



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**DESARROLLO DE UN CIRCUITO DOBLADOR DE
VOLTAJE EN EL LABORATORIO DE ALTA
TENSION SEDE CUENCA PARA LA GENERACIÓN
DE IMPULSOS BIL DE HASTA 200 kV**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Eléctrico

**AUTORES: JOHAN DANIEL LAZO AGUIRRE
JUAN MARCELO TELLO BERMEO**

TUTOR: ING.FLAVIO ALFREDO QUIZHPI PALOMEQUE, MGTR.

Cuenca - Ecuador
2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Johan Daniel Lazo Aguirre con documento de identificación N° 0106658503 y Juan Marcelo Tello Bermeo con documento de identificación N° 0107256869; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 28 de julio del 2025

Atentamente,



Johan Daniel Lazo Aguirre Mogrovejo
0106658503



Juan Marcelo Tello Bermeo
0107256869

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Johan Daniel Lazo Aguirre con documento de identificación N° 01066585036 y Juan Marcelo Tello Bermeo con documento de identificación N° 0107256869, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: "Desarrollo de un circuito doblador de Voltaje en el laboratorio de Alta Tensión sede Cuenca para la generación de impulsos BIL de hasta 200 kV", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 28 de julio del 2025

Atentamente,



Johan Daniel Lazo Aguirre
0106658503



Juan Marcelo Tello Bermeo
0107256869

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque con documento de identificación N° 0102257482, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DESARROLLO DE UN CIRCUITO DOBLADOR DE VOLTAJE EN EL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN SEDE CUENCA PARA LA GENERACIÓN DE IMPULSOS BIL DE HASTA 200 KV, realizado por Johan Daniel Lazo Aguirre con documento de identificación N° 0106658503 y por Juan Marcelo Tello Bermeo con documento de identificación N° 0107256869, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 28 de julio del 2025

Atentamente,



Ing. Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque
0102257482

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por haberme brindado la fuerza, sabiduría, paciencia y motivación necesarias para superar cada dificultad a lo largo de este proceso. Agradezco profundamente a mi madre, por su amor incondicional y su apoyo constante durante toda mi vida; siempre ha creído en mí y me ha motivado a seguir adelante. Ha sido el pilar fundamental que me permitió enfrentar cada obstáculo con determinación y perseverancia, enseñándome con su ejemplo que, con esfuerzo y dedicación, es posible alcanzar cualquier meta. También quiero expresar mi gratitud a mi hermano mayor, quien siempre me ofreció consejos y enseñanzas valiosas que me sirvieron en todas las etapas de la universidad; gracias por estar presente en los momentos difíciles, por escucharme, animarme y brindarme tu apoyo incondicional. Agradezco sinceramente a mi padre, quien en todo momento de mi vida me enseñó a ser fuerte, a resistir ante las adversidades y a luchar con perseverancia. De igual manera, agradezco a mis tíos y a mi abuelita por su cariño incondicional y por los sabios consejos que me han acompañado a lo largo de mi vida. Extiendo mi agradecimiento a la Universidad Politécnica Salesiana por permitirme formarme en un entorno académico tan enriquecedor, así como a los docentes, quienes con su dedicación y conocimiento me han preparado para enfrentar los desafíos del mundo profesional. Finalmente, agradezco a mi compañero de tesis por su apoyo, compromiso y colaboración durante todo este proceso.

Johan Daniel Lazo Aguirre

Quiero comenzar agradeciendo al Tiempo por brindarme la fuerza y la sabiduría para seguir adelante a lo largo del camino que he recorrido hasta esta etapa de mi vida. A mi madre, a quien agradezco por ser un pilar fundamental que me ha permitido llegar hasta donde estoy. A mis abuelos y tíos, quienes me vieron crecer y siempre han estado presentes para apoyarme cuando lo he necesitado. Junto con mi madre, su respaldo incondicional y sus consejos han sido mi mayor motor y guía. A mis hermanos y a mi padre, por estar siempre a mi lado, brindándome su compañía y apoyo en cada etapa de este proceso. Además, quiero agradecer a mis amigos, quienes me han brindado su apoyo y con quienes he compartido risas, momentos de aprendizaje y experiencias inolvidables a lo largo de esta etapa. Su compañía y aliento han sido fundamentales en este camino. A mi compañero de tesis, con quien he compartido este camino académico y cuya constancia, responsabilidad y compromiso han sido esenciales tanto en este trabajo como en toda nuestra formación profesional.

Juan Marcelo Tello Bermeo

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, por darme la fortaleza, sabiduría y paciencia necesarias para superar cada desafío a lo largo de este proceso. A mi madre, por su amor incondicional y por ser siempre mi mayor ejemplo de esfuerzo y perseverancia. A mi padre y a mi hermano, por sus enseñanzas, consejos y apoyo constante, que me ayudaron a mantenerme firme en los momentos difíciles. A mi familia, por su cariño y palabras de aliento que me motivaron a seguir adelante. Este logro es el resultado del acompañamiento y la influencia positiva que cada uno ha tenido en mi vida.

Johan Daniel Lazo Aguirre

Dedico este trabajo a mi familia, por su apoyo constante mientras llevaba a cabo este proyecto, por su comprensión, paciencia y confianza, así como por su capacidad para escucharme y motivarme en cada etapa del proceso. A mis amigos, con quienes he compartido momentos inolvidables a lo largo de la carrera y que siempre me han brindado su apoyo. A mi tutor de tesis, profesores y miembros de la constructora por su guía y valiosos consejos, que han sido fundamentales para la culminación de este trabajo

Juan Marcelo Tello Bermeo

RESUMEN

El estudio busca fortalecer las capacidades experimentales del laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca, mediante el diseño e implementación de un circuito doblador de voltaje que genere impulsos eléctricos tipo BIL a partir de una fuente de corriente alterna, elevando la tensión a más de 100 kV, con el objetivo de alcanzar los 200 kV para ensayos de aislamiento eléctrico. El documento aborda la fundamentación teórica y la aplicación práctica, analizando el funcionamiento de los dobladores de voltaje, con énfasis en el diseño Cockcroft-Walton, y examinando los componentes clave como diodos y condensadores. Además, se exploran los principios de los impulsos tipo BIL y su relevancia en la evaluación de la capacidad dieléctrica de equipos eléctricos, junto con las normativas técnicas internacionales que regulan estos ensayos, como los estándares IEEE Std 4TM-2013 [1].

Se caracterizaron los recursos disponibles en el laboratorio, identificando las capacidades técnicas de transformadores, dispositivos de medición, sistemas de puesta a tierra y elementos de conexión, lo que fue crucial para delimitar los alcances del diseño e implementar criterios de seguridad adecuados. El diseño del circuito se validó mediante simulaciones en MATLAB-Simulink, optimizando la disposición de los componentes, y posteriormente se procedió a su construcción física, realizando ajustes estructurales para superar dificultades relacionadas con la distribución del voltaje, el efecto corona y las descargas en aire.

El diseño del circuito fue validado mediante simulaciones en MATLAB-Simulink, optimizando la disposición de los componentes, y luego se construyó físicamente, realizando ajustes estructurales para superar dificultades relacionadas con la distribución del voltaje, el efecto corona y las descargas en aire. A pesar del cumplimiento parcial de los objetivos cuantitativos, el proyecto constituye una contribución significativa a la infraestructura académica y al aprendizaje práctico en alta tensión, sentando las bases para futuras investigaciones y mejoras en sistemas de prueba para equipos eléctricos en condiciones extremas.

Palabras clave: Alta Tensión, Doblador de Voltaje, Cockcroft-Walton, Ensayos de Impulso, Sobretensiones Transitorias, Rectificación de Alta Tensión.

Índice

Glosario	7
1. Marco Teórico	13
1.1. Doblador de voltaje	13
1.1.1. Diodo	14
1.1.2. Condensador	14
1.2. Ensayos Tipo BIL	15
1.3. Normativas	17
1.3.1. Parámetros y Ejecución de los Ensayos BIL (IEEE Std 4 TM -2013)	17
1.3.2. Guía para la Selección de Niveles de Aislamiento (IEEE Std C62.82.2-2022)	18
1.4. Software Simulink de matlab	19
2. Áreas del Trabajo de Grado para ABET	20
3. CAPITULO 1: DISEÑO DEL CIRCUITO DOBLADOR DE TENSIÓN Y ENSAYOS BIL	23
3.1. Recursos Disponibles	23
3.1.1. Transformador de Pruebas	23
3.1.2. Panel de control	24
3.1.3. Osciloscopio	27
3.1.4. Sistema de conexión a tierra del laboratorio	27
3.1.5. Barras de Conexión y Barras aislantes	28
3.1.6. Corona de conexión y Pedestal de piso	30
3.1.7. Diodos	31
3.1.8. Capacitores	33
3.1.9. Resistencias	35
3.1.10. Barra de conexión al sistema de tierra	37
3.1.11. Esferas de disrupción y separador de esferas	38
3.1.12. Interruptor de puesta a tierra	39
3.2. Diseño del doblador de tensión	40
3.3. Diseño del ensayo BIL	41
3.4. Simulación del circuito doblador de tensión mediante el software MATLAB	42
3.5. Simulación del circuito BIL mediante el software MATLAB	48

4. CAPITULO 2: IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO DOBLADOR DE TENSIÓN PARA ENSAYOS BIL	51
4.1. Doblador de Tensión	51
4.2. Ensayos BIL	51
4.3. Doblador de tensión implementado a ensayo BIL	52
4.4. Rediseño del circuito Doblador de tensión para Ensayos BIL	53
5. CAPITULO 3: VALIDACION DEL CIRCUITO DOBLADOR DE TENSION PARA ENSAYOS BIL	55
5.1. Prueba inicial del doblador de voltaje y del ensayo BIL	55
5.2. Ensayos de resistencia de diodos conjuntamente con rectificación de onda completa	57
5.3. Diagnóstico y validación operativa de los condensadores	61
5.4. Prueba de rectificación de los condensadores reparados	66
5.5. Ensayos de validación de funcionamiento de los elementos de medición	67
5.6. Ensayo de Doblador de Tensión hasta 200 kV	69
5.7. Ensayo final del circuito Doblador de tensión para Ensayos BIL	71
6. Análisis de resultados	74
7. Conclusiones	76
8. Recomendaciones	77
8.0.1. Futuros Proyectos	77
8.0.2. Mejoras al Laboratorio	77
9. Anexos	81
9.1. Especificaciones técnicas proporcionadas por el fabricante DAWN-CAP	81

Índice de figuras

1. Recursos Disponibles en el laboratorio de alta tensión	23
2. Transformador de pruebas del laboratorio de alta tensión	24
3. Voltmetro pico (HV9150), Voltmetro DC (HV9151), Voltmetro de impulsos (HV9152), Salida del transformador de regulación de voltaje y corriente	25
4. Área de operación del panel de control	26
5. Osciloscopio del laboratorio de alta de tensión	27
6. Puesta a tierra del laboratorio	28

7.	Barras conductoras HV9108	29
8.	Barras conductoras HV9119 y HV9118	29
9.	Barras aisladoras del laboratorio	30
10.	Pedestales de piso para conexión, modelo HV9110	31
11.	Coronas de conexión, modelo HV9109	31
12.	Diodos del laboratorio de alta tensión	32
13.	Diodos con capacidad de 150 kV del laboratorio de alta tensión	33
14.	Capacitores HV9112 del laboratorio de alta tensión	34
15.	Capacitores HV9141 y HV9120 del laboratorio de alta tensión	34
16.	Capacitores HV9130 para captar señales de tipo impulso	35
17.	Capacitores de 25000 pF con tensión nominal de 150 kV del laboratorio de alta tensión.	35
18.	Resistencias y partidor resistivo HV9113 del laboratorio de alta tensión	36
19.	Partidor resistivo HV9113 y partidor resistivo $300M\Omega$ del laboratorio de alta tensión	37
20.	Pertiga del laboratorio de alta tensión	38
21.	Esferas de disrupción (HV9125) y separador de esferas (HV9126) del laboratorio de alta tensión	39
22.	Interruptor de puesta a tierra	40
23.	Circuito doblador de tensión	40
24.	Rediseño del circuito doblador de tensión	41
25.	Diseño del circuito BIL	42
26.	Simulación del circuito doblador de tensión	43
27.	Tiempo de muestreo de la señal	44
28.	Nivel de tensión aplicado al circuito	45
29.	Distribución del subsistema de condensadores (visualizado a la izquierda) y valores asignados a cada condensador (ubicados a la izquierda)	45
30.	Valores de resistencia y parámetros de la red snubber de los diodos	46
31.	Tensión de salida	46
32.	Visualización general de la señal de entrada y la señal de salida	47
33.	Tensión de entrada y tensión de salida observadas a corta distancia	47
34.	Validación por simulación del circuito doblador de tensión para la generación de impulsos tipo BIL	48
35.	Especificaciones de los condensadores empleados en la simulación del impulso tipo BIL	49
36.	Especificaciones de las resistencias empleadas en la simulación del impulso tipo BIL	49

37.	Análisis simulado del valor máximo alcanzado por la onda BIL	50
38.	Análisis simulado del nivel correspondiente al 50 % del valor pico de la onda BIL	50
39.	Primera parte de circuito BIL. (Rectificación)	51
40.	Segunda parte de circuito BIL. (Generación de Impulsos)	52
41.	Circuito Doblador mas Ensayo BIL	53
42.	Rediseño del circuito doblador mas Ensayo BIL	54
43.	Doblador de tensión con un único capacitor de 150 kV	57
44.	Disposición del megger para la prueba de los diodos	58
45.	Valores de resistencia del diodo de 140 kV en polarización directa (parte superior) e inversa (parte inferior)	58
46.	Valores de resistencia del diodo de 150 kV en polarización directa (parte superior) e inversa (parte inferior)	59
47.	Circuito Rectificador de onda completa	60
48.	Forma de onda obtenida en el circuito rectificador de onda completa	60
49.	Proceso de desmontaje del condensador de 150 kV	61
50.	Esquema de conexión utilizado para la verificación operativa de los condensadores	62
51.	Forma de onda obtenida del condensador en condiciones normales de funcionamiento	63
52.	Forma de onda obtenida del condensador con funcionamiento defectuoso	63
53.	Condensador DAWNCAP, 15 000 pF / 50 kV	64
54.	Reducción interna de la cápsula dieléctrica mediante proceso de mecanizado	65
55.	Proceso de llenado al vacío con aceite dieléctrico en los condensadores de 150 kV	65
56.	Configuración del circuito rectificador tras la reposición de condensadores	66
57.	Señal de salida obtenida en el ensayo del circuito rectificador con condensadores de 150 kV restaurados	67
58.	Circuito Doblador de Tensión	69
59.	Partidor Resistivo con Puente	70
60.	Esquema del circuito duplicador de voltaje utilizado en ensayos con impulsos BIL	72
61.	Ensayo Doblador de Tension mas ensayo BIL Final	72
62.	Onda con un Frente de 1,2us	73
63.	Onda con la mitad del valor pico de 50 μ s	74

Índice de tablas

1.	Áreas del Trabajo de Grado	20
2.	Características del Transformador	24
3.	Descripción del panel de control	25
4.	Especificación del conjunto de mandos del panel de control	26
5.	Características Técnicas del Osciloscopio	27
6.	Características de las barras de conexión	28
7.	Características de la barra aislante	29
8.	Parámetros técnicos de la corona y el pedestal empleados en el laboratorio de alta tensión	30
9.	Diodos del laboratorio de alta tensión	32
10.	Características técnicas de los capacitores del laboratorio	33
11.	Resistencias disponibles en el laboratorio	36
12.	Tabla de Resultados	68
13.	Resultados Doblador de Tensión	71

“DESARROLLO DE UN CIRCUITO DOBLADOR DE VOLTAJE EN EL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN SEDE CUENCA PARA LA GENERACIÓN DE IMPULSOS BIL DE HASTA 200 kV”

1. Marco Teórico

1.1 Doblador de voltaje

El doblador de tensión fue desarrollado por el físico Heinrich Greinacher basado en un circuito detector de picos en 1913 sin embargo, su desarrollo y aplicación más amplia se publicó en 1921 [2]. El diseño utiliza un condensador que se carga a través de un diodo durante una media onda de la corriente alterna (AC) y transfiere esa carga a un segundo condensador en la media onda siguiente. Este proceso resulta en un voltaje de salida que es aproximadamente el doble del voltaje pico de la entrada, lo que da origen al concepto de doblador de tensión.

Posteriormente los físicos John Cockcroft y Ernest Walton en 1930 [3] adaptaron el doblador de tensión de Greinacher en su búsqueda por acelerar protones a altas velocidades para bombardear núcleos atómicos. Inspirados en los trabajos previos, desarrollaron el multiplicador Cockcroft-Walton, un sistema basado en una cadena de diodos y condensadores que permitía obtener tensiones mucho más elevadas que los sistemas convencionales de la época. Este aparato generaba tensiones de hasta 700 kV, lo que fue suficiente para acelerar protones y colisionarlos con núcleos de litio, logrando la división del núcleo en partículas más pequeñas, como el helio.

Un doblador de tensión es un circuito eléctrico que convierte una señal de corriente alterna (AC) en corriente continua (DC), generando un voltaje de salida aproximadamente el doble del voltaje de entrada. Este tipo de circuito utiliza una combinación de diodos y condensadores para realizar la conversión. Este circuito se emplea cuando se requiere obtener un voltaje más alto a partir de una fuente de voltaje más baja sin recurrir a transformadores. Su funcionamiento se basa en la carga y descarga de condensadores durante distintas fases del ciclo de una señal de corriente alterna (AC). Durante el semiciclo positivo, un condensador se carga al voltaje pico de la fuente a través de un diodo, acumulando carga. En el semiciclo negativo, un segundo

condensador se carga con el doble del voltaje de entrada, ya que el voltaje almacenado en el primer condensador se suma al de la señal de entrada. Esto permite generar un voltaje de salida mayor.

