100	0.7663
30	60	0.5372
30	80	0.6706
40	100	0.0557
40	60	0.5803
40	80	0.9007
50	100	0.6972
50	60	0.6390
50	80	0.9350
60	100	0.1507
60	60	0.4062
60	80	0.2552

Mientras que, para el caso de Impulso, debido a que el ensayo se realiza para generar un impulso determinado, el calculo del campo eléctrico no va a indicar los valores de campo eléctrico teóricos esperados. En la Tabla A.9, contenida en el Anexo Sección A.2.4, se presentan los valores de campo eléctrico observados en el punto de exposición. En dicha tabla se logra observar que el mayor error porcentual corresponde a la configuración de 20 *kV* y 80 *cm* con un valor del 1, 1087 %. Esto corrobora el uso del protocolo de mediciones generado al principio de la experimentación en donde se buscaba superar el valor referencial obtenido por el Pliego Técnico RPTD N°07 y normativa internacional.

Al comparar los datos obtenidos mediante el medidor de campo eléctrico se obtienen los siguientes errores porcentuales:

Tabla 6.13: Error porcentual de campo eléctrico AC en comparación con medidor.

Tensión (<i>kV</i>)	Distancia (<i>cm</i>)	E_{rms} distancia (<i>kV/m</i>)	$E_{Medidor}$ Campo (<i>V/m</i>)	$E_{Medidor}$ Campo (<i>kV/m</i>)	Error Porcentual (%)
20	100	20.16	1791	1.791	91.12
20	60	33.45	1815	1.815	94.57
20	80	25.33	1830	1.830	92.78
30	100	30.23	1815	1.815	93.99
30	60	50.09	1815	1.815	96.38
30	80	37.74	1870	1.870	95.05
40	100	39.98	1831	1.831	95.42
40	60	67.04	1831	1.831	97.27
40	80	50.34	1853	1.853	96.32
50	100	50.39	1832	1.832	96.36
50	60	83.84	1896	1.896	97.74
50	80	62.66	1852	1.852	97.04
60	100	60.12	1873	1.873	96.88
60	60	100.4	1892	1.892	98.12
60	80	75.59	1870	1.870	97.53

Como se observa en la Tabla 6.13 los datos obtenidos por el medidor de campo eléctrico distan de forma exasperada de los valores esperados. Este fenómeno se debe a la baja resolución del medidor de campo eléctrico ya que los valores de campo eléctrico superan la resolución de 1999*V/m* del medidor.

6.4.2. Pulsos Electromagnéticos

En esta sección se presentarán algunas gráficas de pulsos electromagnéticos medidos con antena junto con la forma de onda generada por el circuito de la Figura 5.5.

Las imágenes a continuación corresponden a la señal medida del canal 1 del osciloscopio al generar pulsos electromagnéticos a una tensión de 20 kV y distancia de 80 cm pero variando la resolución de tiempo de la ventana. La totalidad de las figuras se presentan en el Anexo Sección A.2.5 y Sección A.2.7.

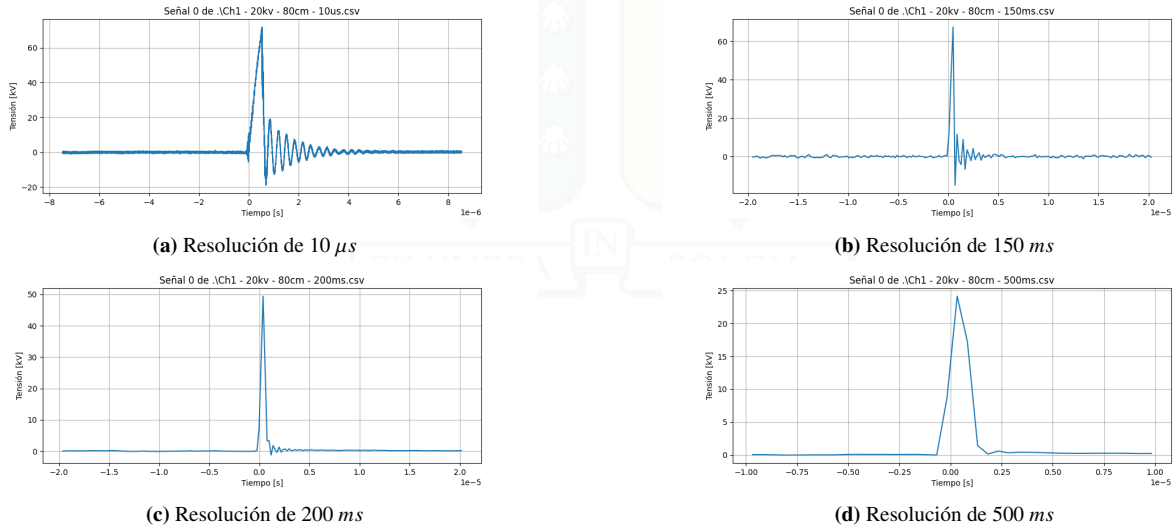
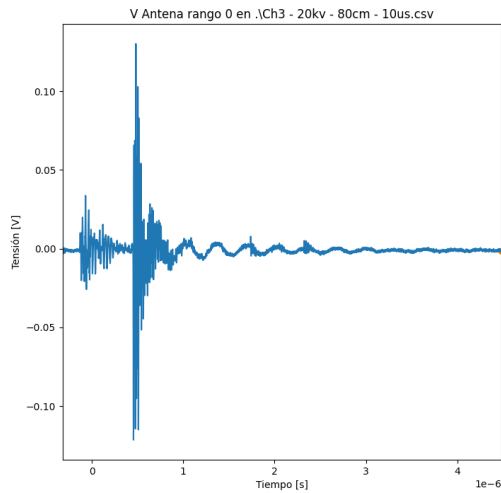


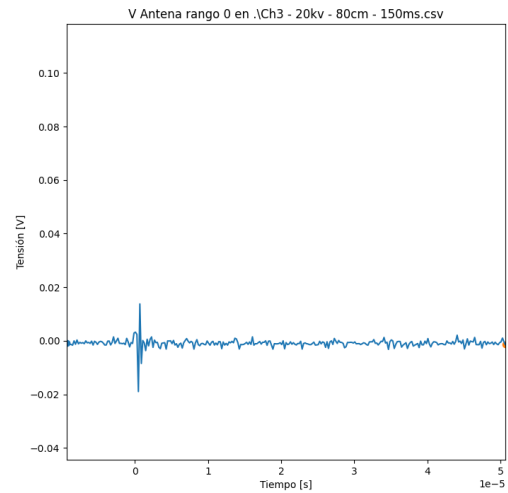
Figura 6.29: Formas de onda Impulso 20 kV a 80 cm con diferentes resoluciones

Como se puede observar en la Figura 6.29 se tienen distintas formas de onda al utilizar distintas resoluciones de ventana esto debido a que el osciloscopio al momento de cambiar la ventana de tiempo, mantiene constante la cantidad de puntos variando la frecuencia de muestreo y por ende afectando directamente a la visualización del impulso generado.

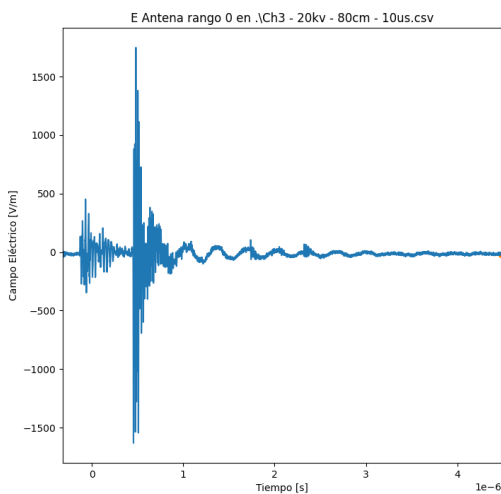
A continuación se presentan cuatro gráficas de la señal obtenida de la antena receptora DEEPACE R102. Las primeras dos corresponden a la señal de tensión obtenida directamente de la antena mientras que las últimas dos corresponden a la señal de campo eléctrico indirecto obtenida multiplicando el factor de antena de la antena según el fabricante por la señal de tensión obtenida. Las demás gráficas se presentan en el Anexo Sección A.2.6.



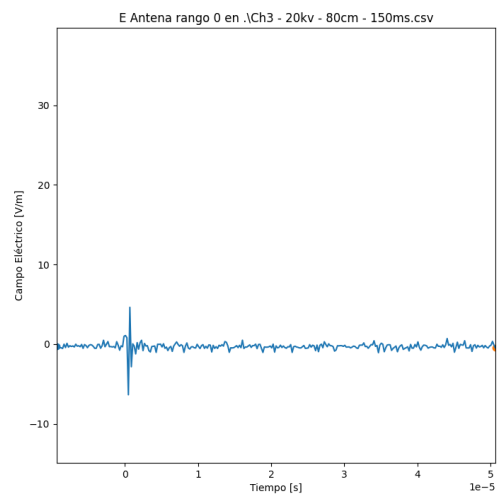
(a) Señal de tensión a 20 kV, 80 cm con resolución de 10 us.



(b) Señal de tensión a 20 kV, 80 cm con resolución de 150 ms.



(c) Señal de campo eléctrico a 20 kV, 80 cm con resolución de 10 us.



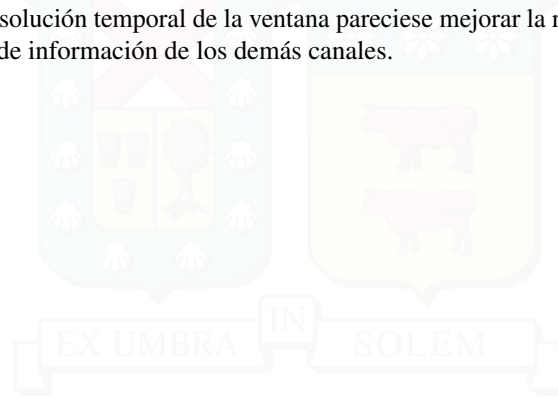
(d) Señal de campo eléctrico a 20 kV, 80 cm con resolución de 150 ms.

Figura 6.30: Comparación de señales de tensión y campo eléctrico obtenidos por antena.

De la Figura 6.30 se logra observar que, tal como se mencionó anteriormente, al momento de obtener el valor del campo eléctrico percibido por la antena en exposición a PEM no se observa el valor esperado por el protocolo de medición resultando en un valor de campo eléctrico de aproximadamente 18 kV/m (10 veces el valor detectado de aproximadamente 1,8 kV/m debido al uso del atenuador de 20 dB) en vez de los 25 kV/m teorizados. Esto se debe a que la exposición generada no corresponde a un campo eléctrico en sí sino que más bien a una variación violenta del mismo y por ende los efectos observados corresponden a las componentes del campo eléctrico que varían de forma rápida con el tiempo.

Se evidencia claramente que la gran diferencia entre ambos pares de figuras radica en su magnitud. Esto debido a que, para obtener la señal de campo eléctrico, se requiere utilizar la ecuación (3.43). También se presenta un problema: No se logra visualizar el pulso electromagnético en toda su frecuencia lo cual se presenta como inconsistencias en la forma de onda observada. Este problema tiene distintos orígenes:

- La antena no presenta un ancho de banda suficiente como para poder medir la frecuencia de los pulsos electromagnéticos.
- La frecuencia de muestreo del instrumento de medida no resulta suficiente para obtener todos los datos de la antena.
- El circuito de medición presenta interferencias en la medición de la señal.
- A pesar de que variar la resolución temporal de la ventana pareciese mejorar la resolución de la muestra no resulta ser lo ideal ya que se pierde información de los demás canales.



7 | Conclusión

La finalidad de este documento es presentar el comportamiento de los marcapasos implantables frente a interferencias electromagnéticas externas, en el marco de un estudio de compatibilidad electromagnética. En la actualidad, estos dispositivos ya incorporan medidas para mitigar los efectos de las interferencias, como carcassas con apantallamiento y filtros electrónicos que previenen problemas en el funcionamiento del dispositivo. Se revisaron varios estudios mas se observó que, no solo recomiendan continuar con la investigación de este tema, sino que no abordan el problema de una mirada eléctrica, algo que se buscó realizar con esta investigación.

Uno de los principales fenómenos que se observaron fue el acoplamiento de los campo externos en la banda nula de la señal del marcapasos. Este fenómeno era de esperarse debido a la teoría de inducción electromagnética estudiada, dejando en claro que la interferencia externa sí logra inducir tensiones de alta frecuencia y baja intensidad en la señal transmitida al objeto de excitación (en un caso real, un corazón). Este fenómeno de inducción queda expuesto en las gráficas de espectrograma de las señales de los pulsos generados por el marcapasos. Aun así se logra notar que la forma de onda de dichos pulsos no se ve afectada siendo la zona más alterada la banda nula de la señal.

Al momento de analizar las señales del marcapasos al exponerlo a pulsos electromagnéticos, la señal inducida corresponde al pulso generado por el circuito impulso, el cual aparece en la señal con magnitud y frecuencias distintas a las de origen. Esta diferencia en magnitud se debe al mismo efecto de inducción mientras que la diferencia en frecuencia depende de muchas variables, desde el fenómeno de inducción hasta las protecciones o sistemas detectores de interferencias inherentes del dispositivo, teniendo un papel importante la frecuencia de muestreo del equipo de medición.

Al modificar la distancia y los niveles de tensión del circuito generador de campo, se generan distintos niveles de exposición e interferencia electromagnética en el marcapasos. Sin embargo, el impacto más significativo se observa al comparar diferentes ventanas de análisis. En una ventana que captura únicamente el pulso del marcapasos, se detectan anchos de banda con frecuencias altas y de corta duración, sin una tendencia clara ante los cambios de exposición, lo que sugiere que el acoplamiento por radiación está presente en esta parte de la señal. Este acoplamiento por radiación induce tensiones de alta frecuencia pero baja magnitud, que generan un comportamiento más aleatorio en los datos. En contraste, cuando la ventana incluye mayormente la banda nula de la señal, los datos muestran una agrupación coherente y una respuesta más definida. En este caso, el acoplamiento por inducción electromagnética predomina, manifestándose en forma de señales de alta magnitud pero baja duración. A medida que aumenta la tensión y se reduce la distancia al origen de la interferencia, la duración de las frecuencias inducidas se incrementa mientras su magnitud disminuye. Esto evidencia que las interferencias electromagnéticas tienen diferentes impactos según el tipo de acoplamiento predominante y la parte de la señal analizada.

Este análisis, junto con el análisis estadístico de la forma de onda de los pulsos de marcapasos en ensayo de norma BSI, deja en claro que la exposición a interferencia no provoca deformaciones en la señal del marcapasos pero si se presenta un acople del pulso electromagnético en la señal. Aun así, este estudio no logra captar el fenómeno de forma completa debido a varios factores. En primer lugar, la cantidad de muestras ensayadas es insuficiente para obtener conclusiones definitivas sobre una influencia persistente. La limitada muestra podría no ser representativa de un conjunto más amplio, ya que factores fuera del alcance de este estudio pueden haber influido en los resultados obtenidos. Luego, se presenta un problema de acoplamiento en el cable que transporta la señal del marcapasos al equipo de medida, tanto por inducción electromagnética como por radiación. Debido a que se consideró el sistema marcapasos - cable como un solo dispositivo, existe una alta probabilidad que el cable funcione como una antena receptora de las señales externas y, por ende, que la interferencia ocurra principalmente en el cable y no en el marcapasos en sí. Por último, este estudio solo

se centra en las señales de salida del marcapasos y no considera ninguna variable interna ya sea eléctrica o magnética, junto con que no se ahondó en si los fenómenos observados logran afectar la salud del paciente. Para ello, se requiere no solo profundizar en cómo afectan las diferencias de tensión en el corazón, sino que también se requiere realizar un estudio donde el marcapasos se encuentre rodeado de una sustancia salina que simule las condiciones internas del cuerpo humano (esto ya que esas condiciones afectan cómo la exposición se transmite a través del medio y cómo llega a incidir en el dispositivo).

Para concluir, y a modo de resumen, se ha identificado que las señales de pulso del marcapasos sí presentan interferencias electromagnéticas en forma de tensiones inducidas en distintos rangos de frecuencia, aunque estas no logran modificar significativamente la forma de onda programada inicialmente. No obstante, es fundamental continuar investigando este tema. Se necesita un mayor número de muestras para obtener datos representativos y resolver problemas como la inducción en los cables de medición. Además, es crucial considerar variables internas eléctricas y magnéticas y realizar estudios en condiciones que simulen el entorno interno del cuerpo humano, como el uso de sustancias salinas.

Asimismo, resulta importante destacar la dificultad inherente al trabajo con pulsos electromagnéticos, antenas y equipos de medición. La precisión en la generación y detección de pulsos electromagnéticos es esencial, ya que cualquier error puede afectar los resultados del estudio. Las antenas y equipos de medición deben ser cuidadosamente calibrados y posicionados para evitar interferencias adicionales que puedan distorsionar los datos. Estas complejidades técnicas añaden otra capa de desafío a la investigación, pero son cruciales para obtener una comprensión completa de los efectos de la interferencia electromagnética en el funcionamiento de los marcapasos y su impacto en la salud del paciente.

Solo mediante una investigación más exhaustiva, que aborde estas dificultades técnicas y metodológicas, podremos comprender completamente estos efectos y garantizar la seguridad y eficacia de los marcapasos en presencia de interferencias electromagnéticas.

Bibliografía

- [1] C. Hurtado Nazal, A. Araneda V., M. Zamora H., A. Parra P. y A. González A., «Cuidado perioperatorio de pacientes portadores de dispositivos electrónicos cardíacos implantables,» *Revista chilena de cirugía*, vol. 69, n.º 1, págs. 77-83, 2017. doi: [10.1016/j.rchic.2016.06.001](https://doi.org/10.1016/j.rchic.2016.06.001). dirección: <https://doi.org/10.1016/j.rchic.2016.06.001>.
- [2] Mayo Clinic, *Electrocardiogram (ECG or EKG)*, <https://www.mayoclinic.org/es/tests-procedures/ekg/about/pac-20384983>, Accessed: 2024-06-09, mayo de 2022.
- [3] K. W. Klein, P. R. Barnes y H. W. Zaininger, «Electromagnetic pulse and the electric power network,» *IEEE power engineering review*, vol. PER-5, n.º 6, págs. 66-67, 1985. doi: [10.1109/mper.1985.5526665](https://doi.org/10.1109/mper.1985.5526665).
- [4] F. Hamamah, W. W. Ahmad, C. Gomes, M. M. Isa y M. J. Homam, «Concerns on the Risk of Malaysian Civil and Defense Systems Due to Intentional Electromagnetic Interference,» en *2019 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE)*, 2019.
- [5] R. Coma Samartín, M. J. Sancho-Tello de Carranza, F. Ruiz Mateas, J. Leal del Ojo González, M. L. Fidalgo Andrés y Sección de Estimulación Cardíaca, «Registro Español de Marcapasos. VIII Informe Oficial de la Sección de Estimulación Cardíaca de la Sociedad Española de Cardiología (2010),» *Revista española de cardiología*, vol. 64, n.º 12, págs. 1154-1167, 2011. doi: [10.1016/j.recesp.2011.08.011](https://doi.org/10.1016/j.recesp.2011.08.011). dirección: <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2011.08.011>.
- [6] M. Pombo Jiménez, J. Chimeno García, V. Bertomeu González y Ó. Cano Pérez, «Spanish pacemaker registry. 19th official report of the Heart Rhythm Association of the Spanish Society of Cardiology (2021),» *Revista Espanola de Cardiologia (English Ed.)*, vol. 75, n.º 11, págs. 946-956, 2022. doi: [10.1016/j.rec.2022.09.009](https://doi.org/10.1016/j.rec.2022.09.009). dirección: <https://doi.org/10.1016/j.rec.2022.09.009>.
- [7] V. J. Ellis, «The Effects of Electromagnetic Pulse (EMP) on Cardiac Pacemakers,» Defense Technical Information Center, inf. téc. ADA242990, nov. de 1991, Accessed: 2024-06-15. dirección: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA242990>.
- [8] J. B. Tur, *Interferencias eléctricas y electromagnéticas en los marcapasos y desfibriladores automáticos implantables*, <https://www.studylib.es/doc/5681114/interferencias-electricas-y-electromagneticas-en-los-marcapasos-y>, Accessed: 2024-06-09.
- [9] British Standards Institution, *BS EN ISO 14708-2:2022 Implants for Surgery. Active Implantable Medical Devices. Cardiac Pacemakers*, British Standards Institution, London, ISBN 9780580946844. Retrieved from https://www.techstreet.com/standards/bs-en-iso-14708-2-2022?product_id=2260557, 2022.
- [10] D. J. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics*, 4th. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [11] S. Engels et al., «Anthropogenic electromagnetic noise disrupts magnetic compass orientation in a migratory bird,» *Nature*, vol. 509, n.º 7500, págs. 353-356, 2014. doi: [10.1038/nature13290](https://doi.org/10.1038/nature13290). dirección: <https://www.nature.com/articles/nature13290>.
- [12] European Union, *Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields)*, 2013. dirección: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/35/oj>.
- [13] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*, 1998. dirección: <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPemfgdl.pdf>.

