MANUAL DE PROCEDIMIENTOS PARA EL LABORATORIO ESPECIALIZADO DE ALTA TENSIÓN DE LA FACULTAD TECNOLÓGICA



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

JOHAN FERNEY CASTILLO GONZALEZ

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
INGENIERÍA ELÉCTRICA POR CICLOS PROPEDEUTICOS
BOGOTA D.C.
2022

MANUAL DE PROCEDIMIENTOS PARA EL LABORATORIO ESPECIALIZADO DE ALTA TENSIÓN DE LA FACULTAD TECNOLÓGICA

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

JOHAN FERNEY CASTILLO GONZALEZ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TITULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO

DIRECTORES
HENRY FELIPE IBÁÑEZ OLAYA
DIEGO ARMANDO GIRAL RAMIREZ

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
INGENIERÍA ELÉCTRICA POR CICLOS PROPEDEUTICOS
BOGOTA D.C.
2022

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION ***8***

1. ACTUALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE EQUIPOS, MODULO TERCO ***9***

1.1 Banco de elementos TERCO *10*

1.2 Relación Transformación - Divisor Resistivo Puro *13*

1.3 Relación Transformación - Divisor Capacitivo Puro *13*

1.4 Relación Transformación - Divisor Resistivo Compensado *14*

1.5 Relación Transformación - Divisor Capacitivo Amortiguado *15*

2. ESTUDIO Y MONTAJE EXPERIMENTAL PARA GENERACIÓN Y MEDICIÓN DE ALTAS TENSIONES AC (HV-AC) ***16***

2.1 Requerimientos y características Laboratorio Especializado Alta Tensión *16*

2.2 Transformador sencillo de tanque cilíndrico TERCO - HV9105 ..... *17*

2.3 Transformadores en cascada *18*

2.4 Montaje experimental – Generación y medición de altas tensiones (HV-AC) *19*

2.4.1 Medición de altas tensiones (HV-AC) con Divisor Resistivo Puro *21*

2.4.2 Medición de altas tensiones (HV-AC) con Divisor Capacitivo Puro *22*

2.4.3 Medición de altas tensiones (HV-AC) con Divisor Resistivo Compensado *23*

2.4.4 Medición de altas tensiones (HV-AC) con Divisor Capacitivo Amortiguado *24*

2.4.5 Medición de altas tensiones (HV-AC) con DRP y DCP mediante Tektronix DPO7054C *25*

3. ESTUDIO Y MONTAJE EXPERIMENTAL PARA GENERACIÓN Y MEDICIÓN DE ALTAS TENSIONES DC (HV-DC) ***27***

3.1 Circuitos rectificadores – Media onda *27*

3.2 Circuitos rectificador - Onda completa *28*

3.3 Cockroft-walton – Circuito en cascada *30*

3.4 Montaje experimental – Generación y medición de altas tensiones (HV-DC) *30*

3.4.1 Medición de altas tensiones (HV-DC) con Divisor Resistivo Puro *32*

3.4.2 Medición de altas tensiones (HV-DC) con Divisor Resistivo Compensado *33*

3.4.3 Medición de altas tensiones: (HV-AC) con DCP y (HV-DC) con DRP mediante Tektronix DPO7054C *35*

4. ESTUDIO Y MONTAJE EXPERIMENTAL PARA GENERACIÓN Y MEDICIÓN DE IMPULSOS DE TENSIÓN (GIT) ***36***

4.1 Circuito de generación para un impulso de tensión – GIT *36*

4.2 Impulso tipo rayo normalizado – NTC4591 ..... *38*

4.3 Impulso tipo maniobra normalizado – NTC4591 ..... *39*

4.4 Montaje experimental - Impulsos de tensión (GIT) *40*

4.4.1 Medición de Impulso de tensión con Osciloscopio DPO7054C *42*

5. ESTUDIO Y MONTAJE EXPERIMENTAL PARA GENERACIÓN Y MEDICIÓN DE IMPULSOS DE CORRIENTE (GIC) ***44***

5.1 Circuito de generación para un impulso de corriente – GIC *44*

5.2 Definiciones para los ensayos de corriente de impulso *45*

5.3 Corrientes de impulso normalizadas *46*

5.4 Montaje experimental – Impulsos de corriente (GIC) *46*

5.4.1 Medición de Impulso de tensión con Osciloscopio DPO7054C *48*

6. ESTUDIO Y MONTAJE EXPERIMENTAL PARA DESCARGA EN MATERIALES AISLANTES Y DIELÉCTRICOS ***49***

6.1 Tipos de descarga *49*

6.2 Tensión disruptiva (Descarga directa)....49

6.3 Tensión de ruptura DC (breakdown) – Ley de Paschen....50

6.4 Montaje experimental – Descarga parcial en gases (aire)....50
6.4.1 Montaje experimental – Descarga parcial en gases (aire) – Esfera_Esfera.....51
6.4.2 Montaje experimental – Descarga parcial en gases (aire) – Placa_Placa.....52
6.4.3 Montaje experimental – Descarga parcial en gases (aire) – Punta_Punta.....53
6.4.4 Montaje experimental – Descarga parcial en gases (aire) – Punta(+)_Placa(-).....54
6.4.5 Montaje experimental – Descarga parcial en gases (aire) – Punta(-) Placa(+)....55
6.4.6 Comparación de Descargas parciales en función de los electrodos usados.....56
6.4.7 Descarga Parcial en Aceite dieléctrico – Configuración Placa-Placa....56

7. ESTUDIO Y MONTAJE EXPERIMENTAL PARA DESCARGADORES DE SOBRETENSIÓN....58

7.1 Prueba en HV-AC para Descargadores de sobretensión....58
7.1.1 Montaje Experimental – Descargador de sobretensión BOWTHORFE.....59
7.1.2 Montaje Experimental – Descargador de sobretensión GENERAL ELECTRIC.....61

7.2 Prueba Impulso Tipo Rayo para Descargadores de sobretensión....63
7.2.1 Montaje Experimental – Impulso Tipo Rayo en Descargador de sobretensión BOWTHORFE....64
7.2.2 Montaje Experimental – Impulso Tipo Rayo en Descargador de sobretensión GENERAL ELECTRIC....66

BIBLIOGRAFIA....68

TABLA DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Banco de elementos TERCO. Tomado de: Fuente propia. 9
Figura 2. Sistema básico para pruebas de tensión. Tomado de: High Voltage Engineering, Second edition 2000, E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel. 17
Figura 3. Transformador sencillo de tanque cilíndrico TERCO - HV9105 Tomado de: Terco HV9000 High Voltage Modular Training Set, 2015. 18
Figura 4. Transformadores en cascada para la generación de HV-AC Tomado de: High Voltage Engineering, Second edition 1995, M S Naidu, V Kamaraju. 18
Figura 5. Generación de HV-AC con transformadores en cascada TERCO Tomado de: Terco HV9000 High Voltage Modular Training Set, 2015. 19
Figura 6. Placa característica transformador TERCO-HV9105 Tomado de: Fuente propia. 19
Figura 7. Medición de HV-AC usando Divisor Resistivo Puro Tomado de: Fuente propia. 21
Figura 8. Medición de HV-AC usando Divisor Capacitivo Puro Tomado de: Fuente propia. 22
Figura 9. Medición de HV-AC usando Divisor Resistivo Compensado Tomado de: Fuente propia. 23
Figura 10. Medición de HV-AC usando Divisor Capacitivo Amortiguado Tomado de: Fuente propia. 24
Figura 11. Medición de HV-AC con DRP y DCP en simultaneo Tomado de: Fuente propia. 25
Figura 12. Medición de HV-AC con DRP y DCP mediante Osciloscopio Tektronix DPO7054C Tomado de: Fuente propia. 25
Figura 13. (a)Rectificador de media onda con capacitancia de filtro (b)Tensión de entrada AC y Rectificación a DC Tomado de: High Voltage Engineering, Second edition 2000, E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel. 28
Figura 14. Circuito rectificador de onda completa con dos diodos Tomado de: High Voltage Engineering, Second edition 2000, E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel. 29
Figura 15. (a) onda seno de entrada (b) salida con rectificador de media onda (c) salida con rectificador de onda completa Tomado de: High Voltage Engineering, Second edition 1995, M S Naidu, V Kamaraju. 29
Figura 16. Generador de HV-DC Cockroft walton Tomado de: High Voltage Engineering, Second edition 2000, E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel. 30
Figura 17. Circuito rectificador de media onda para generar HV-DC Tomado de: Fuente propia. 31
Figura 18. Medición de HV-DC usando Divisor Resistivo Puro Tomado de: Fuente propia. 32
Figura 19. Medición de HV-DC usando Divisor Resistivo Compensado Tomado de: Fuente propia. 33
Figura 20. Medición de HV-AC con DCP y HV-DC con DRP mediante Osciloscopio Tektronix DPO7054C Tomado de: Fuente propia. 35
Figura 21. Circuito básico tipo Marx para la Generación de impulsos de tensión. Tomado de: High Voltage Engineering, Second edition 2000, E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel. 36
Figura 22. Forma de onda general de un impulso de tensión. Tomado de: IEC 60-1. 37
Figura 23. Forma de onda - Impulso tipo rayo normalizado Tomado de: NTC4591 39
Figura 24. Forma de onda - Impulso tipo maniobra normalizado Tomado de: NTC4591 40
Figura 25. Circuito experimental para el Generador de Impulsos de Tensión Tomado de: Fuente propia. 41
Figura 26. Impulso Tipo Rayo obtenido del ensayo experimental mostrado en la pantalla del osciloscopio Tektronix DPO7054C Tomado de: Fuente propia. 42
Figura 27. Circuito general de un generador de impulsos de corriente 44
Figura 28. Circuito experimental para el Generador de Impulsos de Corriente Tomado de: Fuente propia. 47
Figura 29. Impulso de corriente obtenido del ensayo experimental mostrado en la pantalla del osciloscopio Tektronix DPO7054C. Tomado de: Fuente Propia. 48
Figura 30. Descarga Esfera-Esfera Tomado de: Fuente propia. 51
Figura 31. Descarga Placa-Placa Tomado de: Fuente propia. 52
Figura 32. Descarga Punta-Punta Tomado de: Fuente propia. 53
Figura 33. Descarga Punta(+) Placa(-) Tomado de: Fuente propia. 54
Figura 34. Descarga Punta(-) Placa(+) Tomado de: Fuente propia. 55
Figura 35. Comparación Descarga Parcial Con Configuraciones de electrodos. Tomado de: Fuente Propia. 56
Figura 36. Aspectos generales sobre pruebas de aceite en transformadores de potencia. 56
Figura 37. Prueba de rigidez dielectrica para aceite. Tomado de: Fuente Propia. 57
Figura 38. Descargador de sobretensión BOWTHORFE expuesto a un HV-AC Tomado de: Fuente propia. 59
Figura 39. Descargador de sobretensión BOWTHORFE a 10kVrms mostrado en Osciloscopio Tektronix DPO7054C Tomado de: Fuente propia. 59
Figura 40. Descargador de sobretensión BOWTHORFE a 12,6k Vrms mostrado en Osciloscopio Tektronix DPO7054C Tomado de: Fuente propia. 60

Figura 41. Descargador de sobretensión GENERAL ELECTRIC expuesto a un HV-AC TOMADO DE: FUENTE PROPIA. 61
Figura 42. Descargador de sobretensión GENERAL ELECTRIC a 18kVrms mostrado en Osciloscopio Tektronix DPO7054C TOMADO DE: FUENTE PROPIA. 61
Figura 43. Descargador de sobretensión GENERAL ELECTRIC a 24kVrms mostrado en Osciloscopio Tektronix DPO7054C TOMADO DE: FUENTE PROPIA. 62
Figura 44. Circuito Generador de Impulso Tipo Rayo 1,2/48us con soporte para objeto de prueba. TOMADO DE: FUENTE PROPIA. 63
Figura 45. Impulso Tipo Rayo de 28,4kV sin DPS BOWTHORFE TOMADO DE: FUENTE PROPIA. 64
Figura 46. Descargador de sobretensión BOWTHORFE ante Impulso Tipo Rayo 1,2/48us TOMADO DE: FUENTE PROPIA. 64
Figura 47. Impulso Tipo Rayo de 25,5kV en DPS BOWTHORFE TOMADO DE: FUENTE PROPIA.....65
Figura 48. Impulso Tipo Rayo de 50,5kV sin DPS GENERAL ELECTRIC.....66
Figura 49. Descargador de sobretensión GENERAL ELECTRIC ante Impulso Tipo Rayo 1,2/48us TOMADO DE: FUENTE PROPIA. 66
Figura 50. Impulso Tipo Rayo de 42,5kV en DPS BOWTHORFE TOMADO DE: FUENTE PROPIA.....67

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Elementos TERCO, valores nominales y su aplicación. 11
Tabla 2. Valores medidos elementos TERCO. 12
Tabla 3. Relación Transformación - Divisor Resistivo Puro. 13
Tabla 4. Relación Transformación - Divisor Capacitivo Puro. 13
Tabla 5. Relación Transformación - Divisor Resistivo Compensado. 14
Tabla 6. Relación Transformación - Divisor Capacitivo Amortiguado. 15
Tabla 7. Tabla comparativa de divisores de tensión. 15
Tabla 8. Medición de HV-AC con DRP vs Relación de transformación del trafo HV9105 21
Tabla 9. Medición de HV-AC con DCP vs Relación de transformación del trafo HV9105 22
Tabla 10. Medición de HV-AC con DRC vs Relación de transformación del trafo HV9105 23
Tabla 11. Medición de HV-AC con DCA vs Relación de transformación del trafo HV9105 24
Tabla 12. Medición de HV-DC con DRP vs Medición de HV-AC con DCP 32
Tabla 13. Medición de HV-DC con DRC vs Medición de HV-AC con DCP 34
Tabla 14. Tiempos de frente y cola calculados para el Impulso Tipo Rayo Generado 43
Tabla 15. Valores y características del impulso de corriente normalizado – NTC4519. 46
Tabla 16. Valor de ruptura en función de la distancia de electrodos - Esfera_Esfera. 51
Tabla 17. Valor de ruptura en función de la distancia de electrodos - Placa_Placa 52
Tabla 18. Valor de ruptura en función de la distancia de electrodos - Punta_Punta 53
Tabla 19. Valor de ruptura en función de la distancia de electrodos - Punta(+) Placa(-) 54
Tabla 20. Valor de ruptura en función de la distancia de electrodos - Punta(-) Placa(+) 55

INTRODUCCION

Las Técnicas de Aislamiento y Alta Tensión son una de las ramas de la Ingeniería Eléctrica dentro del campo de la tecnología, que requieren de mayor experimentación, y por consiguiente, de la realización de prácticas y experimentos aplicados en ambientes dotados de equipos e instrumentos especializados. La tensión disruptiva de aisladores, las perdidas por efecto corona, el grado de protección de los pararrayos y descargadores de sobretensiones, entre otros, no se pueden determinar con exactitud por otro método que no sea el del ensayo experimental; el cual se puede conseguir a través de las diferentes técnicas en la generación de impulsos de tensión y corriente.

De esta manera resulta beneficioso entonces, para cualquier estudiante del programa de tecnológica en electricidad de media y baja tensión, Ingeniería eléctrica o cualquier otra persona que haga uso del laboratorio, tener una guía o manual de procedimientos en la cual se exponga la manera adecuada de realizar las conexiones para este tipo de ensayos y con ayuda de los elementos de instrumentación interpretar los resultados obtenidos en las pruebas. Se propone así en elaborar y redactar un manual de procedimientos para el Laboratorio Especializado de Alta Tensión, el cual sirva como material de apoyo y permita conocer a fondo el uso y funcionamiento de los equipos, montajes típicos y ensayos experimentales concernientes al entendimiento de las altas tensiones.

1. ACTUALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE EQUIPOS, MODULO TERCO

Los métodos de la Alta Tensión son una de las ramas de la Ingeniería Eléctrica dentro del campo de la tecnología, que requieren de mayor experimentación, y por consiguiente, de la realización de prácticas y experimentos aplicados en ambientes dotados de equipos e instrumentos especializados. La generación de altas tensiones AC y DC, la tensión disruptiva de aisladores, el grado de protección de los pararrayos y descargadores de sobretensiones, la generación de impulsos de tensión y corriente, entre otros, no se pueden determinar con exactitud por otro método que no sea el del ensayo experimental; el cual se puede conseguir a través de los diferentes montajes que permite un laboratorio de alta tensión.

Al presente en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en su facultad tecnológica se cuenta con un Laboratorio Especializado de Alta Tensión, espacio dotado por equipos y elementos que permiten realizar varias configuraciones para entender los fenómenos presentes en el estudio de las altas tensiones. Principalmente los equipos y elementos de circuitos disponibles en el LEAT son de la marca sueca TERCO, fundada en Estocolmo en el año 1963. Ahora bien, tomando como punto de partida que los montajes experimentales a realizar son mayormente empleando dichos elementos, se hace necesario actualizar e identificar los valores nominales de los mismos; entiéndase por esto que antes de energizar cualquier elemento se debe reconocer para que esta destinado y cuál es su aplicación. En la figura 1 se presenta el banco de elementos TERCO.

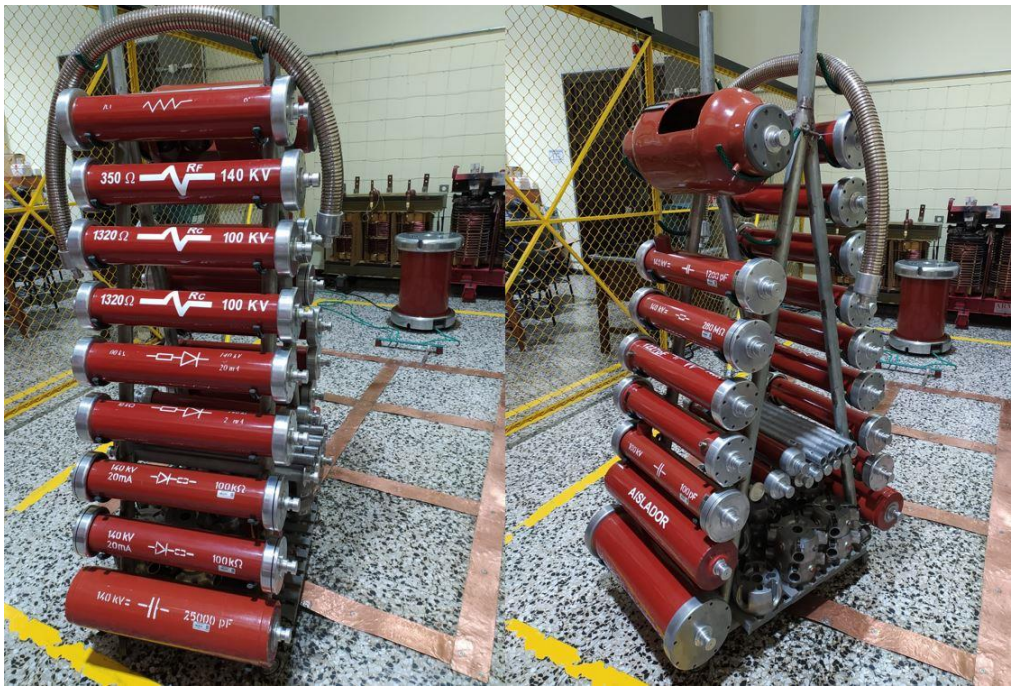


Figura 1. Banco de elementos TERCO.
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

Es importante mencionar que no todos los elementos de este banco fueron allegados al LEAT por una compra realizada directamente a la marca TERCO y desde la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, sino que algunos de ellos son diseño y construcción en proyectos de grado desarrollados a través de los años anteriores por estudiantes de *Ingeniería En Distribución Y Redes Eléctricas* de la facultad tecnológica.

1.1 Banco de elementos TERCO

A continuación, se describe cuales elementos componen actualmente el banco TERCO y se enuncian sus valores nominales junto con la aplicación, véase la tabla 1.