Los dobladores de tensión consisten en un circuito compuesto por diodos y condensadores. En 2013 [4] y 2015 [5] respectivamente, la Universidad Politécnica Salesiana, como resultado de proyectos de titulación previos, diseñó y construyó dos diodos de potencia con un voltaje inverso ánodo-cátodo de 150 kV con una corriente nominal de 50 mA, así como dos condensadores de 25000 pF y una resistencia de medición de 300 M Ω con una tensión de 150 kV. Los implementos desarrollados en estos proyectos facilitarán significativamente el diseño y la construcción del doblador de tensión para ensayos tipo BIL de hasta 200 kV propuesto en este trabajo.

1.1.1 Diodo

El diodo es un componente electrónico que permite el flujo de corriente en una única dirección. El primer diodo, conocido como válvula Fleming o diodo de vacío, fue creado por John Ambrose Fleming en 1904 [6] y se utilizó inicialmente en radios para rectificar señales de radiofrecuencia. Posteriormente, en 1939 [7], el ingeniero Russell Ohl desarrolló el diodo de silicio, el cual se utiliza en circuitos de dobladores de tensión modernos debido a su capacidad para manejar altos voltajes y corrientes.

El diodo está compuesto por una unión de dos materiales semiconductores: uno tipo P y otro tipo N. Su función principal es actuar como un interruptor unidireccional, permitiendo el paso de corriente únicamente cuando se encuentra en polarización directa. Esto ocurre cuando el voltaje aplicado permite que los electrones del lado N se desplacen hacia el lado P y se combinen; es decir, cuando el terminal positivo está conectado al lado P y el terminal negativo al lado N. En el contexto del doblador de tensión, los diodos controlan el flujo de corriente en una sola dirección, permitiendo que los condensadores se carguen y evitando que se descarguen en la dirección opuesta.

1.1.2 Condensador

Un condensador es un componente electrónico que almacena energía en un campo eléctrico entre dos placas conductoras, separadas por un material aislante conocido como dieléctrico. El primer condensador, desarrollado por Ewald Georg von Kleist y Pieter van Musschenbroek

en 1745 [8], representó un intento exitoso de almacenar una carga eléctrica de manera controlada. Posteriormente, en 1887 [9], Charles Pollak introdujo el primer condensador electrolítico, al darse cuenta de la importancia del electrolito para proporcionar estabilidad a una capa de óxido en el electrodo. Este avance permitió la creación de condensadores con alta capacidad.

Cuando se aplica una tensión a un condensador, los electrones se acumulan en una de las placas, generando una carga negativa, mientras que la otra placa adquiere una carga positiva. El dieléctrico actúa como un aislante, evitando que las cargas se combinen y manteniendo así la energía almacenada. El condensador puede descargarse rápidamente al conectarse a un circuito, liberando la energía acumulada. En el contexto del doblador de tensión, los condensadores almacenan energía eléctrica durante ambos semiciclos de corriente alterna (AC), lo que permite la acumulación de voltaje.

1.2 Ensayos Tipo BIL

En 1930 [10], se desarrolló uno de los primeros estudios enfocados en cómo las tormentas eléctricas afectan a los sistemas de alta tensión, centrándose en la investigación de descargas atmosféricas en un sistema de transmisión de 220 kV. El objetivo de esta investigación era mejorar la protección contra rayos. A lo largo de 114 millas de circuito, se utilizaron dispositivos avanzados, como oscilógrafos de rayos catódicos y registradores de sobretensión, para analizar la magnitud, forma y duración de las sobretensiones. Los resultados indicaron que las líneas sin cables de tierra eran más vulnerables a descargas directas y fallos en los aisladores, mientras que las secciones protegidas presentaban menos daños. Se registraron sobretensiones de hasta 2400 kV, lo que destaca la necesidad de contar con altos niveles de aislamiento para prevenir fallos. El estudio propone mejorar la protección de las líneas a través de una mejor distribución de cables de tierra y un aislamiento robusto, con el fin de minimizar interrupciones y daños en el sistema.

En 1937 [11], se introdujeron los primeros conceptos relacionados con los ensayos tipo BIL (Basic Insulation Level), a través de un estándar publicado por la AIEE (hoy conocida como IEEE). Este estándar describía cómo las pruebas BIL se convirtieron en una herramienta clave para la coordinación del aislamiento en sistemas eléctricos. Estas pruebas permiten establecer niveles de protección adecuados para los

transformadores, considerando las condiciones operativas y los niveles esperados de sobretensión. El ensayo BIL ha sido esencial para asegurar la seguridad y fiabilidad de los transformadores frente a eventos como rayos y sobrevoltajes, permitiendo la estandarización de pruebas y garantizando que los transformadores operen de manera confiable bajo condiciones de alta tensión, minimizando así el riesgo de fallos catastróficos en los sistemas eléctricos.

En los años siguientes, se continuaron mejorando las normativas en el ámbito de Técnicas de Pruebas de Alta Tensión, donde los ensayos BIL (Basic Insulation Level) desempeñaron un papel fundamental al proporcionar un criterio uniforme para evaluar la resistencia al impulso. Esto ha sido clave para evitar fallos catastróficos en equipos como transformadores y líneas de transmisión. Los procedimientos de prueba garantizan que los equipos cumplan con los requisitos de aislamiento necesarios para operar de manera segura bajo condiciones extremas. La normativa vigente, el estándar IEEE 4-2013 [1], define los métodos y técnicas para pruebas de alta tensión aplicables a una variedad de equipos y escenarios, incluyendo voltajes alternos, voltajes directos, impulsos de rayo, impulsos de conmutación y corrientes de impulso.

Actualmente los ensayos tipo BIL [1] son pruebas críticas para evaluar la capacidad de los equipos eléctricos de resistir sobrevoltajes transitorios causado por fenómenos como descargas atmosféricas y longevidad de los equipos eléctricos, especialmente en aquellos que operan en redes de alta tensión, como transformadores y líneas de transmisión. La onda tipo BIL [12], definida por el estándar IEC 60060-1, se ha mantenido constante desde 1962. Esta onda estándar se caracteriza por tener un tiempo de frente de 1.2 microsegundos y un tiempo de caída a la mitad de 50 microsegundos. Estos parámetros se derivan de estudios realizados en los años 1920 y 1930, principalmente en los Estados Unidos, donde se observó que estas características representaban adecuadamente las descargas atmosféricas observadas en sistemas eléctricos reales. La definición de la onda tipo BIL tiene sus raíces en las observaciones de descargas eléctricas en el sistema de transmisión de 220 kV de la Pennsylvania Power and Light Company en 1929. Estas observaciones mostraron que el tiempo de frente de la onda variaba entre 4 y 10 microsegundos, mientras que el tiempo de caída a la mitad oscilaba entre 9 y 50 microsegundos. Posteriormente, los estándares europeos y americanos unificaron esta definición en la que

hoy conocemos como la onda tipo BIL de 1.2/50 us, garantizando que la prueba refleje las condiciones más adversas que un equipo eléctrico pueda enfrentar debido a sobrevoltajes.

1.3 Normativas

1.3.1 Parámetros y Ejecución de los Ensayos BIL (IEEE Std 4TM-2013)

El estándar IEEE Std 4TM-2013 [1], que regula las técnicas de prueba de alta tensión, establece directrices precisas para la realización de ensayos BIL. Estos ensayos verifican que los equipos eléctricos puedan soportar los picos de tensión generados por fenómenos como rayos y maniobras de conmutación, asegurando la integridad del aislamiento en condiciones extremas.

Parámetros Clave en los Ensayos BIL: Los ensayos BIL implican la aplicación de un voltaje de impulso que imita los efectos de un rayo. El impulso estándar tiene un frente de 1.2 us y un tiempo a la mitad de 50 us, simulando de manera realista las condiciones de operación.

Los parámetros clave que deben seguirse incluyen:

- Impedancia de los equipos: Se evalúa la resistencia del equipo a las corrientes de impulso para evitar fallas por descargas disruptivas, que pueden ocurrir si el equipo no soporta el voltaje de prueba.
- Repetición y secuencia: Es esencial aplicar múltiples impulsos para verificar la consistencia del aislamiento bajo estrés repetitivo.
- Polaridad: Los impulsos se aplican tanto en polaridad positiva como negativa, ya que las condiciones de campo pueden variar según el tipo de descarga atmosférica o maniobras de conmutación.

Corrección por Condiciones Atmosféricas: Una parte esencial de los ensayos BIL es la corrección atmosférica, que ajusta los resultados a condiciones de referencia estándar, típicamente a nivel del mar, con una temperatura de 20°C y una presión de 101.3 kPa. Esta corrección es crucial, ya que las variaciones en la presión atmosférica, temperatura y humedad pueden influir en los resultados de los ensayos. El estándar incluye fórmulas y métodos para realizar estas correcciones. Por ejemplo, se utiliza un factor de corrección atmosférica (K) para ajustar el voltaje de prueba según las condiciones reales, garantizando que los ensayos sean precisos y comparables entre diferentes ubicaciones.

Procedimiento de Prueba: El procedimiento estándar de los ensayos BIL sigue una secuencia estricta para asegurar la validez de los resultados. Las pruebas deben realizarse en condiciones controladas, y los equipos sometidos a prueba deben recibir múltiples impulsos de alta tensión para confirmar que el aislamiento soporta el estrés eléctrico sin fallas. Los pasos principales son:

- **Preparación del equipo de prueba:** Se verifica que los medidores de voltaje, generadores de impulso y otros instrumentos estén calibrados y en buen estado.
- **Aplicación de impulsos:** Se aplican impulsos de voltaje al equipo en prueba, incrementando el voltaje progresivamente hasta alcanzar el nivel de BIL especificado.
- **Evaluación de resultados:** Se registran los resultados, observando cualquier signo de falla en el aislamiento, como descargas disruptivas o cortocircuitos. Cualquier anomalía detectada debe ser investigada, y si es necesario, se deben repetir las pruebas para validar los resultados.

1.3.2 Guía para la Selección de Niveles de Aislamiento (IEEE Std C62.82.2-2022)

El estándar IEEE Std C62.82.2-2022 [13] proporciona directrices sobre la selección de niveles de aislamiento en sistemas trifásicos de corriente alterna que operan a más de 15 kV. Este estándar complementa los ensayos BIL al definir parámetros y técnicas para la coordinación de aislamiento, asegurando un diseño óptimo que resista sobrevoltajes de origen atmosférico y de conmutación.

Criterios de Diseño:

- **Selección del nivel de aislamiento:** Se debe elegir un nivel que equilibre la protección del equipo y la viabilidad económica, capaz de resistir sobrevoltajes máximos sin fallas.
- **Tipo de sobrevoltajes:** Los sistemas eléctricos deben estar protegidos contra tres tipos de sobrevoltajes:
 - **Temporales:** Causados por fallas en la línea o condiciones anormales como rechazos de carga.
 - **De conmutación:** Asociados con maniobras de energización y desenergización de líneas.

- **Atmosféricos:** Provocados por rayos, caracterizados por ser rápidos y de alta magnitud.

Parámetros para la Coordinación de Aislamiento:

El estándar recomienda el uso de métodos matemáticos y simulaciones para analizar tensiones transitorias y determinar los niveles de aislamiento necesarios. Esto incluye el cálculo de distancias de fuga, la selección de pararrayos y la determinación del tiempo de respuesta de los equipos de protección.

Además, se destaca la importancia de ajustar los parámetros de prueba para diferentes entornos operativos, como sistemas aislados en gas o subestaciones exteriores, que pueden requerir niveles de aislamiento más altos debido a condiciones ambientales extremas.

1.4 Software Simulink de matlab

Simulink es una plataforma computacional que permite desarrollar simulaciones mediante la representación gráfica de sistemas dinámicos. Está integrada en el entorno de MATLAB y se caracteriza por utilizar diagramas de bloques como base para el modelado. Esta herramienta facilita el diseño y análisis de sistemas provenientes de diversas áreas de la ingeniería, incluyendo sistemas eléctricos, mecánicos, electrónicos, de control y fluidos, entre otros.

A través de su interfaz visual, es posible construir modelos conectando bloques funcionales que simulan ecuaciones, componentes físicos o procesos automáticos. Esta estructura permite observar el comportamiento del sistema en distintas condiciones, ya sea en tiempo continuo, discreto o una combinación de ambos, lo cual resulta útil para validar el funcionamiento previo a su implementación real.

Simulink también dispone de bibliotecas complementarias que enriquecen su utilidad, como Simscape, orientada al modelado físico; Power Systems, enfocada en redes eléctricas; y otras destinadas al control y procesamiento de señales. Estas bibliotecas amplían el rango de aplicaciones posibles dentro del entorno de simulación.

Debido a su integración con MATLAB, es posible complementar los modelos con algoritmos personalizados, análisis numéricos y automatización de tareas. Por estas razones, Simulink se considera una herramienta fundamental en el ámbito académico y profesional, ya que contribuye significativamente en el desarrollo de proyectos de investigación, enseñanza técnica y diseño de soluciones en ingeniería

2. Áreas del Trabajo de Grado para ABET

Tabla 1: Áreas del Trabajo de Grado

Título del Trabajo:	Accesibilidad	Estética	
Restricciones múltiples (dos o más)	Códigos	Construibilidad	3,5
	Costos	Ergonomía	
	Extensibilidad	Funcionalidad	5
	Interoperabilidad	Consideraciones Legales	
	Mantenibilidad	5,3, 5,4 Manufacturabilidad	
	Mercadeo	Política	
	Regulaciones	5,1 Cronogramas	
	Normativas	5,7 Sostenibilidad	
	Impacto Ambiental	5,3 Impacto Social	
	Usabilidad	Otros:	
Normas relevantes (dos o más)	IEEE Std 4™-2013		
	IEEE Std C62.82.2-2022		
Elementos del proceso	Identificación de oportunidades	Generación de soluciones múltiples	4,4
	Desarrollo de requerimientos	Evaluación de soluciones	5,6.
	Procesos iterativos	Consideración de riesgos	5,1, 5,2
	Realizar compromisos o tratados		
Basado en trabajos anteriores	Protecciones	Iluminación	
	Optimización de sistemas	Alta Tensión	3,1,8
	Energías alternativas	Distribución	
	Máquinas eléctricas	Otros temas	

De la Tabla 1 se desprende que las restricciones múltiples aplicables a este trabajo incluye los siguientes aspectos:

- **Mantenibilidad:** En la sección 5.2, 5.3, 5.4 se identificó la necesidad de realizar un diagnóstico técnico para detectar y reemplazar componentes defectuosos, tales como condensadores y diodos. Como parte de este proceso, se implementó un mantenimiento correctivo que incluyó la reparación, verificación funcional y reutilización de los elementos que presentaban fallas, garantizando así la operatividad del sistema bajo condiciones de alta tensión.
- **Impacto Ambiental:** En las secciones 5.3 se priorizó el reacondicionamiento de componentes, como los condensadores con aceite dieléctrico, con el objetivo de reducir el desperdicio electrónico. Esta práctica se alinea con los principios de sostenibilidad en ingeniería, promoviendo el uso responsable de los recursos y la extensión de la vida útil de los equipos.
- **Regulaciones:** En la sección 5.1 se cumplieron los parámetros técnicos y normativas de seguridad establecidos para laboratorios de alta tensión, considerando criterios esenciales como la correcta puesta a tierra, el manejo seguro de tensiones elevadas y la aplicación de medidas operativas que garanticen la integridad del personal y de los equipos durante los ensayos.
- **Normativas:** Se adoptaron estándares internacionales para garantizar la validez y confiabilidad de los ensayos. En particular, se aplicó la norma IEEE Std 4TM-2013 aplicado en la sección 5.7 para la ejecución de pruebas de impulso tipo BIL, y se consideró la norma IEEE Std C62.82.2-2022 como referencia para la selección adecuada de los niveles de aislamiento eléctrico en los componentes sometidos a alta tensión.
- **Constructibilidad:** En la sección 3.5 se llevó a cabo una evaluación integral de los recursos técnicos disponibles en el laboratorio de alta tensión, incluyendo transformadores, diodos, capacitores, paneles de control, osciloscopios y elementos de conexión. A partir de este análisis, se optimizó el uso de dichos recursos para garantizar una implementación funcional y segura del sistema propuesto.
- **Funcionalidad:** El circuito fue diseñado con el objetivo de generar impulsos tipo BIL, lo cual exigió el cumplimiento de criterios rigurosos de rendimiento, tanto en la etapa de simulación como en la validación

experimental, considerando la necesidad de alcanzar tensiones cercanas a los 200 kV. Todo esto expuesto en la sección 5.

Así como también se identifica algunos elementos del proceso:

- **Generacion de soluciones multiples:** En la sección 4.4 se evaluaron diversas alternativas, incluyendo el uso de diferentes configuraciones para el diseño del doblador de tensión, comparando su rendimiento mediante simulaciones realizadas en MATLAB-Simulink.
- **Evaluacion de soluciones:** La opción más adecuada fue seleccionada en función de las limitaciones técnicas del proyecto, expresado en la sección 5.6. Esta elección se fundamentó en simulaciones y análisis de resultados, complementados con la validación funcional mediante mediciones experimentales y representación gráfica de los datos obtenidos a través de MATLAB y un osciloscopio.
- **Consideracion de riesgos:** En las secciones 5.1, 5.2 durante la fase de validación práctica, se identificaron fallas atribuibles a interrupciones eléctricas. Como resultado, se llevaron a cabo pruebas de resistencia dieléctrica, un análisis exhaustivo de las fallas en los componentes involucrados, y se procedió al rediseño del circuito para mitigar dichas fallas.

Adicional se tiene basados en trabajos anteriores:

- **Alta Tension:** Se emplearon componentes desarrollados en investigaciones previas realizadas en el mismo laboratorio como los componentes mostrados en las secciones 3.1.7, 3.1.8, lo que refleja una continuidad académica en el avance de soluciones para aplicaciones de alta tensión.