- [14] España, *Real Decreto 1066/2001, de 28 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas*, 2001. dirección: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2001-18256>.
- [15] A. V. Oppenheim y A. S. Willsky, *Signals and Systems*, 2nd. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997.
- [16] C. Christopoulos, *Principles and techniques of electromagnetic compatibility*, en, 3.^a ed. Londres, Inglaterra: CRC Press, 2022.
- [17] H. W. Ott, *Electromagnetic Compatibility Engineering*. John Wiley & Sons, 2009.
- [18] R. Coma Samartín, M. J. Sancho-Tello de Carranza, F. Ruiz Mateas, J. Leal del Ojo González, M. L. Fidalgo Andrés y Sección de Estimulación Cardíaca, «Registro Español de Marcapasos. VIII Informe Oficial de la Sección de Estimulación Cardíaca de la Sociedad Española de Cardiología (2010),» es, *Rev. Esp. Cardiol.*, vol. 64, n.º 12, págs. 1154-1167, 2011.
- [19] J. B. Tur, «Interferencias eléctricas y electromagnéticas en los marcapasos y desfibriladores automáticos implantables,» *Revista de Ingeniería Biomédica*, vol. 15, n.º 2, págs. 123-135, 2023. dirección: <https://www.ejemplo.com/interferencias-marcapasos>.
- [20] M. Wiktor, T. Bandurski y M. Gawrysiak, «Study of interaction of pacemaker electrode with high frequency RF fields,» en *2009 19th International Conference Radioelektronika*, IEEE, 2009.
- [21] Y. Zhao, W. Qi, N. Kang, B. Han, Y. Yuan y B. Peng, «A Cone and Ground Plane Device for Calibrating Electromagnetic Pulse Field Sensors and Probes,» en *2023 IEEE 7th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (ISEMC)*, 2023, págs. 1-6. doi: [10.1109/ISEMC58300.2023.10370287](https://doi.org/10.1109/ISEMC58300.2023.10370287).
- [22] J. Chen, X. Cui, X. Liu y P. Li, «Ultra-wideband standard antenna for transient field measurement of short electromagnetic pulse,» en *2013 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2013, págs. 197-202.
- [23] TERCO, *HV9000 High Voltage Modular Training Set*, es, dic. de 2018.
- [24] DEEPACE, *DEEPACE Wideband Directional Antenna R102 1.5GHz-9GHz Manual*, <https://www.deepace.com/products/wideband-directional-antenna-r102>, 2024.
- [25] Keysight Technologies, *InfiniiVision 3000 X-Series Oscilloscopes*, es, mayo de 2022.
- [26] J. A. Ardila-Rey, M. P. Cerda-Luna, R. A. Rozas-Valderrama, B. A. de Castro, A. L. Andreoli y F. Muhammad-Sukki, «Separation techniques of partial discharges and electrical noise sources: A review of recent progress,» *IEEE Access*, vol. 8, págs. 199 449-199 461, 2020.

A | ANEXO

A.1. Gráficas Completas Campo Eléctrico

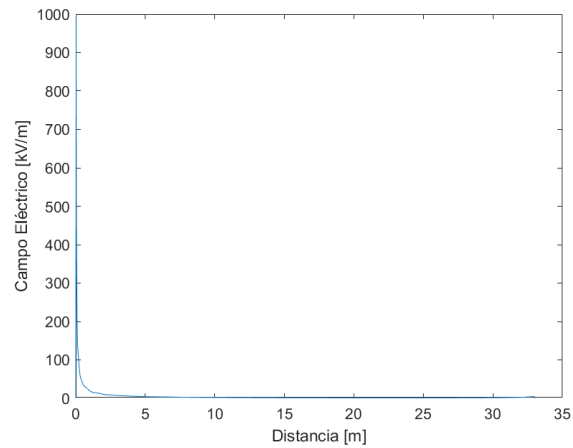


Figura A.1: Gráfica de campo eléctrico con respecto a la distancia a 20 kV de tensión de borde en esfera interna.

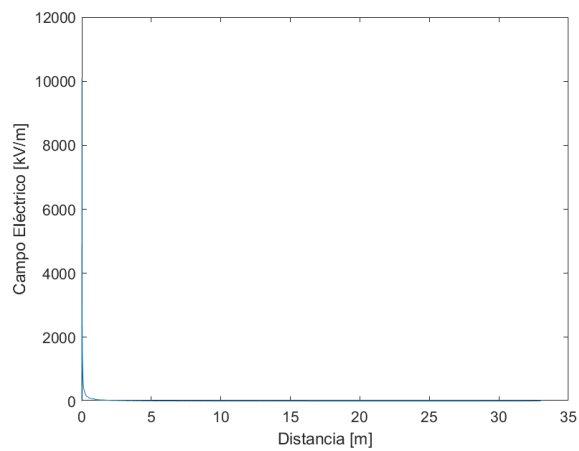


Figura A.2: Gráfica de campo eléctrico con respecto a la distancia a 60 kV de tensión de borde en esfera interna.

A.2. Resultados Experimentales

A.2.1. Tablas Estadísticas Parametrización Forma de Onda y Variables exigidas por Norma

Tabla A.1: Promedio y desviación estándar para parametrización de forma de onda de datos obtenidos por Norma de Marcapasos para exposición AC.

Promedio AC								
R	Amplitud subida [V]	Tiempo de Subida [s]	Tiempo Meseta [s]	Amplitud Bajada [V]	Tiempo Bajada [s]	Pendiente [V/s]	Periodo [s]	Frecuencia [Hz]
Sin R	5,2835 e-01	4,0000 e-05	3,4500 e-04	1,3389 e-02	8,0000 e-05	-2,6099 e+02	1,1636 e+00	9,1673 e-01
R 2000	3,7351 e+00	7,8750 e-05	3,2198 e-04	3,5819 e+00	1,0147 e-04	-3,9402 e+02	1,1666 e+00	9,1672 e-01
R 500	3,2636 e+00	4,0000 e-05	3,4500 e-04	2,8895 e+00	8,0000 e-05	-1,0759 e+03	1,1666 e+00	9,1672 e-01
R 240	2,7607 e+00	4,0000 e-05	3,4500 e-04	2,2445 e+00	8,0000 e-05	-1,4888 e+03	1,1658 e+00	9,1672 e-01
Total	2,5719 e+00	4,9687 e-05	3,3924 e-04	2,1823 e+00	8,5367 e-05	-8,0492 e+02	1,1656 e+00	9,1672 e-01
Desviación Estándar AC								
R	Amplitud subida [V]	Tiempo de Subida [s]	Tiempo Meseta [s]	Amplitud Bajada [V]	Tiempo Bajada [s]	Pendiente [V/s]	Periodo [s]	Frecuencia [Hz]
Sin R	6,5638 e-01	1,0910 e-15	1,2560 e-15	1,3910 e-02	1,1739 e-15	3,5899 e+01	3,7297 e-01	1,8635 e-01
R 2000	1,2852 e-02	1,9588 e-05	2,2542 e-05	1,9867 e-02	2,0857 e-05	3,8623 e+01	3,7461 e-01	1,8733 e-01
R 500	1,3130 e-02	1,0794 e-15	8,1851 e-16	1,3401 e-02	6,8882 e-16	3,3262 e+01	3,7461 e-01	1,8733 e-01
R 240	1,2753 e-02	1,0157 e-15	9,7643 e-16	1,5382 e-02	9,7692 e-16	3,8307 e+01	3,7273 e-01	1,8635 e-01
Total	8,6698 e-01	2,1056 e-05	2,5076 e-05	9,5381 e-01	1,5913 e-05	4,8010 e+02	3,7728 e-01	1,9280 e-01

Tabla A.2: Promedio y desviación estándar para datos exigidos por norma de marcapasos para exposición AC.

Promedio AC			
R	Duraciones [s]	Áreas [V · s]	Amplitudes [V]
Sin R	0,1249	2,6452	2,1179
R 2000	0,8058	1,5216	1,8882
R 500	0,7947	1,2631	1,5894
R 240	0,7928	1,0285	1,2972
Total	0,8336	1,3796	1,63256
Desviación Estándar AC			
R	Duraciones [s]	Áreas [V · s]	Amplitudes [V]
Sin R	0,0000 e+00	1,9502 e-05	1,5614 e-08
R 2000	3,6667 e-01	2,8443 e-06	3,5777 e-09
R 500	4,5126 e-01	4,0355 e-06	5,0755 e-09
R 240	3,9276 e-01	2,7550 e-06	3,5597 e-09
Total	1,3058 e+02	4,2615 e-04	2,8666 e-07

Tabla A.3: Promedio y desviación estándar para parametrización de forma de onda de datos obtenidos por norma de marcapasos para exposición DC.

Promedio DC								
R	Amplitud subida [V]	Tiempo de Subida [s]	Tiempo Meseta [s]	Amplitud Bajada [V]	Tiempo Bajada [s]	Pendiente [V/s]	Periodo [s]	Frecuencia [Hz]
R 2000	3,7345 e+00	9,0000 e-05	3,1370 e-04	3,5883 e+00	1,0799 e-04	-3,9166 e+02	1,1506 e+00	9,1672 e-01
R 500	3,2632 e+00	4,0000 e-05	3,4500 e-04	2,8906 e+00	8,0000 e-05	-1,0730 e+03	1,1666 e+00	9,1672 e-01
R 240	2,7618 e+00	4,0000 e-05	3,4500 e-04	2,2449 e+00	8,0000 e-05	-1,4910 e+03	1,1666 e+00	9,1672 e-01
Total	3,2554 e+00	5,6820 e-05	3,3447 e-04	2,9111 e+00	8,9415 e-05	-9,8250 e+02	1,1612 e+00	9,1672 e-01
Desviación Estándar DC								
R	Amplitud subida [V]	Tiempo de Subida [s]	Tiempo Meseta [s]	Amplitud Bajada [V]	Tiempo Bajada [s]	Pendiente [V/s]	Periodo [s]	Frecuencia [Hz]
R 2000	1,2158 e-02	5,0232 e-16	1,9113 e-05	1,3166 e-02	1,6464 e-05	3,5016 e+01	3,9688 e-01	1,8635 e-01
R 500	1,1428 e-02	1,0847 e-15	7,7847 e-16	1,5524 e-02	7,6256 e-16	3,9734 e+01	3,7527 e-01	1,8766 e-01
R 240	1,0329 e-02	1,0427 e-15	5,6849 e-16	1,1921 e-02	5,5463 e-16	3,4956 e+01	3,7527 e-01	1,8766 e-01
Total	4,5476 e-01	2,3935 e-05	2,9208 e-05	5,8373 e-01	1,7363 e-05	4,6012 e+02	3,8815 e-01	1,9601 e-01

Tabla A.4: Promedio y desviación estándar para datos exigidos por norma de marcapasos para exposición DC.

Promedio DC			
R	Duraciones [s]	Áreas [$V \cdot s$]	Amplitudes [V]
R 2000	0,8058	1,5212	1,8876
R 500	0,7946	1,2624	1,5886
R 240	0,7928	1,0272	1,2955
Total	0,7978	1,2714	1,5919
Desviación Estándar DC			
R	Duraciones [s]	Áreas [$V \cdot s$]	Amplitudes [V]
R 2000	3,0893 e-01	2,5827 e-06	3,2167 e-09
R 500	4,6962 e-01	2,0403 e-06	2,7304 e-09
R 240	3,4222 e-01	1,7428 e-06	2,1551 e-09
Total	5,3270 e+01	2,1892 e-04	2,6405 e-07

Tabla A.5: Promedio y desviación estándar para parametrización de forma de onda de datos obtenidos por norma de marcapasos para exposición Impulso.

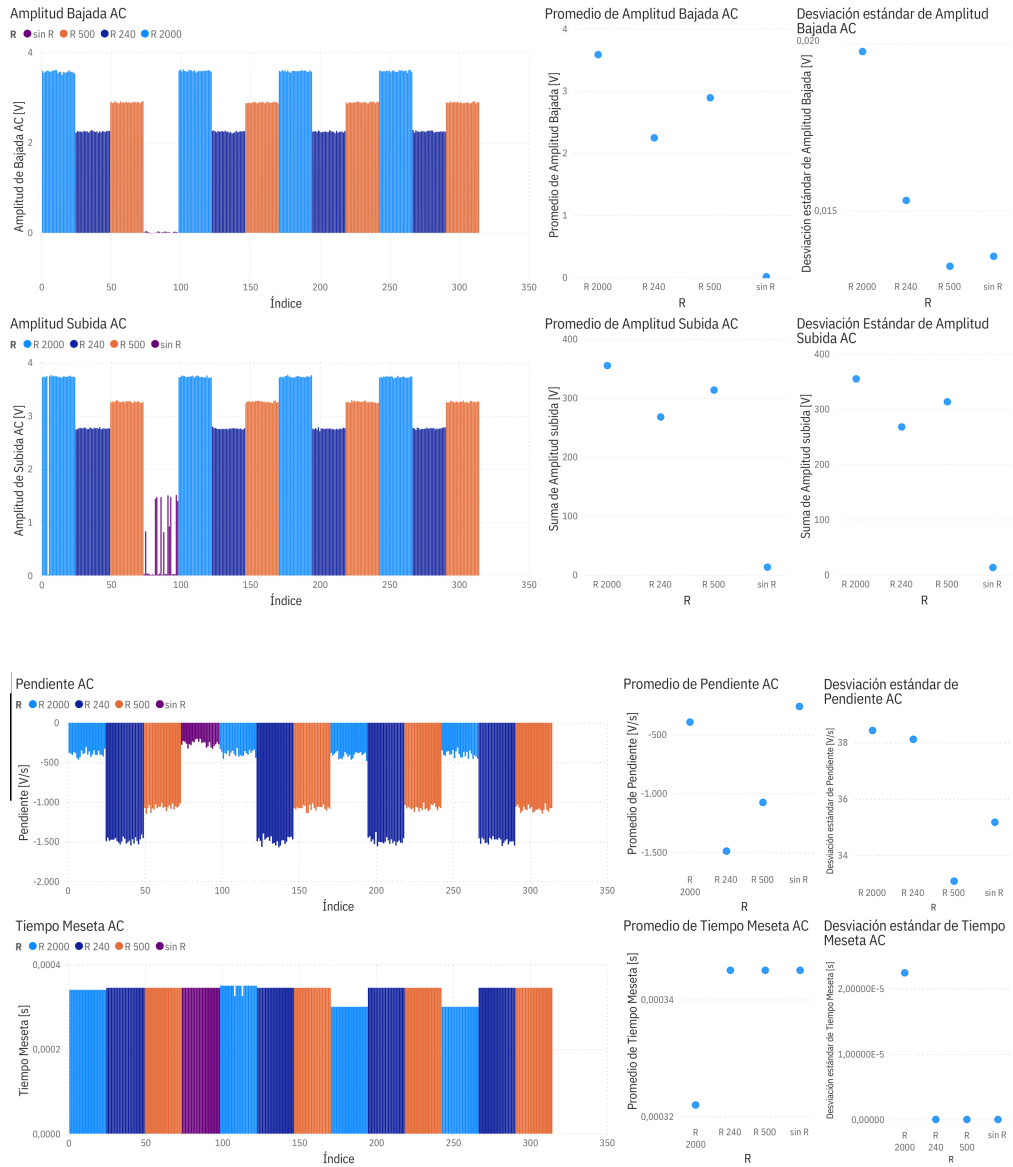
Promedio Impulso								
R	Amplitud subida [V]	Tiempo de Subida [s]	Tiempo Meseta [s]	Amplitud Bajada [V]	Tiempo Bajada [s]	Pendiente [V/s]	Periodo [s]	Frecuencia [Hz]
R 2000	3,7215 e+00	8,5000 e-05	3,3146 e-04	3,5718 e+00	1,2750 e-04	-3,8905 e+02	9,9994 e-01	1,0001 e+00
R 500	3,2564 e+00	4,0000 e-05	3,4500 e-04	2,8894 e+00	8,0000 e-05	-1,0469 e+03	9,9994 e-01	1,0001 e+00
R 240	2,7613 e+00	4,0000 e-05	3,4500 e-04	2,2392 e+00	8,0000 e-05	-1,5060 e+03	9,9994 e-01	1,0001 e+00
Total	3,2464 e+00	5,5000 e-05	3,4049 e-04	2,9001 e+00	9,5833 e-05	-9,8065 e+02	9,9994 e-01	1,0001 e+00
Desviación Estándar Impulso								
R	Amplitud subida [V]	Tiempo de Subida [s]	Tiempo Meseta [s]	Amplitud Bajada [V]	Tiempo Bajada [s]	Pendiente [V/s]	Periodo [s]	Frecuencia [Hz]
R 2000	1,1131 e-02	4,0860 e-05	1,0052 e-05	1,8369 e-02	4,8522 e-05	3,8162 e+01	3,0904 e-05	3,0908 e-05
R 500	7,7919 e-03	5,8017 e-17	3,3161 e-17	1,4958 e-02	8,3870 e-17	2,9856 e+01	6,0253 e-06	6,0260 e-06
R 240	8,2754 e-03	5,6718 e-17	8,1121 e-17	1,6111 e-02	8,3870 e-17	3,3157 e+01	3,7879 e-06	3,7883 e-06
Total	5,4604 e-01	3,2012 e-05	4,0757 e-05	6,4148 e-01	3,7139 e-05	4,7369 e+02	1,1703 e-01	1,1705 e-01

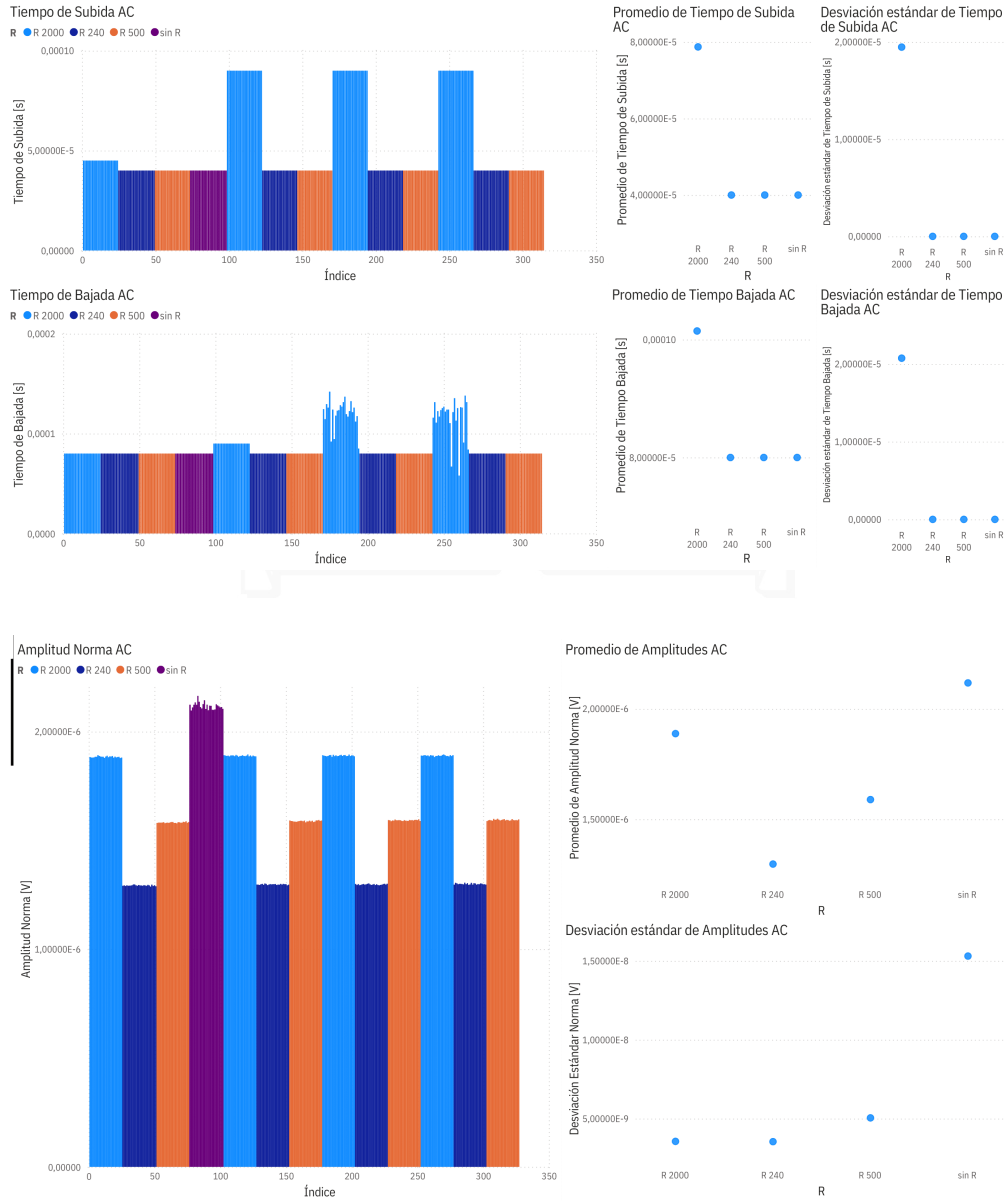
Tabla A.6: Promedio y desviación estándar para datos exigidos por norma de marcapasos para exposición Impulso.