Referencia Equivalente TERCO	Elemento	Valores Nominales	Aplicación
HV9103	Módulo de mando	Potencia Nominal: 5kVA Continuos. Tensión de alimentación: 230V Tensión salida: 0 - 250V Corriente salida: 0 - 25A Frecuencia: 50/60Hz	1.Energizar de manera controlada el transformador de ensayos HV9105.
HV9105	Transformador de ensayos	Potencia nominal: 5kVA Continuos. Tensión nominal: 220V / 100kV Corriente nominal: 22,72A / 50mA Frecuencia: 50/60Hz Short circuit impedance: 4,8%	1.Energizar los montajes elevando y generando una alta tensión AC.
HV9111	Diodo rectificador (x4)	Tensión de pico inversa: 140 kV Corriente nominal: 20 mA Resistencia protección: 100 kΩ Longitud/Altura: 743 mm Peso: 8 kg	1.Generación de tensión DC. 2.Rectificador para impulso de tensión.
HV9112	Condensador	Tensión DC e Impulso: 140 kV Capacitancia: 25.000pF Longitud/Altura: 743 mm Peso: 20 kg	1.Generación de tensión DC. 2.Condensador de carga para impulso de tensión.
-	Condensador	Tensión DC e Impulso: 140 kV Capacitancia: 2nF Longitud/Altura: 743 mm Peso: 20 kg	1.Generación de tensión DC. 2.Condensador de carga para impulso de tensión.
HV9127	Resistencia de protección	Resistencia: 3,6 MΩ Longitud/Altura: 743 mm Peso: 4,5 kg	1.Resistencia limitadora.
HV9125	Espinterómetro	Tensión de impulso: 140 kV Diámetro de las esferas: 100 mm Máx. ajuste de espacio: 80 mm Longitud/Altura: 743 mm Peso: 7 kg	1.Generación de impulso de tensión.
HV9122	Resistencia de frente	Tensión de impulso: 140 kV Resistencia: 350 Ω Longitud/Altura: 743 mm Peso: 5 kg	1.Generación de impulso de tensión. (Determina el tiempo de subida)
HV9123	Resistencia de cola (x2)	Tensión de impulso: 140 kV Resistencia: 1320 Ω Longitud/Altura: 743 mm Peso: 5 kg	1.Generación de impulso de tensión. (Determina el tiempo de bajada hasta la mitad)

HV9134	Sistema porta electrodos	Longitud/Altura: 743 mm Peso: 10 kg	1.Descarga en gases (aire) y líquidos (aceite dieléctrico).
HV9124	Barra aislante (x2)	Tensión AC: 100 kV Tensión DC e Impulso: 140 kV Longitud/Altura: 743 mm Peso: 1,5 kg	1.Aislante y soporte mecánico para elementos.
HV9108	Barra conexión superior (x7)	Longitud/Altura: 743 mm Peso: 1 kg	1.Elemento conductor de aluminio para conexión a nivel superior, se inserta en copa de conexión.
HV9121	Tubo espaciador inferior (x5)	Longitud/Altura: 718 mm Peso: 1 kg	1.Elemento conductor de aluminio para conexión a nivel del suelo, se inserta en pedestal de piso.
HV9109	Copa de conexión (x8)	Dimensión: Ø 157 x h 86 mm Peso: 2,2 kg	1.Elemento conductor, cuatro elementos se puede insertar en posición horizontal y dos en posición vertical.
HV9110	Pedestal de piso (x11)	Dimensión: 200 x 200 x 80 mm Peso: 2 kg	1.Elemento conductor, cuatro tubos espaciadores horizontalmente y apoyando un componente verticalmente.
HV9106	Barra de conexión flexible	Longitud: 1,5m	1.Conexión metálica flexible con conector para el transformador de prueba y copa de conexión.
HV9113	Divisor resistivo puro (DRP)	Tensión DC: 140 kV Resistencia: 280 MΩ Corriente continua nominal: 0,5 mA Longitud/Altura: 743 mm Peso: 5 kg	1.Medición de altas tensiones AC y DC.
HV9141	Divisor capacitivo puro (DCP)	Tensión AC: 100 kV Capacitancia: 100 pF Longitud/Altura: 743 mm Peso: 9 kg	1.Medición de altas tensiones AC.
HV9120	Divisor capacitivo puro para impulsos (DCP_I)	Tensión DC e Impulso: 140 kV Capacitancia: 1200pF Longitud/Altura: 743 mm Peso: 9 kg	1.Medición para impulso de tensión.
-	Divisor resistivo compensado (DRC)	Tensión DC: 140 kV Resistencia: 280 MΩ Capacitancia: 98,79 paf Longitud/Altura: 743 mm Peso: 5 kg	1.Medición de altas tensiones AC y DC.
-	Divisor capacitivo amortiguado (DCA)	Tensión AC: 100 kV Resistencia: 54,28 Ω Capacitancia: 12279 pF Longitud/Altura: 743 mm Peso: 5 kg	1.Medición de altas tensiones AC.

Tabla 1. Elementos TERCO, valores nominales y su aplicación.

Con ánimo de garantizar y llevar una trazabilidad de estos valores nominales, se creó una hoja de vida para el seguimiento de los equipos y allí se llevará el registro periódicamente de los valores medidos con distintos equipos como el Fluke 289, Puente RLC PM6306, Amprobe AMB-50 y Micro-ohmmeter AEMC6250, tal como se aprecia en la tabla 2.

Valores Nominales Vs Valores Medidos Banco elementos Terco	**Realizado por:**	**Fecha de medición:**	**Día**	**Mes**	**Año**
	Johan Castillo		15	Julio	2022
Elemento	**Fluke 289 #1**	**Fluke 289 #2**	**Puente RLC PM6306**	**Amprobe AMB-50**	**Micro - ohmmeter AEMC6250**
Resistencia de protección 3,6 [MΩ]	3,7610 [MΩ]	3,7602 [MΩ]	3,764 [MΩ]	3,8 [MΩ]	No aplica
Resistencia de frente 350 Ω	344,34 [Ω]	344,53 [Ω]	344,34 [Ω]	No aplica	344,4 [Ω]
Resistencia de cola #1 1320 Ω	1320,5 [Ω]	1321,5 [Ω]	1320,6 [Ω]	No aplica	1320,6 [Ω]
Resistencia de cola #2 1320 Ω	1322,4 [Ω]	1322,9 [Ω]	1322,4 [Ω]	No aplica	1322,3 [Ω]
Impulse Capacitor (Condensador de impulso 25000 pF)	27 [nF]	27 [nF]	26,646 [nF]	No aplica	No aplica
Impulse Capacitor (Condensador de impulso 2 nF)	2,23 [nF]	2,22 [nF]	2,224 [nF]	No aplica	No aplica
Divisor Resistivo Puro Measuring Resistor (Resistencia de medición 280 MΩ)	280,7 [MΩ]	280,6 [MΩ]	No aplica	281 [MΩ]	No aplica
Divisor Capacitivo Puro Measuring Capacitor (Condensador de medición 100 pF)	0,100 [nF]	0,100 [nF]	99,7 [pF]	No aplica	No aplica
Divisor Capacitivo Puro Para Impulsos Load Capacitor (Condensador de carga 1200 pF)	1,32 [nF]	1,32 [nF]	1,1994 [nF]	No aplica	No aplica
Divisor Resistivo Compensado (280 MΩ // 98,79 pF)	291,7 [MΩ] // 0,099 [nF]	289,3 [MΩ] // 0,098 [nF]	98,6 [pF]	292 [MΩ]	No aplica
Divisor Capacitivo Amortiguado (54,28 Ω - 1227pF)	1,32 [nF]	1,33 [nF]	57,52 [Ω] - 1,2210 [nF]	No aplica	No aplica

Tabla 2. Valores medidos elementos TERCO.

A partir de las pruebas realizadas, podemos evidenciar que los valores nominales presentados para cada elemento tienen una variación luego de ser medidos y por ende se tomaran como referencia para el estudio de las altas tensiones aquellos valores que fueron registrados en la tabla 2.

Como trabajo previo a realizar mediciones en HV-AC y HV-DC se realizó el desarrollo teórico para encontrar las relaciones de transformación teóricas y reales de cada uno de los 4 sistemas de medida presentes en el LEAT; *Divisor Resistivo Puro, Divisor Capacitivo Puro, Divisor Resistivo Compensado y Divisor Capacitivo Amortiguado.* Estas relaciones serán importantes para el análisis de los datos medidos en cada montaje experimental, ya que las lecturas tomadas en BT en [Vrms] por los instrumentos de medida como el Fluke 289 o el osciloscopio Tektronix DPO 7054C luego deberán traducirse en el valor real que hay en AT dado en [kVrms].

1.2 Relación Transformación - Divisor Resistivo Puro

Divisor Resistivo Puro	
$V_{BT} = V_{AT} * \frac{R_{BT}}{R_{BT} + R_{AT}}$ $V_{AT} = V_{BT} * \frac{R_{BT} + R_{AT}}{R_{BT}}$ $m = \frac{R_{BT} + R_{AT}}{R_{BT}}$	
Valores Teóricos	**Valores Medidos**
$R_{AT} = 280[M\Omega]$ $R_{BT} = 40[k\Omega]$ $m_{Teorico} = \frac{40[k\Omega] + 280[M\Omega]}{40[k\Omega]}$ $m_{Teorico} = 7001$	$R_{AT} = 281[M\Omega]$ $R_{BT} = 40{,}219[k\Omega]$ $m_{Real} = \frac{40{,}219[k\Omega] + 281[M\Omega]}{40{,}219[k\Omega]}$ $m_{Real} = 6987{,}74$

Tabla 3. Relación Transformación - Divisor Resistivo Puro.

1.3 Relación Transformación - Divisor Capacitivo Puro

Divisor Capacitivo Puro	
$V_{BT} = V_{AT} * \frac{C_{AT}}{C_{BT} + C_{AT}}$ $V_{AT} = V_{BT} * \frac{C_{BT} + C_{AT}}{c_{AT}}$ $m = \frac{C_{BT} + C_{AT}}{C_{AT}}$	
Valores Teóricos	**Valores Medidos**
$C_{AT} = 100[pF]$ $C_{BT} = 330[nF]$ $m_{Teorico} = \frac{330[nF] + 100[pF]}{100[pF]}$ $m_{Teorico} = 3301$	$C_{AT} = 99{,}7[pF]$ $C_{BT} = 336[nF]$ $m_{Real} = \frac{336[nF] + 99{,}7[pF]}{99{,}7[pF]}$ $m_{Real} = 3371{,}11$

Tabla 4. Relación Transformación - Divisor Capacitivo Puro.

1.4 Relación Transformación - Divisor Resistivo Compensado

<table>
<tr><th colspan="2">Divisor Resistivo Compensado</th></tr>
<tr><td>

$$V_{BT} = V_{AT} * \frac{Z_{BT}}{Z_{BT} + Z_{AT}}$$

$$V_{AT} = V_{BT} * \frac{Z_{BT} + Z_{AT}}{Z_{BT}}$$

$$m = \frac{Z_{BT} + Z_{AT}}{Z_{BT}}$$

</td><td>



</td></tr>
<tr><th>Valores Teóricos</th><th>Valores Medidos</th></tr>
<tr><td>

$R_{AT} = 280[M\Omega] \rightarrow Z_{R_{AT}} = 280[M\Omega]$

$C_{AT} = 98{,}79[pF] \rightarrow Z_{C_{AT}} = \frac{1}{jwC_{AT}} = \frac{1}{j * 120\pi * 98{,}79[pF]} = -j26850717{,}53[\Omega]$

$R_{BT} = 102{,}3[k\Omega] \rightarrow Z_{R_{BT}} = 102{,}3[M\Omega]$

$C_{BT} = 0{,}271[uF] \rightarrow Z_{C_{BT}} = \frac{1}{jwC_{BT}} = \frac{1}{j * 120\pi * 0{,}271[uF]} = -j9788{,}12[\Omega]$

$Z_{AT} = Z_{R_{AT}} \backslash\backslash Z_{C_{AT}} = \frac{Z_{R_{AT}} * Z_{C_{AT}}}{Z_{R_{AT}} + Z_{C_{AT}}}$

$Z_{AT} = \frac{280[M\Omega] * (-j26.850.717{,}53[\Omega])}{280[M\Omega] + (-j26.850.717{,}53[\Omega])} = 2551398{,}34 - j26606050{,}11[\Omega]$

$Z_{BT} = Z_{R_{BT}} \backslash\backslash Z_{C_{BT}} = \frac{Z_{R_{BT}} * Z_{C_{BT}}}{Z_{R_{BT}} + Z_{C_{BT}}}$

$Z_{BT} = \frac{102{,}3[M\Omega] * (-j9788{,}12[\Omega])}{102{,}3[M\Omega] + (-j9788{,}12[\Omega])} = 928{,}03 - j9699{,}33[\Omega]$

$m_{Teorico} = \frac{(928{,}03 - j9699{,}33[\Omega]) + (2551398{,}34 - j26606050{,}11[\Omega])}{(928{,}03 - j9699{,}33[\Omega])}$

$m_{Teorico} = 2744{,}13 + j0{,}58$

$m_{Teorico} = |2744{,}13 + j0{,}58| = 2744{,}13$

</td><td>

$R_{AT} = 292[M\Omega] \rightarrow Z_{R_{AT}} = 292[M\Omega]$

$C_{AT} = 98{,}6[pF] \rightarrow Z_{C_{AT}} = \frac{1}{jwC_{AT}} = \frac{1}{j * 120\pi * 98{,}6[pF]} = -j26902458{,}26[\Omega]$

$R_{BT} = 102{,}02[k\Omega] \rightarrow Z_{R_{BT}} = 102{,}02[M\Omega]$

$C_{BT} = 0{,}271[uF] \rightarrow Z_{C_{BT}} = \frac{1}{jwC_{BT}} = \frac{1}{j * 120\pi * 0{,}271[uF]} = -j9788{,}12[\Omega]$

$Z_{AT} = Z_{R_{AT}} \backslash\backslash Z_{C_{AT}} = \frac{Z_{R_{AT}} * Z_{C_{AT}}}{Z_{R_{AT}} + Z_{C_{AT}}}$

$Z_{AT} = \frac{292[M\Omega] * (-j26902458{,}26[\Omega])}{292[M\Omega] + (-j26902458{,}26[\Omega])} = 2457707{,}74 - j26676025{,}45[\Omega]$

$Z_{BT} = Z_{R_{BT}} \backslash\backslash Z_{C_{BT}} = \frac{Z_{R_{BT}} * Z_{C_{BT}}}{Z_{R_{BT}} + Z_{C_{BT}}}$

$Z_{BT} = \frac{102{,}02[M\Omega] * (-j9788{,}12[\Omega])}{102{,}02[M\Omega] + (-j9788{,}12[\Omega])} = 930{,}53 - j9698{,}84[\Omega]$

$m_{Real} = \frac{(930{,}53 - j9698{,}84[\Omega]) + (2457707{,}74 - j26676025{,}45[\Omega])}{(930{,}53 - j9698{,}84[\Omega])}$

$m_{Real} = 2750{,}43 - j10{,}38$

$m_{Real} = |2750{,}43 - j10.38| = 2750{,}45$

</td></tr>
</table>

Tabla 5. Relación Transformación - Divisor Resistivo Compensado.

1.5 Relación Transformación - Divisor Capacitivo Amortiguado

<table>
<tr><th colspan="2">Divisor Capacitivo Amortiguado</th></tr>
<tr><td>

$$V_{BT} = V_{AT} * \frac{Z_{BT}}{Z_{BT} + Z_{AT}}$$

$$V_{AT} = V_{BT} * \frac{Z_{BT} + Z_{AT}}{Z_{BT}}$$

$$m = \frac{Z_{BT} + Z_{AT}}{Z_{BT}}$$

</td><td>
</td></tr>
<tr><th>Valores Teóricos</th><th>Valores Medidos</th></tr>
<tr><td>

$$R_{AT} = 54{,}28[\Omega] \rightarrow Z_{R_{AT}} = 54{,}28[\Omega]$$

$$C_{AT} = 1227[pF] \rightarrow Z_{C_{AT}} = \frac{1}{jwC_{AT}} = \frac{1}{j * 120\pi * 1227[pF]} = -j2161843{,}83[\Omega]$$

$$R_{BT} = 0{,}03952[\Omega] \rightarrow Z_{R_{BT}} = 0{,}03952[\Omega]$$

$$C_{BT} = 1{,}686[uF] \rightarrow Z_{C_{BT}} = \frac{1}{jwC_{BT}} = \frac{1}{j * 120\pi * 1{,}686[uF]} = -j1573{,}29[\Omega]$$

$$Z_{AT} = Z_{R_{AT}} + Z_{C_{AT}}$$

$$Z_{AT} = 54{,}28 - j2161843{,}83[\Omega]$$

$$Z_{AT} = Z_{R_{BT}} + Z_{C_{BT}}$$

$$Z_{BT} = 0{,}03952 - j1573{,}29[\Omega]$$

$$m_{Teorico} = \frac{(0{,}03952 - j1573{,}29[\Omega]) + (54{,}28 - j2161843{,}83[\Omega])}{(0{,}03952 - j1573{,}29[\Omega])}$$

$$m_{Teorico} = 1375{,}08 - j15{,}10e - 6$$

$$m_{Teorico} = |1375{,}08 - j15{,}10e - 6| = 1375{,}08$$

</td><td>

$$R_{AT} = 56{,}26[\Omega] \rightarrow Z_{R_{AT}} = 56{,}26[\Omega]$$

$$C_{AT} = 1221[pF] \rightarrow Z_{C_{AT}} = \frac{1}{jwC_{AT}} = \frac{1}{j * 120\pi * 1221[pF]} = -j1660042{,}79[\Omega]$$

$$R_{BT} = 0{,}05384[\Omega] \rightarrow Z_{R_{BT}} = 0{,}05384[\Omega]$$

$$C_{BT} = 1{,}87[uF] \rightarrow Z_{C_{BT}} = \frac{1}{jwC_{BT}} = \frac{1}{j * 120\pi * 1{,}87[uF]} = -j1418{,}49[\Omega]$$

$$Z_{AT} = Z_{R_{AT}} + Z_{C_{AT}}$$

$$Z_{AT} = 56{,}26 - j2172467{,}14[\Omega]$$

$$Z_{AT} = Z_{R_{BT}} + Z_{C_{BT}}$$

$$Z_{BT} = 0{,}05384 - j1418{,}49[\Omega]$$

$$m_{Teorico} = \frac{(0{,}05384 - j1418{,}49[\Omega]) + (56{,}26 - j2172467{,}14[\Omega])}{(0{,}05384 - j1418{,}49[\Omega])}$$

$$m_{Teorico} = 1171{,}28 - j0{,}0047$$

$$m_{Teorico} = |1171{,}28 - j0{,}0047| = 1171{,}28$$

</td></tr>
</table>

Tabla 6. Relación Transformación - Divisor Capacitivo Amortiguado.

Seguidamente, en la tabla 7 se muestra una comparación de los divisores de tensión, en donde se establece que tipo es adecuado en función de la señal que se pretende medir.

DIVISOR VS TIPO DE SEÑAL	ALTERNO (AC-60HZ)	CONTINUA (DC)	ALTERNO ALTAS FRECUENCIAS	IMPULSO TIPO RAYO
DIVISOR RESISTIVO PURO	SI	SI	NO	NO
DIVISOR CAPACITIVO PURO	SI	NO	SI	SI
DIVISOR RESISTIVO COMPENSADO	SI	SI	SI	SI
DIVISOR CAPACITIVO AMORTIGUADO	SI	NO	SI	SI

Tabla 7. Tabla comparativa de divisores de tensión.

2. ESTUDIO Y MONTAJE EXPERIMENTAL PARA GENERACIÓN Y MEDICIÓN DE ALTAS TENSIONES AC (HV-AC)

En general, los generadores de alta tensión disponibles en el mercado se utilizan en los laboratorios de pruebas rutinarias; se emplean para probar equipos como transformadores, bornes, cables, condensadores, aparamentos eléctricos, etc. Las pruebas deben confirmar la eficacia y la fiabilidad de los productos y, por lo tanto, es necesario un equipo de prueba de alta tensión para estudiar el comportamiento del aislamiento en todas las condiciones en las que se pueden encontrar los aparatos. Las amplitudes y los tipos de tensiones de prueba, que son siempre superiores a las tensiones normales o nominales de los equipos sometidos a prueba, suelen estar prescritas por normas o recomendaciones nacionales o internacionales, por lo que no hay mucha libertad en la selección de los equipos de prueba de alta tensión. Sin embargo, a menudo los laboratorios de pruebas de rutina también se utilizan para las pruebas de rutina.

Sin embargo, a menudo los laboratorios de pruebas rutinarias también se utilizan para el desarrollo de nuevos productos. En ese caso, pueden ser necesarias tensiones aún más altas para determinar el factor de seguridad sobre las posibles condiciones de trabajo y para garantizar que el rango de trabajo no sea ni demasiado alto ni demasiado bajo. La mayoría de los circuitos generadores de alta tensión pueden modificarse para aumentar los niveles de tensión de salida, si el circuito original se ha diseñado correctamente. Por lo tanto, incluso la selección del equipo de prueba rutinario debe tener siempre en cuenta la futura ampliación de las capacidades de prueba.

TOMADO DE: HIGH VOLTAGE ENGINEERING, SECOND EDITION 2000, E. KUFFEL, W.S. ZAENGL, J. KUFFEL, CHAPTER 2 - GENERATION OF HIGH VOLTAGES, PAGINA8.

2.1 Requerimientos y características Laboratorio Especializado Alta Tensión

- Las altas tensiones son usadas para pruebas sobre equipos de distribución, transmisión y potencia.
- Pruebas de aislamiento en materiales o elementos específicos (laboratorio y experimentación).
- Espacios que deben cumplir con condiciones de CEM y distancias de seguridad.
- Uso de elementos y protocolos de seguridad para el personal y los equipos.
- Baja tensión en el devanado primario (entre 220Vrms y 450 Vrms a frecuencia 50 o 60 Hz).
- Pruebas sobre elementos de alta impedancia (orden de MΩ)
- Pruebas que involucran bajas corrientes (< 1A)
- Requerimientos de bajas potencias (<10 kVA)
- Métodos y equipos especiales, NO REQUIEREN ALTAS POTENCIAS.
- Equipos para realización de pruebas de aislamiento.
- Tensiones entre 10 kVrms y 1.5 MVrms (*Máxima para el LEAT 100kV*).
- Mayor parte de las pruebas son a frecuencia industrial (60Hz)
- Pruebas con tensión fase-tierra
- Formas de ondas cercanas a sinusoides puras.