3. CAPITULO 1: DISEÑO DEL CIRCUITO DOBLADOR DE TENSIÓN Y ENSAYOS BIL

3.1 Recursos Disponibles

En este capítulo se presentan los criterios utilizados para el diseño del circuito doblador de tensión en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca. Para ello, se describen los elementos disponibles en el laboratorio que permiten la realización de diversas pruebas. Además, se lleva a cabo una simulación en el software MATLAB R2023b con el objetivo de analizar el funcionamiento y el comportamiento del circuito.



Figura 1: Recursos Disponibles en el laboratorio de alta tensión

3.1.1 Transformador de Pruebas

En la tabla 2 se presentan las características técnicas del transformador utilizado en el laboratorio, y en la figura 2 se muestra una fotografía del equipo.

Transformador de Pruebas							
Modelo	Serie	Frecuencia	Impedancia de voltaje	Conexión	Conexión Primaria	Conexión Secundaria	Vrms Secundario
HV9105	T-10380	60 Hz	5%	220 V	ua con ub y va con vb	U con V	100 kV
				440 V	ub con va		

Tabla 2: Características del Transformador



Figura 2: Transformador de pruebas del laboratorio de alta tensión

3.1.2 Panel de control

La tabla 3 presenta el modelo y la descripción de las pantallas que conforman el panel de control, mientras que la figura 3 muestra una imagen referencial del mismo.

Panel de Control		
Modelo	Elementos	Descripción
HV9103	HV9150	Medición de voltaje alterno
	HV9151	Medición de voltaje continuo
	HV9152	Medición de voltaje de impulso
	Voltaje	Medición del voltaje en el primario
	Corriente	Medición de corriente en el primario
	Conectores	Conexión para el osciloscopio y tierra

Tabla 3: Descripción del panel de control

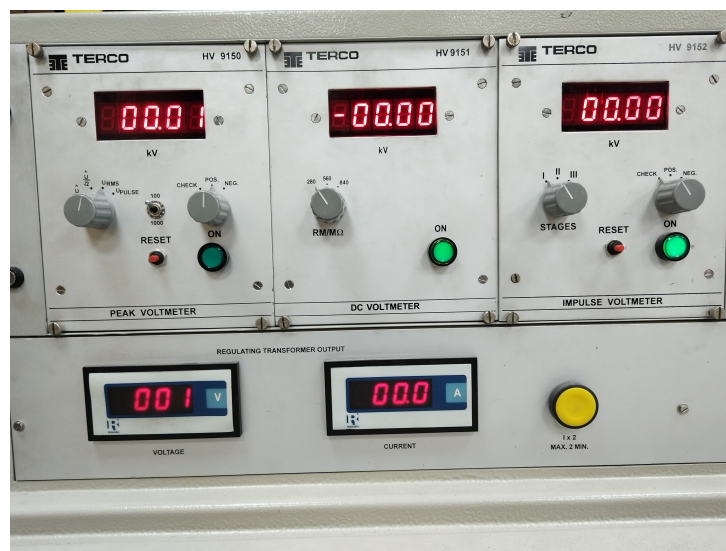


Figura 3: Voltmetro pico (HV9150), Voltmetro DC (HV9151), Voltmetro de impulsos (HV9152), Salida del transformador de regulación de voltaje y corriente

En la tabla 4 se presenta la descripción del panel de control y de cada uno de los elementos que lo conforman, a través de los cuales se gestiona su funcionamiento. Por su parte, en la figura 4 se muestra una fotografía del panel.

Tabla 4: Especificación del conjunto de mandos del panel de control

Mando del panel de control	
Color	Descripción
Rojo 1	Pulsante de Emergencia
Verde 1	Interruptor de inicio
Plata	Llave que habilita el panel de control
Negro 1	Pulsante que activa la bocina
Amarillo	Pulsante que activa el secundario del transformador cuando exista un valor de voltaje establecido
Azul 1	Perilla que permite activar el motor de HV9133
Azul 2	Perilla que permite activar el motor de HV9126
Verde 2	Pulsante que activa el primario del transformador
Verde 3	Pulsante que activa el secundario del transformador
Rojo 2	Luz que indica que hay tensión en el secundario del transformador
Rojo 3	Pulsante que desactiva el primario del transformador
Rojo 4	Pulsante que desactiva el secundario del transformador
Verde 4	Luz que indica que algún elemento está colocado a tierra
Negro 2	Pulsante que deshabilita las luces del panel de control
Rojo 5	Pulsante elevador y reductor de tensión (Precisión)
Rojo 6	Pulsante elevador y reductor de tensión (Velocidad)



Figura 4: Área de operación del panel de control

3.1.3 Osciloscopio

En la tabla 5 se detallan las especificaciones técnicas del osciloscopio disponible en el laboratorio de alta tensión, mientras que en la figura 5 se muestra una imagen del equipo.

Tabla 5: Características Técnicas del Osciloscopio

Modelo	GDS-1102a
Ancho de Banda	100 MHz
Frecuencia de Muestreo	1 GSa/s Tiempo real
	25 GSa/s Tiempo equivalente
Point Record Length	2 Mega
Escala Vertical	2 mV ~ 10 V
Escala Horizontal	1 ns ~ 50 s
Medidas Automáticas	27
Funciones Matemáticas	+, -, x, FFT, FFTrms
Visualización	5,6" TFT LCD
Interfaz	USB compatible con tarjeta SD
Soporte Multi-idioma en la Operación del menú y en la pantalla de ayuda	



Figura 5: Osciloscopio del laboratorio de alta de tensión

3.1.4 Sistema de conexión a tierra del laboratorio

El laboratorio de alta tensión cuenta con un sistema de puesta a tierra mediante una malla independiente, cuya resistencia es de $0,6 \Omega$. Las conexiones están distribuidas de la siguiente manera: el primer terminal, de derecha a izquierda, con un cable verde con amarillo, está destinado al equipo HV9133; el segundo punto se utiliza para la conexión a tierra del transformador y del piso donde se ubican los distintos dispositivos; y el tercer punto sirve para aterrizar la jaula de protección que asegura la distancia de seguridad.

La figura 6 presenta una imagen donde se pueden observar las conexiones del sistema de puesta a tierra instaladas en el laboratorio.



Figura 6: Puesta a tierra del laboratorio

3.1.5 Barras de Conexión y Barras aislantes

La tabla 6 presenta las especificaciones de las barras de conexión utilizadas en el laboratorio. Por otro lado, en la figura 7 se muestran las barras correspondientes al modelo HV9108, mientras que en la figura 8 se exhiben las barras de los modelos HV9119 y HV9118.

Tabla 6: Características de las barras de conexión

Barras de Conexión				
Modelo	Longitud	Diámetro	Unidades (#)	Aplicación
HV9108	67 cm	3,3 cm	6	Unión en la zona superior de los componentes
HV9119	67 cm	3,3 cm	5	Unión en la zona inferior de los componentes
HV9118	56 cm	3,3 cm	1	Unión en la parte inferior del HV9133

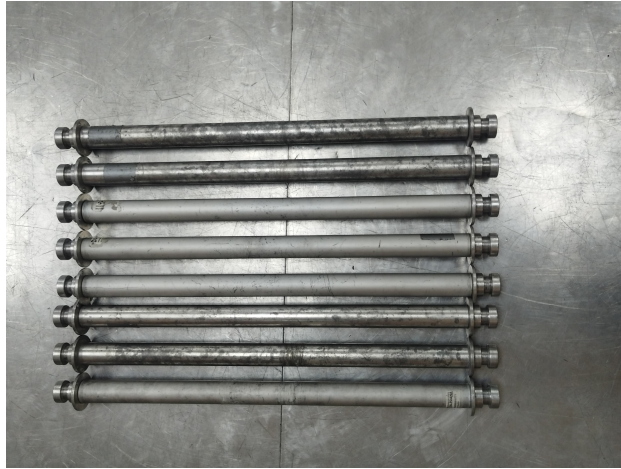


Figura 7: Barras conductoras HV9108

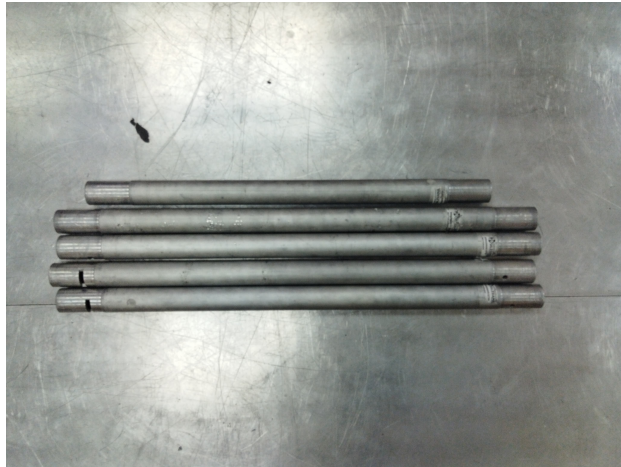


Figura 8: Barras conductoras HV9119 y HV9118

En la tabla 7 se detallan las propiedades de las barras aislantes utilizadas en el laboratorio, mientras que en la figura 9 se incluye una imagen representativa de dichas barras.

Tabla 7: Características de la barra aislante

Barra Aislante			
Modelo	Longitud	Unidades (#)	Aplicación
HV9124	67 cm	2	Protección aislante del circuito
—	35 cm	1	Protección aislante del circuito



Figura 9: Barras aisladoras del laboratorio

3.1.6 Corona de conexión y Pedestal de piso

En la tabla 8 se describen las especificaciones de la corona de conexión y del pedestal de piso. Asimismo, en la figura 10 se presenta una imagen de los pedestales de piso, mientras que en la figura 11 se muestran las coronas de conexión.

Tabla 8: Parámetros técnicos de la corona y el pedestal empleados en el laboratorio de alta tensión

Corona de conexión y Pedestal de piso		
Modelo	Unidades (#)	Descripción
HV9109	17	Dispositivo de conexión superior del circuito
HV9110	5	Pedestal de apoyo empleado en la conexión de los componentes

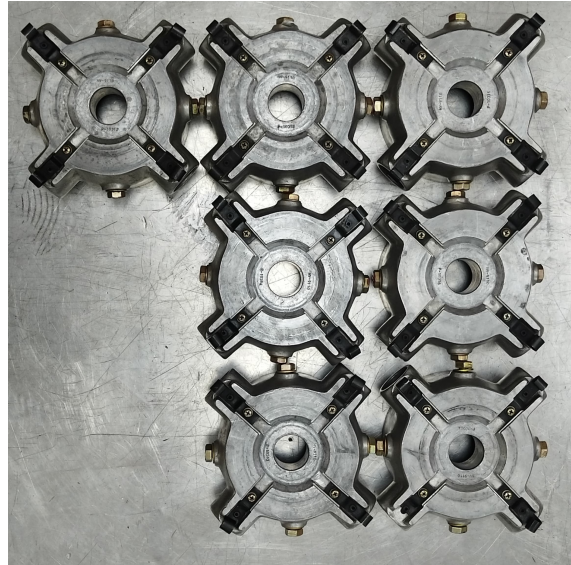


Figura 10: Pedestales de piso para conexión, modelo HV9110



Figura 11: Coronas de conexión, modelo HV9109

3.1.7 Diodos

En la Tabla 9 se detallan las especificaciones técnicas de los diodos utilizados en el laboratorio. Por su parte, la Figura 12 muestra una representación visual de los componentes disponibles, mientras que la Figura 13 ilustra los diodos que forman parte del diseño presentado en trabajos anteriores desarrollada con anterioridad [4].

Tabla 9: Diodos del laboratorio de alta tensión

Características Técnicas de los Diodos				
Modelo	Voltaje	Corriente	Ω Polarización Directa	Ω Polarización Inversa
HV9111	140 kV	20 mA	100 k Ω	1 T Ω
HV9111	140 kV	20 mA	100 k Ω	1 T Ω
—	150 kV	100 mA	76 k Ω	23.5 G Ω
—	150 kV	100 mA	76 k Ω	23.3 G Ω



Figura 12: Diodos del laboratorio de alta tensión



Figura 13: Diodos con capacidad de 150 kV del laboratorio de alta tensión

3.1.8 Capacitores

En la Tabla 10 se presentan las especificaciones técnicas de los capacitores disponibles en el laboratorio. Por otro lado, en la figura 14 se muestran imágenes del capacitor modelo HV9112; en la figura 15, los capacitores modelos HV9141 y HV9120; en la figura 16, el capacitor modelo HV9130; y en la figura 17, los capacitores con una tensión nominal de 150 kV, los cuales forman parte del diseño desarrollado en trabajos realizados previamente [5].

Tabla 10: Características técnicas de los capacitores del laboratorio

Características Técnicas de los Capacitores				
Modelo	Voltaje	Capacitancia	Unidades	Descripción
HV9141	100 kV	100 pF	1	Permite realizar un partidor capacitivo para tomar medición de voltaje alterno y continuo
HV9120	140 kV	1200 pF	1	
HV9130	150 kV	474.01 nF / Serie V10393 482.79 nF / Serie V12442	2	Complementa el partidor capacitivo.
HV9112	140 kV	25000 pF	2	Capacitor normal.
—	150 kV	25000 pF	2	Capacitor normal.



Figura 14: Capacitores HV9112 del laboratorio de alta tensión



Figura 15: Capacitores HV9141 y HV9120 del laboratorio de alta tensión

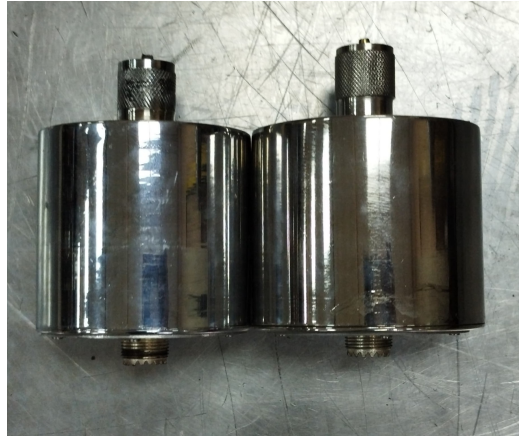


Figura 16: Capacitores HV9130 para captar señales de tipo impulso



Figura 17: Capacitores de 25000 pF con tensión nominal de 150 kV del laboratorio de alta tensión.

3.1.9 Resistencias

La Tabla 11 presenta las especificaciones técnicas de las resistencias utilizadas en el laboratorio, mientras que la figura 18 muestra una imagen de

dichos componentes. En el caso de las resistencias de $280M\Omega$ y $300M\Omega$, que se observan en la figura 19, se trata de dispositivos empleados en el laboratorio para la medición de voltaje en corriente continua (DC); en particular, la resistencia de $300M\Omega$ forma parte del diseño presentado en trabajos anteriores [5].

Tabla 11: Resistencias disponibles en el laboratorio

Características Técnicas de las Resistencias			
Modelo	Tensión	Valor Ohmico	Unidades (#)
HV9113	140 kV	$280 M\Omega$	1
HV9121	140 kV	$10 M\Omega$	2
HV9122	140 kV	350Ω	1
HV9123	140 kV	2400Ω	1
—	150 kV	300Ω	1



Figura 18: Resistencias y partidor resistivo HV9113 del laboratorio de alta tensión



Figura 19: Partidor resistivo HV9113 y partidor resistivo 300MΩ del laboratorio de alta tensión

3.1.10 Barra de conexión al sistema de tierra

La tabla 14 presenta las especificaciones técnicas de la barra destinada a la derivación a tierra disponible en el laboratorio, y la figura 20 ofrece una representación visual del mencionado componente.



Figura 20: Pertiga del laboratorio de alta tensión

3.1.11 Esferas de disrupción y separador de esferas

El modelo correspondiente a las esferas de disrupción es el HV9125, mientras que el del separador de esferas es el HV9126. Ambos dispositivos se emplean para llevar a cabo pruebas de disrupción mediante un impulso aplicado. El separador se encuentra conectado al HV9125 a través del panel de control, desde donde se realiza su operación. En la figura 21 se presenta una imagen de estos componentes.



Figura 21: Esferas de interrupción (HV9125) y separador de esferas (HV9126) del laboratorio de alta tensión

3.1.12 Interruptor de puesta a tierra

El modelo del interruptor de puesta a tierra utilizado es el HV9114, el cual establece contacto con el electrodo HV9138. Su función es aterrizar los componentes conectados a este, una vez que el circuito ha sido desenergizado mediante el panel de control. En la figura 22 se muestra una fotografía del dispositivo.

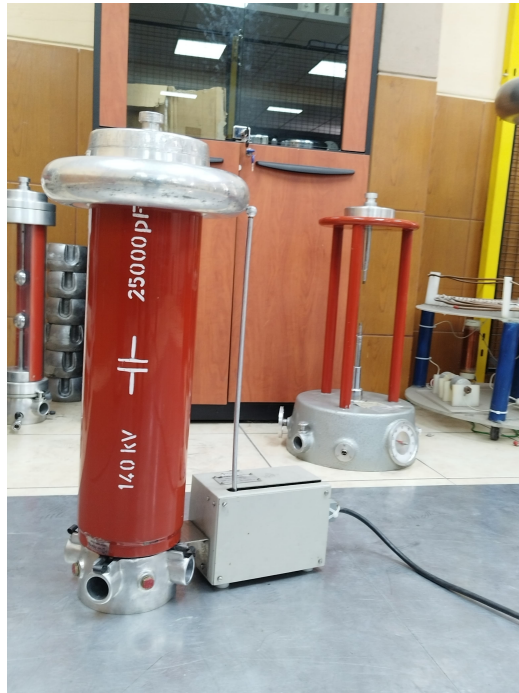


Figura 22: Interruptor de puesta a tierra

3.2 Diseño del doblador de tensión

Para el diseño del circuito doblador de tensión, se tomó como referencia el circuito doblador de Cockcroft-Walton, descrito previamente en el marco teórico. Esta configuración está compuesta por dos capacitores ($C1$ y $C2$) y dos diodos ($D1$ y $D2$), los cuales cumplen funciones específicas dentro del proceso de duplicación de la tensión, tal como se muestra en la Figura 23.