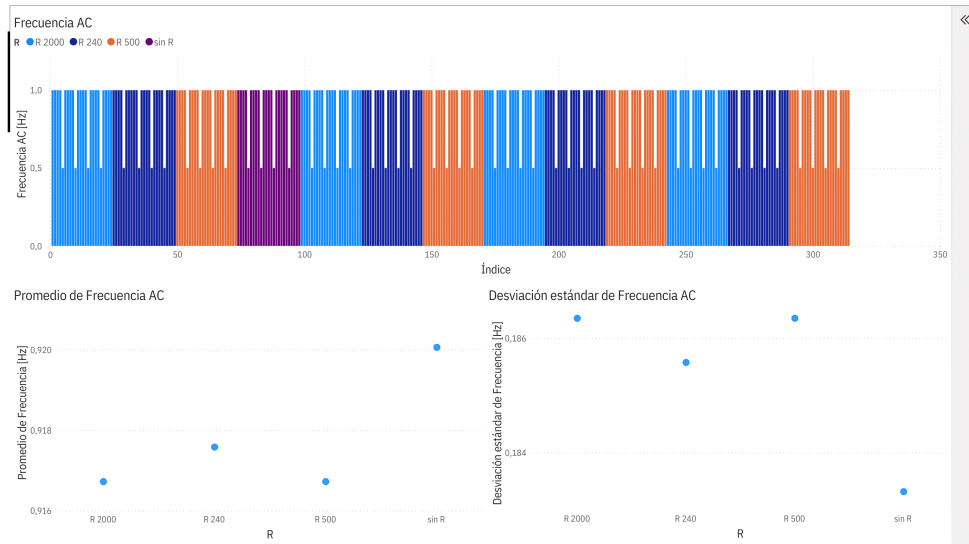
Promedio Impulso			
R	Duraciones [s]	Áreas [$V \cdot s$]	Amplitudes [V]
R 2000	0,8053	1,4792	1,8367
R 500	0,7945	1,2256	1,5426
R 240	0,7927	0,99165	1,2509
Total	0,7975	1,2322	1,5434
Desviación Estándar AC			
R	Duraciones [s]	Áreas [$V \cdot s$]	Amplitudes [V]
R 2000	4,9013 e-01	2,6348 e-06	3,3087 e-09
R 500	5,0855 e-01	4,8894 e-06	6,3348 e-09
R 240	4,4978 e-01	2,9776 e-06	3,8363 e-09
Total	8,3792 e+01	2,3734 e-04	2,8875 e-07

A.2.2. Gráficas Power BI

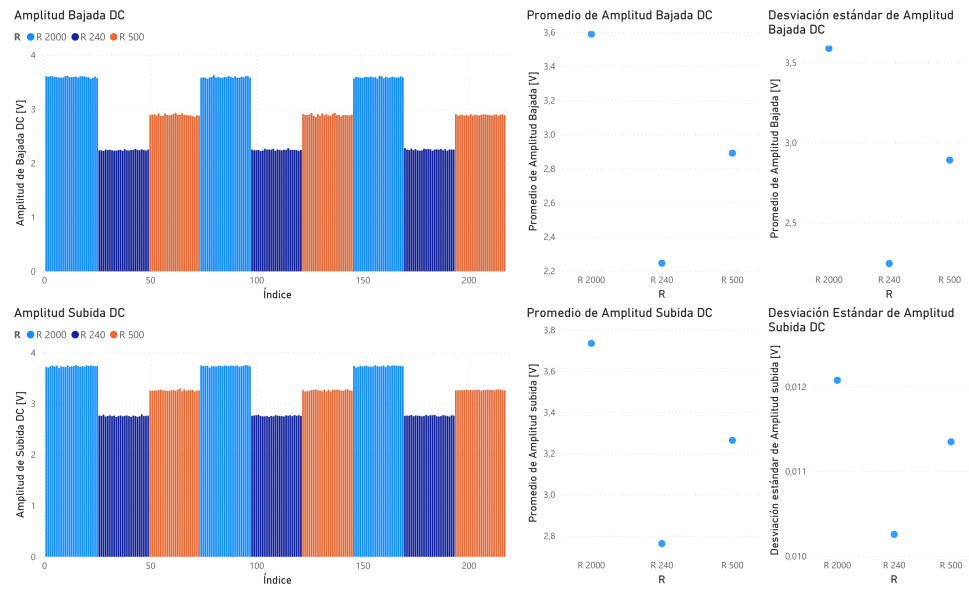
A.2.2.1. Exposición AC

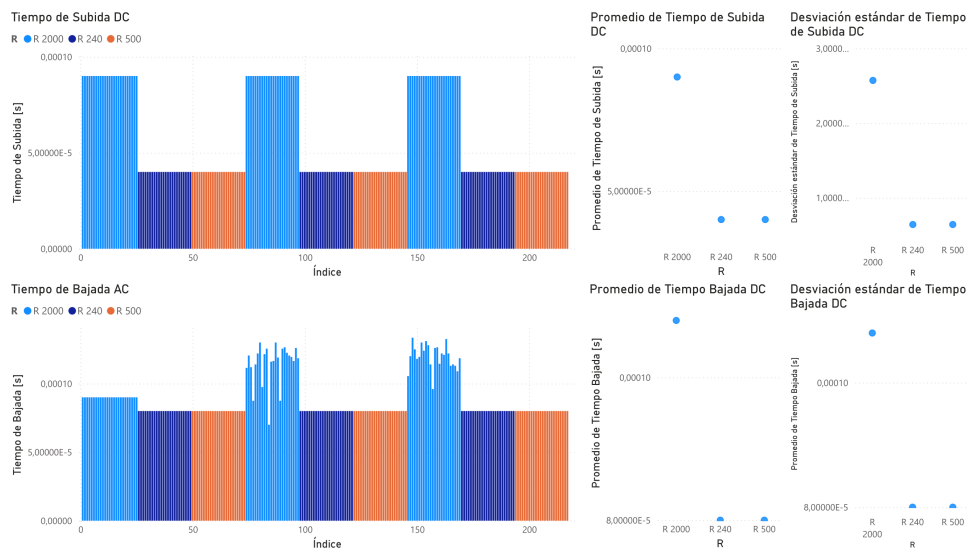
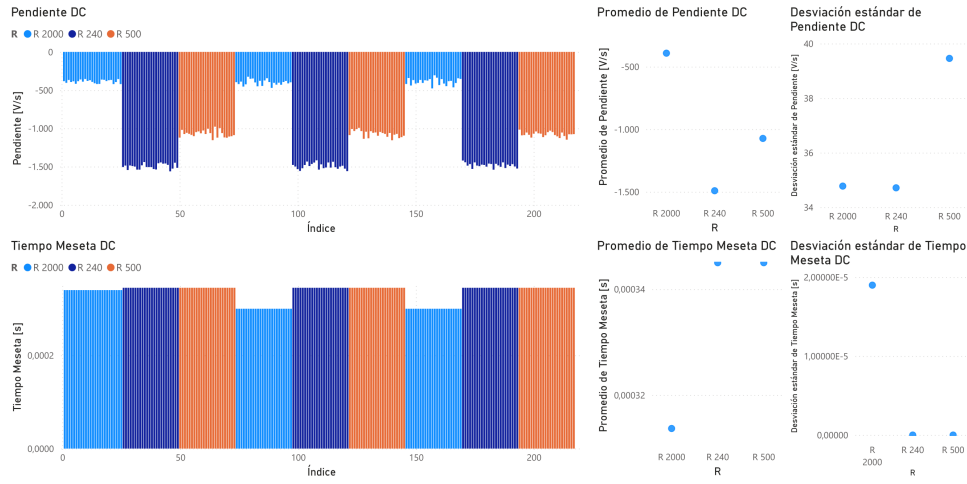


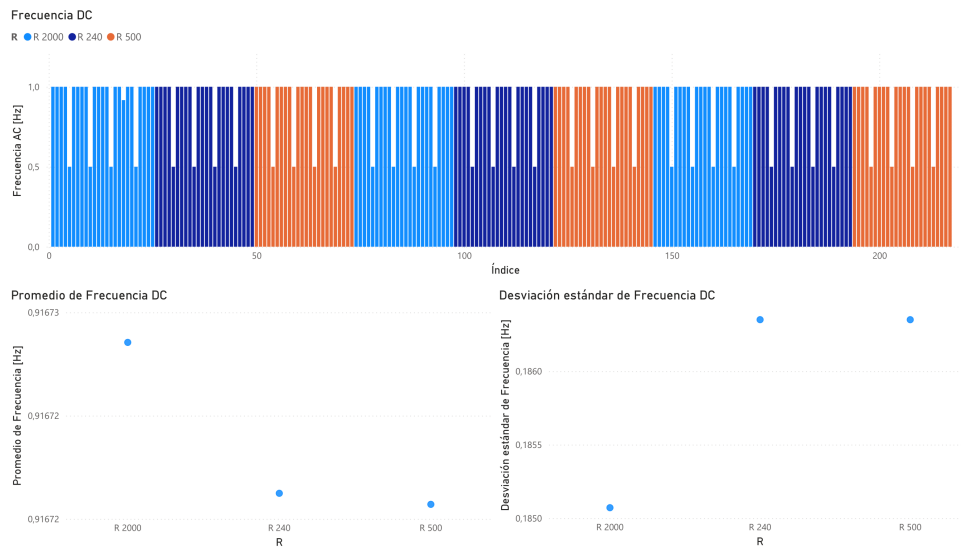
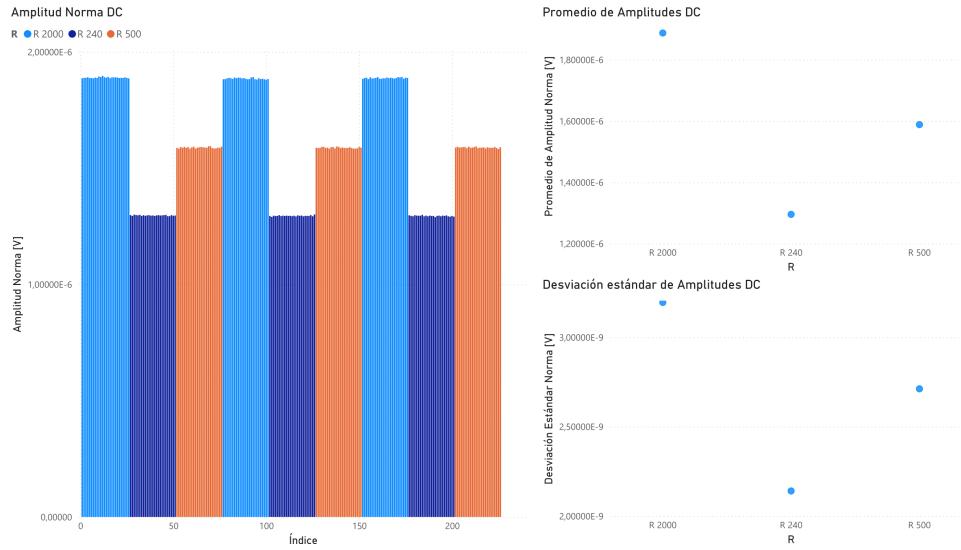




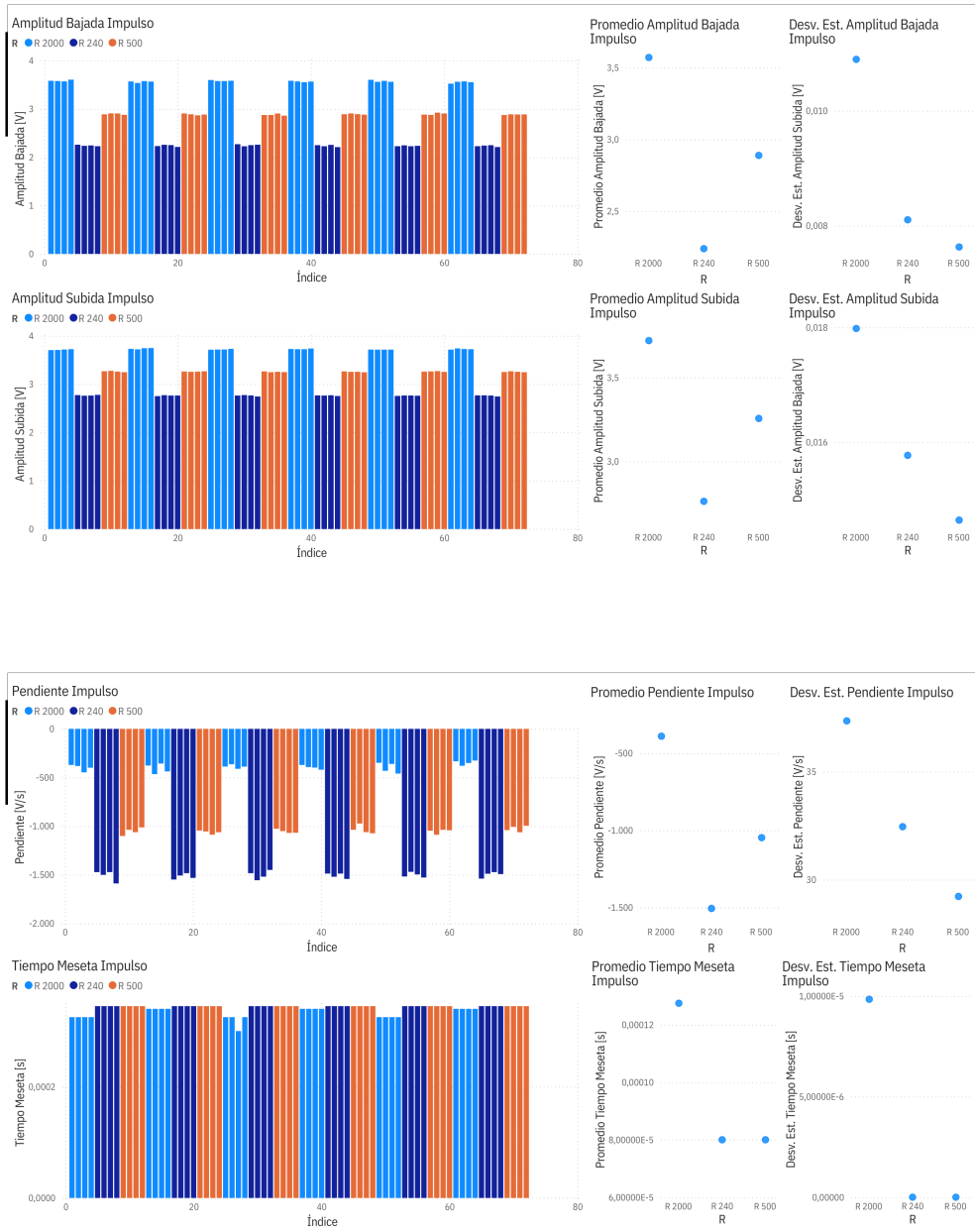
A.2.2.2. Exposición DC

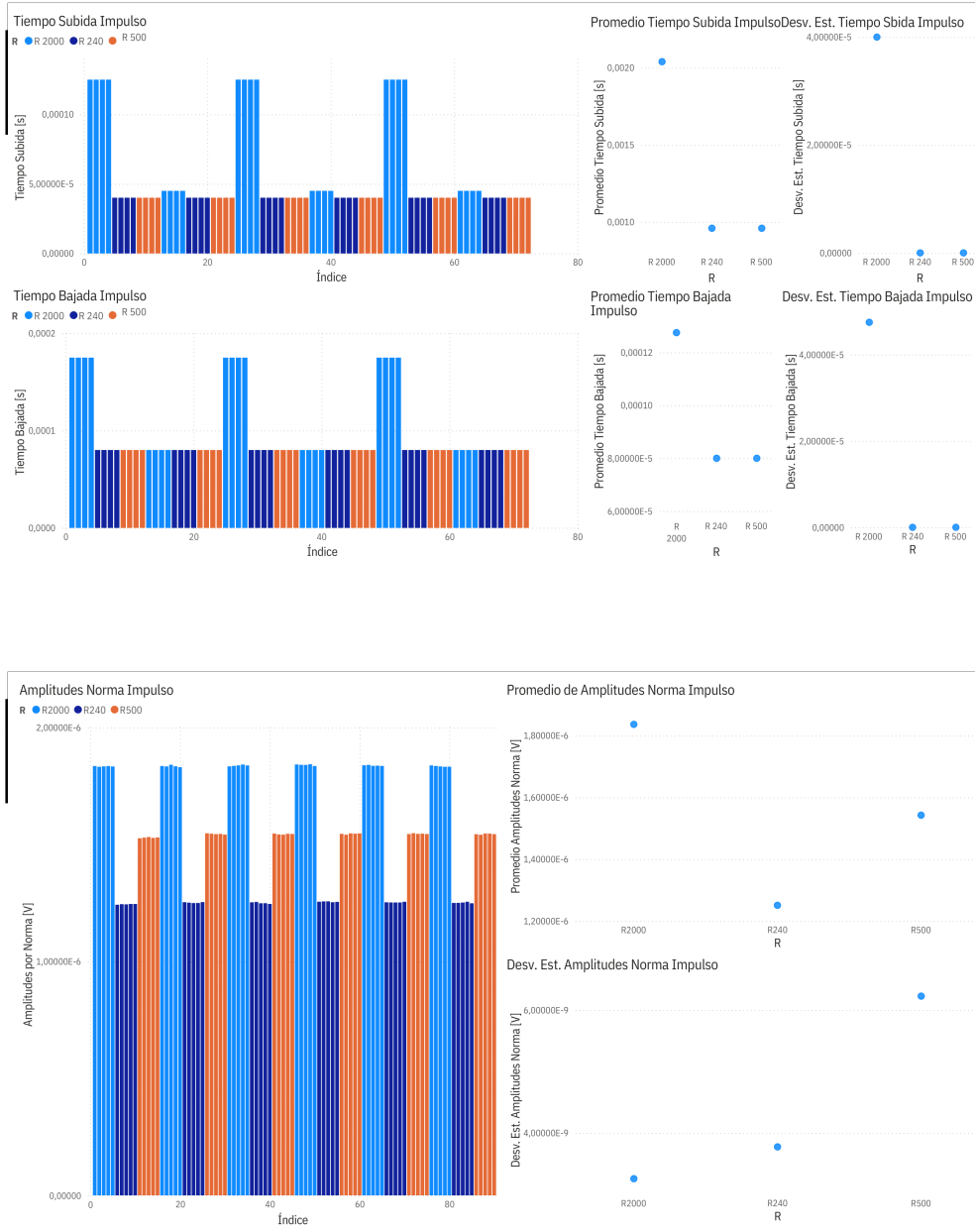


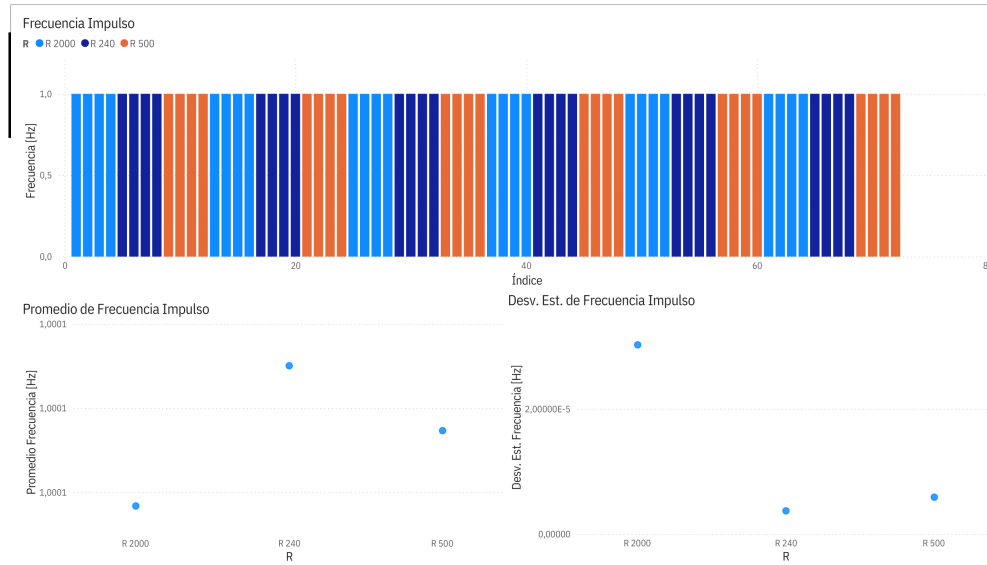




A.2.2.3. Exposición Impulso

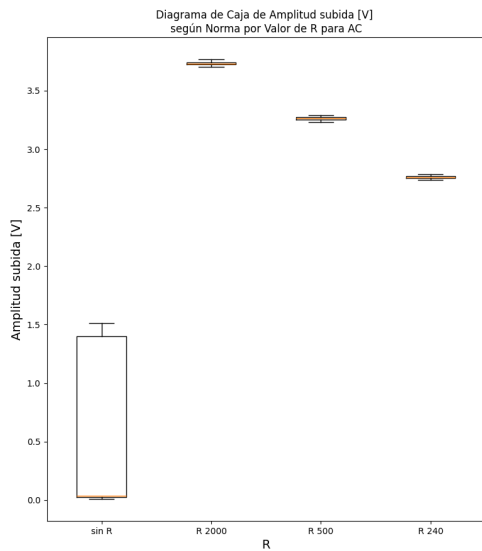




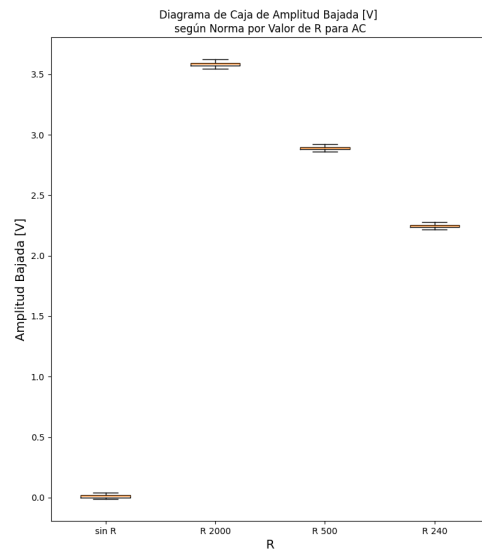


A.2.3. Diagramas de Caja

A.2.3.1. Exposición AC

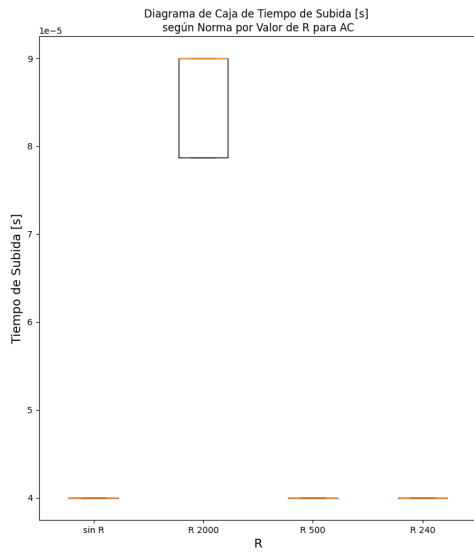


(a) Diagrama de caja amplitud subida AC.