En la Figura 2 se presenta el sistema básico para realizar ensayos de tensión; esquema que ilustra de manera sencilla las etapas que se deben tener en cuenta para la generación y medición con HV-AC.

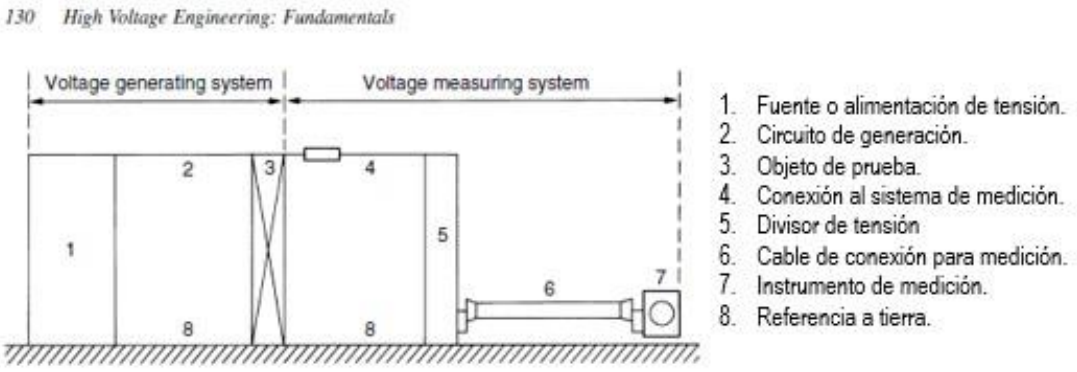


Figura 2. Sistema básico para pruebas de tensión.
TOMADO DE: HIGH VOLTAGE ENGINEERING, SECOND EDITION 2000, E. KUFFEL, W.S. ZAENGL, J. KUFFEL.

Ahora bien, para la generación de altas tensiones en corriente alterna (HV-AC) se emplean varias técnicas y configuraciones de equipos, en donde el uso de los transformadores eléctricos es de suma importancia. Las formas más comunes para alcanzar altas tensiones requieren del uso de transformadores sencillos, transformadores sencillos con tap central, **transformadores sencillos de tanque cilíndrico**, transformadores sencillos de tanque poligonal y transformadores resonantes.

Como se presentó en el capítulo 1, el LEAT tiene a su disposición un transformador de ensayos TERCO-HV9105, que principalmente es el equipo destinado a la generación de las altas tensiones; permitió alcanzar niveles de tensión entre 0 y 100 [kVrms] para energizar cada uno de los montajes experimentales que se desarrollaron en el transcurso de este trabajo de grado.

2.2 Transformador sencillo de tanque cilíndrico TERCO - HV9105

Cuando los requisitos de tensión de prueba son inferiores a unos 300 kVrms, se puede utilizar un único transformador para las pruebas. El transformador TERCO - HV9105 consta de tres devanados con carcasa aislante y electrodos de apantallamiento de aluminio sin corona superior e inferior. El cilindro aislante está fabricado con resina epoxi con refuerzo de fibra de vidrio y recubierto con barniz anti tracción.

El primer devanado de la excitatriz es un devanado doble de 2x220Vrms para conectarse a unos 220Vrms (conexión en paralelo) o 220 + 220Vrms para conectarse a unos 440Vrms (conexión en serie) La conexión en serie requerirá el 50% de la corriente de conexión en paralelo. El segundo devanado es el de alta tensión de 100 kVrms conectado en serie. El tercer devanado, conocido como "devanado acoplador", está previsto para las conexiones en cascada de los transformadores.

La bobina está impregnada al vacío y aislada con aceite de transformador de alta calidad. Véase la figura 3.

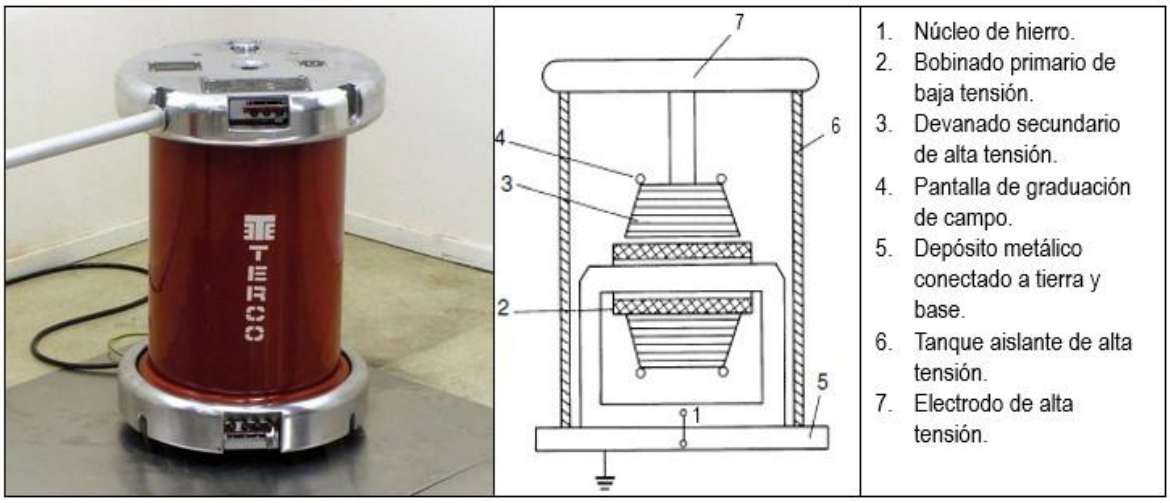


Figura 3. Transformador sencillo de tanque cilíndrico TERCO - HV9105
TOMADO DE: TERCO HV9000 HIGH VOLTAGE MODULAR TRAINING SET, 2015.

2.3 Transformadores en cascada

Para requisitos de tensión más elevados, la construcción de una sola unidad resulta difícil y costosa debido a los problemas de aislamiento. Además, es un problema realizar el transporte y el montaje de los grandes transformadores. Estos inconvenientes se superan mediante la conexión en cascada de varias unidades idénticas de transformadores, en las que los devanados de alta tensión de todas las unidades se conectan en serie para la generación de HV-AC.

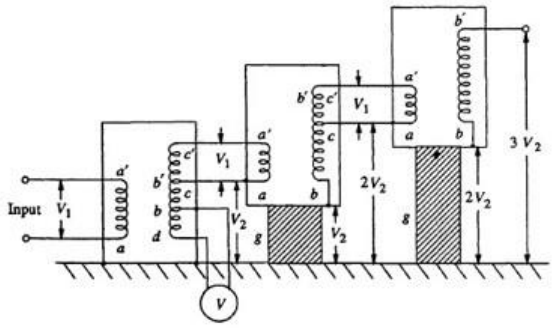


Fig. 6.10 Cascade transformer connection (schematic)

V_1 — Input voltage
V_2 — Output voltage
aa' — L.V. primary winding
bb' — H.V. secondary winding
cc' — Excitation winding
bd — Meter winding (200 to 500 V)

1. Tensiones entre 300 y 500 kV
2. Usa varias unidades de transformación
3. Transformadores idénticos
4. Tienen un devanado de excitación dentro de cada transformador
5. El peso puede ser dividido (transformadores ligeros y compactos)
6. Fácil transporte y conexión

Figura 4. Transformadores en cascada para la generación de HV-AC
TOMADO DE: HIGH VOLTAGE ENGINEERING, SECOND EDITION 1995, M S NAIDU, V KAMARAJU.

Un limitante que tiene el Laboratorio Especializado Alta tensión es el tener una sola unidad de transformación, ya que solo es posible generar hasta los 100kVrms. Si a futuro se logra adquirir un transformador de las mismas características al actual (Terco-HV9105), sería posible generar tensiones HV-AC en varias etapas, así como lo muestra el fabricante en su catálogo, véase la figura 5.

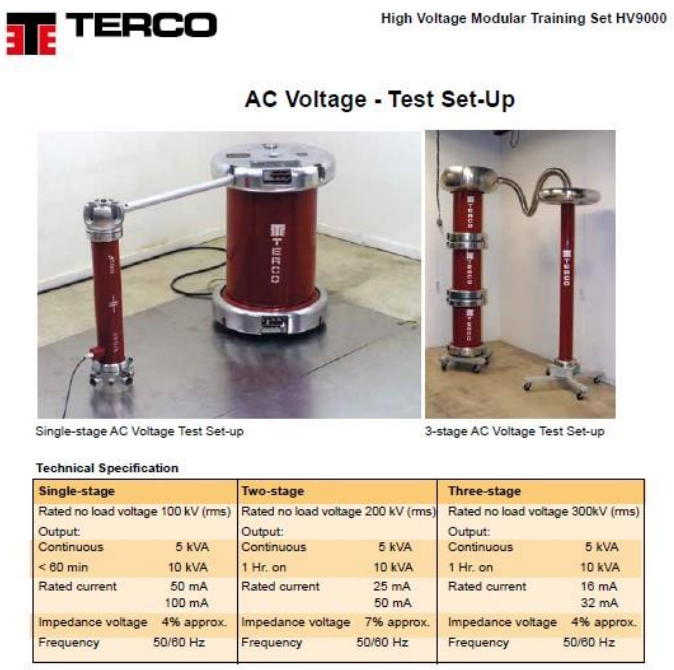


Figura 5. Generación de HV-AC con transformadores en cascada TERCO
TOMADO DE: TERCO HV9000 HIGH VOLTAGE MODULAR TRAINING SET, 2015.

2.4 Montaje experimental – Generación y medición de altas tensiones (HV-AC)

Para el montaje experimental en la generación de HV-AC se realizó a través de energizar por baja tensión el devanado primario del transformador TERCO HV-9105. En la figura 6 se muestra la placa característica del trafo en donde se aprecian sus valores nominales y a partir de las tensiones calcular la relación de transformación de la máquina. Teniendo una tensión nominal para AT de 100[kVrms] y en BT de 220[Vrms], se realiza el cociente de estos valores y se obtiene una relación de 1:454,54. Este valor nos indica que por cada voltio que se tenga en el devanado de BT se obtienen 454,54 voltios en el devanado de AT.

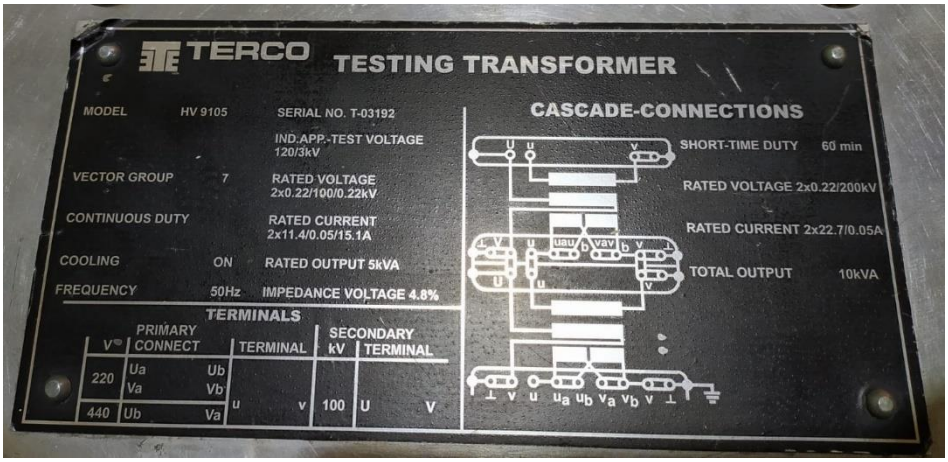


Figura 6. Placa característica transformador TERCO-HV9105
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

Se sugiere que para energizar el devanado de BT y hallar el valor generado en el lado de AT a partir del cálculo por relación de transformación, se haga colocando en primer lugar 11[Vrms] por el lado de baja debido a que con este valor se obtienen 5[kVrms] en el lado de alta.

Seguidamente podríamos colocar 22[Vrms] en el lado de baja tensión y obtener así 10[kVrms] en el lado de alta tensión, es decir, cada múltiplo de 11[Vrms] en BT tendrá un equivalente para los múltiplos de 5[kVrms] en AT; si se colocase en el devanado primario una tensión de 33[Vrms] conseguiríamos una tensión en el devanado secundario de 15[kVrms] y así sucesivamente.

De esta forma podemos variar la tensión de alimentación en 20 pasos iguales, comenzando en 11[Vrms] y terminado en los 220[Vrms] nominales del equipo.

Ahora bien, para efectuar la medida de HV-AC se puede estimar el valor a partir del cálculo simple que se puede realizar por relación de transformación, no obstante, para verificar la magnitud de tensión generada, se usaron los 4 sistemas de medida mencionados en el desarrollo teórico del capitulo1, acoplando uno por uno los divisores de tensión con la alta tensión generada por el transformador HV9105.

Para este montaje son necesarios como mínimo los siguientes equipos y elementos:

- (1) Módulo de mando.
- (1) Transformador de ensayos.
- (1) Sistema de medida de tensión; Rama de AT y BT de DRP o de DCP o de DRC o de DCA.
- (1) Pedestal de piso.
- (1) Copa de conexión.
- (1) Barra de conexión.
- (1) Equipo de medida en BT para el divisor: Fluke289 u Osciloscopio Tektronix DPO7054C.
- (1) Sonda en cable coaxial.

Previo a realizar la práctica es necesario verificar los ítems dispuestos en la lista de chequeo mostrada en el anexo1; allí se hace claridad sobre las condiciones que se deben cumplir y tener presentes antes de energizar. Una vez verificada la lista de chequeo se procede a realizar el montaje en el campo de pruebas si y solo si, en el registro de la misma todos los parámetros descritos se han cumplido. Ahora, con los equipos y elementos indicados anteriormente se ejecuta el montaje experimental, en primer lugar, usando el pedestal de piso sobre los flejes de cobre que están en el campo de pruebas; este pedestal funcionará como base mecánica del divisor y permitirá colocar de forma vertical el sistema de medida. Consecutivamente se coloca en la parte superior del divisor una copa de conexión y a través de la barra de aluminio se acopla al transformador.

Para el divisor de tensión a implementar es importante mencionar se debe acoplar la rama de alta tensión con la rama de baja tensión por medio de conectores y accesorios concéntricos del tipo UHF y llevar la lectura en BT fuera del campo de pruebas con la sonda de cable coaxial hasta el equipo de medida, bien sea un multímetro Fluke 289 u el Osciloscopio Tektronix DPO7054C.

Realizado esto, se debe seguir el Diagrama de flujo para uso del Laboratorio Especializado de Alta Tensión, mostrado en el anexo2.

2.4.1 Medición de altas tensiones (HV-AC) con Divisor Resistivo Puro



Figura 7. Medición de HV-AC usando Divisor Resistivo Puro
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

Las lecturas en BT del transformador fueron registradas por un multímetro Fluke 289 y llevadas a un valor en AT por medio de la relación de transformación de la máquina. De la misma forma para la lectura en BT del DRP, traduciendo este valor en AT al multiplicar por la relación real del divisor.

TRANSFORMADOR TERCO TYPE: HV9105				
Potencia Nominal [kVA]	5	Relación Transformación	454,5454545	
Tensión Primario BT [V]	220	Corriente Primario [A]	22,72727273	
Tensión Secundario AT [kV]	100	Corriente Secundario [mA]	50	
DIVISOR RESISTIVO PURO				
Valor Teórico		Valor Medido		
R_AT [MΩ]	280	R_AT [MΩ]	281	
R_BT [kΩ]	40	R_BT [kΩ]	40,219	
Relación DRP Teórica	7001	Relación DRP Real	6987,747557	
Tensión Trafo_BT Fluke 289 [Vrms]	Tensión Trafo AT [Vrms]	Tensión DRP_BT Fluke 289 [Vrms]	Tensión AT DRP [Vrms]	Error %
11,036	5.016	0,7346	5.133	2,28%
22,074	10.034	1,4730	10.293	2,52%
33,074	15.034	2,2119	15.456	2,73%
44,042	20.019	2,9518	20.626	2,94%
55,20	25.091	3,7007	25.860	2,97%
66,03	30.014	4,4350	30.991	3,15%
77,14	35.064	5,1953	36.303	3,42%
88,20	40.091	5,953	41.598	3,62%
99,13	45.059	6,702	46.832	3,79%
110,18	50.082	7,464	52.157	3,98%
121,22	55.100	8,234	57.537	4,24%
132,22	60.100	8,998	62.876	4,41%
143,12	65.055	9,757	68.179	4,58%
154,32	70.145	10,555	73.756	4,89%
165,11	75.050	11,332	79.185	5,22%
176,24	80.109	12,129	84.754	5,48%
187,21	85.095	12,946	90.463	5,93%
198,13	90.059	13,946	97.451	7,59%
209,25	95.114	14,819	103.551	8,15%
220,00	100.000	15,761	110.134	9,20%

Tabla 8. Medición de HV-AC con DRP vs Relación de transformación del trafo HV9105

De la tabla 8 se puede concluir que comparando los valores en AT obtenidos por relación de transformación y aquellos medidos por el DRP existe un error porcentual que crece en la medida que también lo hace la tensión sobre el trafo. Según los datos presentados podemos decir que el DRP asegura una medida con un error por debajo del 5%, si se conecta para efectuar una medida de tensión en el rango de los 70[kVrms].

2.4.2 Medición de altas tensiones (HV-AC) con Divisor Capacitivo Puro



Figura 8. Medición de HV-AC usando Divisor Capacitivo Puro
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

Las lecturas en BT del transformador fueron registradas por un multímetro Fluke 289 y llevadas a un valor en AT por medio de la relación de transformación de la máquina. De la misma forma para la lectura en BT del DCP, traduciendo este valor en AT al multiplicar por la relación real del divisor.

TRANSFORMADOR TERCO TYPE: HV9105				
Potencia Nominal [kVA]	5	Relación Transformación	454,5454545	
Tensión Primario BT [V]	220	Corriente Primario [A]	22,72727273	
Tensión Secundario AT [kV]	100	Corriente Secundario [mA]	50	
DIVISOR CAPACITIVO PURO				
Valor Teórico		Valor Medido		
C_AT [pF]	100	C_AT [pF]	99,7	
C_BT [nF]	330	C_BT [nF]	336	
Relación DCP Teórica	3301	Relación DCP Real	3371,110331	
Tensión Trafo_BT Fluke 289 [Vrms]	Tensión Trafo AT [Vrms]	Tensión DCP_BT Fluke 289 [Vrms]	Tensión AT DCP [Vrms]	Error %
11,089	5.040	1,4571	4.912	-2,61%
22,094	10.043	2,9043	9.791	-2,57%
33,073	15.033	4,3486	14.660	-2,55%
44,149	20.068	5,806	19.573	-2,53%
55,28	25.127	7,257	24.464	-2,71%
66,03	30.014	8,675	29.244	-2,63%
77,04	35.018	10,130	34.149	-2,54%
88,13	40.059	11,593	39.081	-2,50%
99,17	45.077	13,051	43.996	-2,46%
110,19	50.086	14,498	48.874	-2,48%
121,21	55.095	15,950	53.769	-2,47%
132,24	60.109	17,405	58.674	-2,45%
143,30	65.136	18,860	63.579	-2,45%
154,15	70.068	20,294	68.413	-2,42%
165,32	75.145	21,751	73.325	-2,48%
176,33	80.150	23,193	78.186	-2,51%
187,14	85.064	24,608	82.956	-2,54%
198,09	90.041	26,048	87.811	-2,54%
209,07	95.032	27,492	92.679	-2,54%
220,27	100.123	28,961	97.631	-2,55%

Tabla 9. Medición de HV-AC con DCP vs Relación de transformación del trafo HV9105

De la tabla 9 se puede concluir que comparando los valores en AT obtenidos por relación de transformación y aquellos medidos por el DCP existe un error porcentual que se mantiene en promedio en -2,53% y el cual nos indica al ser negativo que las medidas realizadas con este divisor se encuentran siempre por debajo de lo esperado. Según los datos presentados podemos decir que el DCP asegura una medida más confiable que el DRP al registrar errores más pequeños.

2.4.3 Medición de altas tensiones (HV-AC) con Divisor Resistivo Compensado



Figura 9. Medición de HV-AC usando Divisor Resistivo Compensado
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

Las lecturas en BT del transformador fueron registradas por un multímetro Fluke 289 y llevadas a un valor en AT por medio de la relación de transformación de la máquina. De la misma forma para la lectura en BT del DRC, traduciendo este valor en AT al multiplicar por la relación real del divisor.