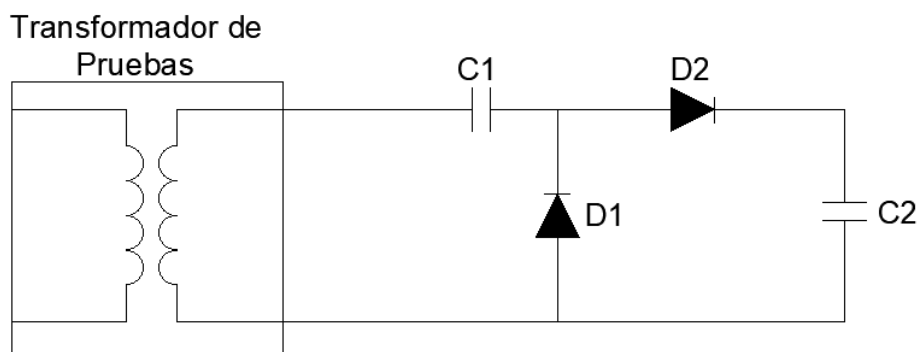


Figura 23: Circuito doblador de tensión

Con base en el circuito mostrado en la Figura 23, se realizó un análisis en el cual se identificó que el capacitor C2 no puede superar su tensión nominal de 150 kV. Considerando que alcanzar un nivel de tensión de 200 kV constituye el objetivo general del trabajo presente, se concluyó que era necesario incorporar un segundo capacitor con el mismo valor de tensión, con el fin de dividir el voltaje entre ambos y así alcanzar el nivel requerido. Asimismo, se integró un diodo en serie con el diodo D1 y otro en serie con el diodo D2, como medida de protección ante el elevado nivel de tensión, con el propósito elevar el voltaje inverso y salvaguardar los componentes del circuito y evitar posibles daños en los equipos. Como resultado de estas modificaciones, se presenta el circuito final en la Figura 24.

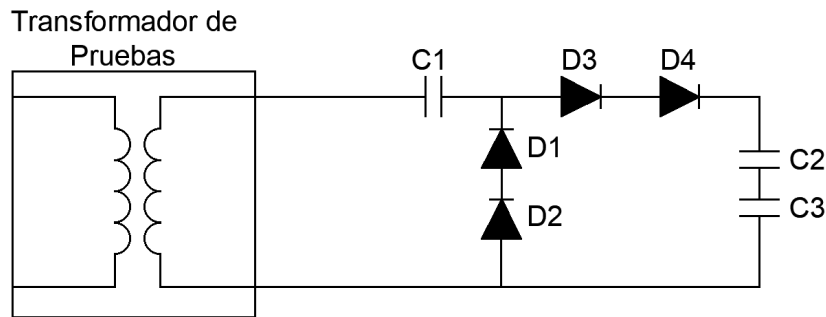


Figura 24: Rediseño del circuito doblador de tensión

3.3 Diseño del ensayo BIL

Para el diseño del circuito generador de impulsos tipo BIL (Basic Insulation Level), se tomó como referencia el manual técnico del fabricante TERCO [14], el cual sirvió como base para definir la topología del circuito, es decir, la disposición y conexión de sus elementos principales. En la simulación se utilizaron los valores reales de los componentes disponibles en el laboratorio, los cuales fueron seleccionados conforme a los parámetros necesarios para generar la forma de onda estándar de $1.2/50 \mu s$. Si bien en la simulación no se obtuvo una coincidencia exacta con dicha forma de onda, los resultados se aproximan de manera razonable, permitiendo generar una señal representativa del impulso tipo BIL, adecuada para fines de validación académica y análisis funcional.

El esquema del circuito puede observarse en la Figura 25. Este está conformado por dos capacitores (C1 y C2) y dos resistencias (R1 y R2), dispuestos de manera que permiten controlar tanto la pendiente de ascenso como la de descenso de la señal de impulso. El capacitor C1, actúa

como el principal elemento de almacenamiento de energía, mientras que la resistencia R1 regula su descarga inicial. Esta etapa del circuito define el tiempo de frente del impulso, es decir, la velocidad con la que la señal alcanza su valor máximo de tensión. El valor de R1, en conjunto con la capacidad de C1, determina la pendiente de esta fase inicial. Posteriormente, la energía restante se transfiere a través de la resistencia R2 hacia el capacitor C2, que actúa como carga del sistema. La interacción entre R2 y C2 permite modelar el tiempo de cola del impulso o fase de descenso, simulando la disipación progresiva de la energía característica de los impulsos tipo BIL.

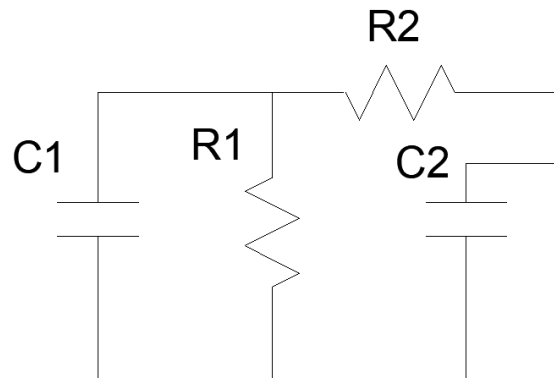


Figura 25: Diseño del circuito BIL

3.4 Simulación del circuito doblador de tensión mediante el software MATLAB

Una vez definido el diseño final del circuito, se procedió a realizar su simulación utilizando el software MATLAB, con el objetivo de evaluar su comportamiento y analizar su funcionamiento antes de su implementación práctica. Para ello, se emplearon los valores reales de los componentes disponibles en el laboratorio, replicando la configuración ilustrada en la Figura 24. En la simulación se incluyeron los capacitores C1, C2 y C3, cuyas características técnicas se detallan en la Tabla 10, así como los diodos utilizados, cuyas especificaciones se presentan en la Tabla 9. El esquema correspondiente a esta simulación se muestra en la Figura 26.

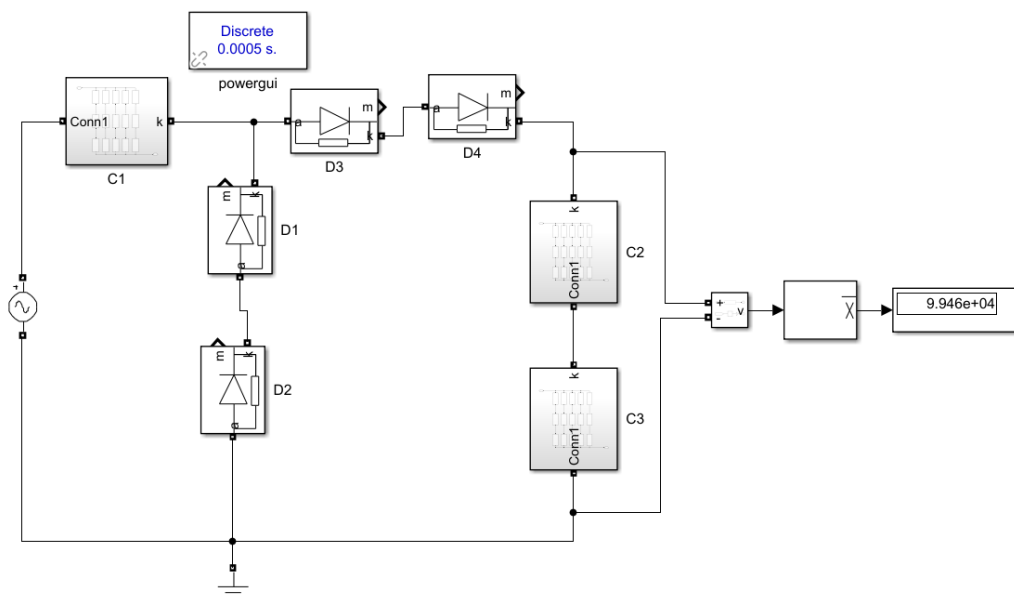


Figura 26: Simulación del circuito doblador de tensión

En el circuito representado en la figura 26, se observa que el bloque Powergui (utilizado para configurar el tiempo de muestreo de la señal) fue configurado en modo discreto, con un tiempo de muestreo de 0.0005 segundos. Esta configuración permite que la simulación recopile una mayor cantidad de datos, lo que facilita una mejor comparación entre la señal de entrada y la señal de salida, esta última ilustrada en la figura 33.

En la figura 28 se puede apreciar que el valor del voltaje de alimentación es de 50 kV. Por su parte, en la figura 29 se muestra uno de los subsistemas del circuito, el cual está conformado por 15 condensadores, distribuidos en tres filas y cinco columnas, cada uno con una capacitancia de 5000 pF. Esta disposición proporciona una capacitancia total de 25000 pF. Dicha configuración fue seleccionada debido a que se asemeja a la forma en que se construyen físicamente los condensadores en los laboratorios. Por esta razón, los condensadores C1, C2 y C3 fueron conectados siguiendo esta disposición.

En la misma figura 30 se presentan los valores de resistencia de los diodos. Los diodos D1 y D2 poseen una resistencia de $100k\Omega$, mientras que los diodos D3 y D4 presentan una resistencia de $1,63M\Omega$. Para la simulación, se asumió que la red snubber de los diodos tiene una resistencia muy elevada (idealmente infinita); por lo tanto, se utilizó un valor alto para su representación. En cuanto a la inductancia de dicha red, se asignó un

valor cercano a cero con el fin de simular su comportamiento ideal.

Cabe mencionar que, para esta simulación, los diodos no fueron modelados con la conexión en serie que normalmente poseen en su estructura interna. Esto se debe a que, al considerar dicha conexión y los respectivos valores de resistencia, el proceso de simulación se torna más lento y complejo. Por tal motivo, se optó por representar cada diodo con un único componente, al cual se le asignaron los valores indicados en la tabla 9 del capítulo 1.

Finalmente, en el display de medición, que utiliza el bloque Voltage Measurement (utilizado para medición de voltaje) del software MATLAB, se registra un valor de voltaje de 99.4 kV, como se muestra en la figura 31. Este valor evidencia la presencia de pérdidas en el circuito, atribuibles a la configuración de los distintos elementos que lo componen. No obstante, se comprobó que el circuito simulado opera de manera adecuada y cumple con su función prevista sin presentar inconvenientes.

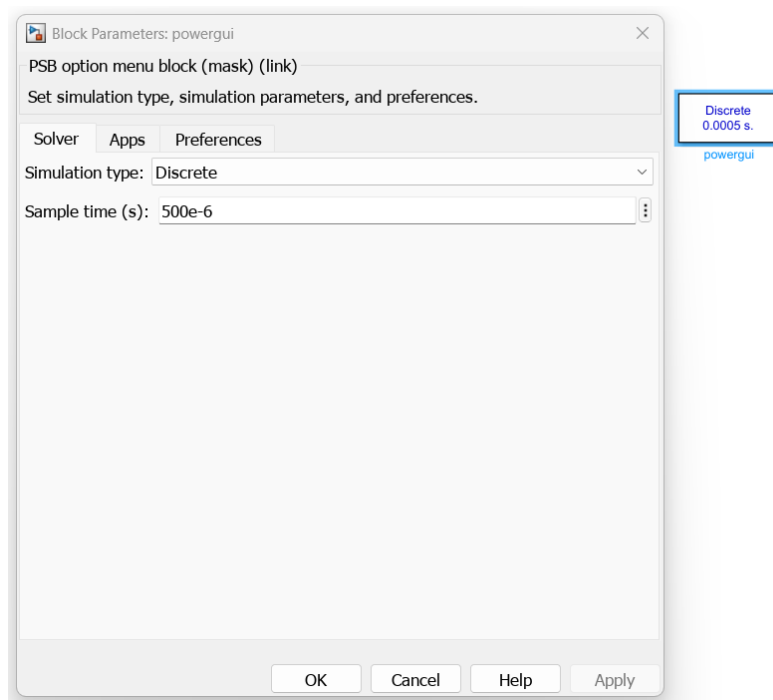


Figura 27: Tiempo de muestreo de la señal

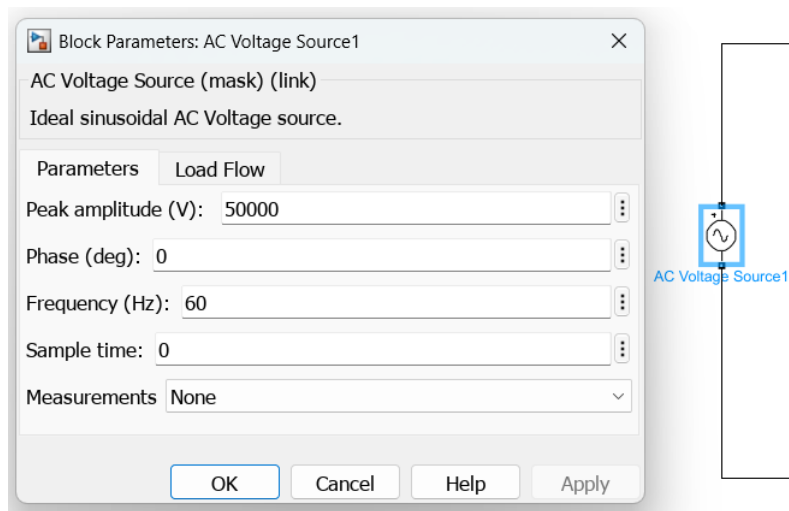


Figura 28: Nivel de tensión aplicado al circuito

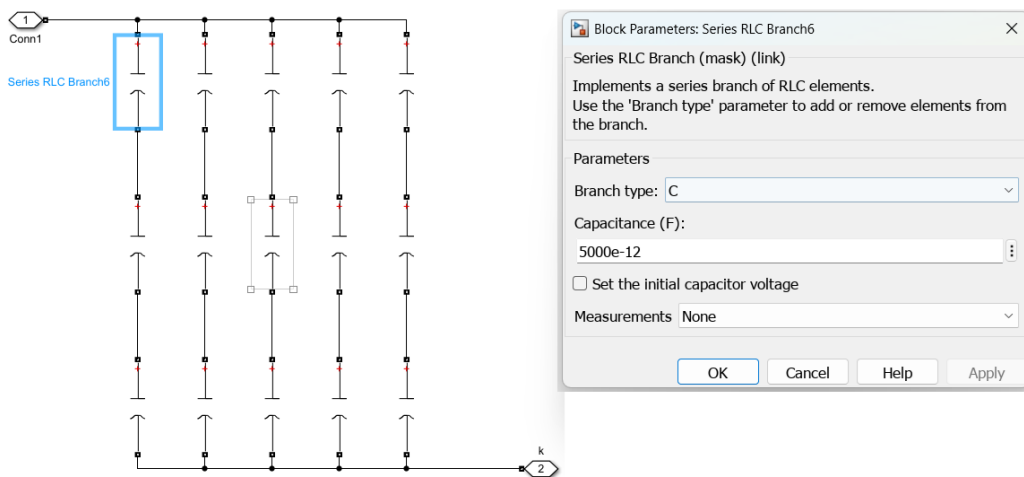


Figura 29: Distribución del subsistema de condensadores (visualizado a la izquierda) y valores asignados a cada condensador (ubicados a la izquierda)

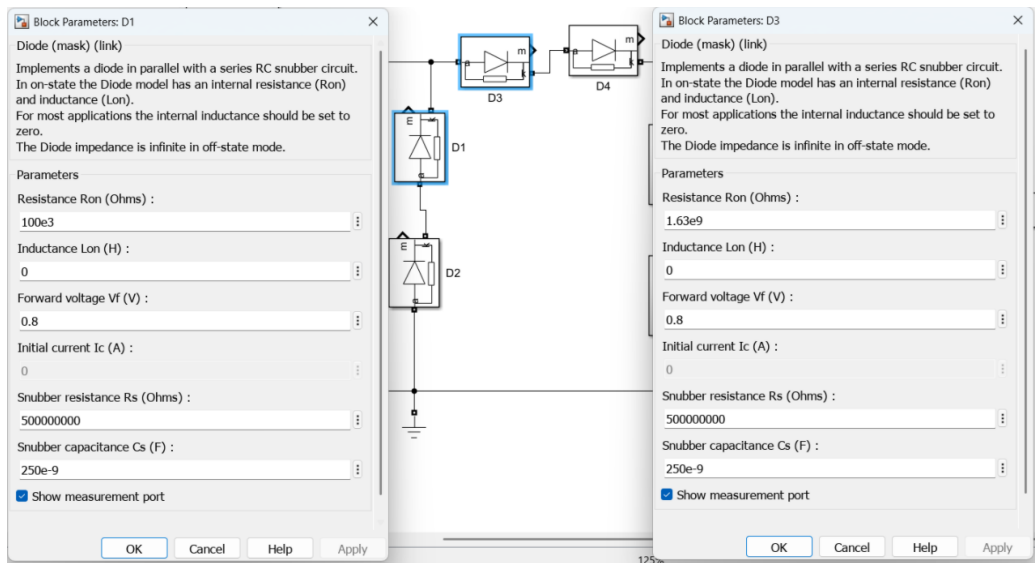


Figura 30: Valores de resistencia y parámetros de la red snubber de los diodos

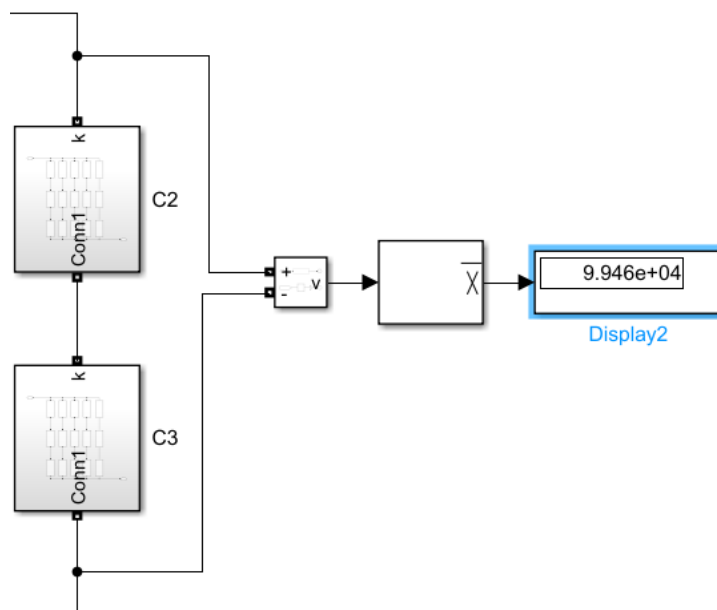


Figura 31: Tensión de salida



Figura 32: Visualización general de la señal de entrada y la señal de salida

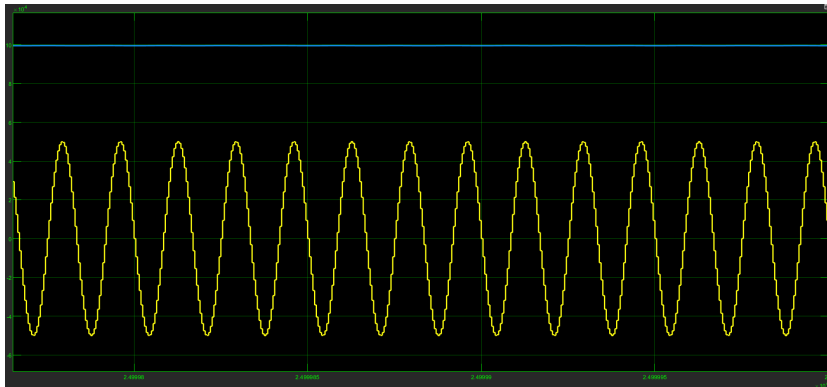


Figura 33: Tensión de entrada y tensión de salida observadas a corta distancia

En las Figuras 32 y 33 se presentan las señales de entrada y salida del circuito doblador de voltaje, obtenidas mediante simulación. La señal de color amarillo corresponde a la tensión de entrada del circuito y es de tipo alterna, proveniente directamente de la fuente de alimentación. Por otro lado, la señal de color azul representa la tensión de salida del circuito, la cual es de tipo continua como resultado del proceso de rectificación efectuado por los diodos.