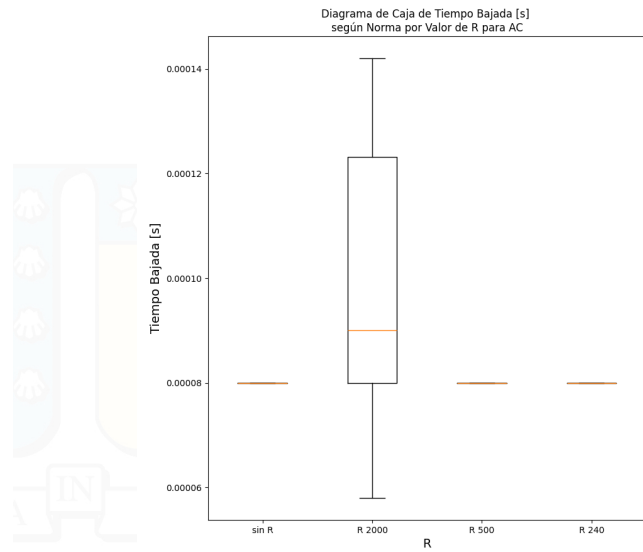


(b) Diagrama de caja amplitud de bajada AC.

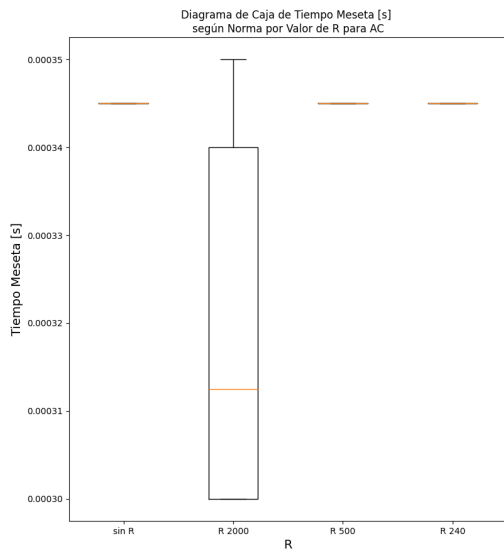
Figura A.3: Diagramas de caja de amplitud subida y bajada AC.



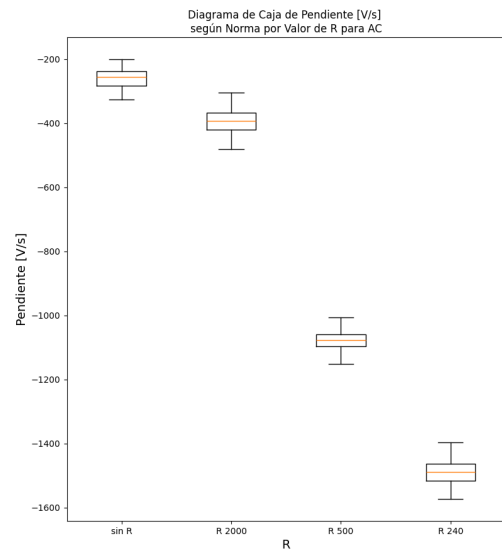
(a) Diagrama de caja tiempo de subida AC.



(b) Diagrama de caja tiempo de bajada AC.

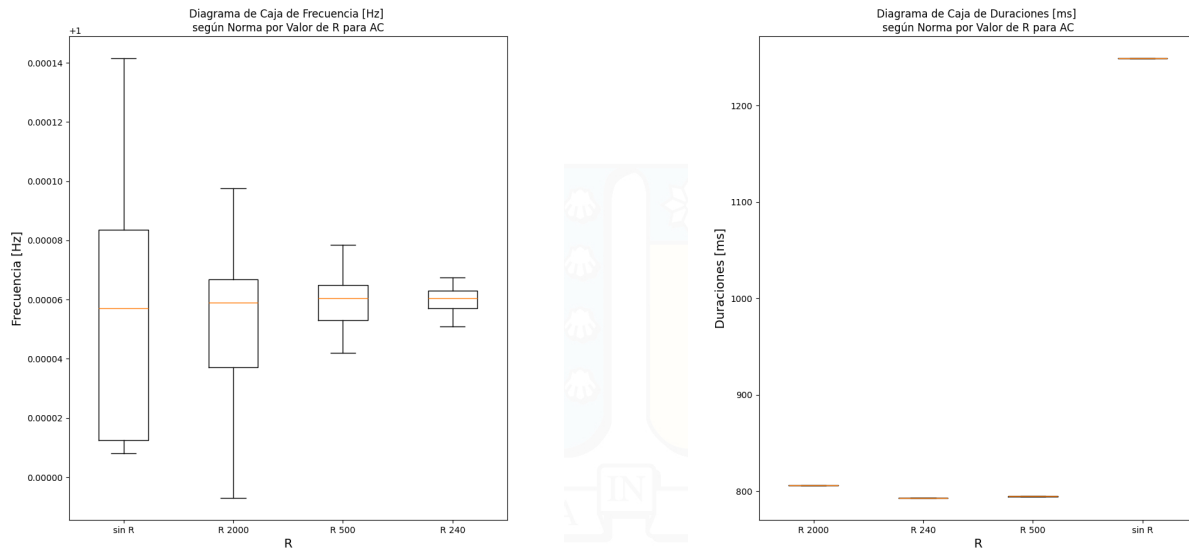
Figura A.4: Diagramas de caja de tiempo de subida y bajada AC.

(a) Diagrama de caja tiempo meseta AC.



(b) Diagrama de caja pendiente AC.

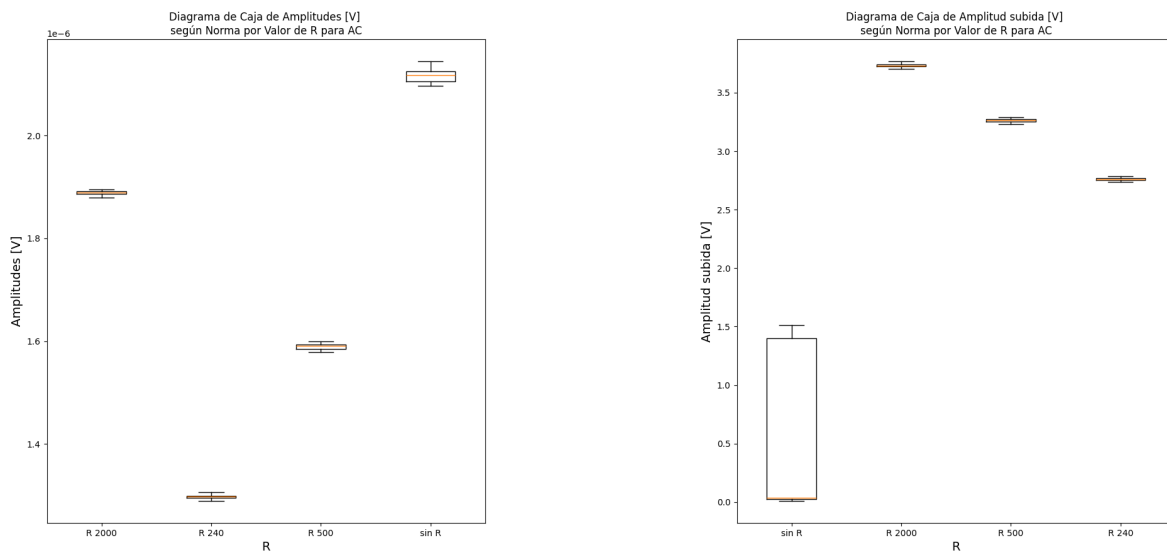
Figura A.5: Diagramas de caja de tiempo meseta y pendiente AC.



(a) Diagrama de caja frecuencia AC.

(b) Diagrama de caja duraciones AC.

Figura A.6: Diagramas de caja de frecuencia y duraciones AC.

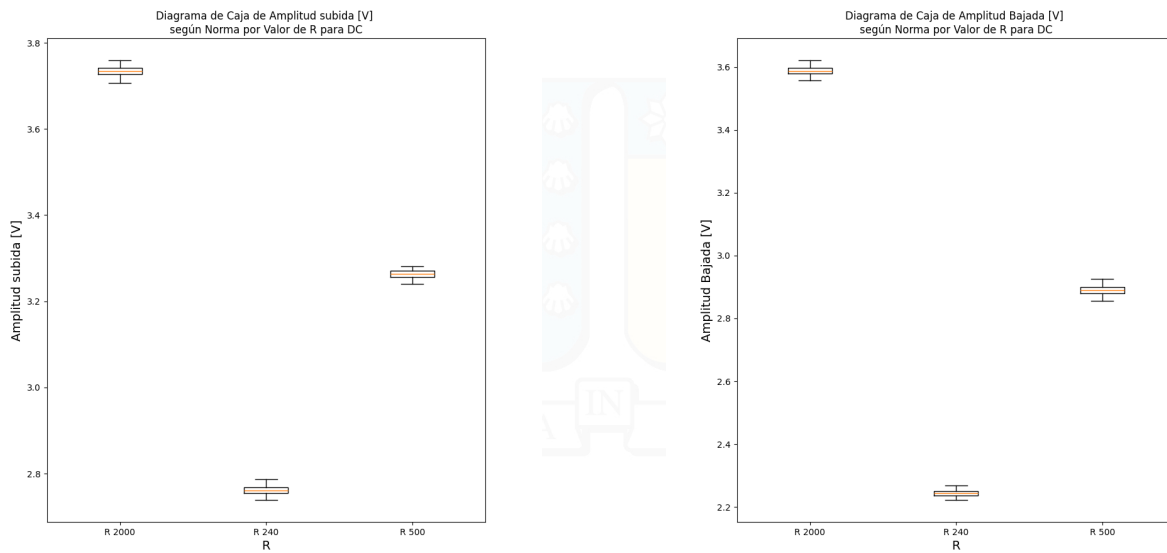


(a) Diagrama de caja amplitudes norma AC.

(b) Diagrama de caja amplitud subida AC.

Figura A.7: Diagramas de caja amplitudes norma y amplitud subida AC.

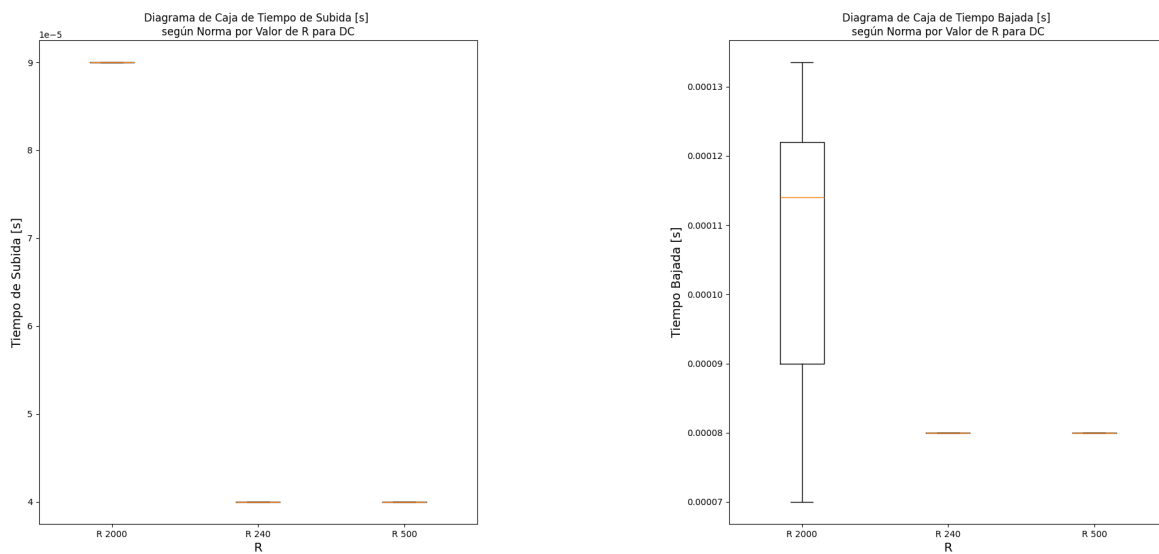
A.2.3.2. Exposición DC



(a) Diagrama de caja amplitud subida DC.

(b) Diagrama de caja amplitud de bajada DC.

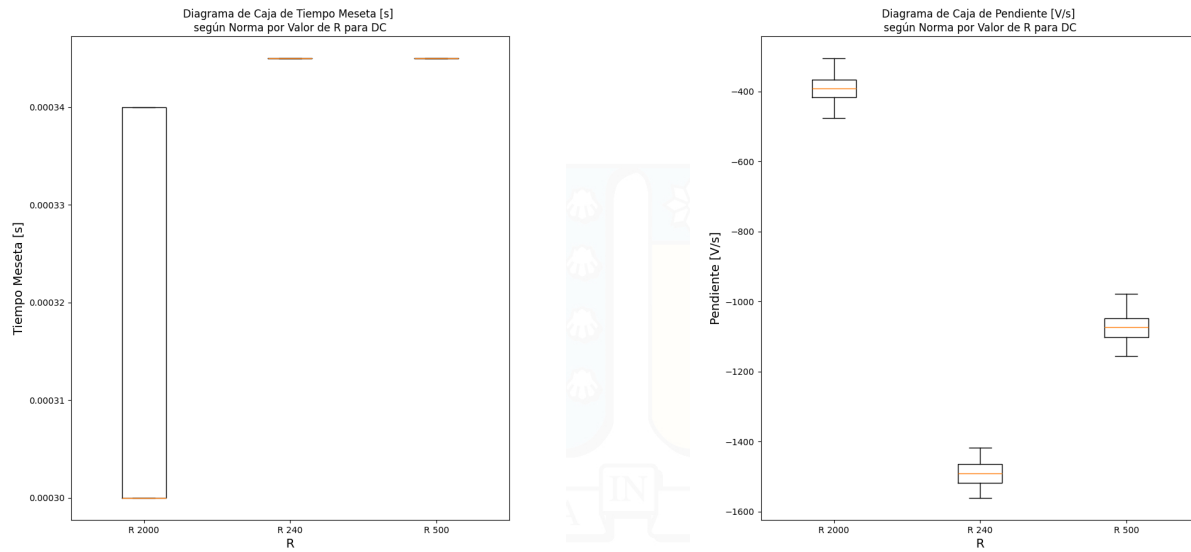
Figura A.8: Diagramas de caja de amplitud subida y bajada DC.



(a) Diagrama de caja tiempo de subida DC.

(b) Diagrama de caja tiempo de bajada DC.

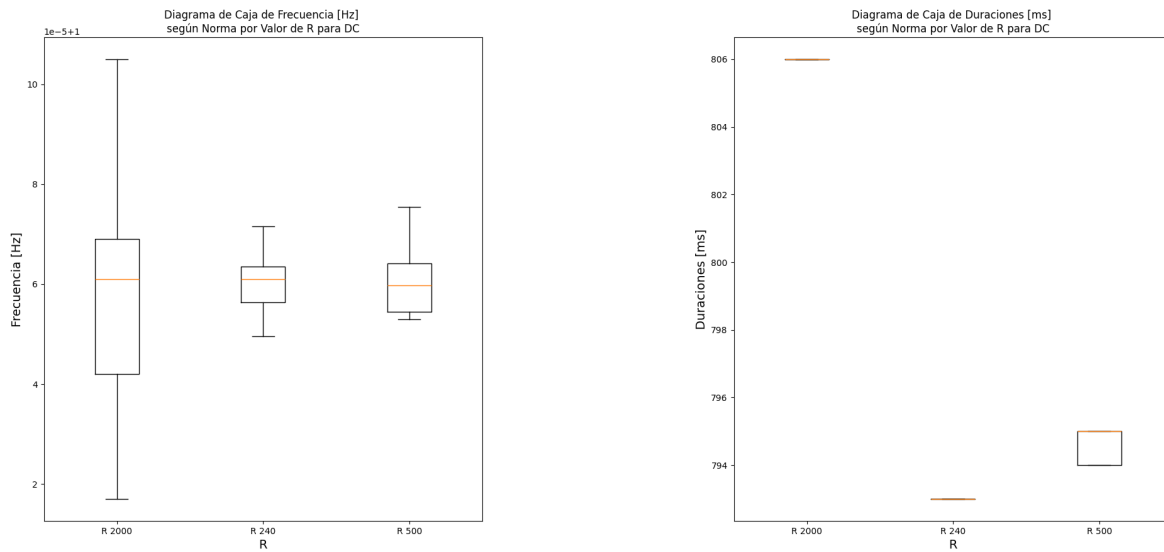
Figura A.9: Diagramas de caja de tiempo de subida y bajada DC.



(a) Diagrama de caja tiempo meseta DC.

(b) Diagrama de caja pendiente DC.

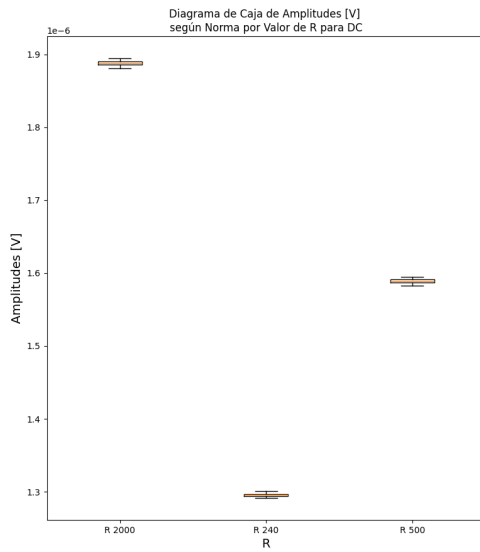
Figura A.10: Diagramas de caja de tiempo meseta y pendiente DC.



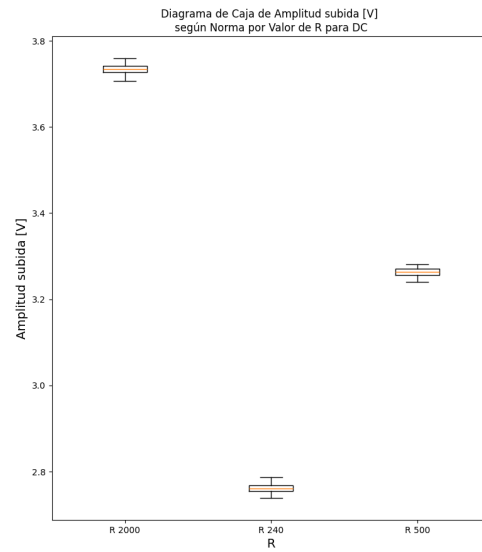
(a) Diagrama de caja frecuencia DC.