TRANSFORMADOR TERCO TYPE: HV9105				
Potencia Nominal [kVA]	5	Relación Transformación	454,5454545	
Tensión Primario BT [V]	220	Corriente Primario [A]	22,72727273	
Tensión Secundario AT [kV]	100	Corriente Secundario [mA]	50	
DIVISOR RESISTIVO COMPENSADO				
Valor Teórico		Valor Medido		
R_AT [MΩ]	280	R_AT [MΩ]	292	
C_AT [pF]	98,79	C_AT [pF]	98,6	
R_BT [kΩ]	102,3	R_BT [kΩ]	102,02	
C_BT [uF]	0,271	C_BT [uF]	0,271	
Relación DRC Teórica	2744,136701	Relación DRC Real	2750,455352	
Tensión Trafo_BT Fluke 289 [Vrms]	Tensión Trafo AT [Vrms]	Tensión DRC_BT Fluke 289 [Vrms]	Tensión AT DRC [Vrms]	Error %
11,074	5.034	1,8543	5.100	1,30%
22,158	10.072	3,7150	10.218	1,43%
33,119	15.054	5,626	15.474	2,71%
44,092	20.042	7,652	21.046	4,77%
55,14	25.064	9,588	26.371	4,96%
66,04	30.018	11,562	31.801	5,61%
77,06	35.027	13,553	37.277	6,03%
88,24	40.109	15,158	41.691	3,80%
99,11	45.050	17,526	48.204	6,54%
111,18	50.536	19,670	54.101	6,59%
121,27	55.123	21,495	59.121	6,76%
132,04	60.018	23,414	64.399	6,80%
143,24	65.109	25,421	69.919	6,88%
154,04	70.018	27,340	75.197	6,89%
165,26	75.118	29,346	80.715	6,93%
176,11	80.050	31,277	86.026	6,95%
187,22	85.100	33,263	91.488	6,98%
198,38	90.173	35,260	96.981	7,02%
209,71	95.323	37,293	102.573	7,07%
220,67	100.305	39,262	107.988	7,12%

Tabla 10. Medición de HV-AC con DRC vs Relación de transformación del trafo HV9105

De la tabla 10 se puede concluir que comparando los valores en AT obtenidos por relación de transformación y aquellos medidos por el DRC se presenta el mismo caso que para el DRP en donde el error porcentual de la medida aumenta en función que también lo hace la tensión del trafo. Sin embargo, el máximo error registrado para este divisor fue de 7,12% contra un 9,20% del DRP.

2.4.4 Medición de altas tensiones (HV-AC) con Divisor Capacitivo Amortiguado



Figura 10. Medición de HV-AC usando Divisor Capacitivo Amortiguado
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

Las lecturas en BT del transformador fueron registradas por un multímetro Fluke 289 y llevadas a un valor en AT por medio de la relación de transformación de la máquina. De la misma forma para la lectura en BT del DCA, traduciendo este valor en AT al multiplicar por la relación real del divisor.

Para esta configuración cabe resaltar que la máxima tensión a la cual se logró medir fue de 50[kVrms] debido a que la corriente entregada por el trafo creció hasta un 65% del nominal y se optó por llegar únicamente hasta este punto.

TRANSFORMADOR TERCO TYPE: HV9105				
Potencia Nominal [kVA]	5	Relación Transformación	454,5454545	
Tensión Primario BT [V]	220	Corriente Primario [A]	22,72727273	
Tensión Secundario AT [kV]	100	Corriente Secundario [mA]	50	
DIVISOR CAPACITIVO AMORTIGUADO				
Valor Teórico		Valor Medido		
R_AT [Ω]	54,28	R_AT [Ω]	56,26	
C_AT [pF]	1227	C_AT [pF]	1597,9	
R_BT [Ω]	0,03952	R_BT [Ω]	0,05384	
C_BT [uF]	1,686	C_BT [uF]	1,87	
Relación DCA Teórica	1375,08313	Relación DCA Real	1171,286	
Tensión Trafo_BT Fluke 289 [Vrms]	Tensión Trafo AT [Vrms]	Tensión DCA_BT Fluke 289 [Vrms]	Tensión AT DCA [Vrms]	Error %
11,020	5.009	4,4342	5.194	3,55%
22,230	10.105	8,9490	10.482	3,60%
33,047	15.021	13,301	15.579	3,58%
44,177	20.080	17,787	20.834	3,62%
55,20	25.091	22,160	25.956	3,33%
66,03	30.014	26,555	31.103	3,50%
77,03	35.014	31,014	36.326	3,61%
88,23	40.105	35,527	41.612	3,62%
99,35	45.159	40,043	46.902	3,72%
110,12	50.055	44,620	52.263	4,23%

Tabla 11. Medición de HV-AC con DCA vs Relación de transformación del trafo HV9105

De la tabla 11 se puede concluir que comparando los valores en AT obtenidos por relación de transformación y aquellos medidos por el DCA existe un error porcentual que se mantiene en promedio en 3,64% y el cual nos indica que las medidas realizadas con este divisor se encuentran siempre por encima de lo esperado. Este divisor presenta un error más bajo que el DRP y el DRC.

2.4.5 Medición de altas tensiones (HV-AC) con DRP y DCP mediante Tektronix DPO7054C



Figura 11. Medición de HV-AC con DRP y DCP en simultaneo
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

De la misma forma en que se realizó la medida de HV-AC por individual con los divisores resistivo puro y capacitivo puro, en la figura 11 se aprecia el montaje en donde se acoplan de manera simultánea los dos sistemas de medida para luego las señales en BT ser llevadas hasta el Osciloscopio Tektronix DPO7054C. En esta prueba se energizo el devanado primario del transformador con una tensión de 44,32[Vrms] y así obtener en el lado de alta tensión 20,14 [kVrms]. Con este valor se espera obtener según las relaciones de transformación de los divisores un valor de 2,88[Vrms] en el DRP y un valor de 5,97[Vrms] en el DCP. A continuación, se muestran los valores medidos en la pantalla del osciloscopio.



Figura 12. Medición de HV-AC con DRP y DCP mediante Osciloscopio Tektronix DPO7054C
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

En la figura12, podemos apreciar que la medida en BT del DCP y el DRP se muestra en el CH1(amarillo) y el CH2(cian) respectivamente. Ambos canales se configuraron a 2V/div.

Ahora bien, con ayuda de las herramientas matemáticas ofrecidas por el osciloscopio, se multiplicó el CH1 por la relación de 3371 para el DCP y se obtuvo la señal M1(naranja), adquiriendo así la misma forma de onda de este canal, pero publicando en la pantalla del DPO7054C un valor en [kV]. De la misma forma se multiplicó ahora el CH2 por la relación de 6987 para el DRP y se obtuvo la señal M2(Morado) con un valor en [kV].

Las señales M1 y M2 corresponden de esta manera a los valores en AT para el DCP y el DRP respectivamente, adicionalmente para dichas funciones matemáticas se configuró para mostrar 10kV/div en la pantalla del osciloscopio. Posteriormente se agregaron los valores **Max** y el **Vrms** de los CH1 y CH2 asi como también para M1 y M2.

Podemos apreciar entonces que la onda en color naranja y la onda en color morado se encuentran superpuestas, es decir, el valor en alta tensión para ambos sistemas de medida es comparable y se aproxima al valor obtenido por relación de transformación antes mencionado de 20,14[kVrms], registrando para el DCP 19,42[kVrms] y para el DRP 20,05[kVrms] con un error del -3,77% y -0,44% respectivamente.

3. ESTUDIO Y MONTAJE EXPERIMENTAL PARA GENERACIÓN Y MEDICIÓN DE ALTAS TENSIONES DC (HV-DC)

La generación de altas tensiones en corriente continua es necesaria en los trabajos de investigación en las áreas de la física pura y aplicada, sin embargo, se emplea también para probar equipos eléctricos relacionados con los sistemas de transmisión HV-DC, la gran capacitancia en estos cables tomaría una corriente demasiado grande si se probara con tensiones de corriente alterna.

Se puede decir que hoy en día los proyectos HV-DC han abierto un camino en la transmisión de energía. A pesar de que actualmente la mayoría de los proyectos de transmisión de energía utilizan corriente alterna, existen muchos proyectos HV-DC y esta nueva tecnología se está utilizando cada vez más.

Normalmente, para la generación de tensiones de HV-DC hasta 100 kVrms, se utilizan diodos rectificadores en donde las corrientes de salida son de unos pocos mA. El diodo rectificador requiere una construcción especial para el cátodo y los filamentos, ya que entre el ánodo y el cátodo existe un alto campo eléctrico de varios kV/cm en el periodo de no conducción.

Algunas de las aplicaciones que tiene generar un HV-DC son:

- Pruebas de dispositivos electrónicos
- Pruebas donde el uso de AC es impráctico (uso de corrientes elevadas)
- Aplicaciones industriales (precipitadores electrostáticos, pintura electrostática, industria del cemento)
- Pruebas en cables largos y condensadores grandes
- **Generación de impulsos de alta tensión o altas corrientes.**

3.1 Circuitos rectificadores – Media onda

Los diodos semiconductores, son dispositivos de dos terminales los cuales son denominados ánodo y cátodo. Estos son utilizados como interruptores, gracias a que permiten la conducción en un solo sentido. Los diodos tienen diferentes aplicaciones como los son los convertidores de AC a DC denominado rectificadores, diodo de marcha libre, reguladores conmutados, inversor de carga de condensadores, transferencia de energía entre componentes, aislamientos de voltajes, entre otros.

Es muy importante, para entender el rectificador de media onda, recordar que el diodo es un componente que solo conducen la corriente en un sentido, cuando una corriente o tensión es más positiva en el ánodo del diodo que en el cátodo (polarización directa). En caso contrario (polarización inversa o indirecta) no circulará corriente a través del diodo. Esta propiedad es la que nos permitirá rectificar la corriente.

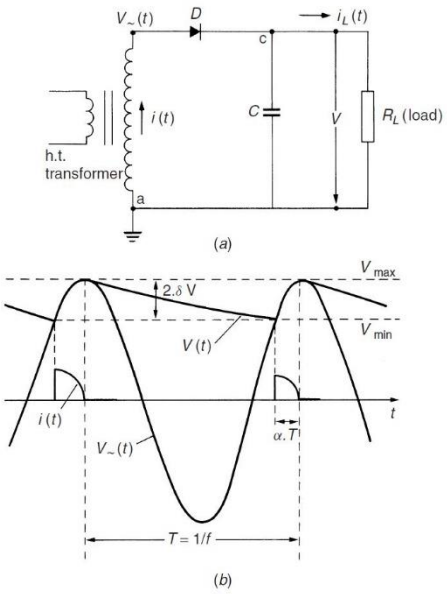


Figura 13. (a)Rectificador de media onda con capacitancia de filtro (b)Tensión de entrada AC y Rectificación a DC
TOMADO DE: HIGH VOLTAGE ENGINEERING, SECOND EDITION 2000, E. KUFFEL, W.S. ZAENGL, J. KUFFEL.

Para comprender claramente el circuito de conversión de AC a DC, el rectificador monofásico de media onda se presenta en la figura13. Si despreciamos la reactancia de fuga del transformador y la pequeña impedancia interna de los diodos durante la conducción, el condensador de filtrado C se carga hasta la tensión máxima Vmax de la señal alterna de alimentación cuando el diodo conduce.

Este es el caso siempre que la señal de alimentación este en el ciclo positivo, que a diferencia del momento en el que se encuentre en su ciclo negativo el diodo no conducirá. El diodo rectificador debe ser dimensionado, por tanto, para soportar una tensión inversa de pico de 2Vmax.

Para la generación de HV-DC dentro del LEAT, se usa adicionalmente una resistencia de protección en serie con el diodo, con el objetivo de limitar la corriente en el circuito. Algunas de las características que se puede mencionar en este tipo de aplicaciones son:

- Son circuitos simples, hasta 1.2 MV.
- Corrientes máximas de 100 mA usando Rprotección (Máxima corriente en el LEAT de 50mA)
- Si se requieren generar EHV-DC el tamaño de los circuitos se hace muy grande, debido al alto número de equipos que podría requerir el circuito.

3.2 Circuitos rectificador - Onda completa

El rectificador de onda completa es un circuito empleado para aprovechar ambos semiciclos de la corriente alterna y obtener corriente directa como resultado ideal (positivo y negativo) aunque el resultado aparenta ser el mismo que en el rectificador de media onda, en este caso los niveles de intensidad son superiores y la caída de tensión es menor cuando se le aplica una carga al sistema.

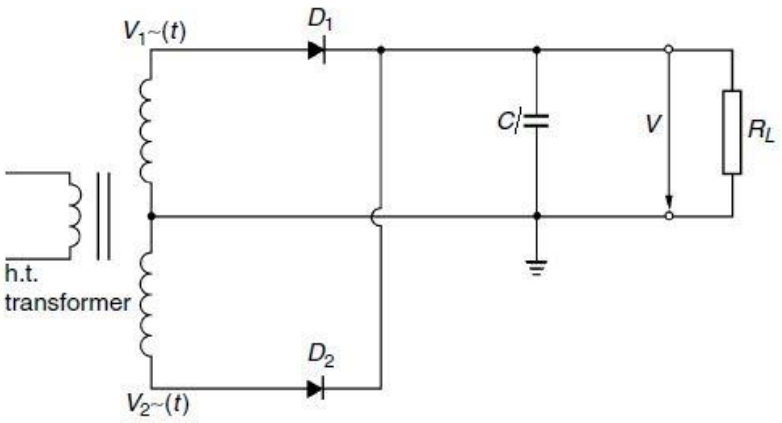


Figura 14. Circuito rectificador de onda completa con dos diodos
TOMADO DE: HIGH VOLTAGE ENGINEERING, SECOND EDITION 2000, E. KUFFEL, W.S. ZAENGL, J. KUFFEL.

En este tipo de aplicaciones se requiere un transformador con tap central, aquí cada diodo conducirá durante un tiempo T/2 para que sobre la carga RL conectada al final del circuito aparezca una señal con el semiciclo positivo y además también con el semiciclo negativo. Al mismo tiempo con ayuda del condensador de filtro se consigue suavizar la tensión y conseguir un voltaje DC. La figura 15 muestra las formas de onda conseguidas en la generación de voltaje DC usando un circuito rectificador de media onda y de onda completa.

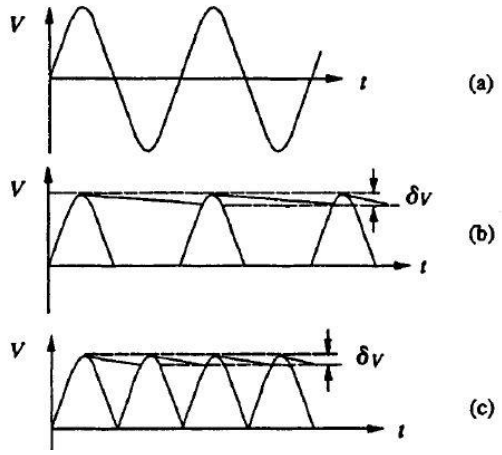


Figura 15. (a) onda seno de entrada (b) salida con rectificador de media onda (c) salida con rectificador de onda completa
TOMADO DE: HIGH VOLTAGE ENGINEERING, SECOND EDITION 1995, M S NAIDU, V KAMARAJU.

Otras configuraciones que son posibles para generar altas tensiones en HV-DC requieren de un gran número de diodos y condensadores, tales como lo son el circuito en cascada cockroft-walton y los circuitos dobladores en configuración greinacher. Como referente teórico se describe este circuito, pero se hace claridad que es una configuración que actualmente no se pueden alcanzar en el LEAT.

3.3 Cockroft-walton – Circuito en cascada

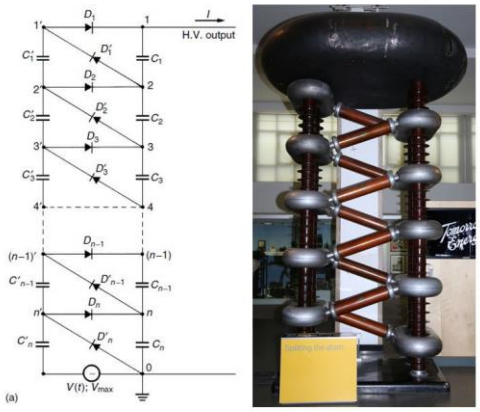


Figura 16. Generador de HV-DC Cockroft walton
TOMADO DE: HIGH VOLTAGE ENGINEERING, SECOND EDITION 2000, E. KUFFEL, W.S. ZAENGL, J. KUFFEL.

El generador o multiplicador Cockcroft-Walton es un circuito eléctrico que genera un alto voltaje de DC a partir de una entrada de AC de bajo voltaje. Está formado por una red en escalera multiplicadora de tensión de condensadores y diodos para generar altas tensiones. A diferencia de los transformadores, este método elimina el requisito del núcleo pesado y la mayor parte del aislamiento/encapsulado requerido. Usando solo condensadores y diodos, estos multiplicadores de voltaje pueden aumentar voltajes relativamente bajos a valores extremadamente altos, mientras que al mismo tiempo son mucho más livianos y económicos que los transformadores.

3.4 Montaje experimental – Generación y medición de altas tensiones (HV-DC)

Para el montaje experimental en la generación de HV-DC de acuerdo a los equipos disponibles en el LEAT, se realizó a partir de un circuito rectificador de media onda usando como fuente de alimentación el transformador TERCO HV-9105; gracias a que esta máquina puede ofrecer en primer lugar el generar un HV-AC para rectificar. En la figura 17 se muestra la configuración para el circuito que se puede ensamblar con los elementos del banco terco.

Para este montaje son necesarios como mínimo los siguientes equipos y elementos:

- (1) Módulo de mando.
- (1) Transformador de ensayos.
- (1) Resistencia de protección 3,76MΩ
- (1) Sistema de medida de tensión para AC; Rama de AT y BT del DCP.
- (1) Diodo rectificador.
- (1) Sistema de medida de tensión para DC; Rama de AT y BT del DRP.
- (1) Condensador de filtro 25.000pF o 2nF
- (4) Pedestal de piso.
- (4) Copa de conexión.
- (2) Barra de conexión.
- (4) Tubo espaciador.
- (1) Equipo de medida en BT para AC al devanado primario del transformador: Fluke179.
- (1) Equipo de medida en BT para AC del DCP: Fluke289 u Osciloscopio Tektronix DPO7054C.
- (1) Equipo de medida en BT para DC del DRP: Fluke289 u Osciloscopio Tektronix DPO7054C.
- (2) Sonda en cable coaxial.



Figura 17. Circuito rectificador de media onda para generar HV-DC
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

Previo a realizar la práctica es necesario verificar los ítems dispuestos en la lista de chequeo mostrada en el anexo1; de la misma manera en cómo se realizó en el capitulo2 con la generación de HV-AC. De manera general en cada uno de los montajes experimentales que se realicen en el laboratorio es indispensable y obligatorio revisar las condiciones descritas en la lista de chequeo.

El circuito rectificador mostrado en la figura 17, se compone en primer lugar de la de fuente de alto voltaje en AC en donde se conecta una resistencia limitadora en serie. En este punto se acopla el divisor capacitivo puro para medir la señal de entrada en AC previa al diodo rectificador; este elemento se conecta de forma horizontal en serie con la resistencia y sobre el capacitor de 25.000pF que permitirá conseguir un voltaje DC. Seguidamente se acopla el divisor resistivo puro en paralelo con el condensador para así medir el HV-DC generado.

Para los divisores de tensión a implementar es importante mencionar que los mismos se acoplan con la rama de baja tensión por medio de conectores y accesorios concéntricos del tipo UHF, posteriormente son llevados por la sonda de coaxial fuera del campo de pruebas para tomar la lectura en BT con el equipo de medida que se prefiera, multímetro Fluke 289 u Osciloscopio Tektronix DPO7054C. Realizado esto, se debe seguir el Diagrama de flujo para uso del Laboratorio Especializado de Alta Tensión, mostrado en el anexo2.

Para realizar las medidas en HV-DC principalmente se optó por usar dos divisores de tensión; el DRP y el DRC, ya que de acuerdo a la tabla 7 “Tabla comparativa de divisores de tensión” estos son los únicos que aplican para hacer una medida en DC. El experimento también incluye un DCP previo al diodo rectificador, con el fin de registrar el valor AC después de la caída de tensión en la resistencia de protección.

Para tomar el registro de los valores se dispuso en primer lugar de un Fluke 179 en el devanado de baja tensión del transformador, que tomara la medida en [Vrms] de la alimentación. Dado que el circuito involucra una resistencia se protección sobre la cual hay una caída de potencial, el DCP fue colocado para registrar en verdad la medida en [Vrms] de HV-AC que se pretende rectificar. Dicha medida se registró con un Fluke 289.

La lectura de la señal de HV-DC rectificada se realiza en dos pruebas; la primera de ellas usando el DRP y la segunda con el DRC. En ambos casos también se dispuso un Fluke 289 para obtener la medida en [V] de la rama de baja tensión.

3.4.1 Medición de altas tensiones (HV-DC) con Divisor Resistivo Puro



Figura 18. Medición de HV-DC usando Divisor Resistivo Puro
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

En la figura 18, se ilustra el montaje para la medición de HV-DC usando un divisor resistivo puro. El circuito de generación fue alimentado con tensiones variables desde el devanado de BT del transformador en un rango de medidas de 11,43[Vrms] hasta 154,20[Vrms] obteniendo asi en el secundario una alta tensión para rectificar que comienza en 5,195[kVrms] y va hasta los 70,09[kVrms]. Recordar que, sobre la resistencia de protección y la misma resistencia interna del diodo, cae parte de la tensión a rectificar. Después de realizada la prueba los datos obtenidos se registraron en la tabla 12.