Ambas figuras corresponden a una misma simulación con una duración total de 25000 segundos. La Figura 32, se observa una vista general de toda la simulación, donde se aprecia cómo la tensión de salida (azul) incrementa progresivamente hasta alcanzar un valor constante, lo cual se debe a la carga gradual de los condensadores del circuito.

La Figura 33 ofrece una vista ampliada de la misma simulación, en la que se pueden observar con mayor detalle las formas de onda. En esta imagen se distingue con claridad cómo la señal de salida (azul) va aumentando en valor conforme avanza el tiempo, a medida que los condensadores se cargan completamente. Asimismo, se puede ver con mayor precisión la señal de entrada alterna (amarilla) y su comportamiento periódico durante el proceso de rectificación.

3.5 Simulación del circuito BIL mediante el software MATLAB

Una vez definido el diseño final del circuito para generar impulsos tipo BIL, se procedió a realizar su simulación utilizando el software *MATLAB*, en conjunto con el circuito doblador de voltaje, con el propósito de evaluar el comportamiento del sistema y analizar su funcionamiento antes de su implementación práctica. Para ello, se utilizaron los valores reales de los componentes disponibles en el laboratorio, correspondientes al circuito doblador descrito en la Subsección 3.4. El esquema completo del montaje simulado se presenta en la Figura 34. En la simulación del ensayo BIL se emplearon valores reales de los implementos que poseen en el laboratorio: el condensador C_S fue de 25 000 pF y el condensador C_{Ext1} de 1,2 nF, cuyos valores se pueden observar en la Figura 35; mientras que la resistencia R_{e1} fue de 2 400 Ω y la resistencia R_{d1} de 350 Ω , mostradas en la Figura 36.

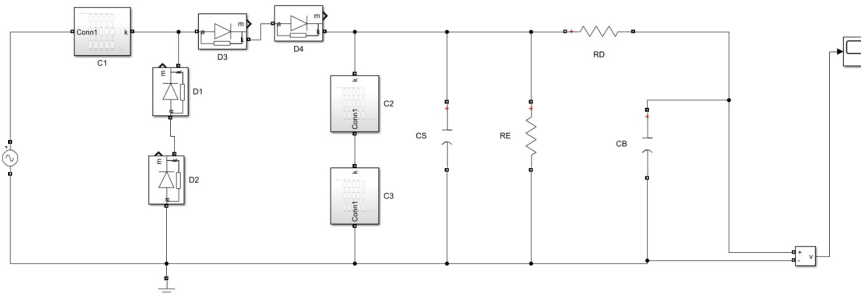


Figura 34: Validación por simulación del circuito doblador de tensión para la generación de impulsos tipo BIL

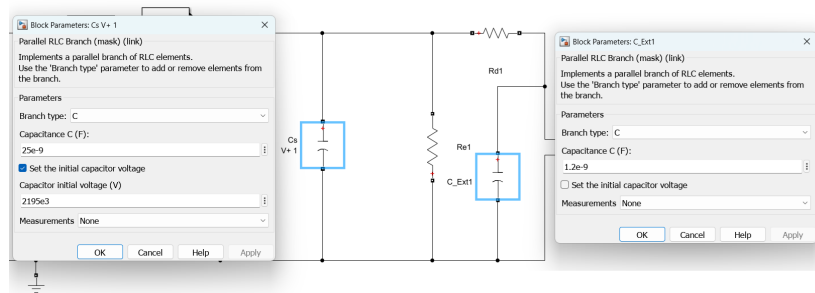


Figura 35: Especificaciones de los condensadores empleados en la simulación del impulso tipo BIL

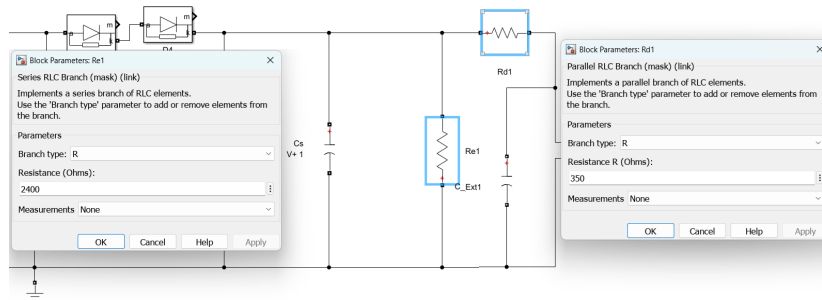


Figura 36: Especificaciones de las resistencias empleadas en la simulación del impulso tipo BIL

Una vez definido el circuito propuesto y establecidos los valores correspondientes a cada uno de sus componentes, se procedió a realizar la simulación del sistema. Para esta etapa, se consideró un tiempo de simulación de 25 000 segundos, dado que dicho intervalo permite que los condensadores alcancen su carga máxima y proporcionen un voltaje de salida equivalente al doble del valor de entrada. En este caso, se aplicó una tensión de entrada de 50 kV, obteniéndose como resultado una tensión de salida de 100 kV. Bajo estos parámetros, los resultados obtenidos se presentan en la figura 37, donde se observa que el tiempo de subida de la onda, es decir, el intervalo necesario para que el pulso crezca desde cero hasta su valor pico, es de $1.974 \mu s$. Por su parte, la figura 38 muestra que el tiempo transcurrido desde el inicio del impulso hasta que la señal decrece hasta el 50 % de su valor máximo es de aproximadamente $50.012 \mu s$. Estos dos parámetros son fundamentales para caracterizar una onda tipo BIL, cuyo comportamiento está regulado por el estándar *IEEE Std 4TM-2013* [1]. Según esta norma, el tiempo de subida debe ser de $1.2 \mu s$, y el tiempo para

alcanzar la mitad del valor pico debe ser de $50 \mu s$. Aunque en la simulación se observa una ligera diferencia en el tiempo de subida con respecto al valor normativo, esta variación es mínima y se considera aceptable dentro de un margen permisible, teniendo en cuenta que los resultados simulados no siempre coinciden exactamente con los valores ideales definidos por la normativa. En consecuencia, se concluye que el circuito presenta un comportamiento adecuado en cuanto a la forma de onda generada, lo cual valida su funcionamiento previo a las pruebas físicas en el laboratorio.

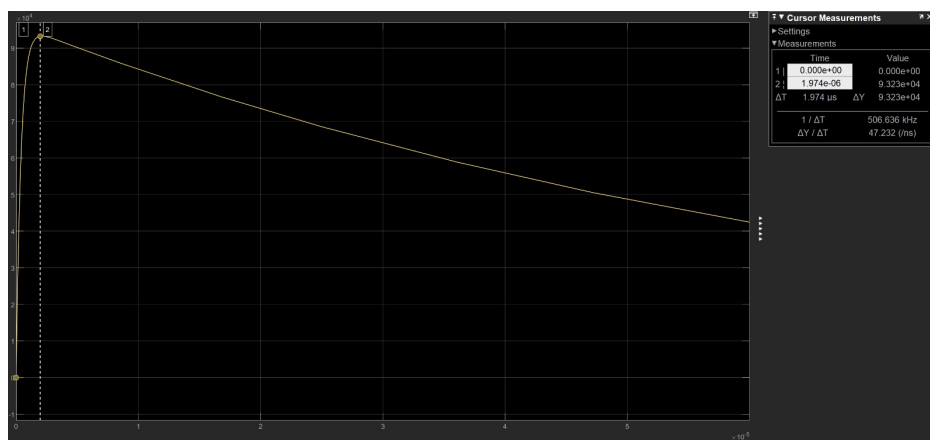


Figura 37: Análisis simulado del valor máximo alcanzado por la onda BIL

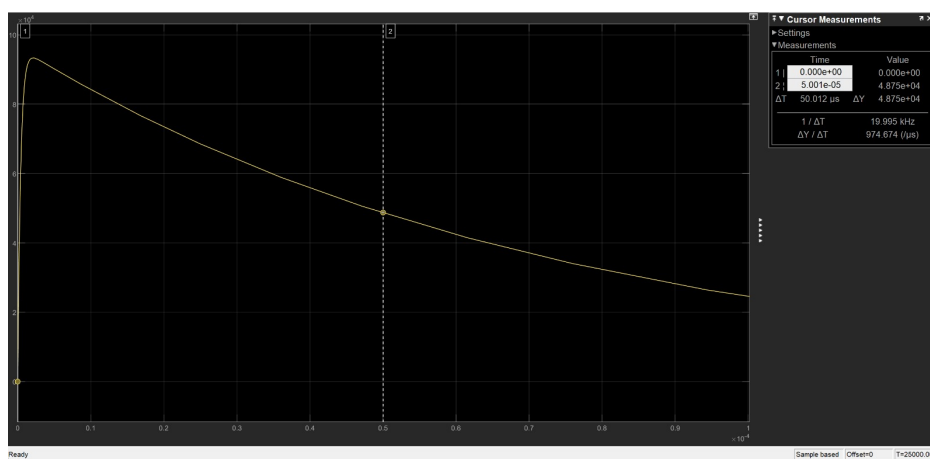


Figura 38: Análisis simulado del nivel correspondiente al 50 % del valor pico de la onda BIL

4. CAPITULO 2: IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO DOBLADOR DE TENSIÓN PARA ENSAYOS BIL

4.1 Doblador de Tensión

A partir del diseño del circuito doblador de tensión presentado en la Figura 23, se establece el esquema correspondiente con el objetivo de visualizar y cuantificar los recursos y el espacio necesarios para su implementación. Esta configuración representa la forma más básica de un sistema funcional de duplicación de voltaje. El circuito permite obtener una salida en corriente continua cuyo valor se aproxima al doble del voltaje pico de la señal de entrada en corriente alterna, mediante un proceso secuencial de carga y transferencia de energía entre los condensadores C1 y C2, coordinado por la conducción alternada de los diodos D1 y D2.

4.2 Ensayos BIL

El circuito destinado para la realización de ensayos BIL (Basic Insulation Level) se encuentra descrito en documentos técnicos de TERCO [14], en los cuales se presentan diversos experimentos con equipos de alta tensión. En dicho material se plantea un esquema específico para este tipo de pruebas, el cual se utilizará como base para futuros ensayos.

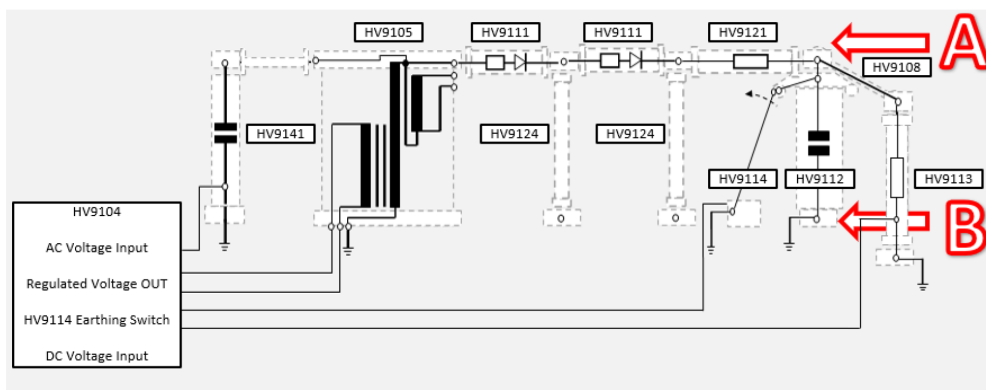


Figura 39: Primera parte de circuito BIL. (Rectificación)

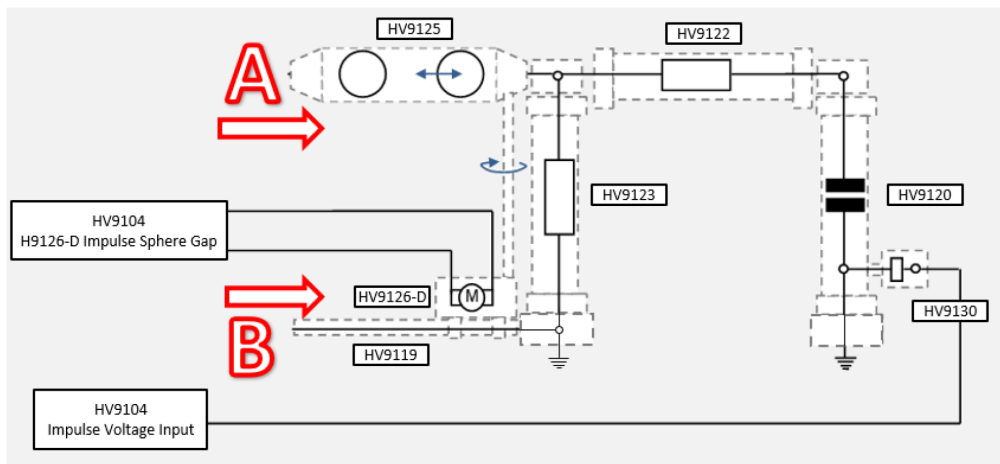


Figura 40: Segunda parte de circuito BIL. (Generacion de Impulsos)

El circuito propuesto se compone de dos secciones claramente diferenciadas. La primera, representada en la Figura 39, corresponde a un rectificador cuya función es convertir la señal de entrada en corriente alterna (AC) a corriente continua (DC), con el fin de alimentar la segunda parte del sistema. Esta segunda sección, ilustrada en la Figura 40, está diseñada para generar el impulso necesario que permita ejecutar el ensayo BIL en su totalidad.

4.3 Doblador de tensión implementado a ensayo BIL

Una vez propuestas y diseñadas las partes fundamentales del proyecto, se procede a integrarlas con el fin de obtener un esquema preliminar del circuito final.

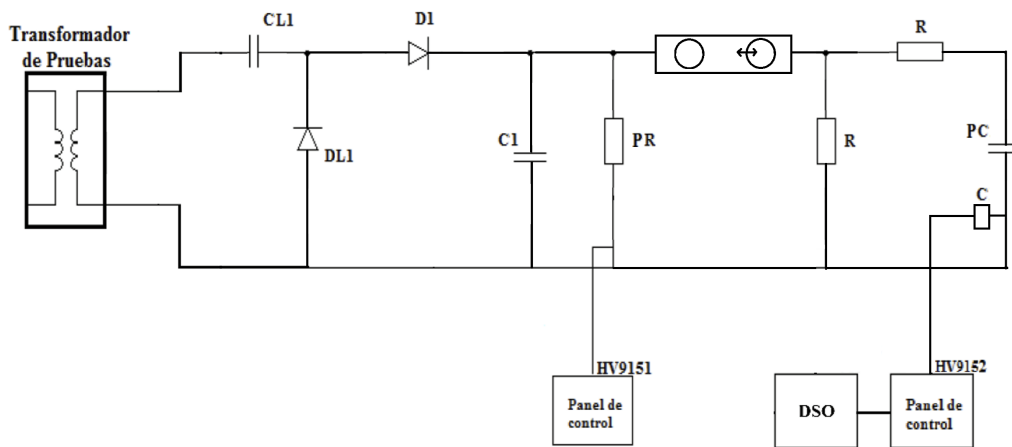


Figura 41: Circuito Doblador mas Ensayo BIL

Para integrar el circuito doblador de tensión al ensayo BIL, se modifica la primera sección del esquema propuesto en el manual. Esta modificación consiste en reemplazar la etapa de rectificación original por el circuito doblador, obteniendo así un diseño compuesto por dos partes: la primera, correspondiente al doblador de tensión, y la segunda, al circuito del ensayo BIL.

El circuito final obtenido permite la implementación de un doblador de tensión para ensayos BIL en el laboratorio de alta tensión de la sede Cuenca. Sin embargo, al realizar las pruebas correspondientes, se observa que no se alcanza la tensión establecida, por lo que se requiere efectuar modificaciones en el diseño del circuito con el fin de lograr la tensión propuesta.