(b) Diagrama de caja duraciones DC.

Figura A.11: Diagramas de caja de frecuencia y duraciones DC.



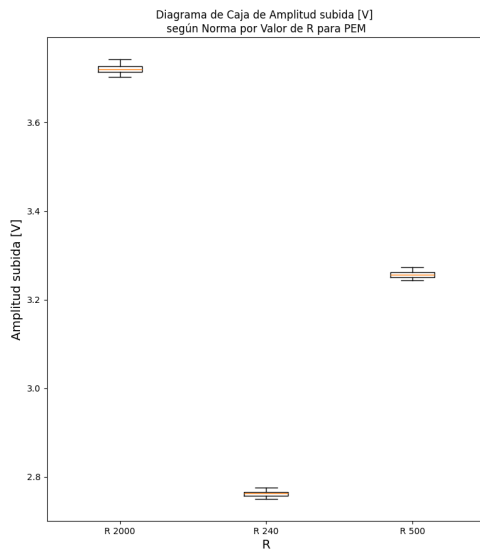
(a) Diagrama de caja amplitudes norma DC.



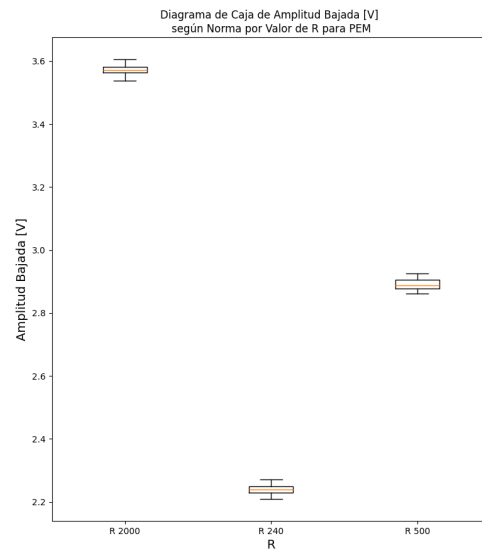
(b) Diagrama de caja amplitud subida DC.

Figura A.12: Diagramas de caja amplitudes norma y amplitud subida DC.

A.2.3.3. Exposición PEM

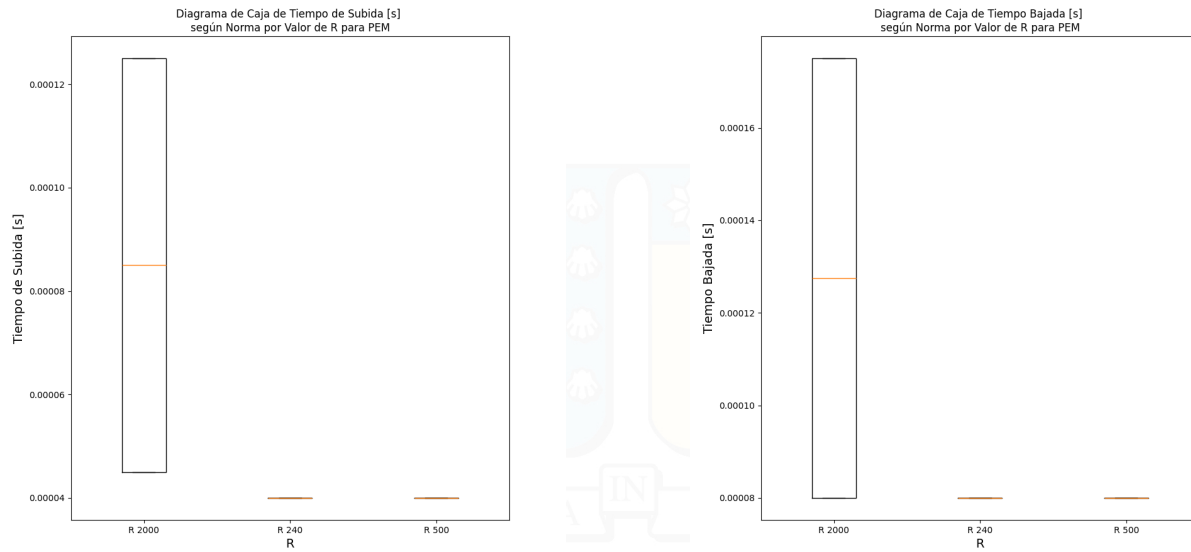


(a) Amplitud subida PEM.



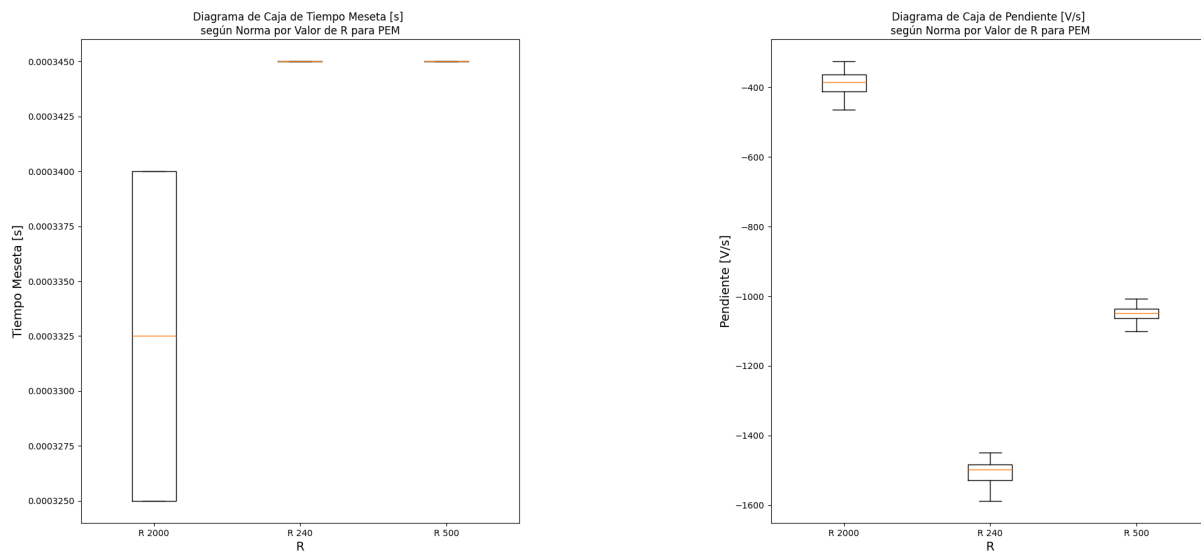
(b) Amplitud bajada PEM.

Figura A.13: Diagramas de caja de amplitud subida y bajada PEM.



(a) Tiempo de subida PEM.

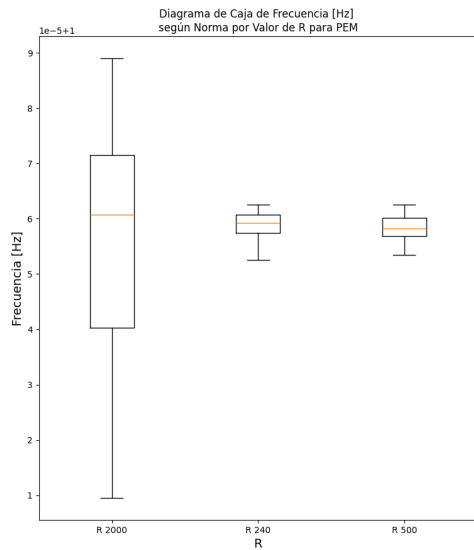
(b) Tiempo de bajada PEM.

Figura A.14: Diagramas de caja de tiempo de subida y bajada PEM.

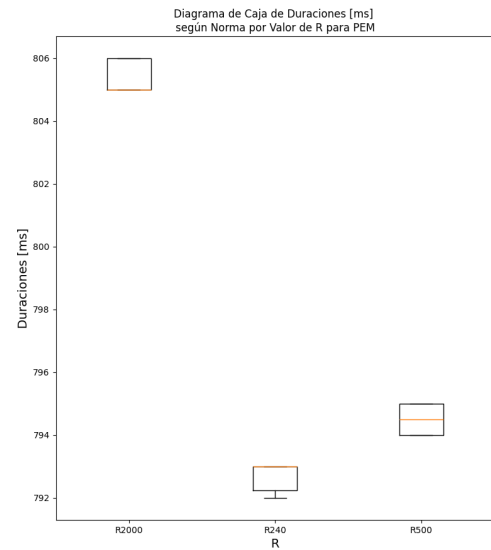
(a) Tiempo meseta PEM.

(b) Pendiente PEM.

Figura A.15: Diagramas de caja de tiempo meseta y pendiente PEM.

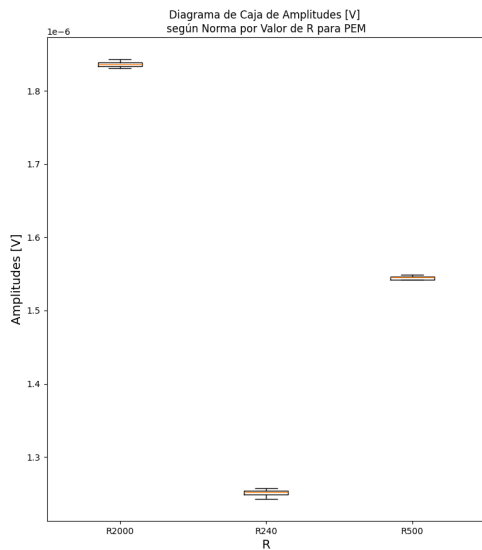


(a) Frecuencia PEM.

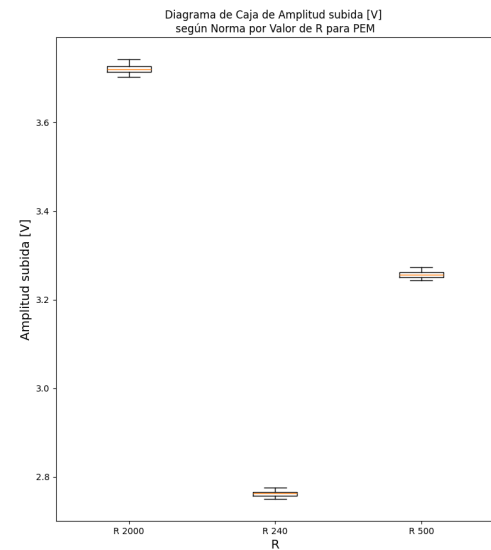


(b) Duraciones PEM.

Figura A.16: Diagramas de caja de frecuencia y duraciones PEM.



(a) Amplitudes norma PEM.



(b) Amplitud subida PEM.

Figura A.17: Diagramas de caja de amplitudes norma y amplitud subida PEM.

A.2.3.4. Tablas de Datos de Exposición

Tabla A.7: Registro completo mediciones de exposición AC

AC									
#	Tensión Teórica [kV]	Tensión rms [kV]	Tensión Primario [kV]	Tensión Secundario [kV]	Distancia [cm]	Nº Segmentos	Trigger	Canales	Medidor Campo [V/m]
1	20	20,21	39	0	100	5	EUT	Tablero,EUT	1791
2	30	30,21	62	0	100	5	EUT		1815
3	40	40,03	89	0	100	5	EUT		1831
4	50	50,32	106	0	100	5	EUT		1832
5	60	60,02	128	0	100	5	EUT		1852
6	20	20,22	39	0	80	5	EUT	Tablero,EUT	1830
7	30	30,17	61	0	80	5	EUT		1870
8	40	40,17	84	0	80	5	EUT		1853
9	50	50,12	106	0	80	5	EUT		1879
10	60	60,33	128	0	80	5	EUT		1873
11	20	20,06	39	0	60	5	EUT	Tablero,EUT	1814
12	30	30,02	61	0	60	5	EUT		1886
13	40	40,13	83	0	60	5	EUT		1900
14	50	50,19	106	0	60	5	EUT		1896
15	60	60,24	128	0	60	5	EUT		1892

Tabla A.8: Registro completo de mediciones de exposición DC.

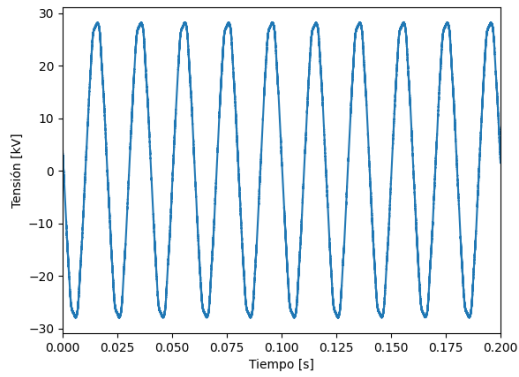
DC									
#	Tensión Teórica [kV]	Tensión rms [kV]	Tensión Primario [kV]	Tensión Secundario [kV]	Distancia [cm]	Nº Segmentos	Trigger	Canales	Medidor Campo [V/m]
1	20	17,87	34	20,1	100	5	EUT	Tablero,EUT	1512
2	40	35,56	73	40,26	100	5	EUT		1683
3	60	53,02	112	60,2	100	5	EUT		1743
4	20	17,95	34	20,16	80	5	EUT	Tablero,EUT	1589
5	40	35,66	73	40,3	80	5	EUT		1687
6	60	53,02	34	20,16	80	5	EUT		1732
7	20	17,96	34	20,18	60	5	EUT	Tablero,EUT	1577
8	40	35,38	73	39,98	60	5	EUT		1703
9	60	52,91	112	59,95	60	5	EUT		1744

A.2.4. Valores de Campo Eléctrico para Exposición Impulso

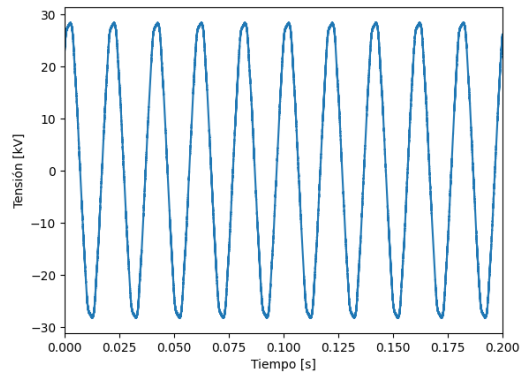
Tabla A.9: Valores de campo eléctrico a exposición impulso

Tensión [kV]	Distancia [cm]	Campo Eléctrico Teórico [kV/m]	Campo Eléctrico RMS [kV/m]
20	100	20	0,054218931
20	100	20	0,062627975
20	100	20	0,003940946
20	100	20	0,002912093
20	100	20	0,003341165
20	80	25	0,002836481
20	80	25	0,678594206
20	80	25	1,139583681
20	80	25	0,856349707
20	80	25	0,901875055
20	80	25	0,006451606
20	80	25	0,022264461
20	80	25	0,013485005
20	60	33,33333333	0,009069375
20	60	33,33333333	4,497821504
20	60	33,33333333	3,55879336
20	60	33,33333333	3,580254208
20	80	25	3,476054133
20	80	25	3,827538625
20	80	25	3,689054902
20	80	25	3,357000234
20	80	25	0,058454752
20	80	25	1,051058265
20	80	25	1,017732671
20	80	25	0,069214304
20	60	33,33333333	1,003278883
20	60	33,33333333	4,774692537
20	60	33,33333333	4,665963215
20	60	33,33333333	4,333805449
20	60	33,33333333	4,452808118
20	80	25	4,306350603
20	80	25	3,753396651
20	80	25	3,841356448
20	60	33,33333333	3,813043261
20	60	33,33333333	30,79476375
20	60	33,33333333	31,29226873
20	60	33,33333333	24,53874348
20	60	33,33333333	16,89541322
20	60	33,33333333	9,80444999
20	60	33,33333333	5,477447443
20	60	33,33333333	4,472144476
20	60	33,33333333	4,909184119
20	60	33,33333333	5,851984091
20	60	33,33333333	4,433306557

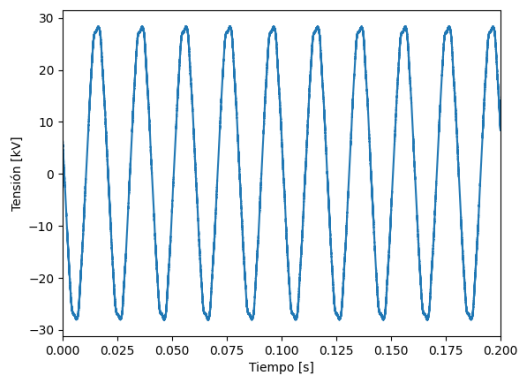
A.2.5. Formas de Onda Canal 1 Exposición AC



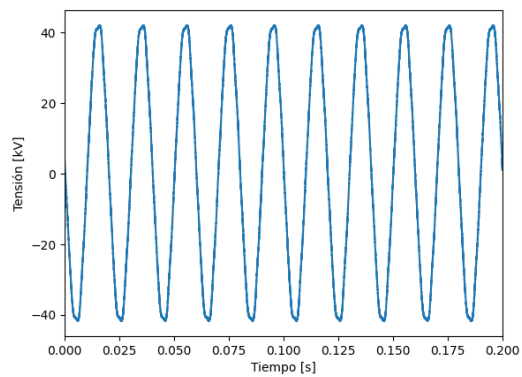
(a) 20kV - 60cm



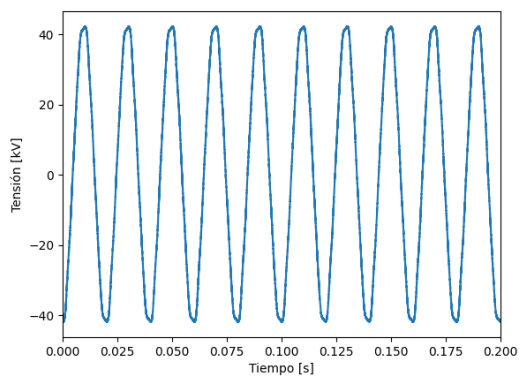
(b) 20kV - 80cm



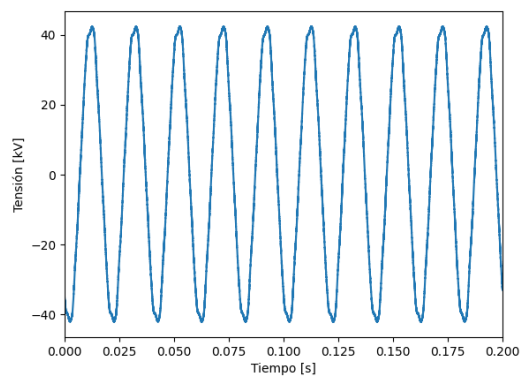
(a) 20kV - 100cm



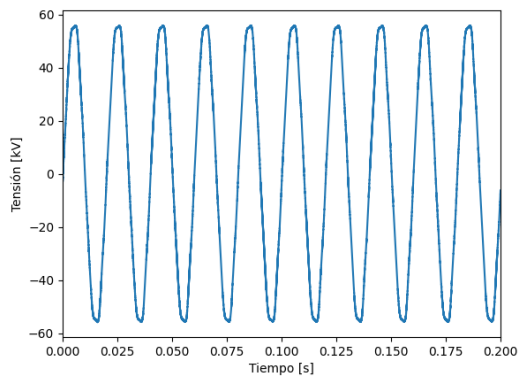
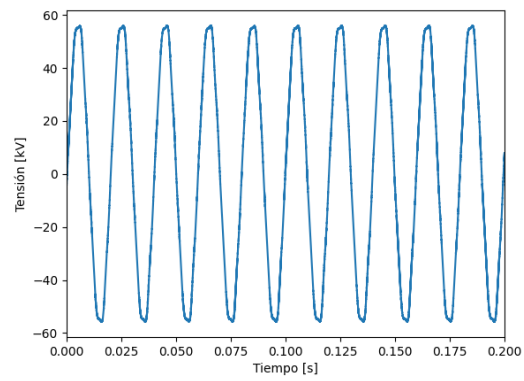
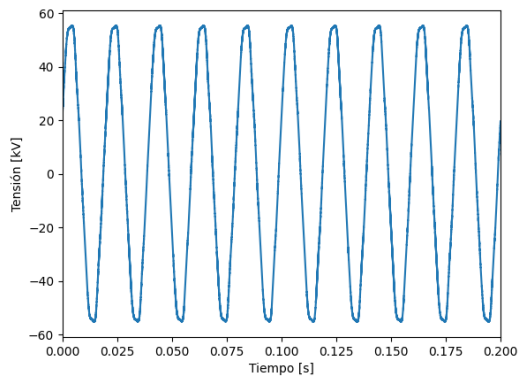
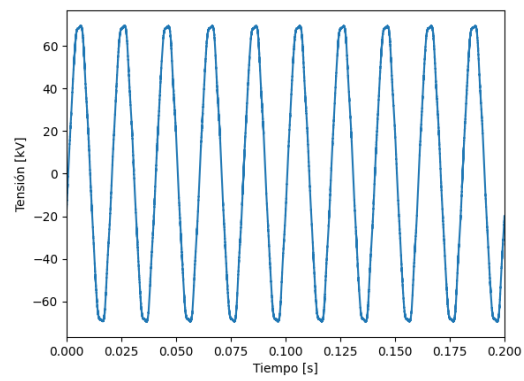
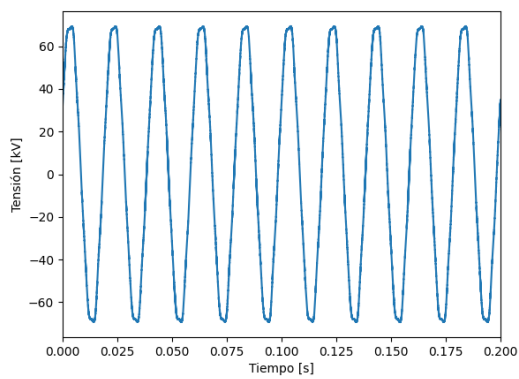
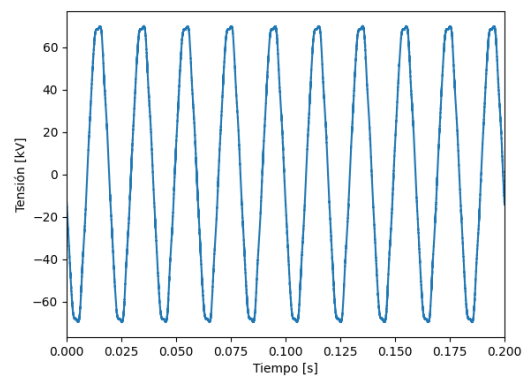
(b) 30kV - 60cm