TRANSFORMADOR TERCO TYPE: HV9105			
Potencia Nominal [kVA]	5	Relación Transformación	454,5454545
Tensión Primario [V]	220	Corriente Primario [A]	22,72727273
Tensión Secundario [kV]	100	Corriente Secundario [mA]	50

DIVISOR CAPACITIVO PURO				DIVISOR RESISTIVO PURO			
Valor Teórico		Valor Medido		Valor Teórico		Valor Medido	
C_AT [pF]	100	C_AT [pF]	99,7	Rama AT [MΩ]	280	Rama AT [MΩ]	281
C_BT [nF]	330	C_BT [nF]	336	Rama BT [kΩ]	40	Rama BT [kΩ]	40,219
Relación DCP Teórica	3301	Relación DCP Real	3371,110331	Relación DRP	7001	Relación DRP	6987,747557
Tensión Trafo_BT Fluke 179 [Vrms]	Tensión Trafo AT [Vrms]	Tensión DCP_BT Fluke 289 #1 [Vrms]	Tensión AT DCP [Vrms]	Tensión DRP_BT Fluke 289 #2 [V]	Tensión AT DRP [V]	Tensión AT DRP [Vrms]	Error %
11,43	5.195	1,4416	4.860	0,9210	6.436	4.551	-7%
22,77	10.350	2,8707	9.677	1,8533	12.950	9.157	-6%
33,34	15.155	4,2106	14.194	2,7355	19.115	13.516	-5%
44,35	20.159	5,611	18.915	3,6472	25.486	18.021	-5%
55,13	25.059	6,955	23.446	4,5519	31.808	22.491	-4%
66,60	30.273	8,398	28.311	5,495	38.398	27.151	-4%
77,60	35.273	9,778	32.963	6,402	44.736	31.633	-4%
88,30	40.136	11,140	37.554	7,319	51.143	36.164	-4%
99,10	45.045	12,483	42.082	8,205	57.334	40.542	-4%
110,30	50.136	13,909	46.889	9,157	63.987	45.246	-4%
121,40	55.182	15,317	51.635	10,119	70.709	49.999	-3%
132,70	60.318	16,720	56.365	11,060	77.284	54.648	-3%
143,20	65.091	18,051	60.852	11,977	83.692	59.179	-3%
154,20	70.091	19,422	65.474	12,902	90.156	63.750	-3%

Tabla 12. Medición de HV-DC con DRP vs Medición de HV-AC con DCP

En la primera columna de la tabla12, se encuentra consignada la lectura en BT realizada por el Fluke 179 sobre el devanado primario, valor en [Vrms] que fue traducido en una alta tensión a través de la relación de transformación del HV9105. Ahora bien, para registrar el valor real de HV-AC que se rectificó, los datos en BT dados en [Vrms] del DCP fueron puestos en la tercera columna y traducidos de igual manera a un valor en AT por medio de la relación de transformación de este sistema de medida. Siguiendo el mismo método se hizo para la lectura en BT dada en [V] del DRP y traducida de igual manera a un valor en AT.

Dado que los valores en alta tensión para el DCP están en [kVrms] y los del DRP en [kV], se dividieron cada uno de los valores en [kV] para convertir de valores pico a valores rms y luego poder efectuar comparaciones y calculo del error.

Se evidencia que el divisor resistivo puro muestra un error porcentual negativo, lo cual indica que los valores registrados están por debajo de lo esperado y que en un primer punto el máximo error calculado equivale a un -7%, número que disminuye poco a poco en función de que los valores en HV crecen y finalmente se puede apreciar un -3% de error calculado.

El error calculado es inversamente proporcional a las lecturas del DRP, es decir, en la medida que los valores de tensión se hacen más grandes el error% disminuye, lo cual indica que este sistema de medida se comporta mucho mejor cuando esta expuesto a valores de HV-DC por encima de 50[kVrms], a diferencia de cuando se midió un HV-AC en donde el error% crecía en la medida de que también lo hacia la tensión medida.

3.4.2 Medición de altas tensiones (HV-DC) con Divisor Resistivo Compensado



Figura 19. Medición de HV-DC usando Divisor Resistivo Compensado
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

En la figura 19, se ilustra el montaje para la medición de HV-DC usando un divisor resistivo compensado. De la misma forma que en el experimento y medida de HV-DC con el DRP, este circuito

de generación fue alimentado con tensiones variables desde el devanado de BT del transformador en un rango de medidas de 11,03[Vrms] hasta 154,4[Vrms] obteniendo así en el secundario una alta tensión para rectificar que comienza en 5,01[kVrms] y va hasta los 70,18[kVrms].

Después de realizada la prueba los datos obtenidos se registraron y se presentan a continuación:

TRANSFORMADOR TERCO TYPE: HV9105			
Potencia Nominal [kVA]	5	Relación Transformación	454,5454545
Tensión Primario [V]	220	Corriente Primario [A]	22,72727273
Tensión Secundario [kV]	100	Corriente Secundario [mA]	50

DIVISOR CAPACITIVO PURO				DIVISOR RESISTIVO COMPENSADO			
Valor Teórico		Valor Medido		Valor Teórico		Valor Medido	
C_AT [pF]	100	C_AT [pF]	99,7	Rama AT [MΩ]	280	Rama AT [MΩ]	292
C_BT [nF]	330	C_BT [nF]	336	Rama AT [pF]	98,79	Rama AT [pF]	98,6
Relación DCP Teórica	3301	Relación DCP Real	3371,110331	Rama BT [kΩ]	102,3	Rama BT [kΩ]	102,02
				Rama BT [uF]	0,271	Rama BT [uF]	0,271
				Relación DRC	2744,136701	Relación DRC	2750,455352

Tensión Trafo_BT Fluke 179 [Vrms]	Tensión Trafo AT [Vrms]	Tensión DCP_BT Fluke 289 #1 [Vrms]	Tensión AT DCP [Vrms]	Tensión DRC_BT Fluke 289 #2 [V]	Tensión AT DRC [V]	Tensión AT DRC [Vrms]	Error %
11,03	5.014	1,3907	4.688	2,1279	5.853	4.138	-13%
22,03	10.014	2,7855	9.390	4,2941	11.811	8.351	-12%
33,18	15.082	4,1952	14.142	6,503	17.886	12.647	-12%
44,18	20.082	5,587	18.834	8,671	23.849	16.864	-12%
55,30	25.136	6,996	23.584	10,929	30.060	21.255	-11%
66,30	30.136	8,352	28.156	13,055	35.907	25.390	-11%
77,00	35.000	9,717	32.757	15,252	41.950	29.663	-10%
88,00	40.000	11,095	37.402	17,442	47.973	33.922	-10%
99,60	45.273	12,563	42.351	19,862	54.630	38.629	-10%
110,10	50.045	13,891	46.828	22,014	60.549	42.814	-9%
121,50	55.227	15,325	51.662	24,370	67.029	47.396	-9%
132,00	60.000	16,648	56.122	26,624	73.228	51.780	-8%
143,10	65.045	18,082	60.956	29,095	80.024	56.586	-8%
154,40	70.182	19,466	65.622	31,365	86.268	61.001	-8%

Tabla 13. Medición de HV-DC con DRC vs Medición de HV-AC con DCP

De la tabla 13, se evidencia que el divisor resistivo compensado muestra un error porcentual negativo, lo cual indica que los valores registrados están por debajo de lo esperado y que en un primer punto el máximo error calculado equivale a un -13%, número que disminuye poco a poco en función de que los valores en HV crecen y finalmente se puede apreciar un -8% de error calculado.

El error calculado es inversamente proporcional a las lecturas del DRC, es decir, en la medida que los valores de tensión se hacen más grandes el error% disminuye, así como también se evidencio con el uso del DRP midiendo un HV-DC.

A diferencia de cuando se midió un HV-AC con el DRC, en donde el error% crecía en la medida de que también lo hacia la tensión, aquí ocurre lo contrario y el divisor presenta un mejor comportamiento cuando se requiere medir un alto voltaje en DC.

3.4.3 Medición de altas tensiones: (HV-AC) con DCP y (HV-DC) con DRP mediante Tektronix DPO7054C

Tomando como referencia el experimento presentado en el numeral 3.4.1 *"Medición de altas tensiones (HV-DC) con Divisor Resistivo Puro"* se realizó la medida con los instrumentos que allí se mencionaron, pero esta vez en reemplazo de los multímetros Fluke 179 y Fluke 289 se analizó un único punto mediante el Osciloscopio Tektronix DPO7054C. El experimento se realizó energizando el transformador por BT con aproximadamente 44[Vrms] para así obtener 20[kVrms] y luego rectificarlos.

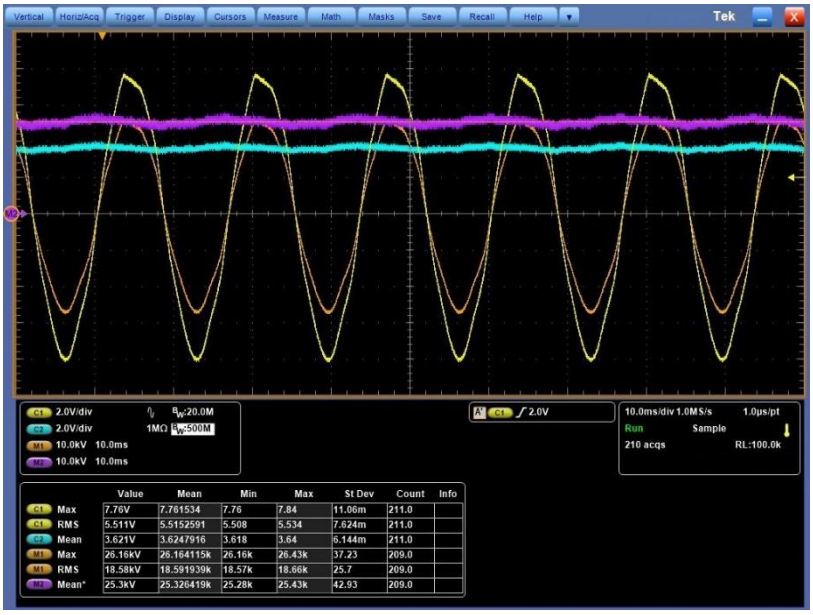


Figura 20. Medición de HV-AC con DCP y HV-DC con DRP mediante Osciloscopio Tektronix DPO7054C
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

En la figura20, podemos apreciar la medida en BT(AC) del DCP y la medida en BT(DC) del DRP, señales que se muestran en el CH1(amarillo) y el CH2(cian) respectivamente. Ambos canales se configuraron a 2V/div.

Ahora bien, con ayuda de las herramientas matemáticas ofrecidas por el osciloscopio, se multiplicó el CH1 en [V] por la relación de 3371 para el DCP y se obtuvo la señal M1(naranja), adquiriendo así la misma forma de onda alterna, pero publicando en la pantalla del DPO7054C un valor en [kV].

La **onda en color amarillo** muestra la **señal alterna en BT[V]** mientras la **onda de color naranja** permite ver la **señal alterna en AT [kV].**

De la misma forma que antes, se multiplicó ahora el CH2 en [V] por la relación de 6987 para el DRP y se obtuvo la señal M2(Morado) adquiriendo así la misma forma de onda rectificada por el diodo y filtrada por el condensador, pero publicando en la pantalla del DPO7054C el valor en [kV].

La "**línea horizontal" en color cian** muestra la **señal rectificada en BT[V]** mientras la "**línea horizontal" de color morado** permite ver la **señal rectificada en AT [kV].**

Al generar las funciones matemáticas M1-M2 y lograr establecer para ambos un rango de medida de 10kV/div se aprecia como el HV-DC (en morado) registra un valor máximo de 25,3[kV] que se mantiene cercano al pico de la señal alterna en HV-AC (en naranja) registrando un máximo de 26,16[kV].

4. ESTUDIO Y MONTAJE EXPERIMENTAL PARA GENERACIÓN Y MEDICIÓN DE IMPULSOS DE TENSIÓN (GIT)

Posterior al estudio y montaje experimental que se expuso en el capítulo 3 con la generación de HV-DC, ahora es posible introducir un nuevo concepto, el generador de impulsos de tensión GIT.

En el laboratorio especializado de alta tensión es posible realizar los ensayos que den lugar a la generación de este fenómeno, puesto que el impulso de tensión resulta útil cuando se requiere determinar y poner a prueba los niveles de aislamiento de los equipos usados en los sistemas de generación y transmisión de energía eléctrica tales como: transformadores de potencial, transformadores de corriente, aisladores de suspensión, conductores, etc.

Con la generación de un impulso de tensión es posible emular las sobretensiones producidas por un rayo o por la operación transitoria de los sistemas de distribución de energía. Se pueden usar para pruebas de aislamiento ante impulsos normalizados (tipo rayo y tipo maniobra) o para pruebas en dispositivos de protección tales como: descargadores de sobretensión, fusibles, interruptores, seccionadores entre otros.

Los impulsos de tensión se clasifican en frente lento y frente rápido: los de frente lento son causados generalmente por maniobras de enganche y desenganche de interruptores mientras que los de frente rápido son atribuidos principalmente a los efectos del rayo. En la ***NTC4591 "Técnicas de ensayo a alta tensión. Definiciones generales y requisitos de ensayo"*** se suministra la definición y características de este tipo de impulsos, así como los requisitos generales para el procedimiento de los ensayos.

4.1 Circuito de generación para un impulso de tensión – GIT

Para realizar el ensayo experimental y obtener un impulso de tensión es necesario la generación de un HV-DC; que luego será acoplado por medio de un spark gap a una configuración de circuito que simula la forma de onda del impulso.

El circuito eléctrico de carácter comercial universalmente más empleado para tales generadores de impulso corresponde al llamado tipo Marx, que en su versión simplificada puede analizarse mediante un circuito de una sola etapa, en configuraciones físicas de hasta 200 kV.

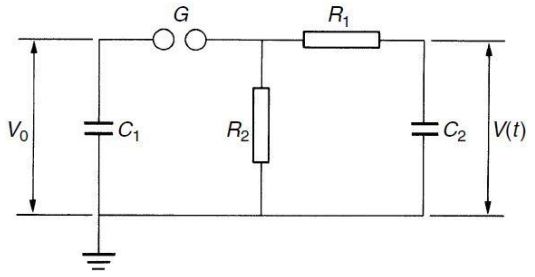


Figura 21. Circuito básico tipo Marx para la Generación de impulsos de tensión.
TOMADO DE: HIGH VOLTAGE ENGINEERING, SECOND EDITION 2000, E. KUFFEL, W.S. ZAENGL, J. KUFFEL.

En la figura 21, se muestra la configuración básica para un circuito que permita la generación de impulsos de tensión, en donde:

- C1: Condensador de carga, equivalente a la fuente de HV-DC.
- G: Spark-gap o Interruptor controlado por tensión, también conocido como espinterómetro.
- R1: Resistencia de frente, determina el tiempo de frente del impulso.
- R2: Resistencia de cola, determina el tiempo de cola del impulso.
- C2: Capacitancia de carga.

Este tipo de circuito se compone de dos funciones exponenciales que se obtienen mediante un circuito de segundo orden que contiene dos elementos almacenadores de energía, en este caso C1 y C2.

Para entender el funcionamiento de GIT, en primer lugar, se genera un HV-DC cargando el condensador C1, que en el caso del laboratorio especializado de alta tensión puede usarse el capacitor HV9112 de 25000pF o el condensador de carga de 2nF. Una vez cargado el condensador se dispone accionar el espinterómetro, que actúa como interruptor controlado por tensión, haciendo que la carga almacenada en C1 se transfiera a la resistencia de frente R1(HV9122), la resistencia de cola R2(HV9123) y al capacitor C2(HV9120), logrando de esta forma que la señal de tensión llegue rápidamente al pico (tiempo de frente) y por último se descargue lentamente sobre C2 en donde se puede apreciar la cola de la señal.

A continuación, en la figura 22 se muestra la forma de onda característica que puede tener un impulso de tensión.

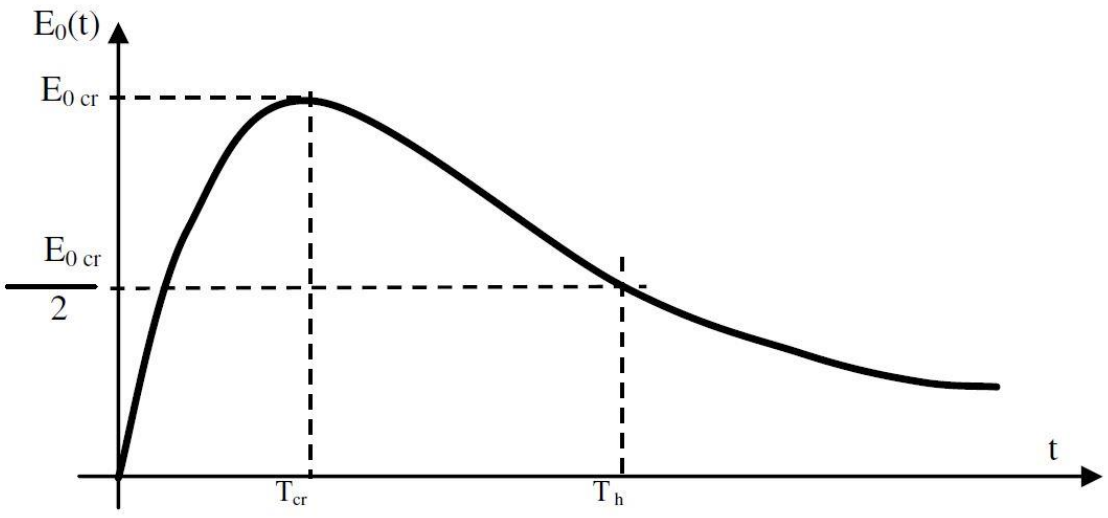


Figura 22. Forma de onda general de un impulso de tensión.
TOMADO DE: IEC 60-1.

Como se mencionó anteriormente en la **NTC4591** se dan los lineamientos para las técnicas de ensayo que se pueden realizar en alta tensión y las definiciones para cada tipo de impulso:

Formalmente la definición que se dicta en la norma es esta:

> 3. IMPULSOS
> "Un impulso es una tensión o corriente transitoria o no periódica aplicada intencionalmente, que se suele elevar rápidamente hasta un valor de cresta y que después cae más lentamente hacia cero. Para propósitos especiales se usan impulsos que tengan frentes o transitorios que se eleven en forma aproximadamente lineal, de forma oscilante o aproximadamente rectangular. El término "impulso" se debe distinguir del término "sobretensión" que se refiere a transitorios que ocurren en equipo eléctrico o redes en servicio".
> *TOMADO DE: NTC4591*

Clasificando también los impulsos de acuerdo a su duración, en concreto con la siguiente definición:

> *3.1 IMPULSOS TIPO RAYO Y TIPO MANIOBRA*
> *Se hace una distinción entre impulsos tipo rayo y tipo maniobra según la duración del frente. Los impulsos con duración del frente hasta de 20 μs se definen como impulsos tipo rayo y los de frentes más largos se definen como impulsos tipo maniobra. Generalmente, los impulsos tipo maniobra también se caracterizan porque su tiempo total de duración es bastante más largo que el de los impulsos tipo rayo.*
> *TOMADO DE: NTC4591*

4.2 Impulso tipo rayo normalizado – NTC4591

El impulso normalizado tipo rayo o impulso 1,2/50, se define como un impulso positivo o negativo cuya amplitud máxima establecida fluctúa en un rango Vmax ± 3%, registrando tiempos de frente en el rango de 1,2 μs ± 30% y de cola en el rango de 50 μs ± 20% cuando la tensión desciende al 50% de su valor pico. Formalmente lo dictado por la norma refiere a:

> *19.1 IMPULSO TIPO RAYO NORMALIZADO*
> *"El impulso tipo rayo normalizado es un impulso pleno tipo rayo que tenga un tiempo frontal de 1,2 μs y un tiempo hasta el valor medio de 50 μs. Se describe como un impulso de 1,2/50."*
>
> *18.1.4 Tiempo frontal T1 – Tiempo de frente*
> *El tiempo frontal de un impulso tipo rayo es un parámetro virtual definido como 1,67 veces el intervalo T entre los instantes en que el impulso es 30 % y 90 % del valor de cresta puntos A y B.*
>
> *18.1.6 Tiempo hasta el valor medio T2 – Tiempo de cola.*
> *El tiempo hasta el valor medio de un impulso tipo rayo es un parámetro virtual definido como el intervalo de tiempo entre el origen virtual O1 y el instante en que la tensión ha disminuido hasta la mitad del valor de cresta.*