4.4 Rediseño del circuito Doblador de tensión para Ensayos BIL

Una de las modificaciones propuestas en el desarrollo del proyecto consistió en transformar el circuito doblador, lo cual requirió ajustar la cantidad de componentes utilizados, específicamente incrementando el número de diodos y capacitores necesarios para su funcionamiento. Esta modificación introdujo diferencias significativas tanto en la configuración eléctrica como en la estructura física del circuito. Desde el punto de vista estructural, el circuito pasó a tener un diseño en dos niveles, lo que implica una disposición más compleja de los elementos que lo componen. En cuanto a su comportamiento eléctrico, la incorporación de mas elementos permite la formación de una nueva fase de carga, que no solo aumenta la capa-

cidad de almacenamiento de energía, sino que también contribuye a la generación de un voltaje mayor al que se obtiene con el circuito original.

La sección correspondiente al circuito del ensayo BIL se mantuvo sin modificaciones respecto al primer diseño, ya que no presentó inconvenientes significativos que dificultaran el cumplimiento del objetivo establecido.

Durante el proceso de ensamblaje del circuito propuesto en el laboratorio, se identificó una insuficiencia en los elementos de unión, específicamente en las coronas de conexión y pedestales de piso. Ante esta limitación, fue necesario fabricar piezas adicionales, utilizando como referencia una de las coronas de conexión, debido a que su geometría presenta menos complejidad en comparación con la del pedestal de piso, lo que facilita su reproducción.

Para la fabricación de las piezas adicionales se requirió el uso de un fundidor de aluminio, dado que este es el material del que está compuesta la pieza original. En total, fue necesario elaborar seis piezas de aluminio basadas en el molde de la corona de conexión.

Una vez finalizado el proceso de fundición, fue necesario utilizar un torno industrial para dar forma a las piezas, de manera que replicaran con precisión el diseño de la pieza original. Para esta tarea se contó con el apoyo del laboratorio de mecanizado de la UPS sede Cuenca, donde el personal especializado se encargó de realizar el maquinado requerido para obtener una forma lo más fiel posible al componente original.

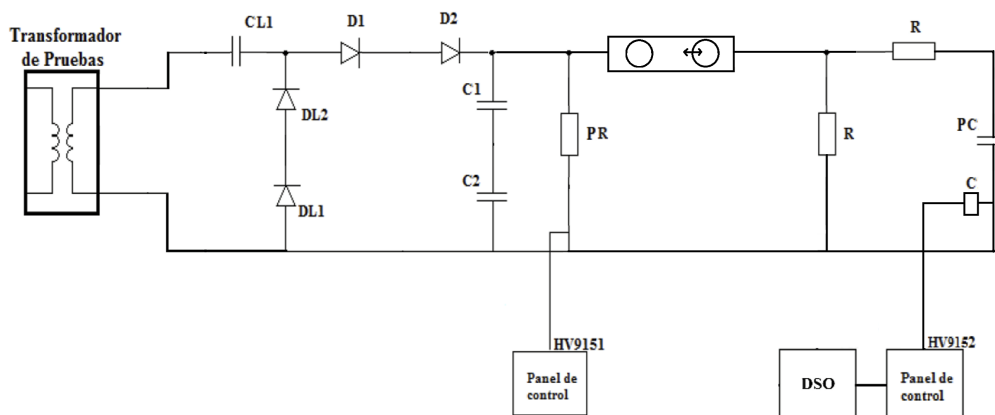


Figura 42: Rediseño del circuito doblador mas Ensayo BIL

5. CAPITULO 3: VALIDACION DEL CIRCUITO DOBLADOR DE TENSION PARA ENSAYOS BIL

En este capítulo se presenta la validación experimental de la propuesta desarrollada en el presente trabajo. Para ello, se llevó a cabo un primer ensayo orientado a verificar la operatividad de los diseños iniciales del circuito planteado. Como resultado de esta prueba preliminar, se identificaron diversas fallas técnicas y operativas, lo que motivó la ejecución de nuevos ensayos dirigidos a corregir dichas deficiencias. Este proceso permitió asegurar la fiabilidad de los resultados obtenidos y confirmar el cumplimiento de los objetivos propuestos.

5.1 Prueba inicial del doblador de voltaje y del ensayo BIL

En el primer ensayo se implementó el circuito propuesto en la figura 23, el cual fue descrito previamente en el Capítulo 1. El montaje se realizó en el laboratorio, tal como se muestra en la figura 43. Antes de proceder con el ensamblaje, se realizó una medición de la resistencia de la malla de puesta a tierra utilizando el método de wenner con un teluometro de la marca AMPROBE, la cual dio un valor de $0,1\Omega$, el cual se mantuvo constante en todas las pruebas realizadas hasta llegar al ensayo tipo BIL.

Asimismo, como parte de los protocolos de seguridad establecidos, al ingresar al laboratorio se verificó la disponibilidad de la pértiga, la cual debe ser colocada en el transformador antes de iniciar cualquier actividad de montaje, con el fin de evitar posibles circulaciones de voltaje remanente. Además, este dispositivo se empleó al finalizar cada ensayo para descargar adecuadamente los componentes energizados, en especial los condensadores, asegurando así condiciones seguras para su desmontaje o manipulación.

Posteriormente, se ensambló el circuito correspondiente al ensayo tipo BIL, representado en la Figura 41, con el propósito de alcanzar un voltaje de 180 kV y verificar la generación de la onda de impulso $1,2/50 \mu\text{s}$. Durante esta prueba se produjo una disrupción a dicho nivel de tensión, lo que ocasionó la activación del sistema de protección del banco y, en consecuencia, su desactivación. Al reactivar el banco, se evidenció que el circuito no funcionaba correctamente, por lo que se procedió al reemplazo de un diodo de 150 kV con el objetivo de descartar una posible falla. Al no obtener resultados favorables, se optó por sustituir también el diodo

de 140 kV por otro componente disponible en el laboratorio.

Una vez completado el ensamblaje del circuito, se procedió a realizar las pruebas correspondientes, verificándose que el sistema operaba de manera adecuada y lograba superar el voltaje de 120 kV, lo cual representaba uno de los principales desafíos técnicos abordados en el desarrollo del trabajo presente.

Posteriormente, se ensambló el circuito correspondiente al ensayo tipo BIL, representado en la figura 41, con el propósito de alcanzar un voltaje de 180 kV y verificar la generación de la onda de impulso 1,2/50 μ s. Durante esta prueba se produjo una disrupción a dicho nivel de tensión, lo que ocasionó la activación del sistema de protección del banco y, en consecuencia, su desactivación. Al reactivar el banco, se evidenció que el circuito no funcionaba correctamente, por lo que se procedió al reemplazo de un diodo de 150 kV con el objetivo de descartar una posible falla. Al no obtener resultados favorables, se optó por sustituir también el diodo de 140 kV por otro componente disponible en el laboratorio.

Tras estas modificaciones, se identificó al condensador de 150 kV como posible origen de la falla, ya que las mediciones realizadas mostraban que no retenía carga en el voltaje de salida. En consecuencia, se procedió a reemplazar dicho componente por otro condensador de 150 kV disponible en el laboratorio. Luego de este ajuste, el circuito comenzó a operar de forma satisfactoria, lo cual fue corroborado mediante nuevas mediciones del voltaje de salida.

Con el condensador reemplazado, se efectuó una nueva prueba a un voltaje inicial de 180 kV con el fin de observar la onda de impulso tipo BIL; no obstante, nuevamente no se logró registrar dicha forma de onda, y el sistema de protección del banco volvió a activarse, interrumpiendo el ensayo. Como acción correctiva, se decidió realizar pruebas individuales a cada uno de los equipos utilizados, con el objetivo de identificar y aislar posibles fallas o daños en los componentes.



Figura 43: Doblador de tensión con un único capacitor de 150 kV

5.2 Ensayos de resistencia de diodos conjuntamente con rectificación de onda completa

Como primer paso, se realizó una prueba utilizando un megger para medir la resistencia de los diodos en condiciones de polarización directa e inversa, aplicando un voltaje de 500 V. Esta evaluación permite identificar posibles fallas en los dispositivos, tales como cortocircuitos o circuitos abiertos, en función de los valores obtenidos. De acuerdo con los fundamentos teóricos, en polarización directa la resistencia debería situarse en el orden de los kilohmios o menos, mientras que en polarización inversa se espera una resistencia del orden de los gigaohmios o superior.

Una vez realizada la prueba, se obtuvieron los valores de resistencia correspondientes a la polarización directa e inversa de los diodos evaluados. La Figura 44 muestra la configuración empleada para los ensayos con el megger en los diodos disponibles en el laboratorio. En la figura 45 se presentan los resultados obtenidos para los diodos de 140 kV, previamente ilustrados en la Figura 12. Por su parte, la figura 46 expone los valores medidos para los diodos de 150 kV, correspondientes a los representados en la Figura 13.



Figura 44: Disposición del megger para la prueba de los diodos



Figura 45: Valores de resistencia del diodo de 140 kV en polarización directa (parte superior) e inversa (parte inferior)



Figura 46: Valores de resistencia del diodo de 150 kV en polarización directa (parte superior) e inversa (parte inferior)

Una vez realizada la medición con el megger, y conforme a lo establecido en la teoría, se pudo deducir preliminarmente que los diodos se encontraban en buen estado. Sin embargo, con el propósito de obtener una verificación más precisa del funcionamiento conjunto de los diodos y condensadores, se procedió a ensamblar un rectificador de onda completa, cuya disposición se presenta en la Figura 47. En dicha figura se observa la configuración de los diodos y condensadores, los cuales fueron intercalados con el fin de evaluar de manera integral el estado de ambos componentes.



Figura 47: Circuito Rectificador de onda completa

Como se muestra en la Figura 48, se obtuvo una señal de salida rectificadora correcta al utilizar los condensadores de 140 kV, representados en la Figura 14, junto con una combinación de diodos de 140 kV y 150 kV. Mientras que los resultados no fueron los mismos a la hora de emplear los condensadores de 150 kV mostrados en la Figura 17, utilizando el mismo método de intercalación de diodos. A partir de estos resultados, se concluye que los condensadores de 150 kV presentan fallas, lo cual afectó el comportamiento del circuito.

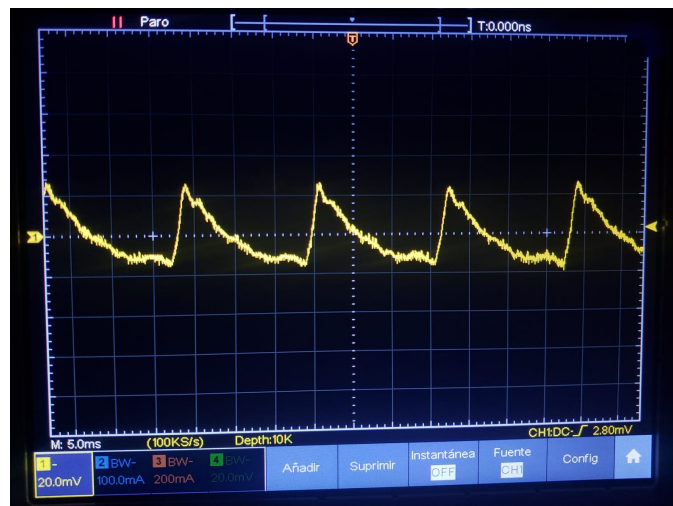


Figura 48: Forma de onda obtenida en el circuito rectificador de onda completa

5.3 Diagnóstico y validación operativa de los condensadores

Con base en los ensayos previamente realizados, se confirmó que los componentes dañados correspondían a los condensadores. Por esta razón, se procedió al desmontaje de los condensadores de 150 kV. Para llevar a cabo este procedimiento, se tomó como referencia del trabajo [5], en la cual se detalla la estructura interna del condensador. Según dicha fuente, en el interior de cada unidad existen 15 condensadores individuales conectados en configuraciones serie y paralelo. Esto implica que es necesario limpiar cada componente para identificar cuál se encuentra en cortocircuito y determinar cuántos resultaron dañados durante el ensayo BIL a 180 kV.

Asimismo, el trabajo consultado indica que los condensadores están equipados con una terminal en cada extremo, las cuales permiten su conexión a los equipos disponibles en el laboratorio. Adicionalmente, cuentan con una tapa en cada lado; una de ellas incorpora dos orificios roscados que facilitan el llenado de aceite dieléctrico.

En este caso, se decidió abrir el condensador por la tapa que no contiene los orificios de llenado. Una vez retirados los tornillos, se aplicaron ligeros golpes controlados para desprender la tapa sin dañar la estructura. Posteriormente, se procedió a extraer el aceite contenido en su interior. Cabe destacar que estos condensadores están llenos de aceite dieléctrico tipo UNIVOLT, utilizado comúnmente en transformadores.

Finalmente, se realizó una limpieza completa de todos los componentes utilizando percloroetileno, sustancia que permite eliminar de manera eficaz los residuos de aceite, asegurando condiciones adecuadas para el posterior análisis individual de los condensadores. Como se puede observar en la figura 49.



Figura 49: Proceso de desmontaje del condensador de 150 kV

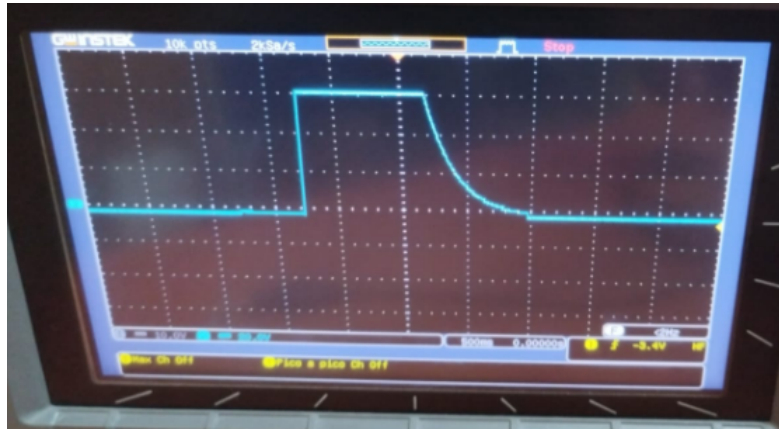


Figura 51: Forma de onda obtenida del condensador en condiciones normales de funcionamiento



Figura 52: Forma de onda obtenida del condensador con funcionamiento defectuoso

Una vez realizado el ensayo para identificar los condensadores en buen estado y descartar aquellos que presentaban fallas, se procedió a contactar al proveedor original, quien indicó que ya no disponía de los componentes requeridos. Ante esta situación, se inició la búsqueda de una alternativa de reemplazo, encontrándose un proveedor de origen chino perteneciente a la empresa DAWNCAP, quien confirmó la disponibilidad de condensadores con características similares. Se estableció comunicación con dicho proveedor, quien proporcionó la hoja de datos técnicos correspondiente, la cual se adjunta en los anexos de este documento. Al analizar las especificaciones, se determinó que los nuevos condensadores presentaban un

radio aproximadamente 1 cm mayor en comparación con los actualmente instalados en los capacitores de 150 kV. No obstante, tras verificar el espacio físico disponible en el sistema, se concluyó que no existía impedimento para su correcta instalación, por lo que se decidió proceder con el reemplazo. Considerando que seis condensadores resultaron averiados durante los ensayos previos, se optó por adquirir seis unidades nuevas. En la figura 53 se muestran los nuevos condensadores de 50 kV que serán incorporados al sistema.



Figura 53: Condensador DAWNCAP, 15 000 pF / 50 kV

Una vez obtenidos los nuevos condensadores, se procedió con su instalación. Durante el montaje de la estructura, se observó que, debido a las dimensiones ligeramente mayores de los condensadores, estos rozaban con la cápsula contenedora dieléctrica. Por esta razón, fue necesario realizar una modificación en dicha cápsula, para lo cual se recurrió a un torneado. En la figura 49 se puede apreciar el proceso de mecanizado, donde se redujo tres milímetros del diámetro interno de la cápsula, lo que permitió que los condensadores, junto con su estructura de soporte, encajaran correctamente.

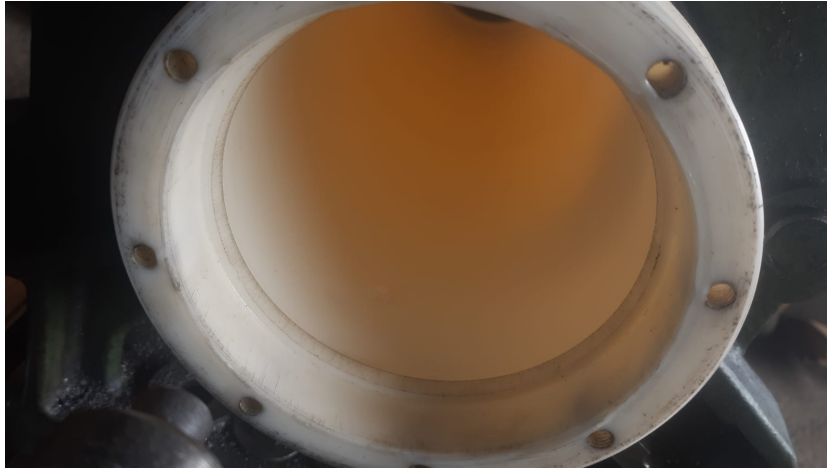


Figura 54: Reducción interna de la cápsula dieléctrica mediante proceso de mecanizado

Una vez completado el ensamblaje de los condensadores, se procedió a realizar el llenado a vacío utilizando aceite dieléctrico tipo UNIVOLT para transformadores, mediante una bomba de vacío, como se muestra en la figura 55. Este procedimiento fue aplicado a ambos condensadores de 150 kV. Finalizado el proceso de sellado con el aceite dieléctrico, se llevaron a cabo las pruebas correspondientes con el fin de verificar su correcto funcionamiento.