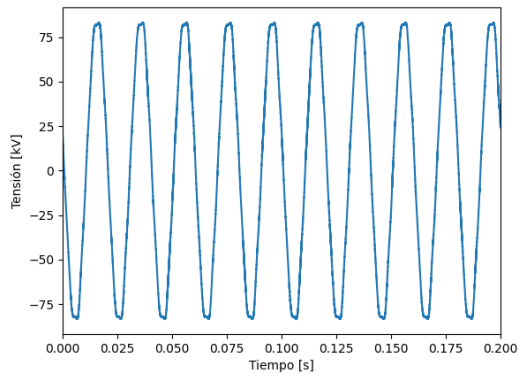


(a) 30kV - 80cm

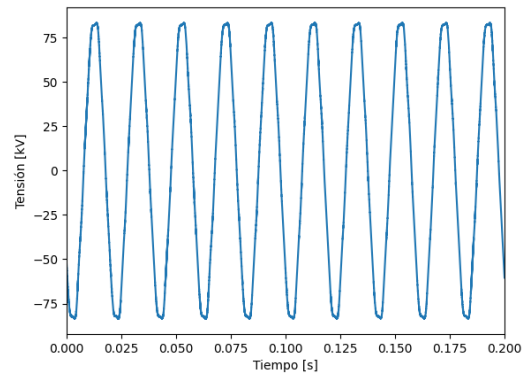


(b) 30kV - 100cm

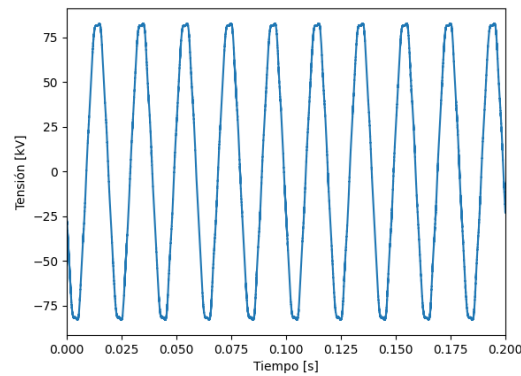
**(a) 40kV - 60cm****(b) 40kV - 80cm****(a) 40kV - 100cm****(b) 50kV - 60cm****(a) 50kV - 80cm****(b) 50kV - 100cm**



(a) 60kV - 60cm

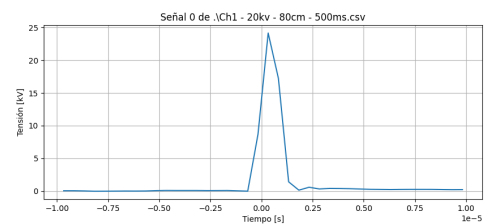
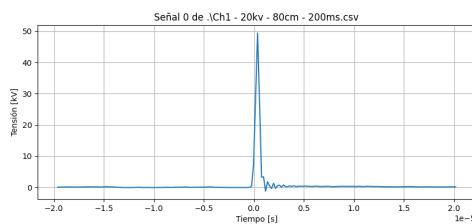
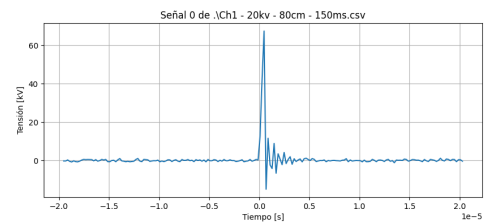
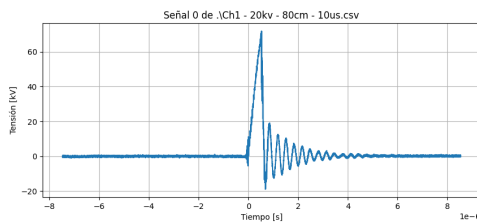


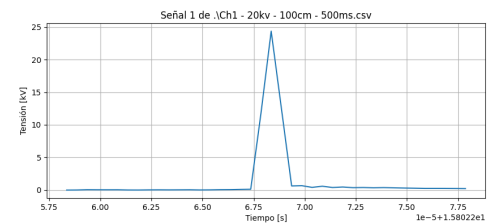
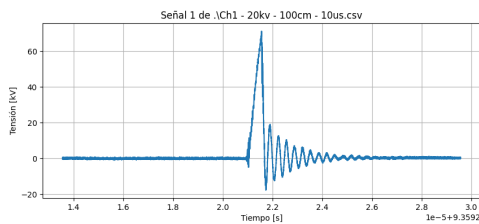
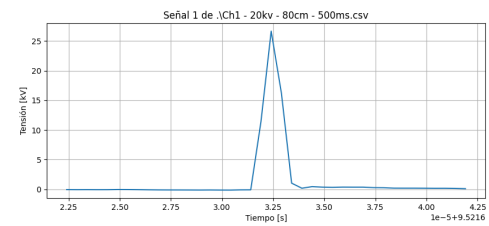
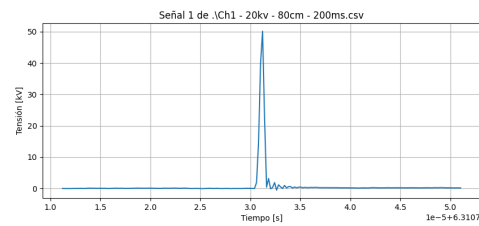
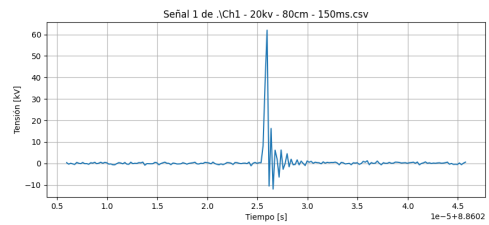
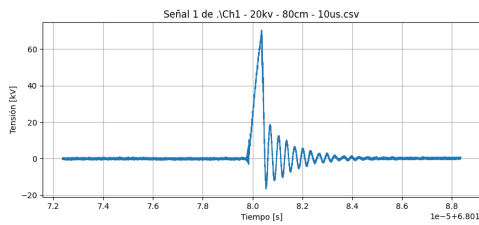
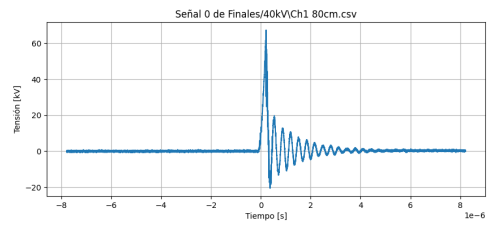
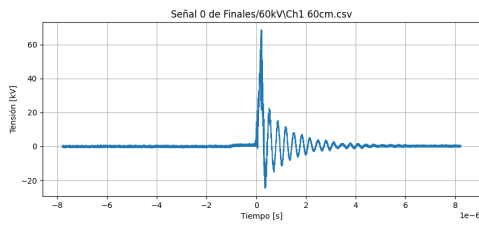
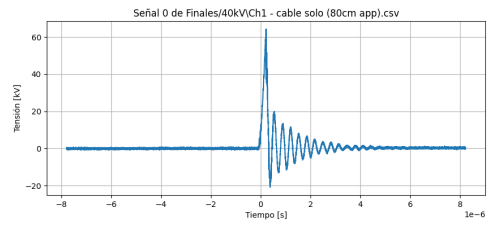
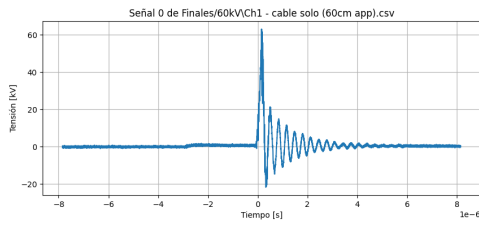
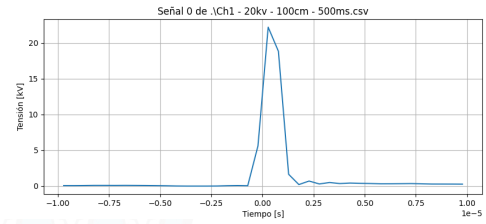
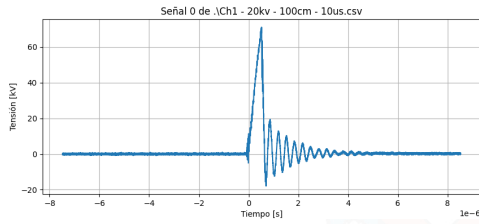
(b) 60kV - 80cm

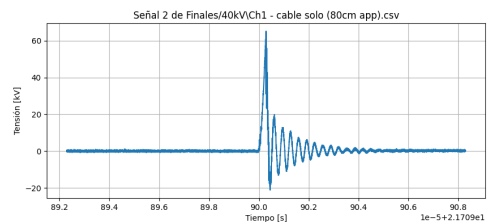
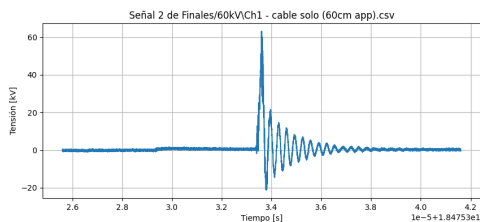
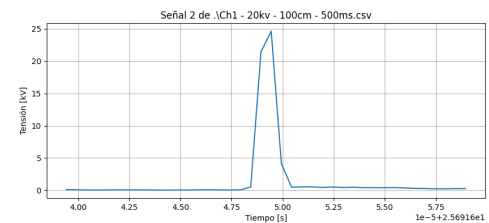
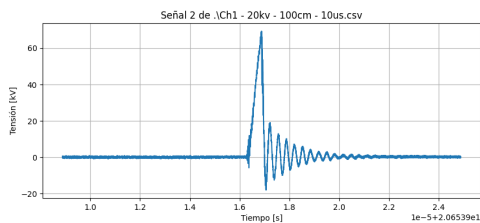
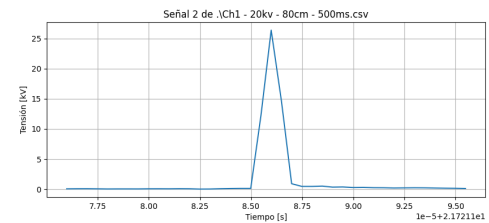
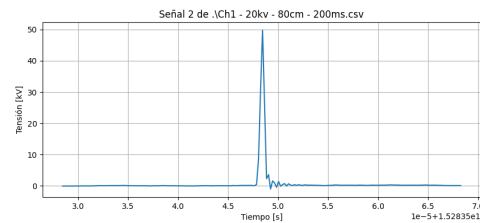
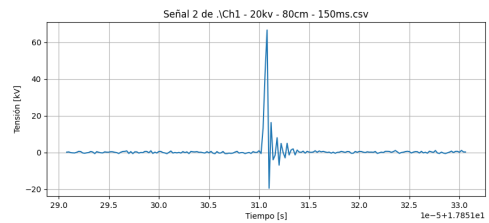
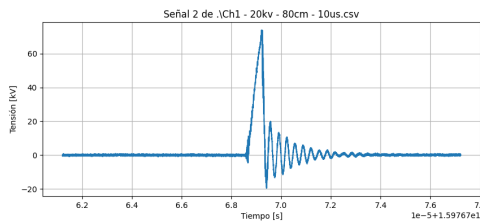
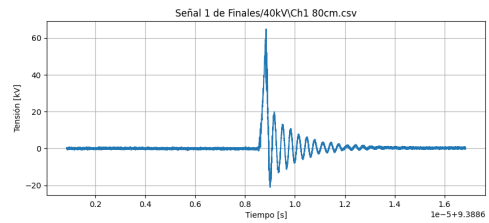
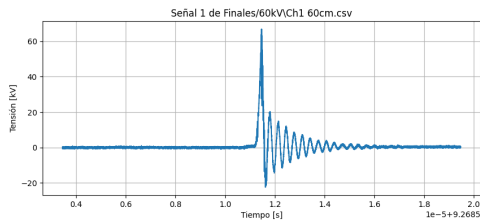
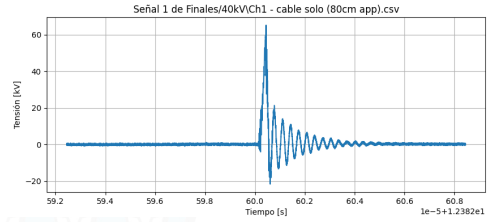
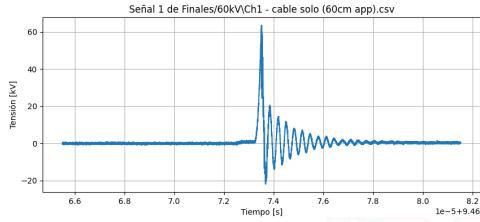


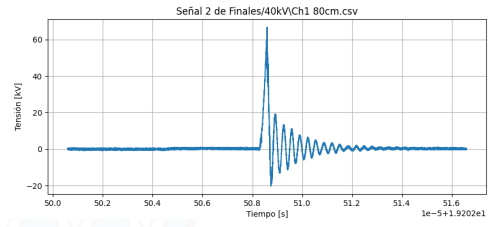
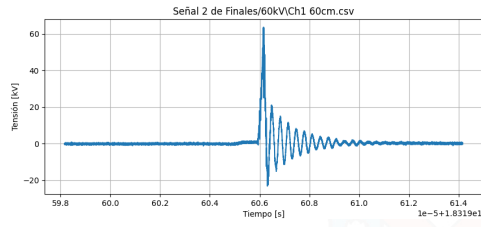
(a) 60kV - 100cm

A.2.6. Formas de Onda Canal 1 Exposición Impulso

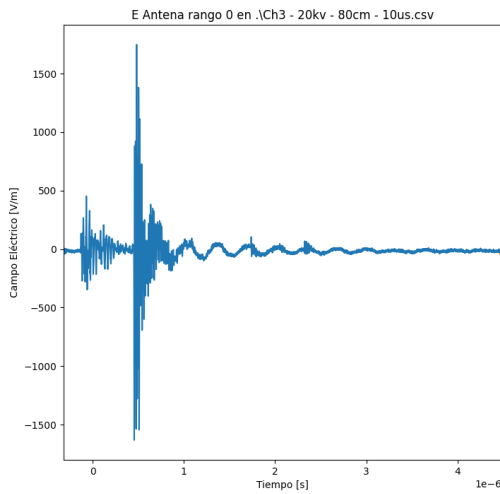




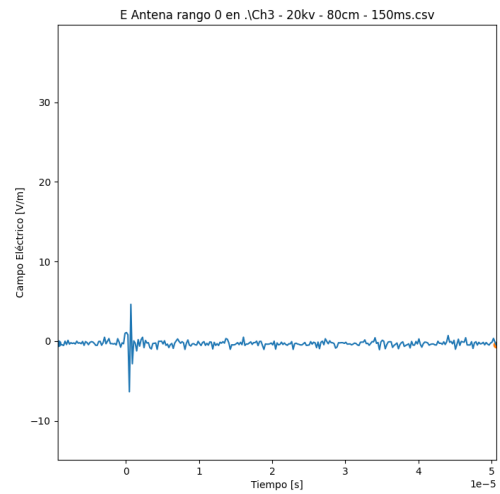




A.2.7. Formas de Onda Canal 3 Exposición Impulso



(a) 20kV, 80cm, 10 μ s



(b) 20kV, 80cm, 150ms

Figura A.41: Formas de onda Canal 3 Exposición Impulso

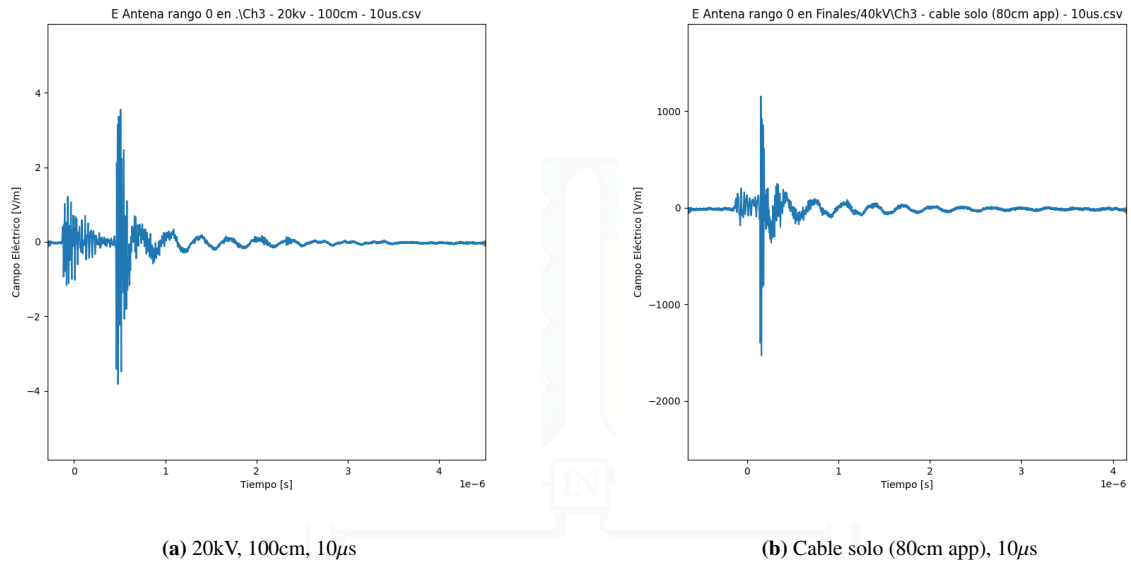


Figura A.42: Formas de onda Canal 3 Exposición Impulso

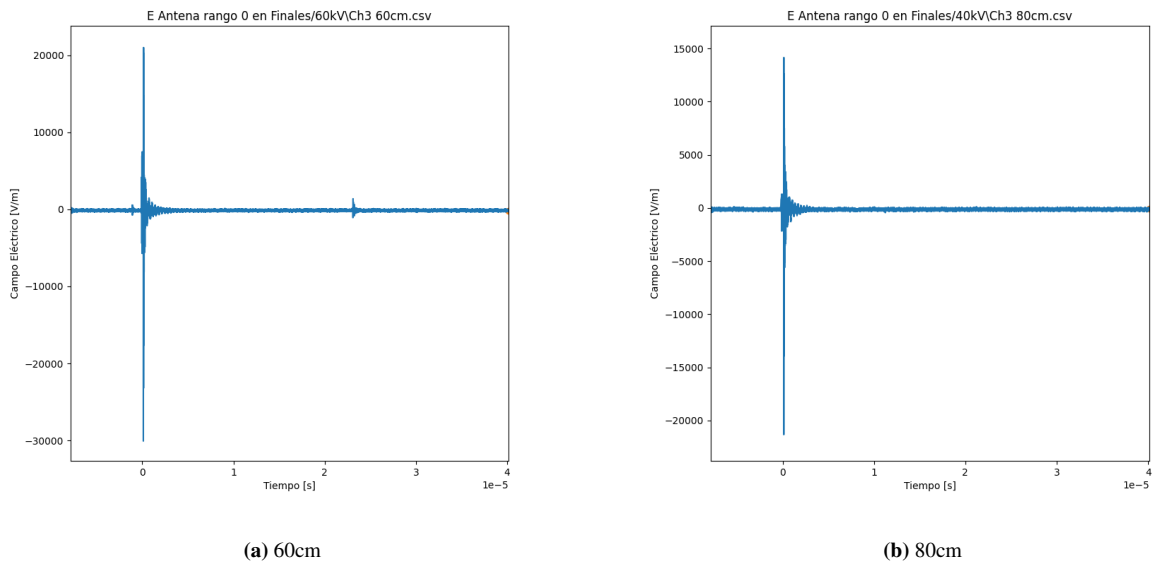


Figura A.43: Formas de onda Canal 3 Exposición Impulso a distintas distancias

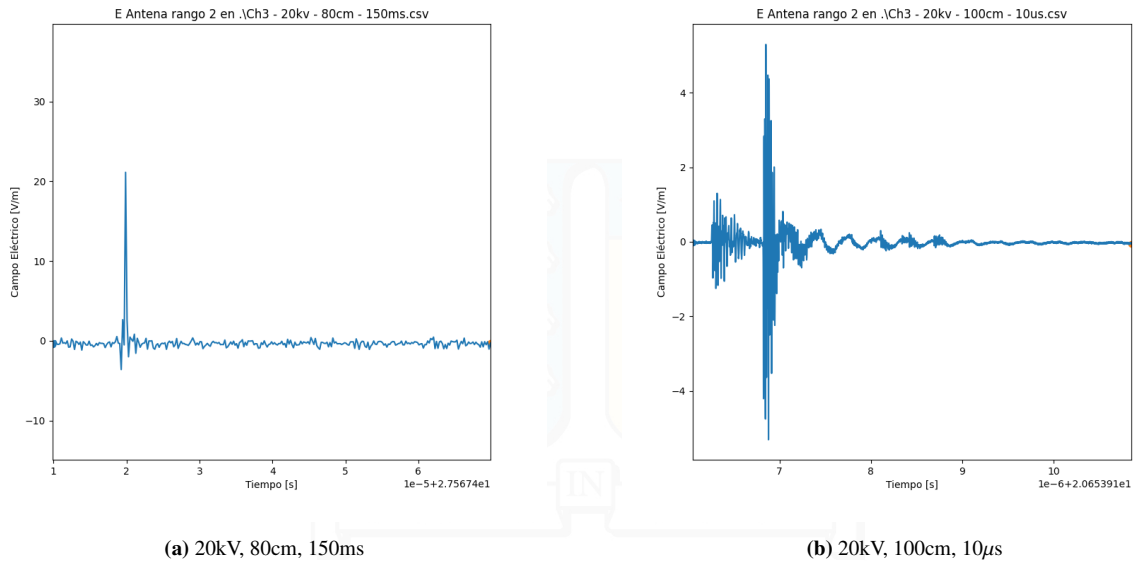


Figura A.46: Formas de onda Canal 3 Exposición Impulso para diferentes configuraciones