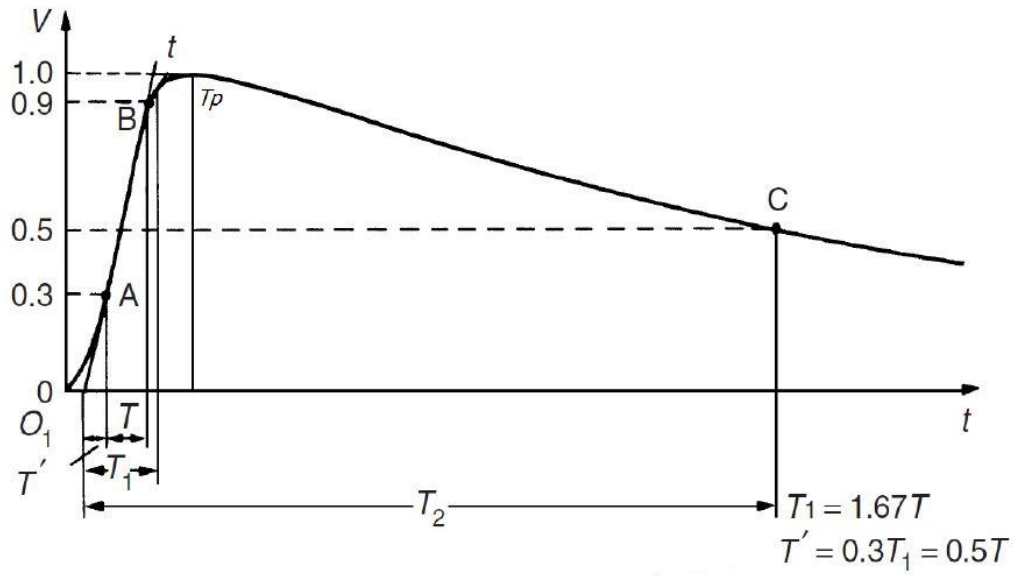


Figura 23. Forma de onda - Impulso tipo rayo normalizado
TOMADO DE: NTC4591

4.3 Impulso tipo maniobra normalizado – NTC4591

El impulso normalizado tipo maniobra o impulso 250/2500, se define como un impulso positivo o negativo cuya amplitud máxima establecida fluctúa en un rango de Vmax ± 3%, registrando en el ascenso un tiempo cresta Tp(hasta el pico) en el rango de 250 µs ± 20% y para el 50% de su valor de cresta en el descenso un tiempo de cola Tc en el rango de 2500 µs ± 60%. Formalmente lo dictado por la norma refiere a:

> *22.1 IMPULSO TIPO MANIOBRA NORMALIZADO*
> *El impulso tipo maniobra normalizado es un impulso que tiene un tiempo hasta la cresta Tp de 250/µs y un tiempo hasta el valor medio T2 de 2500µs. Se describe como un impulso 250/2500µs.*
>
> *21.3 TIEMPO HASTA LA CRESTA TP*
> *El tiempo hasta la cresta Tp es el intervalo de tiempo entre el origen real y el instante en que la tensión haya alcanzado su valor de cresta.*
>
> *21.4 TIEMPO HASTA EL VALOR MEDIO T2*
> *El tiempo hasta el valor medio T2 para un impulso tipo maniobra es el intervalo de tiempo entre el origen real y el instante en que la tensión haya disminuido por primera vez hasta la mitad del valor de cresta.*
>
> *21.5 TIEMPO POR ENCIMA DEL 90 % DE Td*
> *El tiempo por encima del 90 % de Td es el intervalo de tiempo durante el cual la tensión de impulso excede del 90 % de su valor de cresta.*

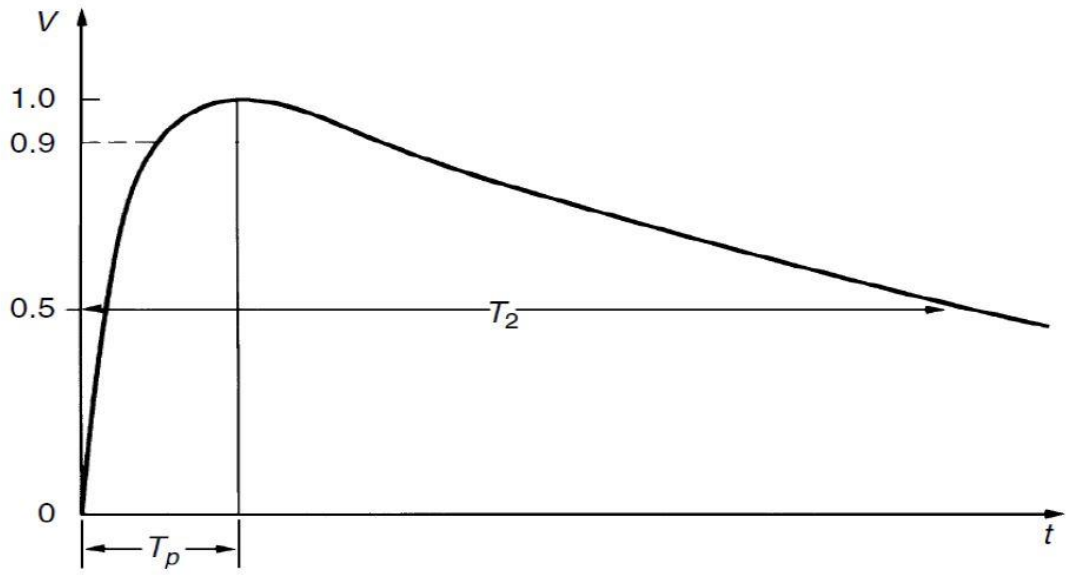


Figura 24. Forma de onda - Impulso tipo maniobra normalizado
TOMADO DE: NTC4591

4.4 Montaje experimental - Impulsos de tensión (GIT)

Para el ensayo experimental del impulso de tensión, se realizó usando la misma configuración que se tenía para generar un HV-DC y seguido a esto se agregaron los demás elementos que el circuito requiere; el espinterómetro HV9125 que hará las veces de spark-gap o interruptor controlado por tensión, la resistencia de frente de 350Ω HV9122, dos resistencias de cola en serie de 1320Ω cada una con referencia HV9123 y el divisor capacitivo puro para impulsos de 1200pF HV9120.

Para este montaje son necesarios como mínimo los siguientes equipos y elementos:

- (1) Módulo de mando.
- (1) Transformador de ensayos.
- (1) Resistencia de protección 3,76MΩ
- (1) Sistema de medida de tensión para AC; Rama de AT y BT del DCP.
- (1) Diodo rectificador.
- (1) Sistema de medida de tensión para DC; Rama de AT y BT del DRP.
- (1) Condensador de filtro 25.000pF o 2nF
- (7) Pedestal de piso.
- (7) Copa de conexión.
- (2) Barra de conexión.
- (5) Tubo espaciador.
- (1) Equipo de medida en BT para AC al devanado primario del transformador: Fluke179.
- (1) Equipo de medida en BT para AC del DCP: Fluke289.
- (1) Equipo de medida en BT para DC del DRP: Fluke289.
- (1) Equipo de medida en BT para el Impulso: Osciloscopio Tektronix DPO7054C.
- (3) Sonda en cable coaxial.



Figura 25. Circuito experimental para el Generador de Impulsos de Tensión
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

Previo a realizar la práctica es necesario verificar los ítems dispuestos en la lista de chequeo mostrada en el anexo1; de la misma manera en cómo se realizó para la generación de HV-AC y HV-DC, ya que como se ha hecho mención de manera general, en cada uno de los montajes experimentales que se realicen en el LEAT es indispensable y obligatorio revisar las condiciones descritas en la lista de chequeo. Realizado esto, se debe seguir el Diagrama de flujo para uso del Laboratorio Especializado de Alta Tensión, mostrado en el anexo2.

En la figura 25 se aprecia que el circuito comprende por una parte de la generación de HV-DC que se explico y realizo de manera experimental en el capitulo3. Ahora bien, parte seguida a esto en el espinterómetro dispuesto para hacer las veces de interruptor, es posible graduar la distancia de separación de las esferas y de esta manera cargar el condensador de 25000pF hasta un valor **Vx** deseado. Una vez cargado el condensador y consigo la primera esfera del explosor hasta la tensión de ruptura, se produce una descarga en las esferas del gap a través del aire y la distancia de separación de estas. La energía almacenada por el capacitor de 25000pF se descarga y transmite a la configuración del circuito delante del explosor.

Para tomar el registro de los valores se dispuso en primer lugar de un Fluke 179 en el devanado de baja tensión del transformador, que tomó la medida en [Vrms] de la alimentación. El DCP fue colocado para registrar en verdad la medida en [Vrms] de HV-AC que se rectificó, haciendo uso de un multímetro Fluke 289. La lectura de la señal de HV-DC rectificada y con la cual se carga el capacitor se registró con el DRP a través de un segundo Fluke 289.

Para visualizar el impulso que se genera en la descarga fue colocado un divisor capacitivo puro para impulsos al final del circuito; la medida en BT de este sistema de medida se llevó hasta el osciloscopio DPO7054C.

4.4.1 Medición de Impulso de tensión con Osciloscopio DPO7054C

En este tipo de ensayos es indispensable contar un equipo que ofrezca las herramientas necesarias para visualizar la forma de onda del impulso, analizar el tiempo de frente y el tiempo de cola y determinar la amplitud de la onda. Los resultados obtenidos de la prueba se presentan en la pantalla del osciloscopio tektronix DPO7054C, como se enseña en la figura 26.



Figura 26. Impulso Tipo Rayo obtenido del ensayo experimental mostrado en la pantalla del osciloscopio Tektronix DPO7054C
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

El tiempo de frente durante el proceso de carga está determinado por la ecuación mostrada en la parte izquierda de la tabla 14, y cuyo valor registrado por el DPO7054C fue de 0.743µs.

El tiempo de cola durante el proceso de descarga esta determinado por la ecuación mostrada en la parte derecha de la misma tabla 14, y cuyo valor registrado por el DPO7054C fue de 40µs.

Tiempo de frente – Proceso de carga	Tiempo de cola – Proceso de descarga
Se calcula el tao de carga del circuito: $\boldsymbol{\tau_{Frente} = R_f * (C_{eq}) = R_f * \left(\frac{C_{carga_DC} * C_{Impulso}}{C_{carga_DC} + C_{Impulso}}\right)}$ $\tau_{Frente} = 350\Omega * \left(\frac{25.000pF * 1.200pF}{25.000pF + 1.200pF}\right)$ $\tau_{Frente} = 0{,}4\mu s$ El tiempo de frente esta dado por: $\boldsymbol{T_{Frente} = \tau_{Frente} * k_{Frente}}$ Donde: $\boldsymbol{k_{Frente} = [1, 8{\sim}3]}$ $T_{Frente} = 1{,}8 * 0{,}4\mu s = 0{,}72\mu s$ Multiplicar por el factor de 1,67 descrito en la NTC4591: $T_{Frente} = 1{,}67 * 0{,}72\mu s = 1{,}2\mu s$	Se calcula el tao de descarga del circuito: $\boldsymbol{\tau_{Cola} = R_c * (C_{eq}) = R_c * (C_{carga_DC} + C_{Impulso})}$ $\tau_{Cola} = 2640\Omega * (25.000pF + 1.200pF)$ $\tau_{Cola} = 69\mu s$ El tiempo de cola esta dado por: $\boldsymbol{T_{Cola} = \tau_{Cola} * k_{Cola}}$ Donde: $\boldsymbol{k_{cola} = [0, 7{\sim}0, 8]}$ $T_{Frente} = 0{,}7 * 69\mu s = 48\mu s$

Tabla 14. Tiempos de frente y cola calculados para el Impulso Tipo Rayo Generado

De los valores calculados en la tabla 14, los porcentajes de tolerancia descritos en la NTC4591 y los valores medidos por el osciloscopio podemos concluir que en el LEAT es posible generar un impulso de tensión corresponde a un Impulso Tipo Rayo Normalizado 1,2/50µs.

5. ESTUDIO Y MONTAJE EXPERIMENTAL PARA GENERACIÓN Y MEDICIÓN DE IMPULSOS DE CORRIENTE (GIC)

Continuando con el estudio de los Impulsos que se pueden generar en el LEAT, se abordó también aquellos concernientes a la generación de un impulso de corriente conocido también por su abreviatura de GIC. Actualmente el LEAT cuenta con un módulo para la generación de impulsos de corriente hasta los 10kA. Fue desarrollado durante la ejecución de un proyecto de grado por estudiantes del proyecto curricular de Ingeniería en *Distribución y Redes Eléctricas* del año 2008; en donde el objetivo principal fue diseñar y construir un generador de impulsos de corriente 8/20 [µs], como aporte para el laboratorio de alta tensión de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas Facultad Tecnológica.

Podríamos decir que un impulso de corriente, es una corriente que circula durante un corto tiempo en una dirección, crece rápidamente hasta un valor máximo y luego cae a cero con una forma de onda sinusoidal amortiguada. Este tipo de ensayos se utiliza para imitar sobretensiones producidas por el impacto de un rayo (100kA pico), también para realizar pruebas de resistencias no lineales como varistores y descargadores de sobretensión. De manera general cualquier aplicación en donde se involucre el uso de altas corrientes.

5.1 Circuito de generación para un impulso de corriente – GIC

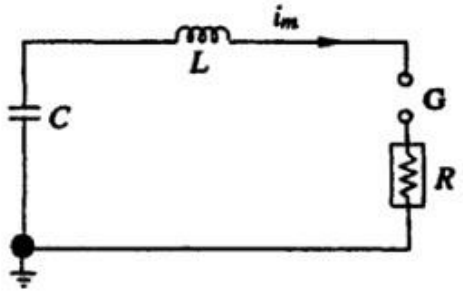


Figura 27. Circuito general de un generador de impulsos de corriente

De la misma forma en como ocurre para el GIT, es necesario en el GIC la generación de un HV-DC cargando un banco de condensadores que será liberado a través de una descarga en las esferas del espinterómetro. El circuito para generar un impulso de corriente corresponde entonces a una conexión en serie de un condensador cargado, una bobina y una resistencia, es decir, un circuito RLC serie en corto sin objeto de prueba.

En la figura 27, se muestra la configuración básica para que permite la generación de impulsos de corriente, en donde:

- C: Banco de condensadores con un HV-DC.
- L: Inductor de alta corriente con núcleo de aire.
- R: Resistencia dinámica: comprende la resistencia variable del circuito y una resistencia shunt de un bajo valor óhmico para efectuar la medida del impulso.

En la **NTC4591** se dan los lineamientos para las técnicas de ensayo que se pueden realizar en alta tensión y aquellas que refieren al ensayo experimental para impulso con corriente.

5.2 Definiciones para los ensayos de corriente de impulso

Según la definición dada por la norma NTC4591 en la sección 8 se entiende que:

> *24.1 CORRIENTE DE IMPULSO*
> *Se usan dos tipos de corrientes de impulso. El primer tipo tiene una forma que se incrementa desde cero hasta el valor de cresta en un tiempo corto, y después disminuye hasta cero bien sea aproximadamente en forma exponencial o en la forma de una curva seno marcadamente amortiguada. Este tipo se define mediante el tiempo frontal T1 y el tiempo hasta el valor medio T2.*
>
> *El segundo tipo tiene una forma aproximadamente rectangular y se define mediante la duración de la cresta y la duración total.*
>
> *24.3 TIEMPO FRONTAL T1*
> *El tiempo frontal T1 de una corriente de impulso es un parámetro virtual definido como 1,25 veces el intervalo T, entre los instantes en que el impulso es el 10 % y el 90 % del valor de la cresta. Si en el frente existen oscilaciones, los valores del 10 % y el 90 % se deben derivar a partir de una curva promedio trazada a través de estas oscilaciones en una forma análoga a la usada para los impulsos tipo rayo con oscilaciones en el frente.*
>
> *24.5 TIEMPO HASTA EL VALOR MEDIO T2*
> *El tiempo hasta el valor medio T2 de una corriente de impulso es un parámetro virtual definido como el intervalo de tiempo entre el origen virtual O1 y el instante en que la corriente ha disminuido hasta la mitad del valor de cresta.*
>
> *24.6 DURACIÓN DE LA CRESTA DE UNA CORRIENTE DE IMPULSO RECTANGULAR Td*
> *La duración de la cresta de una corriente de impulso rectangular T d es un parámetro virtual definido como el tiempo durante el cual la corriente es mayor del 90 % de su valor de cresta (véase la Figura 14b).*
>
> *24.7 DURACIÓN TOTAL DE UNA CORRIENTE DE IMPULSO RECTANGULAR Tt*
> *La duración total de una corriente de impulso rectangular Tt es un parámetro virtual definido como el tiempo durante el cual la corriente es mayor del 10 % de su valor de cresta (véase la Figura 14b). Si en el frente existen oscilaciones, conviene trazar una curva promedio para determinar el tiempo en el cual se alcanza el valor del 10 %.*

5.3 Corrientes de impulso normalizadas

Se usan cuatro corrientes de impulso normalizadas correspondientes al primer tipo de impulso, que se define en el numeral 24.1.

Impulso de 1/20μs	Valor de cresta: Vmax ± 10 %	Tiempo de frente: 1μs ± 10 %	Tiempo de cola: 20μs ± 10 %
Impulso de 4/10μs	Valor de cresta: Vmax ± 10 %	Tiempo de frente: 4μs ± 10 %	Tiempo de cola: 10μs ± 10 %
Impulso de 8/20μs	Valor de cresta: Vmax ± 10 %	Tiempo de frente: 8μs ± 10 %	Tiempo de cola: 20μs ± 10 %
Impulso de 30/80μs	Valor de cresta: Vmax ± 10 %	Tiempo de frente: 30μs ± 10 %	Tiempo de cola: 80μs ± 10 %

Tabla 15. Valores y características del impulso de corriente normalizado – NTC4519.

En el caso de las corrientes de impulso rectangular se tienen duración de la cresta Td de 500μs, 1000μs ó 2000μs, o entre 2000μs y 3200μs.

Además, se tolera una pequeña sobretensión u oscilaciones siempre que su amplitud de cresta individual en la cercanía de la cresta del impulso no sea más del 5 % del valor de la cresta. Cualquier inversión de polaridad después de que la corriente ha caído a cero no debe ser mayor del 20 % del valor de la cresta.

5.4 Montaje experimental – Impulsos de corriente (GIC)

Para el ensayo experimental del impulso de corriente, se realizó usando casi la misma configuración que se tenía para generar un HV-DC, haciendo en esta ocasión el reemplazo en los condensadores de carga, dado que el módulo construido tiene consigo dos condensadores de 14uF a 4kV en conexión serie o paralelo. Seguido a esto se agrega de igual manera el espinterómetro en serie con el lazo inductivo en forma de arco presente en el módulo del GIC, finalmente la corriente de impulso se hace pasar a través de la R shunt de bajo valor óhmico y sobre esta se toma lectura de tensión para posteriormente traducir a un valor en [kA].

Para este montaje son necesarios como mínimo los siguientes equipos y elementos:

- (1) Módulo de mando.
- (1) Transformador de ensayos.
- (1) Resistencia de protección 3,76MΩ
- (1) Sistema de medida de tensión para AC; Rama de AT y BT del DCP.
- (1) Diodo rectificador.
- (1) Sistema de medida de tensión para DC; Rama de AT y BT del DRP.
- (1) Modulo de GIC: L + R en serie con R shunt de bajo valor óhmico: aprox 4mΩ.
- (2) Condensador de filtro 14uF, Serie hasta 4kV y Paralelo hasta 8kV.
- (5) Pedestal de piso.
- (5) Copa de conexión.
- (2) Barra de conexión.
- (2) Barra aislante.
- (4) Tubo espaciador.
- (1) Equipo de medida en BT para AC al devanado primario del transformador: Fluke179.
- (1) Equipo de medida en BT para AC del DCP: Fluke289.
- (1) Equipo de medida en BT para DC del DRP: Fluke289.
- (1) Equipo de medida en BT para el Impulso: Osciloscopio Tektronix DPO7054C.
- (3) Sonda en cable coaxial.

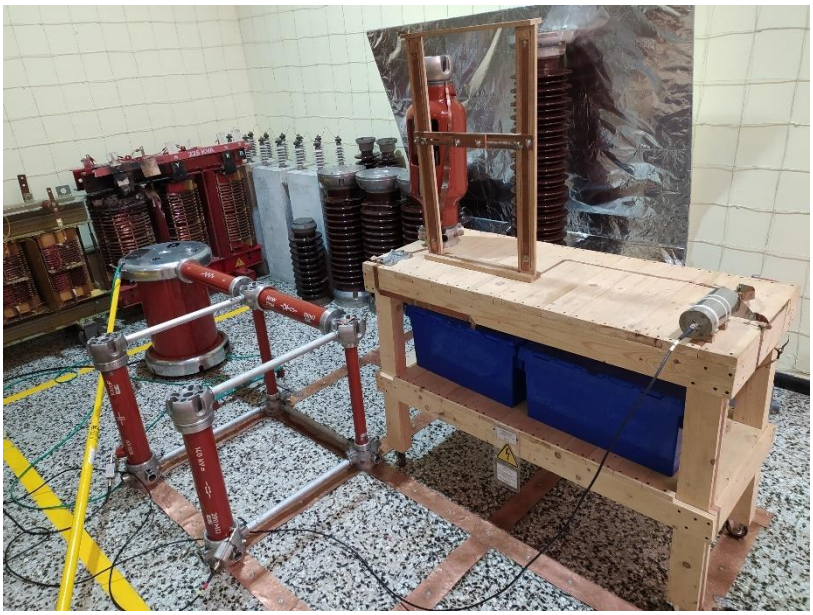


Figura 28. Circuito experimental para el Generador de Impulsos de Corriente
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

Anterior a realizar la práctica es necesario verificar los ítems dispuestos en la lista de chequeo mostrada en el anexo1; de la misma manera en cómo se realizó para los anteriores capítulos puesto que en el LEAT es indispensable y obligatorio revisar las condiciones descritas en la lista. Realizado esto, se debe seguir el Diagrama de flujo para uso del Laboratorio Especializado de Alta Tensión, mostrado en el anexo2.