Figura 55: Proceso de llenado al vacío con aceite dieléctrico en los condensadores de 150 kV

5.4 Prueba de rectificación de los condensadores reparados

Para verificar el correcto funcionamiento de los condensadores, se realizó un ensayo de rectificación de onda completa utilizando los condensadores de 150 kV ya completamente reparados, como se muestra en la figura 56. En dicha configuración, se emplearon diodos conectados en serie para llevar a cabo el proceso de rectificación, y los condensadores de 150 kV fueron intercalados para observar su comportamiento dentro del circuito. La medición de la señal rectificada se efectuó mediante un partidor resistivo. El ensayo se llevó a cabo aplicando un voltaje de 20 kV, obteniéndose la forma de onda mostrada en la figura 57 donde se observa que la señal del circuito rectificador después de reparar, correspondiente a ambos condensadores. A partir de los resultados obtenidos, se concluyó que ambos condensadores operan correctamente y cumplen su función dentro del sistema.



Figura 56: Configuración del circuito rectificador tras la reposición de condensadores

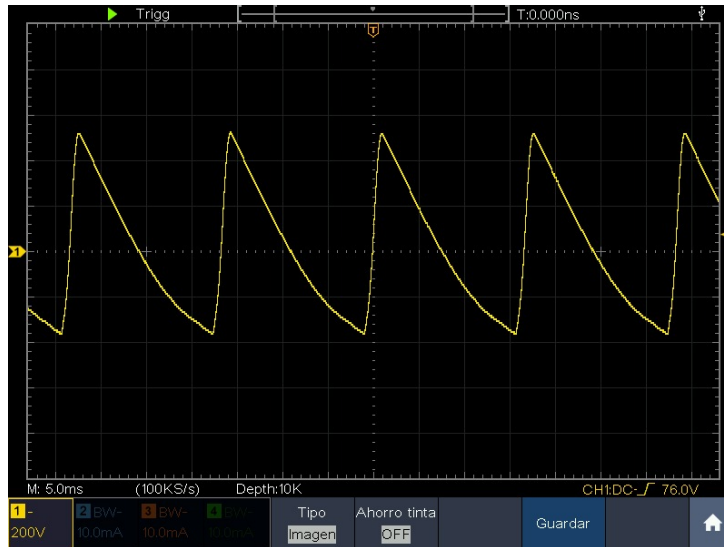


Figura 57: Señal de salida obtenida en el ensayo del circuito rectificador con condensadores de 150 kV restaurados

5.5 Ensayos de validación de funcionamiento de los elementos de medición

Con el objetivo de verificar que los dispositivos de medición proporcionen lecturas precisas de los voltajes de entrada y salida, se realizaron ensayos sobre el partidor resistivo. Estas pruebas se llevaron a cabo tomando como referencia la teoría sobre partidores resistivos, así como los valores registrados por el panel de control del laboratorio.

Para este procedimiento, se ensambló el circuito doblador de tensión y se lo alimentó con valores de voltaje de entrada aleatorios, con el objetivo de verificar la exactitud de los datos de voltaje de salida registrados. Una vez obtenidos los valores de salida a través de los partidores resistivos, se aplicó la fórmula correspondiente al partidor resistivo, con el fin de validar que las mediciones mostradas por el panel de control fueran correctas.

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

Para aplicar correctamente la fórmula del partidor resistivo, es necesario considerar todos los elementos físicos involucrados en la medición del voltaje de salida. En este caso, se emplearon dos partidores resistivos, cada uno con una resistencia asociada, además de la resistencia del banco

al cual se transfiere el valor de salida. La obtención de los dos primeros valores de resistencia es directa, ya que estos se encuentran especificados en los propios dispositivos. En cambio, la resistencia correspondiente al banco de carga se determinó de forma manual, considerando que, dentro del panel de control, el partidor resistivo dispone de un único punto de conexión. Para este propósito, se utilizó un óhmetro con el cual se midió directamente la resistencia desde el cable de conexión que enlaza el partidor resistivo con el panel de control.

Una vez obtenidos los valores necesarios para el cálculo, se establece la siguiente fórmula

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (2)$$

A partir de la fórmula previamente establecida, se despeja el voltaje de entrada, el cual corresponde al valor indicado en el panel de control. Por su parte, el voltaje de salida se determina de forma directa mediante una medición realizada con un multímetro, conectado en la parte posterior del panel de control.

$$V_{\text{in}} = \frac{V_{\text{out}}}{\frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3}} \quad (3)$$

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos durante los ensayos. Con base en estos datos, se concluye que los elementos de medición no presentan fallas, ya que proporcionan valores correctos al momento de realizar las mediciones.

Tabla 12: Tabla de Resultados

Tabla de Resultados	
Voltaje Medido	Voltaje Calculado
34,1 kV	35,34 kV
42,4 kV	43,68 kV
51,6 kV	53,13 kV
63,3 kV	65,01 kV
74,3 kV	76,37 kV
81,7 kV	84,12 kV

5.6 Ensayo de Doblador de Tensión hasta 200 kV

Una vez reparados los implementos del laboratorio que presentaron fallas como resultado del ensayo inicial, se procedió a realizar el ensayo de validación del funcionamiento del circuito doblador de tensión, con el objetivo de verificar su capacidad operativa hasta un nivel de 200 kV.



Figura 58: Circuito Doblador de Tensión

Los ensayos se llevaron a cabo utilizando el reediseño del circuito doblador como esta puesto en la figura 24, al cual se le conectó un partidor capacitivo en la entrada con el fin de medir el voltaje de ingreso, y un partidor resistivo en la salida para registrar el voltaje generado al final del circuito.

Para lograr una mayor medición del voltaje de salida del circuito, se utilizaron dos partidores resistivos conectados en serie, con el objetivo de permitir la medición de un voltaje superior al que puede soportar cada partidor de forma individual. Para implementar esta configuración, se consideró la estructura interna de los partidores, la cual indicó que, en caso de requerir esta conexión, era necesario incorporar un puente en el partidor del cual no se iba a obtener la señal de medición. Este puente

tenía la función de cerrar el circuito interno del partidor, permitiendo así que el otro partidor entregara una medición completa y precisa del voltaje aplicado.



Figura 59: Partidor Resistivo con Puente

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos durante los ensayos. A partir de estos datos, se concluye que el circuito doblador de tensión opera correctamente, logrando duplicar de forma completa el voltaje aplicado en la entrada.

Tabla 13: Resultados Doblador de Tensión

Resultados Doblador de Tensión		
Voltaje Primario del Transformador (CA)	Voltaje Secundario del Transformador (Voltaje de Entrada)(CA)	Voltaje de Salida (CC)
17 V	10 kV	20 kV
33 V	20,2 kV	40,9 kV
50 V	30,08 kV	60,9 kV
67 V	40,26 kV	80,9 kV
83 V	50,06 kV	100,6 kV
100 V	60,20 kV	120,01 kV
117 V	70,46 kV	141,3 kV
134 V	80,68 kV	161,9 kV
150 V	90,96 kV	180,3 kV

A pesar de que el circuito doblador de tensión presentó un funcionamiento adecuado, no fue posible alcanzar el voltaje objetivo de 200 kV, logrando únicamente llegar hasta 180 kV con considerable dificultad. Esta limitación se atribuye a las características físicas de los implementos del laboratorio, ya que al superar los 160 kV comenzaron a manifestarse fenómenos eléctricos, como el efecto corona. Además, al aproximarse a los 180 kV, se observaron descargas eléctricas entre las coronas de conexión y la placa de puesta a tierra a través del aire, lo que representó una dificultad significativa para alcanzar el voltaje deseado. Estas descargas comprometen tanto la integridad como la seguridad de los componentes del sistema al operar por encima de este umbral de tensión.

5.7 Ensayo final del circuito Doblador de tensión para Ensayos BIL

Una vez concluidos y validados los ensayos preliminares, se procedió al ensamblaje del circuito doblador de tensión junto con el circuito del ensayo BIL, con el objetivo de validar el cumplimiento del objetivo general del proyecto o, en su defecto, aproximarse lo máximo posible a dicho objetivo.

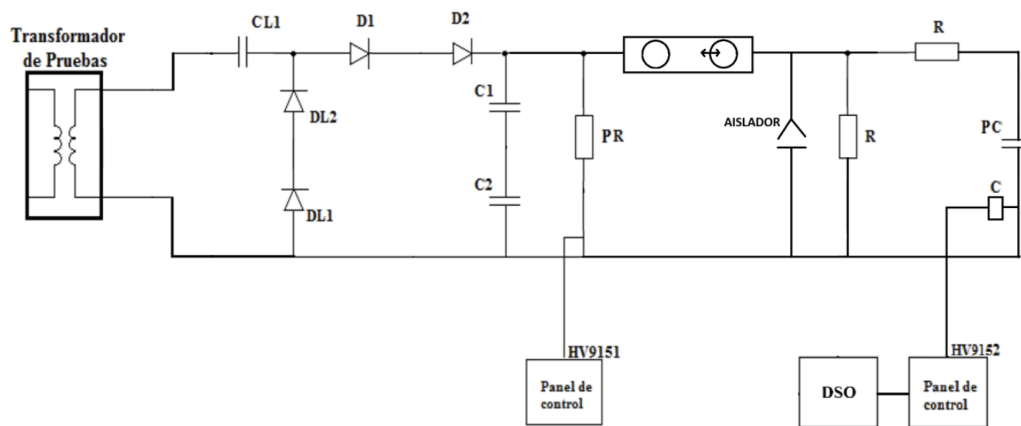


Figura 60: Esquema del circuito duplicador de voltaje utilizado en ensayos con impulsos BIL



Figura 61: Ensayo Doblador de Tension mas ensayo BIL Final

El ensayo presentado corresponde al mismo procedimiento descrito al inicio del capítulo. Para su implementación física, mostrada en la Figura 61, se empleó el esquema representado en la Figura 60. No obstante, en esta ocasión se utilizó una configuración del circuito que integra un doblador de tensión de mayor robustez, diseñado para soportar niveles más altos

de voltaje, junto con la etapa final correspondiente al circuito de prueba del impulso tipo BIL.

Debido a las limitaciones eléctricas previamente identificadas, así como a la ausencia de un segundo partidor capacitivo (componente indispensable para alcanzar el nivel de voltaje requerido en un impulso BIL), se concluye que el circuito no es adecuado para operar a tensiones superiores a 140 kV. Por esta razón, el ensayo se llevará a cabo a un nivel de 100 kV, con el objetivo de evitar fallos técnicos o fenómenos eléctricos que puedan comprometer la integridad del sistema y la validez de los resultados experimentales.

En las siguientes imágenes se observa una respuesta adecuada en la forma de onda generada por el circuito durante el ensayo BIL. Esta respuesta se encuentra en concordancia con lo establecido en el estándar IEEE Std 4TM-2013 [1], el cual indica que los ensayos BIL consisten en la aplicación de un voltaje de impulso que simula los efectos de una descarga atmosférica. Según dicho estándar, el impulso debe presentar un frente de 1.2 μ s y un tiempo a la mitad del valor pico de 50 μ s, representando de manera realista las condiciones de operación.



Figura 62: Onda con un Frente de 1,2us

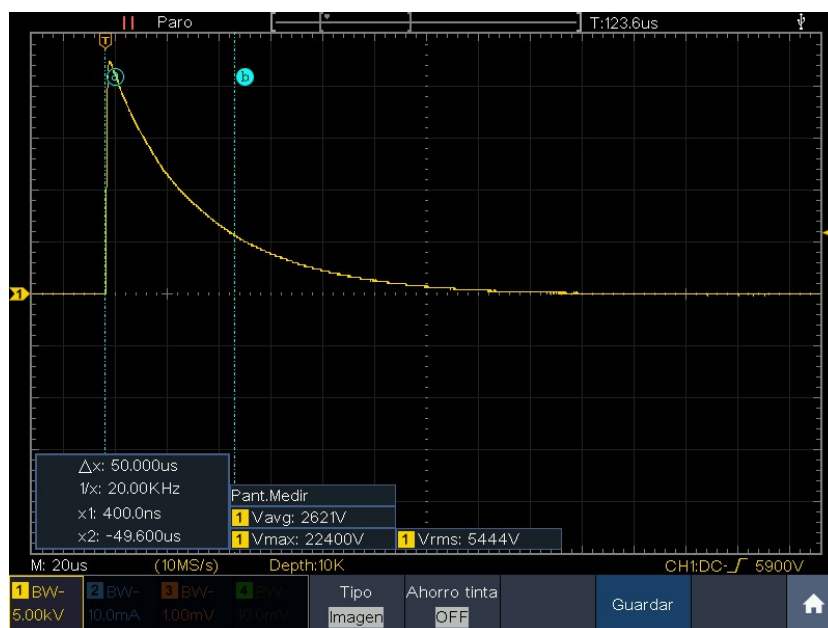


Figura 63: Onda con la mitad del valor pico de 50 μ s

6. Análisis de resultados

El objetivo de este proyecto fue la implementación de un circuito doblador de tensión integrado a un sistema de ensayo BIL, con la finalidad de generar hasta 200 kV para aplicaciones de pruebas de alta tensión. A través de simulaciones preliminares y evaluaciones experimentales, se evaluó el desempeño del sistema bajo diversas configuraciones, lo que permitió identificar tanto las fortalezas como las limitaciones del diseño implementado.

En la fase de simulación, el circuito doblador de tensión alcanzó un voltaje de salida de aproximadamente 99,4 kV a partir de una entrada de 50 kV, lo que confirmó el correcto funcionamiento de la etapa multiplicadora. La sección destinada al ensayo BIL logró simular de manera casi precisa la forma de onda estándar, lo que evidenció una correcta simulación del sistema en su conjunto. Esta etapa de simulación fue fundamental para predecir el comportamiento general del circuito y para ajustar parámetros antes de su implementación física.

Durante la construcción y ensayo inicial del circuito en laboratorio, al intentar generar impulsos a 180 kV, se presentaron fallas en los diodos y

condensadores, siendo necesaria la verificación individual de cada componente. Las pruebas con osciloscopio mostraron que varios condensadores no retenían la carga adecuadamente.

Ante estos inconvenientes, se rediseñó el circuito a una configuración más robusta, lo que implicó duplicar la cantidad de componentes y modificar físicamente la estructura para permitir una mayor capacidad de carga. Adicionalmente, se fabricaron nuevas piezas mecánicas y se adquirieron condensadores de reemplazo de 50 kV. El circuito fue ensamblado nuevamente y sometido a pruebas de validación que incluyeron rectificación de onda completa y medición de voltaje mediante partidores resistivos. Los resultados confirmaron el correcto funcionamiento del sistema reparado.

Finalmente, se realizaron ensayos del doblador de tensión operando hasta los 180 kV, duplicando efectivamente la entrada. Sin embargo, al superar los 160 kV se observaron fenómenos eléctricos como el efecto corona y descargas disruptivas entre las conexiones y la puesta a tierra, lo que limitó la posibilidad de alcanzar de forma segura los 200 kV. En el ensayo BIL final, se aplicó un impulso de 100 kV, logrando una forma de onda con frente de 1,2 μ s y caída a la mitad de 50 μ s, cumpliendo con la norma IEEE Std 4TM-2013 [1].

El circuito diseñado demostró ser funcional y eficiente para aplicaciones de alta tensión, operando de manera segura hasta un límite de 140 kV. Las limitaciones identificadas no estuvieron relacionadas con el diseño eléctrico del sistema, sino con restricciones físicas propias del laboratorio, como el tamaño inadecuado del equipo de medición utilizado en el doblador de tensión y el umbral operativo del dispositivo empleado en los ensayos con impulsos tipo BIL. Los resultados obtenidos validan la viabilidad del sistema para la realización de pruebas BIL controladas, representando un aporte significativo al equipamiento académico y experimental en el área de alta tensión.

7. Conclusiones

El presente proyecto abordó de forma integral el diseño, simulación, implementación y validación de un circuito doblador de tensión integrado a un sistema de ensayo BIL, con la finalidad de generar hasta 200 kV en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca. A partir de un enfoque teórico-práctico, se desarrolló una solución basada en el circuito Cockcroft-Walton, adaptado a las capacidades reales de los componentes disponibles en el entorno experimental.

Durante el desarrollo del trabajo se cumplieron satisfactoriamente los objetivos relacionados con el diseño conceptual y la simulación computacional del sistema, lo que permitió anticipar el comportamiento del circuito y establecer criterios para su implementación física. La simulación en MATLAB-Simulink demostró el principio de operación del doblador de tensión, aunque reveló también ciertas pérdidas atribuibles a la no idealidad de los componentes de alta tensión utilizados en el modelo.

La fase de implementación física permitió identificar múltiples desafíos técnicos, particularmente en la validación experimental del circuito. Aunque el sistema logró alcanzar tensiones cercanas a los 180 kV, fenómenos como el efecto corona, las descargas disruptivas por el aire y la limitación de los equipos de medición condicionaron la posibilidad de operar de forma segura a 200 kV. Estos factores obligaron a realizar pruebas dentro de un rango seguro de operación, lo que derivó en un rediseño parcial del sistema y la sustitución de componentes clave, como diodos y condensadores, varios de los cuales debieron ser reacondicionados manualmente.

A pesar de no haberse alcanzado el objetivo de validación a 200 kV, el circuito demostró ser funcional como generador de impulsos tipo BIL en niveles de tensión menores. Las pruebas finales permitieron obtener una onda de impulso con características ajustadas al estándar IEEE Std 4TM-2013 [1] (1,2/50 μ s), lo que valida su aplicación dentro de condiciones controladas. Asimismo, el proyecto permitió verificar el comportamiento real de los elementos de medición y estableció procedimientos de diagnóstico eficaces para componentes de alta tensión.

En conclusión, el proyecto constituye un aporte significativo para el desarrollo de infraestructura experimental en el área de alta tensión. Si bien las limitaciones técnicas del laboratorio impidieron alcanzar el umbral máximo previsto, se estableció una plataforma funcional y segura para ensayos tipo BIL. Esta experiencia aporta conocimientos valiosos sobre el

comportamiento de sistemas de elevación de tensión en condiciones reales y sienta las bases para futuras mejoras que permitan extender la capacidad del sistema, ya sea mediante refuerzo del aislamiento, optimización del diseño físico o adquisición de instrumentación más robusta.