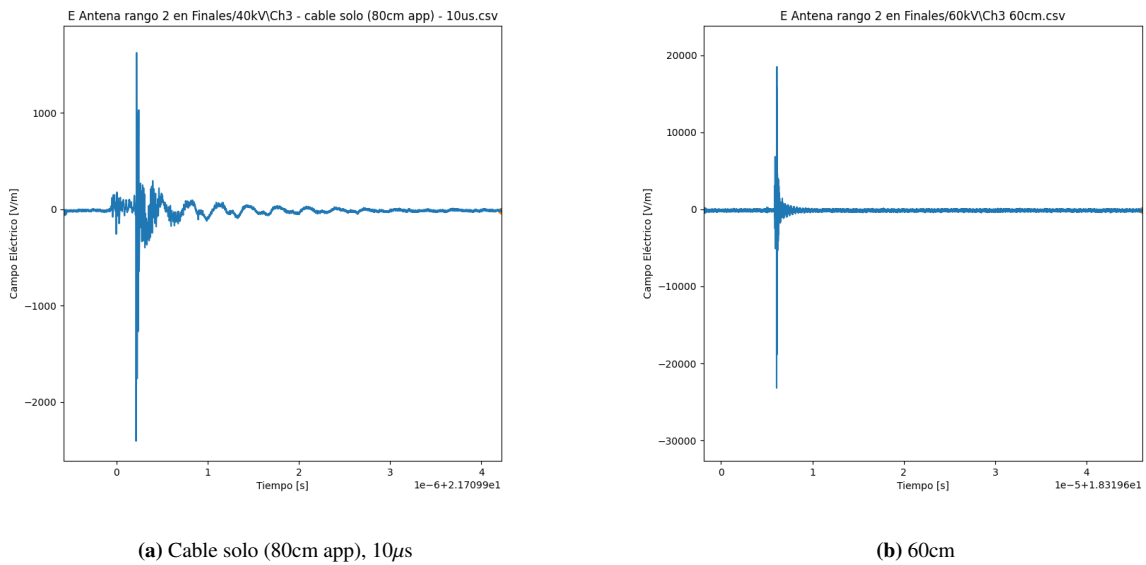


Figura A.47: Formas de onda Canal 3 Exposición Impulso para diferentes configuraciones

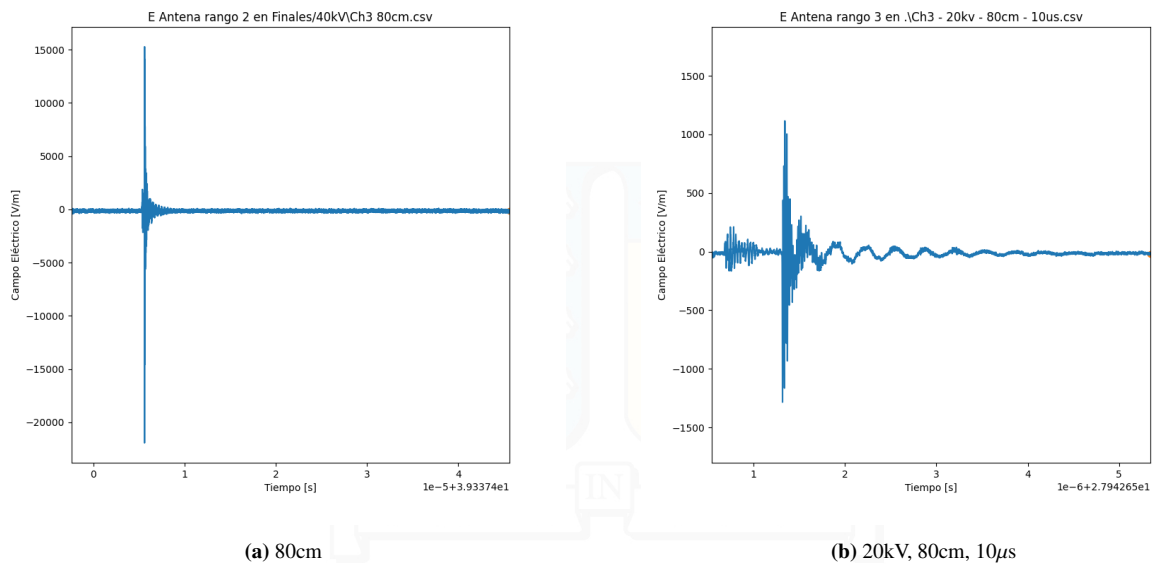


Figura A.48: Formas de onda Canal 3 Exposición Impulso para diferentes configuraciones

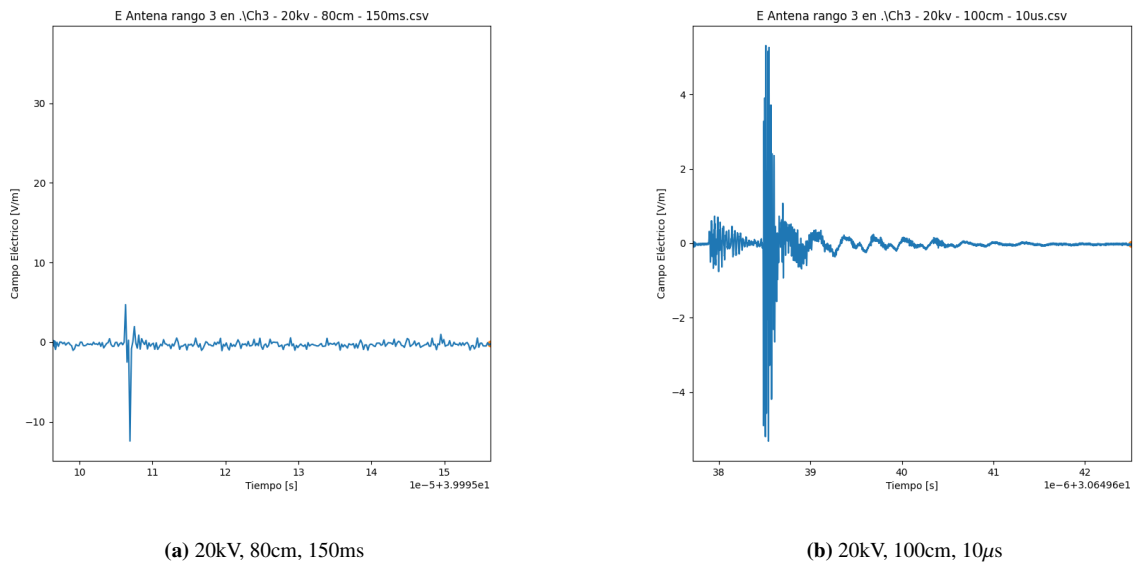


Figura A.49: Formas de onda Canal 3 Exposición Impulso para diferentes configuraciones

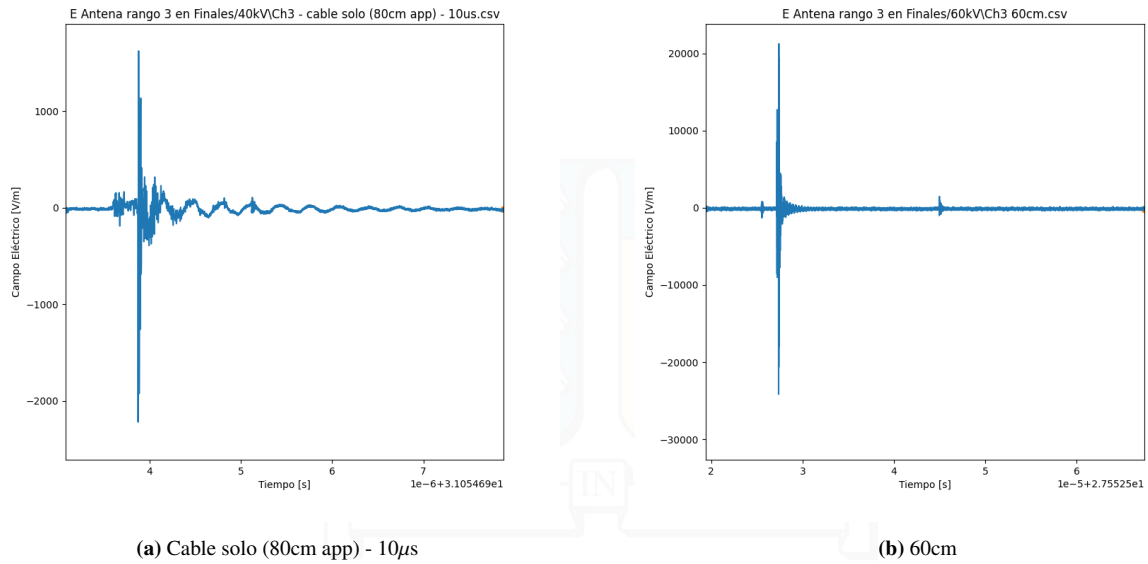


Figura A.50: Formas de onda Canal 3 Exposición Impulso para diferentes configuraciones

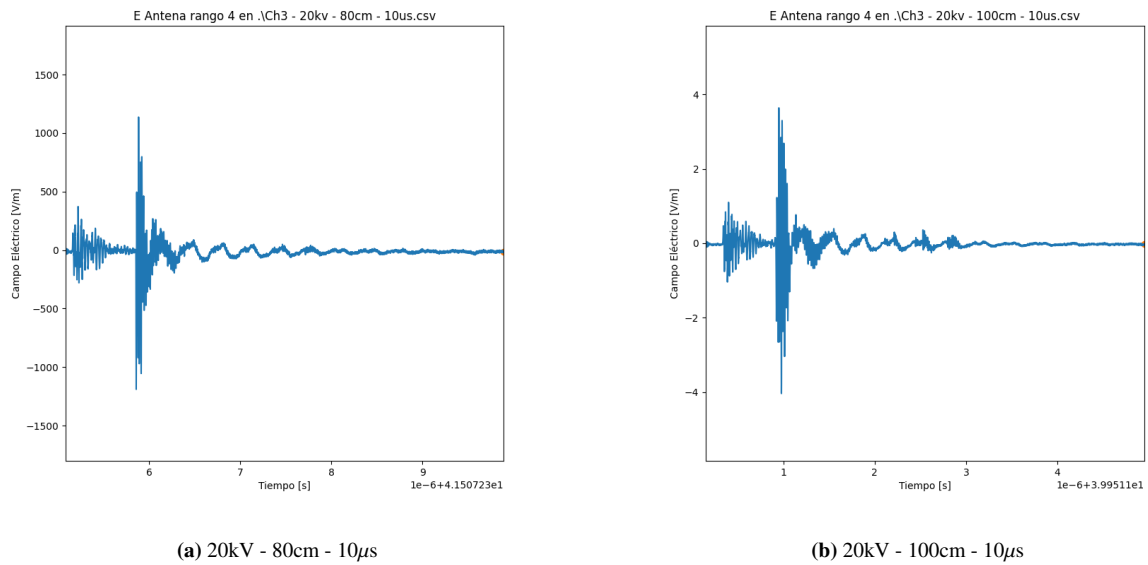


Figura A.51: Formas de onda Canal 3 Exposición Impulso para diferentes configuraciones de voltaje y distancia