En la figura 28 se aprecia el circuito real que se puede realizar con el módulo de impulsos de corriente, en esencia se tiene la generación de HV-DC a través de la carga de los condensadores del módulo, aquellos que se encuentran suspendidos en el banco móvil dentro de los cubos en color azul. Ahora bien, parte seguida a esto en el espinterómetro dispuesto para hacer las veces de interruptor, es posible graduar la distancia de separación de las esferas y de esta manera cargar los condensadores de 14uF hasta un valor **Vx** deseado según la conexión que se establezca; en serie una tensión máxima de 4kV y en paralelo 8kV.

Cargados los condensadores y consigo la primera esfera del explosor hasta la tensión de ruptura, se produce una descarga en las esferas del gap a través del aire y la distancia de separación de los electrodos. La energía almacenada se descarga y transmite a la configuración del circuito delante del explosor. Allí se tiene un lazo inductivo y una resistencia variable que se puede ajustar mecánicamente para variar el efecto y forma de onda del impulso.

Para tomar el registro de los valores se dispuso de un Fluke 179 en el devanado de baja tensión del transformador para la medida en [Vrms] de la alimentación.

El DCP fue colocado para registrar en verdad la medida en [Vrms] de HV-AC que se rectificó, haciendo uso de un multímetro Fluke 289.

La lectura de la señal de HV-DC rectificada y con la cual se cargan los condensadores se registró con el DRP a través de un segundo Fluke 289.

Para visualizar el impulso de corriente que se genera en la descarga fue medido a través de la R shunt de bajo valor óhmico colocado un acople de impedancia a la salida del elemento y llevando una lectura en V hasta el osciloscopio DPO7054C.

5.4.1 Medición de Impulso de tensión con Osciloscopio DPO7054C



Figura 29. Impulso de corriente obtenido del ensayo experimental mostrado en la pantalla del osciloscopio Tektronix DPO7054C.
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

En la figura 29, podemos ver con claridad que el comportamiento del impulso de corriente muestra una onda que crece rápidamente y cae de manera amortiguada hasta llegar a 0 en un tiempo corto, en esta configuración no hay elementos que almacenen energía por lo cual la señal de impulso cae en unos pocos us.

La amplitud del impulso alcanza una cresta de 22,2V que traduciendo dicho valor al dividir por los mΩ de la R shunt se obtiene un valor en kA, particularmente para el ensayo efectuado una corriente de impulso en el orden de 5,4kA.

El tiempo de frente medido por el DPO7054C fue de 5,83us mientras que la cola registra un valor al 50% de 15,6us.

6. ESTUDIO Y MONTAJE EXPERIMENTAL PARA DESCARGA EN MATERIALES AISLANTES Y DIELÉCTRICOS

Una descarga parcial es un fenómeno eléctrico que se puede dar sobre un medio que en teoría es aislante, y tiene lugar entre con conductores que se encuentran a un potencial diferente. Estas descargas ocurren dado que el campo eléctrico generado por los HV no siempre es uniforme y aunque lo fuera, el hecho de estar a un nivel de tensión elevado trae como consecuencia el deterioro a largo plazo de los sistemas de aislamiento, es decir, se supera la rigidez dieléctrica de los materiales y se pueden dar fenómenos como un arco eléctrico.

Principalmente este tipo de descargas se pueden dar en presencia de un campo eléctrico intenso y el estrés dieléctrico causado por el uso de alto voltaje.

Algunos ejemplos en donde ocurren este tipo de descargas son:

- Distribución no homogénea del campo eléctrico.
- Presencia de burbujas en aislamiento sólidos y líquidos.
- Efectos puntuales que localizan el estrés dieléctrico en el aislamiento.
- Presencia de humedad, grietas o agua.
- Presencia de contaminantes en la superficie de aislamiento.
- Tensión que excede la rigidez dieléctrica de los materiales aislantes.

6.1 Tipos de descarga

A continuación, se mencionan los 4 tipos de descargas que existen:

- Internas: que pueden darse dentro del aislante normalmente por una mala fabricación o envejecimiento del material.
- Superficiales: que ocurren en presencia de agentes externos al aislante, pero sobre la superficie de los materiales y crean un medio para que la corriente pueda fluir.
- Corona: Ocurre alrededor de puntos de conducción agudos a alta tensión cuando el gradiente de tensión, excede un valor crítico, y aunque es un fenómeno de baja energía a largo plazo puede degradar el aislamiento de los materiales. Este tipo de descargas puede generar ruido audible y una radiación de color ultravioleta como también el ozono sobre la superficie del material.
- Arborescencia: se origina a partir de un punto defectuoso como un pequeño vacío, un borde de electrodo agudo o una partícula metálica; en donde el campo eléctrico es alto.

6.2 Tensión disruptiva (Descarga directa)

Podemos decir que una tensión disruptiva es aquel fenómeno eléctrico que tiene lugar cuando el valor de tensión sobre un equipo alcanza un punto en el cual se produce la ruptura del aislamiento, bien sea de un material o un medio como el aire y se conduce así una corriente eléctrica.

La tensión disruptiva esta en función de varios parámetros, tales como la presión y temperatura del medio, el tipo de gas que hay presente en las superficies de un equipo, el propio material con el cual se construyen los aislamientos eléctricos y finalmente de la distancia que pueda presentar un punto de alto potencial frente a uno de bajo potencial.

6.3 Tensión de ruptura DC (breakdown) – Ley de Paschen

La ley de paschen explica la probabilidad de disrupción en el espacio que existe entre dos electrodos. Se estudia entonces la tensión de ruptura para distintos gases en función del producto de la presión con la distancia de separación de los electrodos.

$$V_b = \frac{B * p * d}{C + \ln(p * d)} \ [kV]$$

$$C = \ln\left[\frac{A}{\ln\left(\frac{1}{y} + 1\right)}\right]$$

Donde:
B = Constante del gas en (kV)/(bar x cm).
d = Distancia de separación de los electrodos [cm].
P = Presión del aire [bar].
A y C = Constantes del gas.

El campo eléctrico disruptivo – Ley de Paschen está dado por:

$$E_b = \frac{Vb}{d} = \frac{B * p}{C + \ln(pd)} \ [kV/cm]$$

6.4 Montaje experimental – Descarga parcial en gases (aire)

Para el ensayo experimental, en una descarga parcial se requiere del circuito con la configuración en HV-DC. A este sistema de generación se acopló un porta electrodos en donde se dispuso de 5 configuraciones para realizar la práctica.

Para este montaje son necesarios como mínimo los siguientes equipos y elementos:

- (1) Módulo de mando.
- (1) Transformador de ensayos.
- (1) Resistencia de protección 3,76MΩ
- (1) Sistema de medida de tensión para AC; Rama de AT y BT del DCP.
- (1) Diodo rectificador.
- (1) Sistema de medida de tensión para DC; Rama de AT y BT del DRP.
- (1) Condensador de filtro 25.000pF o 2nF
- (4) Pedestal de piso.
- (4) Copa de conexión.
- (2) Barra de conexión.
- (4) Tubo espaciador.
- (1) Equipo de medida en BT para AC al devanado primario del transformador: Fluke179.
- (1) Equipo de medida en BT para AC del DCP: Fluke289.
- (1) Equipo de medida en BT para DC del DRP: Fluke289.
- (1) Porta electrodos: 1. Esfera-esfera 2. Placa-placa 3. Punta-punta 4. Punta(+) placa(-) 5. Punta(-) placa(+)
- (2) Sonda en cable coaxial.

6.4.1 Montaje experimental – Descarga parcial en gases (aire) – Esfera_Esfera.



Figura 30. Descarga Esfera-Esfera
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

Para este experimento se hizo variable la distancia de separación de los electrodos, consignando los valores obtenidos en la tabla 16. El valor de ruptura registrado a 1cm fue de 25,4kV.

CONFIGURACIÓN ESFERA - ESFERA						Valor de Ruptura
d [mm]	Tensión Trafo_BT Fluke 179 [Vrms]	Tensión Trafo AT [Vrms]	Tensión DCP_BT Fluke 289 #1 [Vrms]	Tensión AT DCP [Vrms]	Tensión DRP_BT Fluke 289 #2 [V]	Tensión AT DRP [V]
1	7,04	3.200	0,8749	2.949	0,5363	3.748
2	12,56	5.709	1,5782	5.320	0,9252	6.465
5	23,61	10.732	2,9744	10.027	1,9135	13.371
10	44,40	20.182	5,604	18.892	3,6386	25.426
15	62,67	28.486	7,883	26.574	5,1111	35.715
20	79,4	36.091	10,005	33.728	6,559	45.833

Tabla 16. Valor de ruptura en función de la distancia de electrodos - Esfera_Esfera.

6.4.2 Montaje experimental – Descarga parcial en gases (aire) – Placa_Placa.



Figura 31. Descarga Placa-Placa
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

Para este experimento se hizo variable la distancia de separación de los electrodos, consignando los valores obtenidos en la tabla 17. El valor de ruptura registrado a 1cm fue de 24,68kV.

CONFIGURACIÓN PLACA - PLACA						Valor de Ruptura
d [mm]	Tensión Trafo_BT Fluke 179 [Vrms]	Tensión Trafo AT [Vrms]	Tensión DCP_BT Fluke 289 #1 [Vrms]	Tensión AT DCP [Vrms]	Tensión DRP_BT Fluke 289 #2 [V]	Tensión AT DRP [V]
1	5,448	2.476	0,6879	2.319	0,4334	3.028
2	11,01	5.005	1,3771	4.642	0,8631	6.031
5	23,42	10.645	2,9407	9.913	1,8922	13.222
10	43,16	19.618	5,435	18.322	3,5332	24.689
15	60,98	27.718	7,694	25.937	5,0433	35.241
20	79,9	36.318	10,022	33.785	6,505	45.455

Tabla 17. Valor de ruptura en función de la distancia de electrodos - Placa_Placa

6.4.3 Montaje experimental – Descarga parcial en gases (aire) – Punta_Punta.



Figura 32. Descarga Punta-Punta
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

Para este experimento se hizo variable la distancia de separación de los electrodos, consignando los valores obtenidos en la tabla 18. El valor de ruptura registrado a 1cm fue de 15,12kV menor que en las otras configuraciones de electrodos, debido al campo eléctrico no homogéneo.

CONFIGURACIÓN PUNTA - PUNTA						Valor de Ruptura
d [mm]	Tensión Trafo_BT Fluke 179 [Vrms]	Tensión Trafo AT [Vrms]	Tensión DCP_BT Fluke 289 #1 [Vrms]	Tensión AT DCP [Vrms]	Tensión DRP_BT Fluke 289 #2 [V]	Tensión AT DRP [V]
1	8,71	3.959	1,0995	3.707	0,6905	4.825
2	12,66	5.755	1,5858	5.346	1,0057	7.028
5	19,68	8.945	2,4689	8.323	1,573	10.992
10	26,84	12.200	3,373	11.371	2,164	15.121
15	31,76	14.436	3,9849	13.434	2,5517	17.831
20	34,99	15.905	4,4024	14.841	2,8511	19.923

Tabla 18. Valor de ruptura en función de la distancia de electrodos - Punta_Punta

6.4.4 Montaje experimental – Descarga parcial en gases (aire) – Punta(+)_Placa(-).



Figura 33. Descarga Punta(+) Placa(-)
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

Para este experimento se hizo variable la distancia de separación de los electrodos, consignando los valores obtenidos en la tabla 19. El valor de ruptura registrado a 1cm fue de 11,77kV menor que en las otras configuraciones de electrodos, debido al campo eléctrico no homogéneo, pero en consideración la una superficie negativa mucho mayor.

CONFIGURACIÓN PUNTA (+) - PLACA (-)						Valor de Ruptura
d [mm]	Tensión Trafo_BT Fluke 179 [Vrms]	Tensión Trafo AT [Vrms]	Tensión DCP_BT Fluke 289 #1 [Vrms]	Tensión AT DCP [Vrms]	Tensión DRP_BT Fluke 289 #2 [V]	Tensión AT DRP [V]
1	7,1	3.227	0,8818	2.973	0,5662	3.956
2	10,18	4.627	1,272	4.288	0,7892	5.515
5	14,75	6.705	1,8533	6.248	1,1833	8.269
10	20,58	9.355	2,5994	8.763	1,6848	11.773
15	48,31	21.959	5,995	20.210	3,6486	25.495
20	64,67	29.395	7,973	26.878	4,8699	34.030

Tabla 19. Valor de ruptura en función de la distancia de electrodos - Punta(+) Placa(-)

6.4.5 Montaje experimental – Descarga parcial en gases (aire) – Punta(-) Placa(+)



Figura 34. Descarga Punta(-) Placa(+)
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

Para este experimento se hizo variable la distancia de separación de los electrodos, consignando los valores obtenidos en la tabla 19. El valor de ruptura registrado a 1cm fue de 13,9kV menor que en las otras configuraciones de electrodos, debido al campo eléctrico no homogéneo generado por los electrodos, pero no tan crítico como la anterior configuración.

CONFIGURACIÓN PUNTA (-) - PLACA (+)						Valor de Ruptura
d [mm]	Tensión Trafo_BT Fluke 179 [Vrms]	Tensión Trafo AT [Vrms]	Tensión DCP_BT Fluke 289 #1 [Vrms]	Tensión AT DCP [Vrms]	Tensión DRP_BT Fluke 289 #2 [V]	Tensión AT DRP [V]
1	7,12	3.236	0,8848	2.983	0,5468	3.821
2	10,15	4.614	1,2777	4.307	0,8157	5.700
5	15,04	6.836	1,8963	6.393	1,2212	8.533
10	27,93	12.695	3,3938	11.441	1,9893	13.901
15	43,13	19.605	5,1879	17.489	2,9655	20.722
20	62,66	28.482	6,833	23.035	3,4633	24.201

Tabla 20. Valor de ruptura en función de la distancia de electrodos - Punta(-) Placa(+)

6.4.6 Comparación de Descargas parciales en función de los electrodos usados.

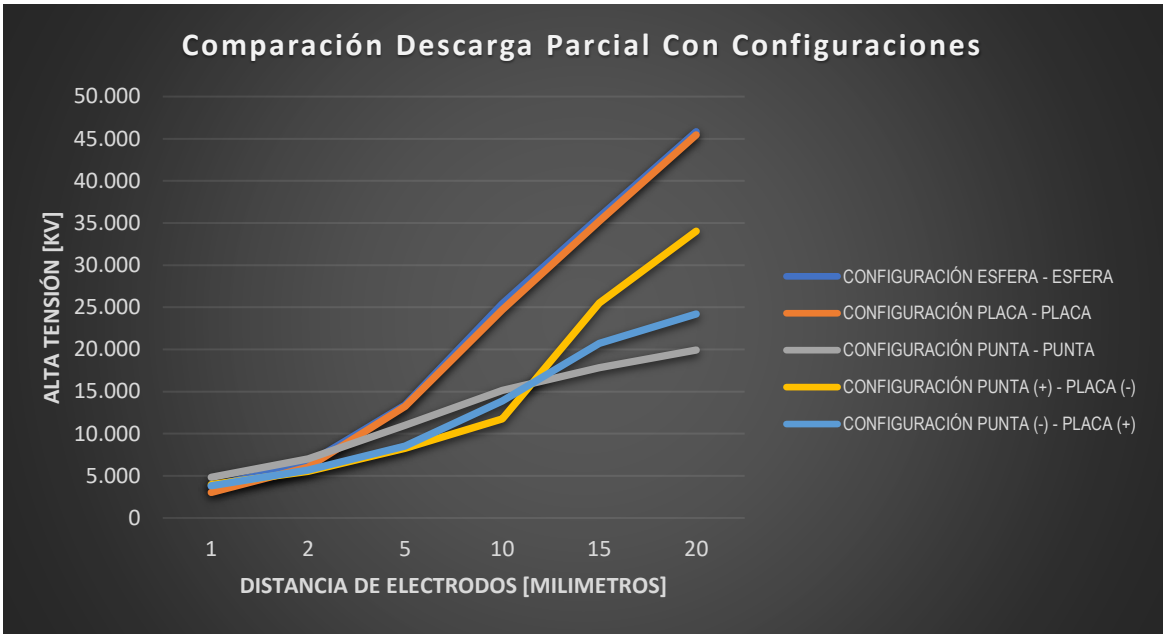


Figura 35. Comparación Descarga Parcial Con Configuraciones de electrodos.
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

En la figura 35, se aprecia una grafica de la tensión de ruptura para las configuraciones de electrodos que se realizaron experimentalmente en función de la distancia de separación. Podemos concluir que para la configuración de las esferas y las placas el valor de ruptura es comparable y tiene una magnitud superior que las demás ordenaciones. El ensayo experimental más crítico resulta con la disposición de la punta(+) y la placa(-), puesto que el campo no homogéneo que se genera hace que se produzca ruptura en el aire sobre los 11kV/cm.

6.4.7 Descarga Parcial en Aceite dieléctrico – Configuración Placa-Placa

La prueba de rigidez dieléctrica es una medida de la resistencia que el aceite dieléctrico presenta ante una descarga o choque eléctrico, y sirve para comprobar la presencia de contaminantes en el aceite, como: partículas conductoras, agua, polvo o celulosa, las cuales se pueden encontrar en concentraciones significativas a tensiones bajas, es decir, cuando el aceite está contaminado presenta valores bajos de rigidez dieléctrica, los cuales disminuyen la vida útil del aislamiento.

Tabla 11. Características de los métodos aplicados para medir la rigidez dieléctrica.

NORMA	TIPO DE ELECTRODO	DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS	TENSIÓN MÍNIMA
ASTM D877	Planos	2.54 mm	25 KV
ASTM D816	Semiesfericos	2.0 mm	50 KV

Figura 36. Aspectos generales sobre pruebas de aceite en transformadores de potencia.

Las normas que estandarizan esta prueba son la ASTM D877 y ASTM D816. La primera utiliza electrodos planos y se recomienda aplicarla a aceites nuevos que no han sido procesados, y la segunda utiliza electrodos semiesféricos y es recomendado para equipos que involucran movimiento del aceite (interruptores) y aceites procesados.

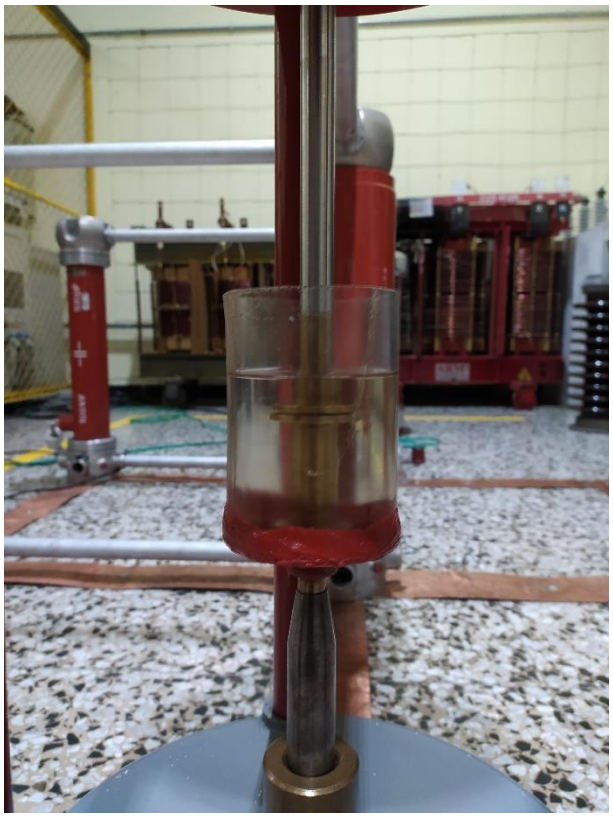


Figura 37. Prueba de rigidez dielectrica para aceite.
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

Se realizo la prueba de rigidez dielectrica según la ASTM D-877 separando los electrodos planos a una distancia de 2,54mm y se aplico la descarga a 25kV. Sin embargo, el aceite dieléctrico que fue sometido al esfuerzo eléctrico no soporto la prueba dado que hubo ruptura en el medio aislante.

7. ESTUDIO Y MONTAJE EXPERIMENTAL PARA DESCARGADORES DE SOBRETENSIÓN

Los DPS conocidos como descargadores de sobretensión, son equipos eléctricos diseñados para resguardar los transformadores y en general las redes de distribución de energía, contra las sobretensiones ocurridas por descarga atmosférica tipo rayo o por las sobretensiones que puede sufrir una red de energía eléctrica. Un protector contra sobretensiones contiene al menos un componente no lineal y su función es limitar las sobretensiones transitorias. En la mayoría de los DPS, los componentes electrónicos no lineales derivan la energía extra de la sobretensión por medio de dos tecnologías: cortocircuitando (los protectores de "tipo crowbar") y/o recortando la tensión ("tipo clamping").