8. Recomendaciones

Los ensayos realizados durante el desarrollo del proyecto evidencian que el objetivo planteado es técnicamente viable para su implementación en el laboratorio de alta tensión de la sede Cuenca. Sin embargo, debido a limitaciones físicas del laboratorio, no fue posible alcanzar el voltaje objetivo.

8.0.1 Futuros Proyectos

Para lograr un funcionamiento confiable de un doblador de tensión operando a 200 kV, se recomienda la incorporación de componentes con mayor longitud física y con un umbral de operación superior, capaces de soportar niveles de tensión más elevados sin comprometer la seguridad ni la integridad del sistema.

Para alcanzar un ensayo BIL con un voltaje de hasta 200 kV, se recomienda la adquisición de nuevas esferas de interrupción que permitan una mayor distancia de separación, adecuadas para operar a niveles de tensión más elevados. Adicionalmente, es fundamental incorporar un segundo partidor capacitivo con una capacitancia de 1200 pF, necesario en la etapa final del circuito del ensayo BIL según el esquema propuesto. La inclusión de estos componentes permitiría superar el umbral actual de 140 kV, posibilitando una operación segura y efectiva del sistema hasta los 200 kV.

8.0.2 Mejoras al Laboratorio

Para evitar fallas futuras, se considera necesaria la reparación de la placa de puesta a tierra del laboratorio de alta tensión, debido a que en ciertas áreas se encuentra despegada del suelo. Esta condición incrementa la resistencia de conexión a tierra, lo cual puede comprometer la seguridad durante las pruebas con alta tensión. Además, dicha irregularidad dificulta el montaje estable de los circuitos, provocando inestabilidad en los componentes y aumentando el riesgo de caídas, lo que podría ocasionar daños en los implementos y pérdidas de funcionalidad en los equipos del laboratorio.

Como recomendación adicional, se sugiere realizar comprobaciones periódicas de la funcionalidad de los equipos del laboratorio, con el fin de asegurar que operen en condiciones óptimas. Estas revisiones permiten prevenir fallos derivados del desgaste de los aislamientos internos presentes en la mayoría de los implementos, lo cual es fundamental para garantizar la seguridad y confiabilidad en ensayos de alta tensión.

Referencias

- [1] “IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques,” *IEEE Std 4-2013 (Revision of IEEE Std 4-1995)*, pp. 1–213, May 2013.
- [2] H. Greinacher, “Über eine methode, wechselstrom mittels elektrischer ventile und kondensatoren in hochgespannten gleichstrom umzuwandeln,” *Zeitschrift für Physik*, vol. 4, no. 2, pp. 195–205, Jun. 1921.
- [3] J. D. COCKCROFT and E. T. S. WALTON, “Disintegration of lithium by swift protons,” *Nature*, vol. 129, no. 3261, pp. 649–649, Apr. 1932.
- [4] J. L. Padilla Guarnizo and J. L. Rodríguez Calle, “Diseño y construcción de dos diodos de potencia, voltaje ánodo cátodo inverso de 150 kv, corriente nominal de 50 ma para el laboratorio de alta tensión de la universidad politécnica salesiana,” Tech. Rep., Jul. 2013. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/4836>
- [5] A. F. Arias Arias and J. F. Gutama Valladares, “Diseño y construcción de dos condensadores de 25000 pf y una resistencia de medición de 300 m Ω , tensión de 150 kv, para el laboratorio de alta tensión de la universidad politécnica salesiana, sede cuenca,” Tech. Rep., Jan. 2015. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/7991>
- [6] J. A. Fleming, *The Principles of Electric Wave Telegraphy and Telephony*. Longmans, Green, and Co, 1906.
- [7] R. Ohl, “Light-sensitive electric device,” U.S Patent 2,402,662, Jun. 25, 1946. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US2402662/en>
- [8] P. van Musschenbroek and E. G. von Kleist, “On the leyden jar,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 47, pp. 457–472, 1752.
- [9] C. POLLAK, “Electrolytic current rectifier and condenser,” U.S Patent 672,913, Apr. 30, 1901. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US672913A/en>
- [10] N. N. Smeloff and A. L. Price, “Lightning investigation on 220-k. system of the pennsylvania power light company (1928 and 1929),” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 49, no. 3, pp. 895–904, July 1930.

- [11] “Insulation strength of transformer,” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 56, no. 6, pp. 749–754, Jun. 1937.
- [12] S. Okabe, J. Takami, T. Tsuboi, G. Ueta, A. Ametani, and K. Hidaka, “Discussion on standard waveform in the lightning impulse voltage test,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, no. 1, pp. 147–156, Feb. 2013.
- [13] “Ieee guide for the application of insulation coordination,” *IEEE Std C62.82.2-2022*, pp. 1–83, March 2023.
- [14] TERCO, “Hv9000 hv modular training set - single stage experiments,” 2022. [Online]. Available: <https://www.tercosweden.com/download/hv9000-high-voltage-laboratory-brochure-high-resolution/>

9. Anexos

9.1 Especificaciones técnicas proporcionadas por el fabricante DAWNCAP

DAWNCAP

MZD SERIES

HIGH VOLTAGE CERAMIC CAPACITORS MZCT8GDL-SERIES

◆ 产品特性 Features

- * 低损耗 Low dissipation factor of 0.2% at 1 KHZ
- * 高频特性好 High frequency $\geq 550\text{KHZ}$
- * 过大电流 High current $\geq 50\text{mA}$
- * 耐压特性好 High voltage ≥ 1.5 倍
- * 绝缘电阻大 High insulation resistance $\geq 200000\text{M}\Omega$



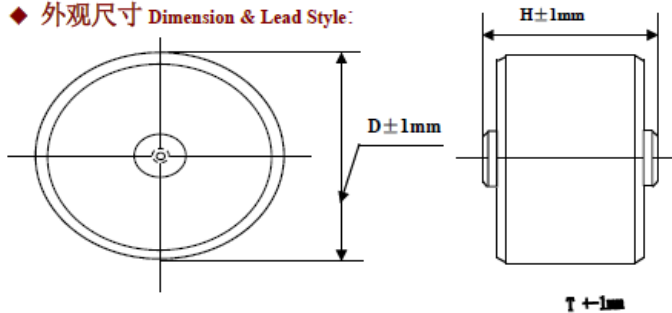
◆ 用途 Applications

- * 适用于高频高压电源 High frequency & high voltage power supplies;
- * 激光 CO₂ lasers, high voltage pulse generator
- * X 光机电源 X-ray equipment
- * 无损探伤检测 NDT (Non-destructive testing)
- * 机场安检设备 Airport security equipment

◆ 陶瓷温度特性 Ceramic dielectric properties:

序号/NO.	陶瓷介质 Ceramic Dielectric	工作温度范围 Operating temperature Range (°C)	绝缘电阻 Insulation Resistance ($\geq \text{M}\Omega$)	介质损耗 Dissipation Factor \leq	温度特性 Temperature characteristics
1	N4700 (DL)	-25~+85°C	200000	0.2%	+/-28%

◆ 外观尺寸 Dimension & Lead Style:



◆ 订购产品说明 Ordering Information

No	Part Number	Ceramic Dielectric	Rated voltage (V)	Capacitance	Dimensions (mm)

Manufacturer of high voltage ceramic capacitors

深圳市天明伟业电子有限公司 Shenzhen DAWNCAP Electronic Co., Ltd
 E-mail: dawncapacitor@163.com Web: http://www.dawncap.cn
 Tel: 86-755-28095986 技术支持: 1326647472

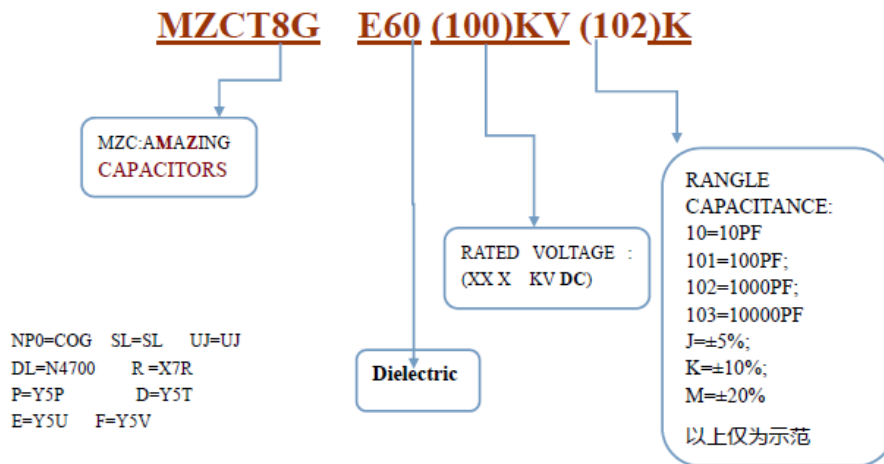
DAWNCAP

MZD SERIES

HIGH VOLTAGE CERAMIC CAPACITORS MZCT8GDL-SERIES

				C (pF)	TOL (%)	D	T	H	M
1	100kv102k	Y5E	50KV	15000PF	10%	80	33	36	5

◆物料编码释义 Explanation of part numbers:



材料特性表:

材料特性	介质损耗 (tgα)	绝缘电阻 (MΩ)	温度变化率	使用温度
SL	≤6×10 ⁻⁴	≥10*10 ⁵	±10%	-25℃ ~ +85℃
Y5U(E)	<1.2%	≥10*10 ⁴	+22% ~ -56%	-25℃ ~ +85℃

Manufacturer of high voltage ceramic capacitors

深圳市天明伟业电子有限公司 Shenahen DAWNCAP Electronic Co.,Ltd
 E-mail:dawncapacitor@163.com Web:http://www.dawncap.cn
 Tel:86-755-28095986 技术支持:13266647472

DAWNCAP

MZD SERIES

HIGH VOLTAGE CERAMIC CAPACITORS MZCT8GDL-SERIES

Y5T(SD)	<1.0%	$\geq 10 \times 10^5$	+22% ~ -33%	-25°C ~ +85°C
N4700(DL)	<0.2%	$\geq 20 \times 10^5$	+22% ~ -33%	-30°C ~ +85°C

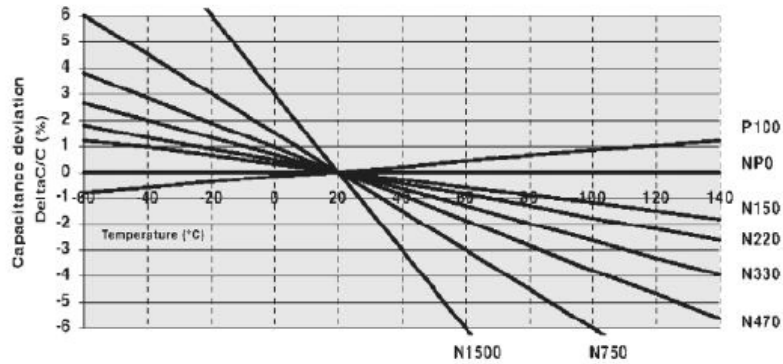
◆ About N4700 ceramic

<p>N4700 陶瓷电容是近年研发成功的一种新型陶瓷，是高端产品中广泛使用的陶瓷材质，相对于其它 I 类陶瓷其介电常数大，适合于做容量较大的电容，其具有耐压更高，介质损耗小于 0.2%，比一般 II 类陶瓷低很多；绝缘电阻大于 200000MΩ，频率特性好，温度系数好，承受电流大，在温度从 -25°C 到 +85°C 时容量变化 ±28%，寿命长。</p>	<p>N4700 ceramic capacitor is successfully developed in recent years, a new type of ceramic, a ceramic material widely used in high-end products, compared to other Class I ceramic dielectric constant large, suitable for larger capacitance, resistance higher voltage, dissipation factor less than 0.2%, much lower than the average class II ceramic; insulation resistance is greater than 200000MΩ, better frequency and characteristics of the temperature coefficient, withstand greater current, Its temperature variation of capacitance is within ±28% from -25°C to +85°C.</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Manufacturer of high voltage ceramic capacitors

深圳市天明伟业电子有限公司 Shenahen DAWNCAP Electronic Co., Ltd
E-mail: dawncapacitor@163.com Web: http://www.dawncap.cn
Tel: 86-755-28095986 技术支持: 13266647472

Class I



N4700 电容温度特性曲线
N4700 Capacitance change vs Temperature

◆ 注意事项	PRECAUTIONS
--------	-------------

Manufacturer of high voltage ceramic capacitors

深圳市天明伟业电子有限公司 Shenahen DAWNCAP Electronic Co., Ltd
E-mail: dawncapacitor@163.com Web: <http://www.dawncap.cn>
Tel: 86-755-28095986 技术支持: 13266647472

DAWNCAP

MZD SERIES

HIGH VOLTAGE CERAMIC CAPACITORS MZCT8GDL-SERIES

<p>(1) 运输和储存:</p> <ul style="list-style-type: none">• 请避免在高温或高湿度或淋雨状态下运输或储存电容。• 不要放置在有毒气体, 如硫酸, 盐酸, 硝酸等。• 避免碰。 <p>(2) 在操作过程中:</p> <ul style="list-style-type: none">• 避免接触, 如汗液电解质。不要赤手触摸。• 避免过多的影响, 如坠落造成。• 请勿焊接螺柱端子。• 不要再机终端。 <p>(3) 用法:</p> <ul style="list-style-type: none">• 当电容器用于高速脉冲, 如激光, 确保外加电压 (峰 - 峰值电压), 电容器的额定规格内。• 确保电容不暴露辐射室或变压器。	<p>(1) During transportation and storage</p> <ul style="list-style-type: none">• Do not transport or store where the capacitor will be exposed to high temperature or high humidity.• Do not expose to poisonous gases such as H₂SO₄, HCL or HNO₃.• Avoid excessive impact such as that caused by falling. <p>(2) During operation</p> <ul style="list-style-type: none">• Avoid contact with electrolytes such as perspiration. Do not touch with bare hands.• Avoid excessive impact such as that caused by falling.• Do not apply solder to stud terminals.• Do not re-machine the terminals. <p>(3) Usage</p> <ul style="list-style-type: none">• When the capacitor is used for high-speed pulses such as with a laser, make sure that the impressed voltage (peak-to-peak volt-age) is within the capacitor's rated specifications.• Make sure that the capacitor is not exposed to radiant heat from cham.
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Manufacturer of high voltage ceramic capacitors

深圳市天明伟业电子有限公司 Shenahen DAWNCAP Electronic Co.,Ltd
E-mail:dawncapacitor@163.com Web:http://www.dawncap.cn
Tel:86-755-28095986 技术支持:13266647472

En base a los objetivos mostrados en el Anexo explicativo del SO2 se desprende que las restricciones múltiples aplicables a este trabajo incluye los siguientes aspectos:

- **Aspectos relacionados con Salud Pública y Medio Ambiente:** En las secciones 5.3, 5.4 se detalla el proceso de desmontaje y limpieza de condensadores que contenían aceite dieléctrico tipo UNIVOLT. Se aplicaron procedimientos de manipulación segura y descontaminación utilizando percloroetileno, evitando así impactos negativos sobre el ambiente y la salud del personal.
- **Aspectos relacionados con Seguridad de Personas y Bienes:** En la sección 5.1 se documenta la activación del sistema de protección ante una interrupción durante los ensayos BIL. Además, en las secciones 3.1.11 y 3.1.12 se incluyen dispositivos como esferas de interrupción e interruptores de puesta a tierra para salvaguardar a los operadores y los equipos de laboratorio.
- **Aspectos relacionados con el Bienestar de la población:** En la sección 4.3 se expone cómo el proyecto fortalece el laboratorio de alta tensión, mejorando el proceso de enseñanza-aprendizaje de los estudiantes de ingeniería eléctrica. Esta mejora técnica repercute en la formación de profesionales más capacitados al servicio de la sociedad.
- **Factores Globales:** El presente proyecto se desarrolló conforme a normativas internacionales, las cuales se describen en las secciones 1.3.1 y 1.3.2. Para su ejecución se aplicaron estándares internacionales consolidados, entre ellos el IEEEStd4™-2013 [1] y el IEEEStdC62.82.2-2022 [13]. La selección de estas referencias garantiza la comparabilidad de los resultados con investigaciones y prácticas profesionales de alcance global, además de aportar rigurosidad al proceso de pruebas de alta tensión y a la determinación de niveles de aislamiento en sistemas eléctricos contemporáneos.
- **Factores Culturales:** En la sección 4.4 se describe la fabricación de coronas de conexión utilizando procesos locales de fundición y mecanizado. Esta acción refleja la adaptación a los recursos culturales y técnicos disponibles en la región, promoviendo el desarrollo tecnológico propio.
- **Factores Sociales:** En las secciones 4.3 y 8 se evidencia cómo el acceso a equipos operativos permite una formación más completa para

los estudiantes, contribuyendo a la educación técnica y al desarrollo profesional de la comunidad universitaria.

- **Factores Ambientales:** En las secciones 5.3 y 5.4 se promueve la reutilización de condensadores y otros componentes dañados, reduciendo la generación de residuos electrónicos y fomentando un enfoque de sostenibilidad ambiental en el desarrollo del proyecto.
- **Factores Económicos:** Desde el punto de vista económico, en la sección 4.4 se describe cómo se optó por realizar el mecanizado de las piezas de unión dentro de las instalaciones de la universidad, con el apoyo del personal técnico capacitado de la institución. Esta decisión permitió reducir significativamente los costos de mecanizado, ya que este servicio de manera externa tenía un valor aproximado de \$30 por pieza. Al requerirse un total de seis piezas, se logró un ahorro de \$180 al aprovechar los recursos internos de la universidad, sin comprometer la calidad del trabajo.