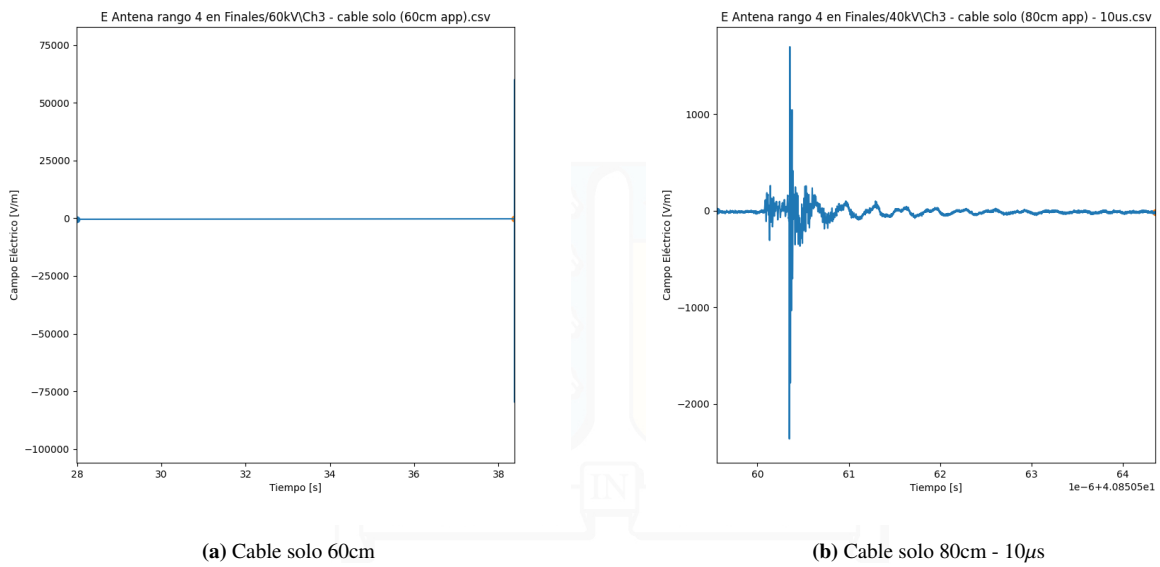


Figura A.52: EEMP Canal 3 - Configuraciones de cable y distancia

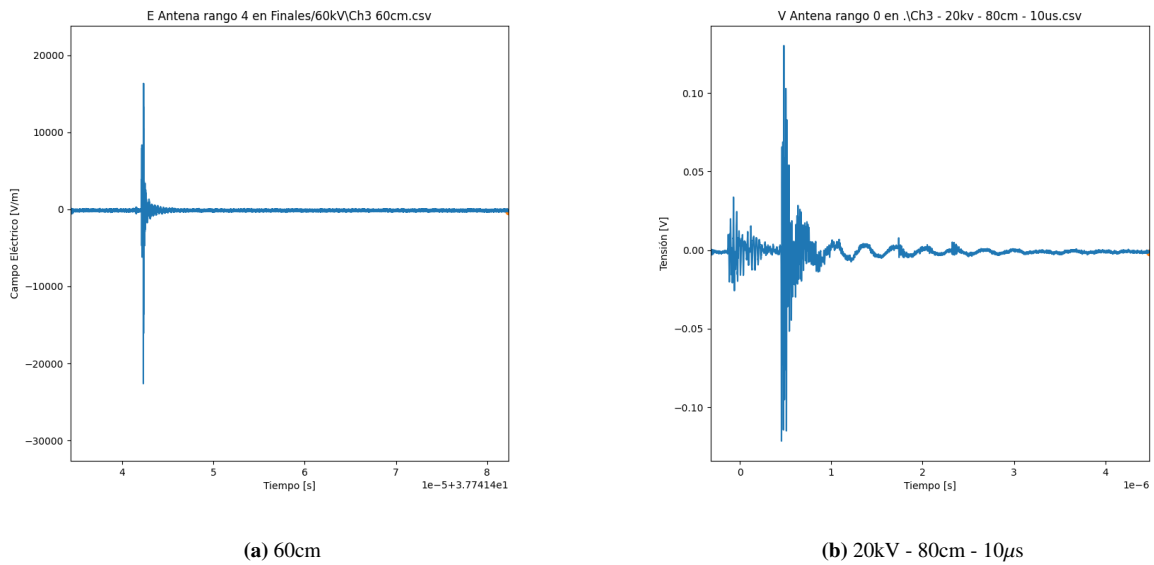


Figura A.53: EEMP y VEMP Canal 3 - 80cm y 60cm

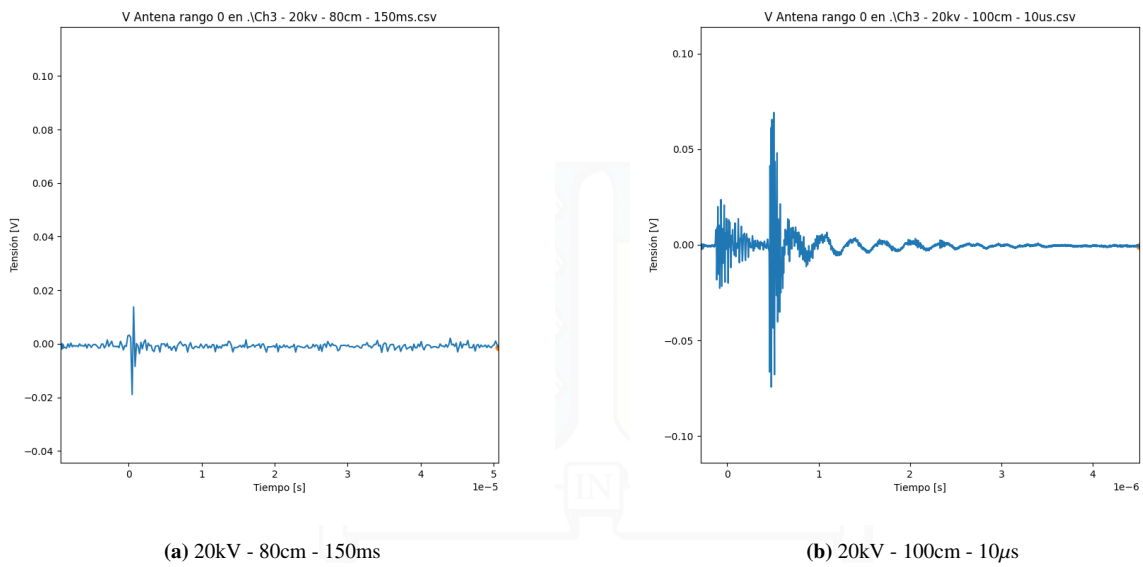


Figura A.54: VEMP Canal 3 - Diferentes tiempos y distancias

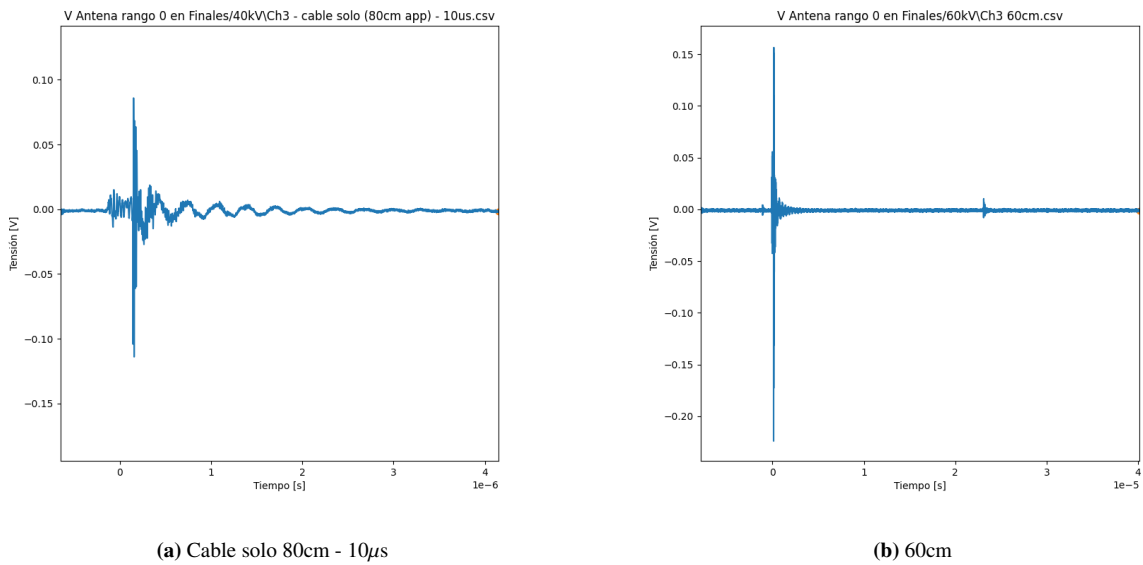


Figura A.55: VEMP Canal 3 - Cable y distancias

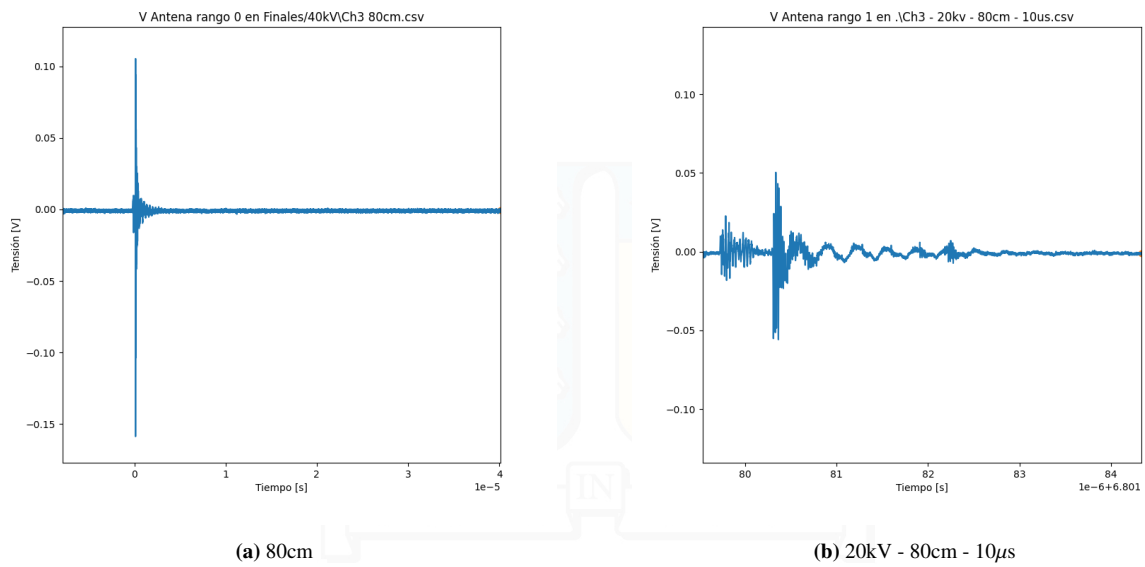


Figura A.56: VEMP Canal 3 - Distancias y voltajes

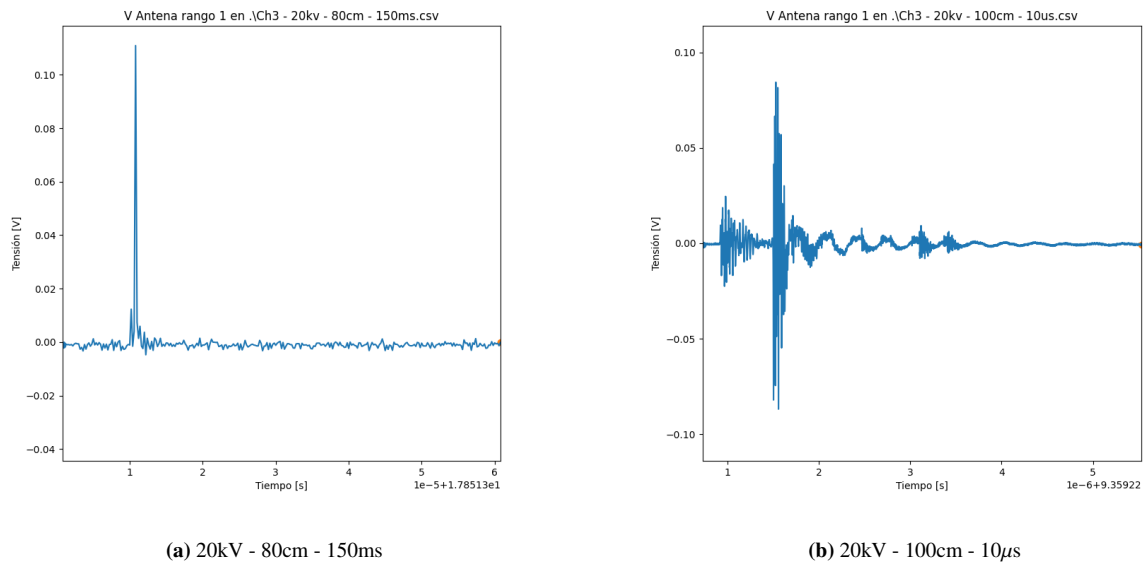


Figura A.57: VEMP Canal 3 - Variaciones de voltaje y distancia

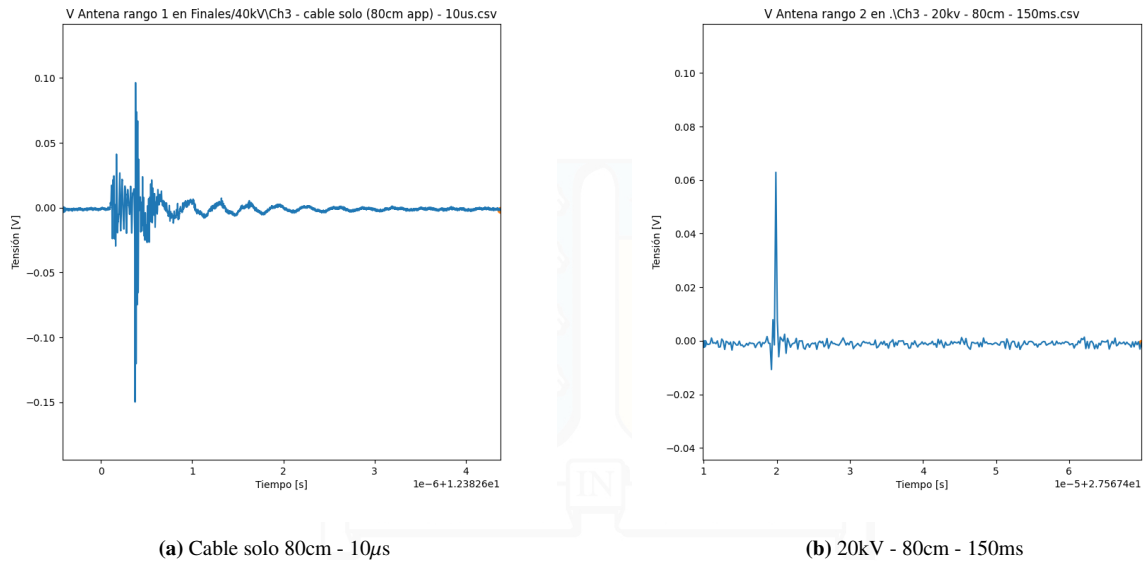


Figura A.58: VEMP Canal 3 - Diferentes configuraciones

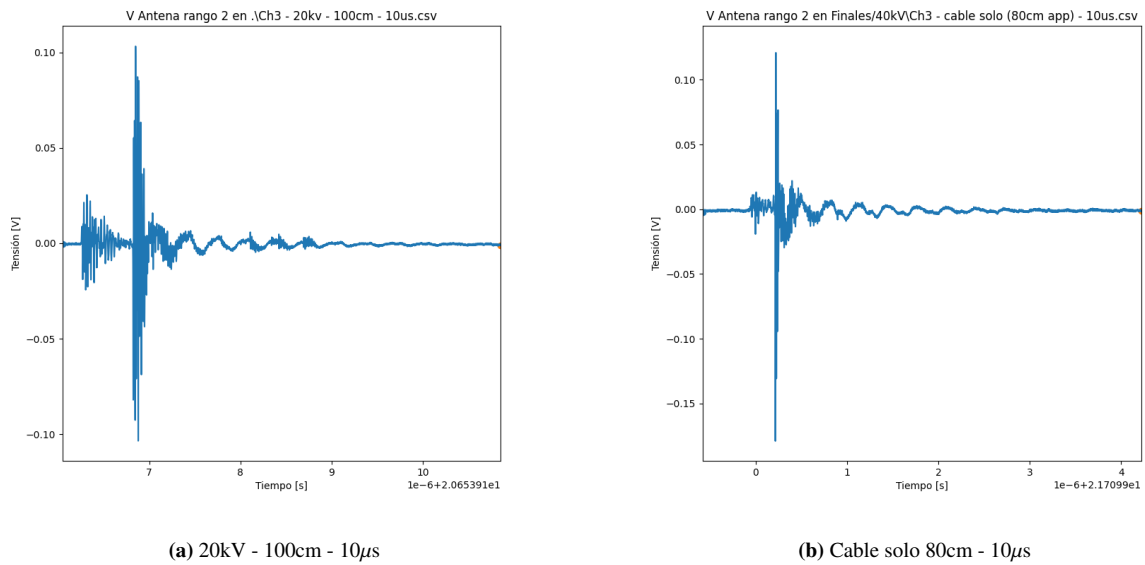
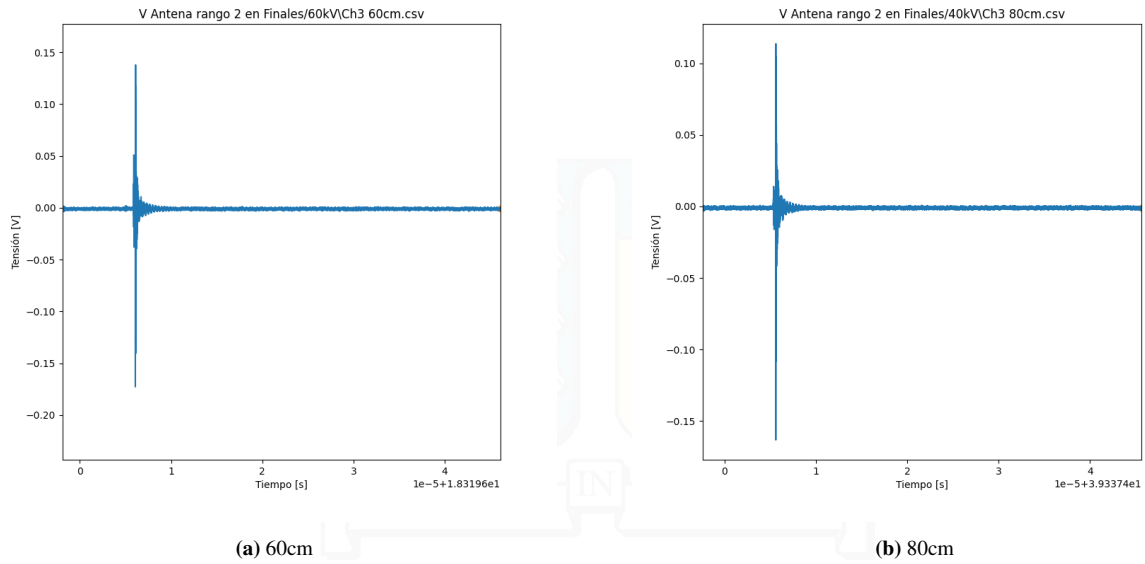
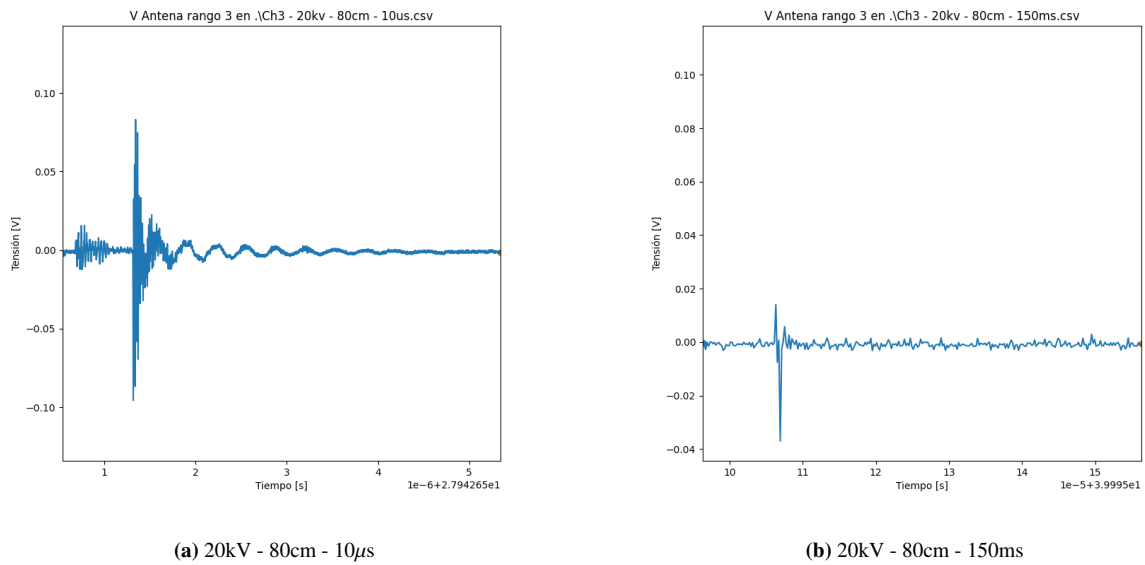


Figura A.59: VEMP Canal 3 - 100cm y cable solo

**Figura A.60:** VEMP Canal 3 - 60cm y 80cm**Figura A.61:** VEMP Canal 3 - 80cm

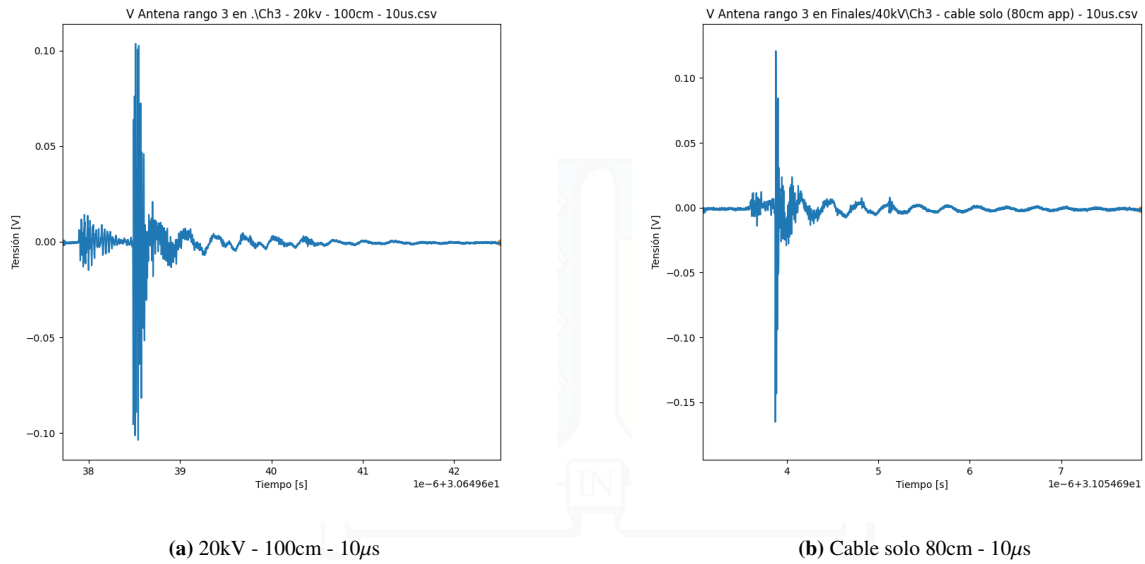


Figura A.62: VEMP Canal 3 - Variaciones en distancia y cable

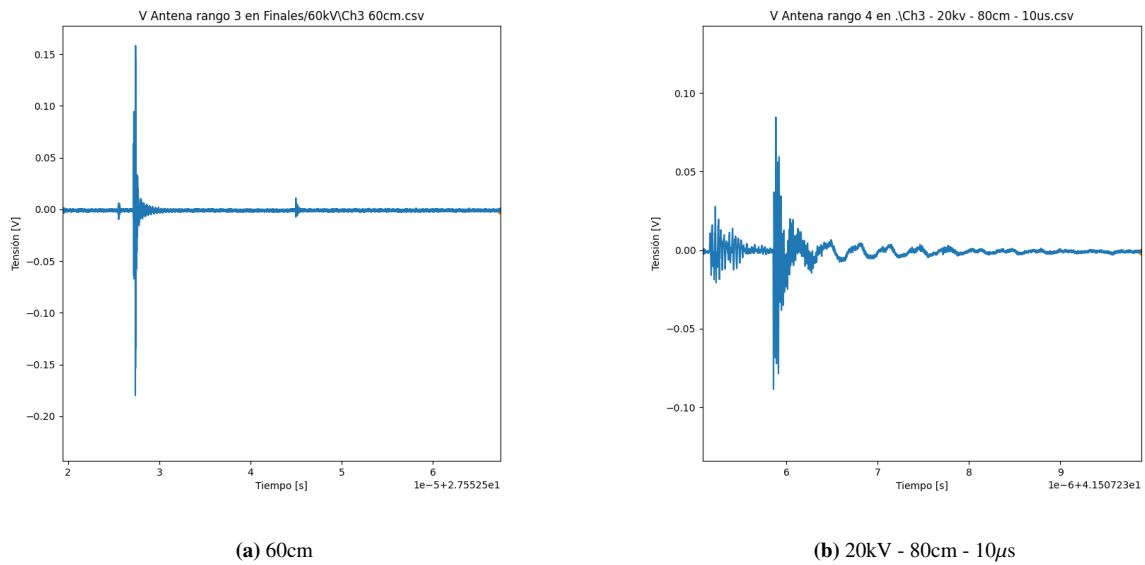


Figura A.63: VEMP Canal 3 - 60cm y 80cm

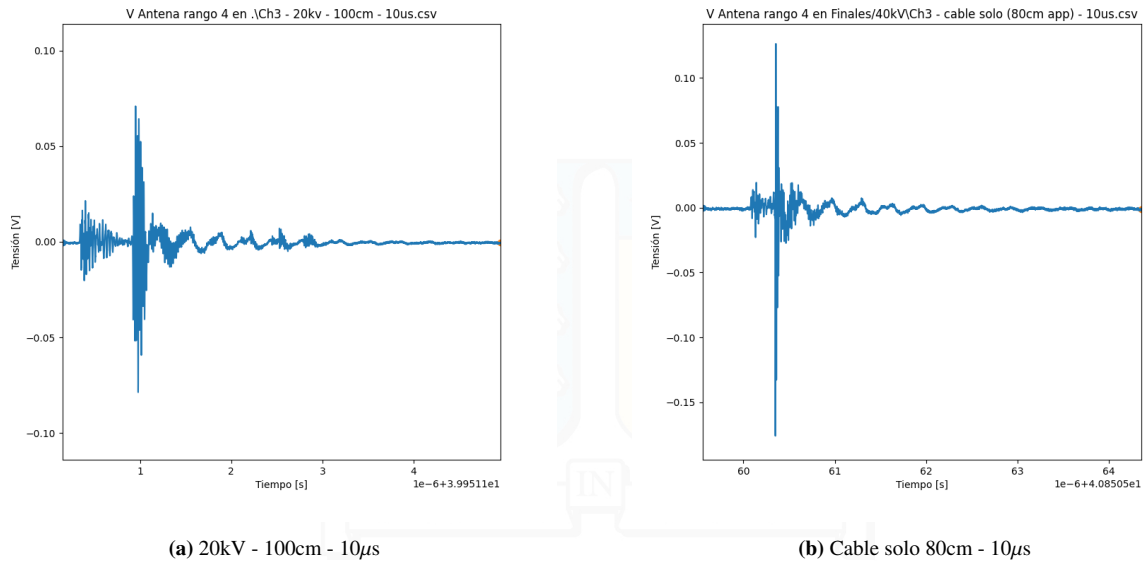


Figura A.64: VEMP Canal 3 - Configuraciones finales