En el LEAT se dispone de dos tipos de DPS, el primero de ellos es un descargador polimérico marca BOWTHORFE de hasta 10kVrms y el segundo es un descargador de sobretensión de oxido metal marca GENERAL ELECTRIC de 18kVrms. Esos equipos fueron sometidos a dos pruebas cada uno, en primer lugar, conectados en paralelo al transformador HV9105 generando un HV-AC y mostrando el comportamiento del dispositivo cuando se supera el umbral de tensión para el cual esta diseñado el equipo. La segunda prueba se realizó aplicando un impulso tipo rayo gracias al GIT que se estudio en el capitulo 4.

7.1 Prueba en HV-AC para Descargadores de sobretensión

Después de generar un HV-AC desde el transformador de ensayos HV9105, al mismo montaje experimental se le conecto en paralelo cada uno de los descargadores mencionados anteriormente, y se alcanzó un Vrms en AT hasta el valor nominal de los equipos; 10kVrms en el caso del DPS polimérico BOWTHORFE y 18kVrms para el DPS de oxido metal GENERAL ELECTRIC.

Para este montaje son necesarios como mínimo los siguientes equipos y elementos:

- (1) Módulo de mando.
- (1) Transformador de ensayos.
- (1) Sistema de medida de tensión; Rama de AT y BT de DRP.
- (1) Sistema de medida de tensión; Rama de AT y BT de DCP.
- (3) Pedestal de piso.
- (3) Copa de conexión.
- (3) Barra de conexión.
- (2) Tubo espaciador.
- (1) Equipo de medida en BT para AC al devanado primario del transformador: Fluke289.
- (1) Equipo de medida en BT para el DCP y DRP en AC: Osciloscopio Tektronix DPO7054C.
- (2) Sonda en cable coaxial.

7.1.1 Montaje Experimental – Descargador de sobretensión BOWTHORFE.

Para este ensayo la tensión en HV-AC a la cual se expuso el DPS tuvo una variación comenzando desde los cero voltios hasta obtener un valor de 10kVrms. En la figura 38 se ilustra la configuración de la prueba.



Figura 38. Descargador de sobretensión BOWTHORFE expuesto a un HV-AC
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

Las formas de onda medidas en BT por los DRP y DCP fueron llevadas al Osciloscopio Tektronix DPO7054C y visualizar en su pantalla el recorte de la señal tal como se muestra a continuación.

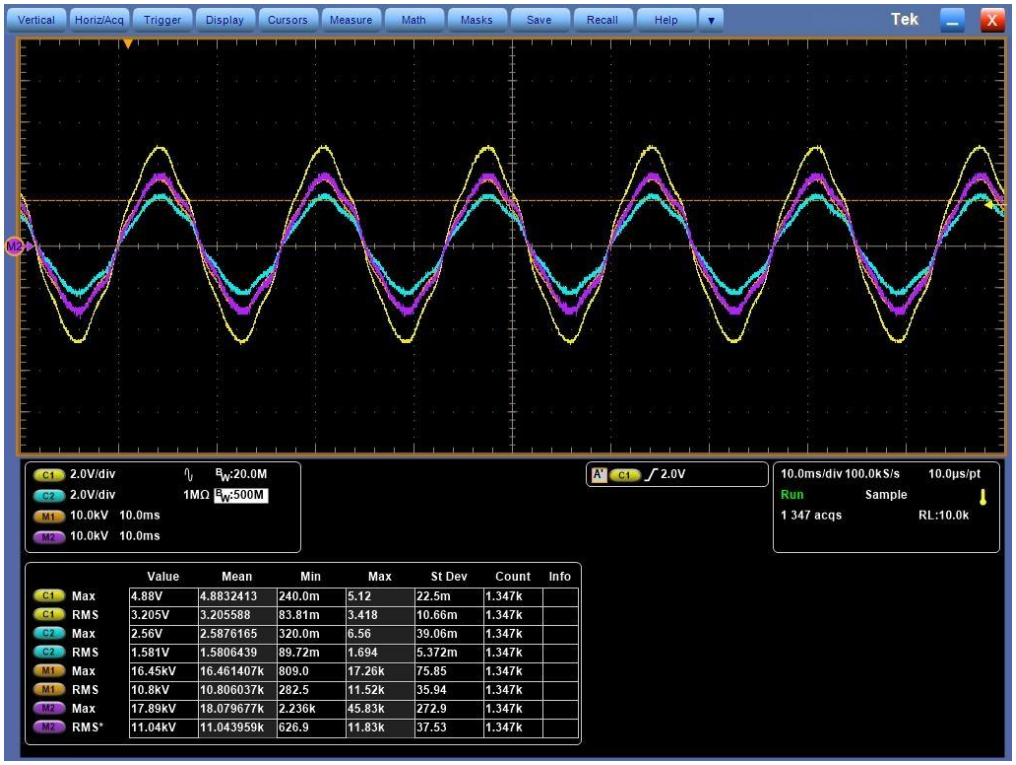


Figura 39. Descargador de sobretensión BOWTHORFE a 10kVrms mostrado en Osciloscopio Tektronix DPO7054C
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

En la figura 39 se aprecia que el DPS BOWTHORFE al estar expuesto a 10kVrms no es capaz de deformar y recortar la onda de HV-AC, sin embargo, para ver el funcionamiento del equipo, se realizo un aumento de la tensión en el trafo hasta un 120% del valor nominal del descargador, es decir, por encima de los 12kVrms.

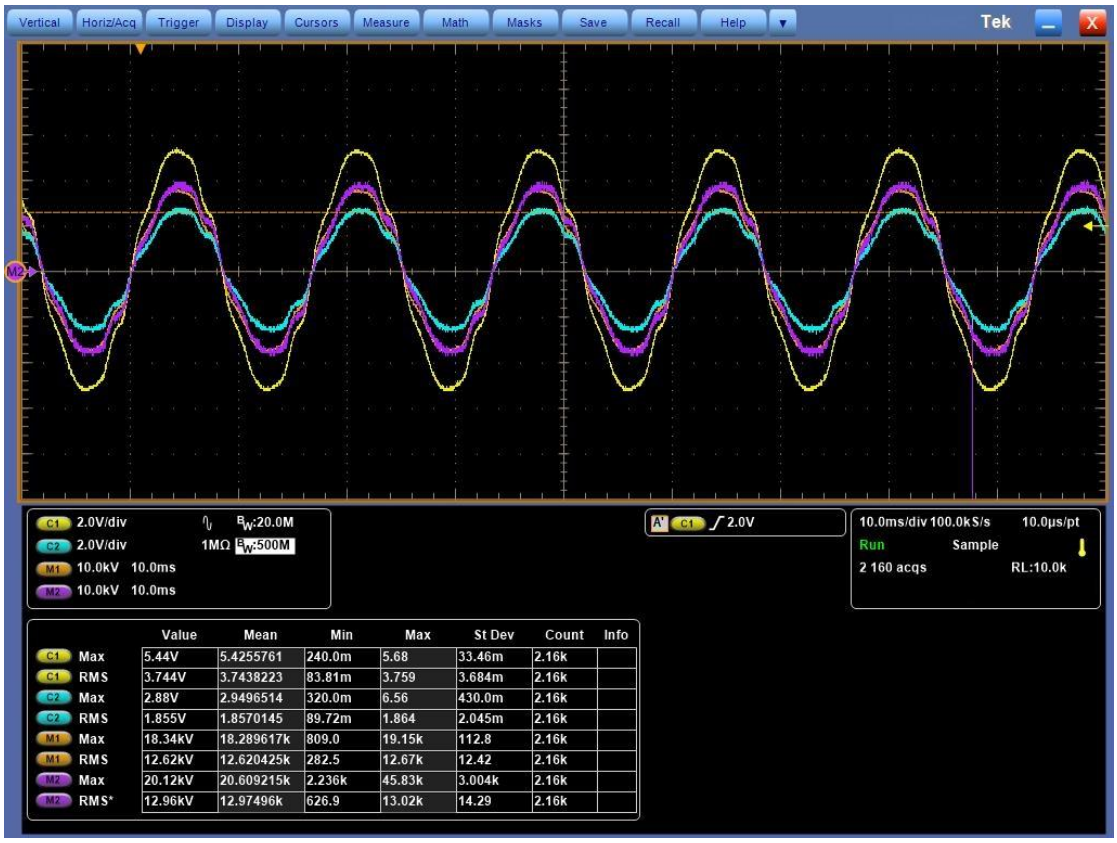


Figura 40. Descargador de sobretensión BOWTHORFE a 12,6k Vrms mostrado en Osciloscopio Tektronix DPO7054C
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

En la figura 40, se visualiza como actúa el descargador de sobretensión BOWTHORFE, recortando la amplitud de la onda de tensión del HV-AC en el transformador y convirtiendo así la señal alterna en una señal que presenta achatamiento en los mínimos y máximos valores.

Las medidas registradas en BT por los divisores de tensión también se ven afectadas por el DPS, es por esto que todas las señales registradas en el osciloscopio presentan la deformación en la onda de tensión.

7.1.2 Montaje Experimental – Descargador de sobretensión GENERAL ELECTRIC.

Para este ensayo la tensión en HV-AC a la cual se expuso el DPS tuvo una variación comenzando desde los cero voltios hasta obtener un valor de 18kVrms. En la figura 41 se ilustra la configuración de la prueba.



Figura 41. Descargador de sobretensión GENERAL ELECTRIC expuesto a un HV-AC
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

Las formas de onda medidas en BT por los DRP y DCP fueron llevadas al Osciloscopio Tektronix DPO7054C y visualizar en su pantalla el recorte de la señal tal como se muestra a continuación.



Figura 42. Descargador de sobretensión GENERAL ELECTRIC a 18kVrms mostrado en Osciloscopio Tektronix DPO7054C
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

En la figura 42 se aprecia que el DPS de oxido de metal marca GENERAL ELECTRIC que al estar expuesto a 18kVrms aun no deformar y recorta la onda de HV-AC, sin embargo, para ver el funcionamiento del equipo, se realizó un aumento de la tensión en el trafo hasta un 130% del valor nominal del descargador, es decir, por encima de los 24kVrms.



Figura 43. Descargador de sobretensión GENERAL ELECTRIC a 24kVrms mostrado en Osciloscopio Tektronix DPO7054C
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

En la figura 43, se visualiza como actúa el descargador de sobretensión GENERAL ELECTRIC, recortando la amplitud de la onda de tensión del HV-AC en el transformador y convirtiendo así la señal alterna en una señal que presenta achatamiento en los mínimos y máximos valores.

Las medidas registradas en BT por los divisores de tensión también se ven afectadas por el DPS, es por esto que todas las señales registradas en el osciloscopio presentan la deformación en la onda de tensión.

7.2 Prueba Impulso Tipo Rayo para Descargadores de sobretensión

Entendido el comportamiento del Impulso Tipo Rayo, ahora es posible aplicarlo sobre un objeto de prueba; particularmente se hizo sobre los descargadores de sobretensión Bowthorfe y General Electric. La onda aplicada corresponde a un impulso con un tiempo de frente de 1,2μs y un tiempo de cola de 48μs (mostrado en el capitulo4).

Para este montaje son necesarios como mínimo los siguientes equipos y elementos:

- (1) Módulo de mando.
- (1) Transformador de ensayos.
- (1) Resistencia de protección 3,76MΩ
- (1) Sistema de medida de tensión para AC; Rama de AT y BT del DCP.
- (1) Diodo rectificador.
- (1) Sistema de medida de tensión para DC; Rama de AT y BT del DRP.
- (1) Condensador de filtro 25.000pF o 2nF
- (8) Pedestal de piso.
- (7) Copa de conexión.
- (2) Barra de conexión.
- (5) Tubo espaciador.
- (1) Equipo de medida en BT para AC al devanado primario del transformador: Fluke179.
- (1) Equipo de medida en BT para AC del DCP: Fluke289.
- (1) Equipo de medida en BT para DC del DRP: Fluke289.
- (1) Equipo de medida en BT para el Impulso: Osciloscopio Tektronix DPO7054C.
- (3) Sonda en cable coaxial.

De la misma manera que en los ensayos anteriores se realizó la lista de chequeo, antes de realizar el montaje experimental. Adicional a esto se debe seguir el protocolo descrito en el *Diagrama de flujo para uso del Laboratorio Especializado de Alta Tensión,* mostrado en el anexo2.

Para esta prueba de ensayo con Impulso Tipo Rayo se recreo el circuito del GIT y se agrego un elemento aislante que sirve de apoyo mecánico para disponer el descargador de sobretensión



Figura 44. Circuito Generador de Impulso Tipo Rayo 1,2/48us con soporte para objeto de prueba.
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

7.2.1 Montaje Experimental – Impulso Tipo Rayo en Descargador de sobretensión BOWTHORFE

Previo en aplicar el Impulso tipo rayo, se registra en el osciloscopio la onda que será aplicada sobre el DPS Bowthorfe con el objetivo de luego comparar el resultado cuando se tiene la presencia del equipo sobre el circuito.

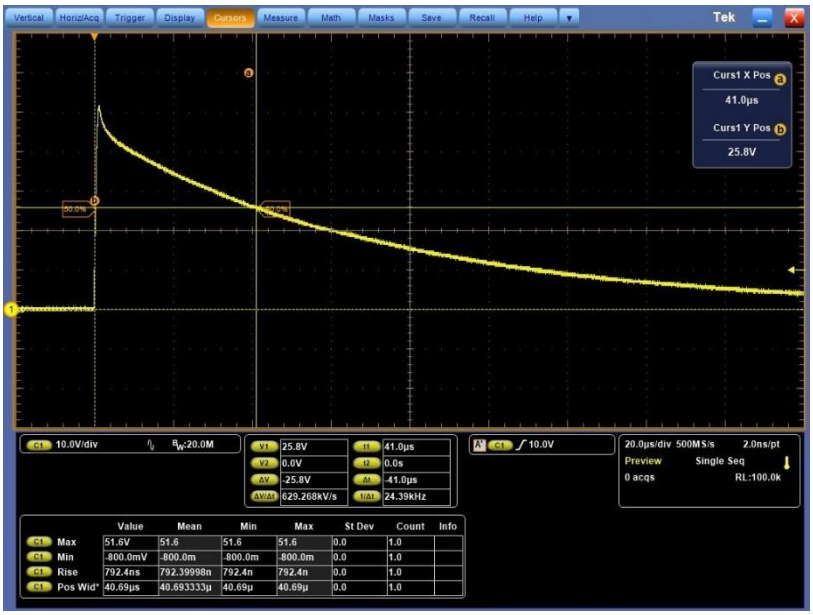


Figura 45. Impulso Tipo Rayo de 28,4kV sin DPS BOWTHORFE
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

Una vez registrado el impulso tipo rayo, en donde se registra una amplitud de 51,6V en BT y que al traducir con la relación del divisor capacitivo puro se obtienen en AT 28,4kV, se procede a colocar el descargador de sobretensión en paralelo al circuito, tal como lo muestra la figura 46.



Figura 46. Descargador de sobretensión BOWTHORFE ante Impulso Tipo Rayo 1,2/48us
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

Efectuado el Impulso tipo rayo sobre el DPS Bowthorfe se presentan nuevamente los valores captados por el osciloscopio, así como se muestra en la figura 47.

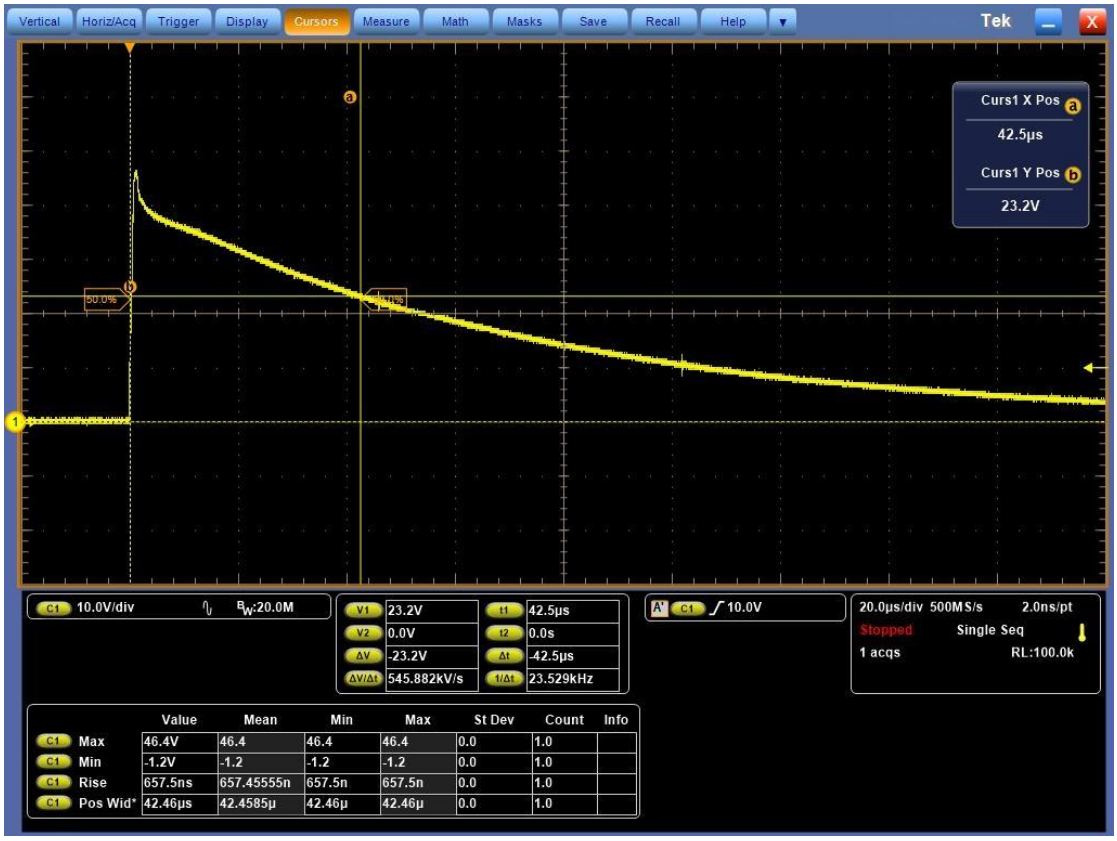


Figura 47. Impulso Tipo Rayo de 25,5kV en DPS BOWTHORFE
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

En la figura 47 se aprecia que hay una disminución en la amplitud de la señal captada por el osciloscopio, medida que en BT registra un máximo de 46,4V y al ser traducida a un valor en AT por medio de la relación del divisor capacitivo puro se obtienen 25,5kV. De igual manera el equipo modifica la forma de onda que se obtiene luego de aplicar el impulso, dado que los tiempos de frente y de cola antes y después de colocar el equipo sin diferentes. Esta prueba demuestra que el descargador es capaz de recortar parte de la señal de impulso que se puede generar en el LEAT.

7.2.2 Montaje Experimental – Impulso Tipo Rayo en Descargador de sobretensión GENERAL ELECTRIC

Previo en aplicar el Impulso tipo rayo, se registra en el osciloscopio la onda que será aplicada sobre el DPS General Eléctric con el objetivo de luego comparar el resultado cuando se tiene la presencia del equipo sobre el circuito.

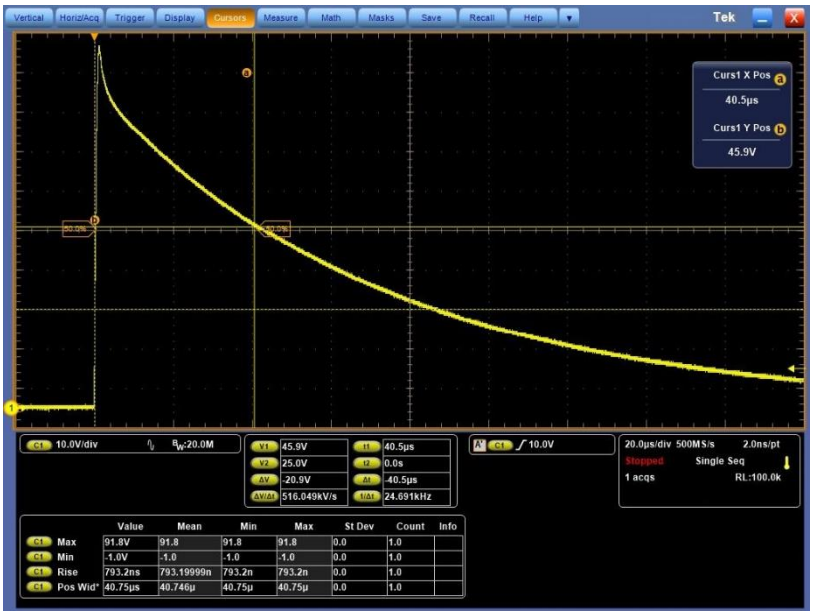


Figura 48. Impulso Tipo Rayo de 50,5kV sin DPS GENERAL ELECTRIC

Una vez registrado el impulso tipo rayo, en donde se registra una amplitud de 91,8V en BT y que al traducir con la relación del divisor capacitivo puro se obtienen en AT 50,5kV, se procede a colocar el descargador de sobretensión en paralelo al circuito, tal como lo muestra la figura 49.



Figura 49. Descargador de sobretensión GENERAL ELECTRIC ante Impulso Tipo Rayo 1,2/48us
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

Efectuado el Impulso tipo rayo sobre el DPS General Electric se presentan nuevamente los valores captados por el osciloscopio, así como se muestra en la figura 50.

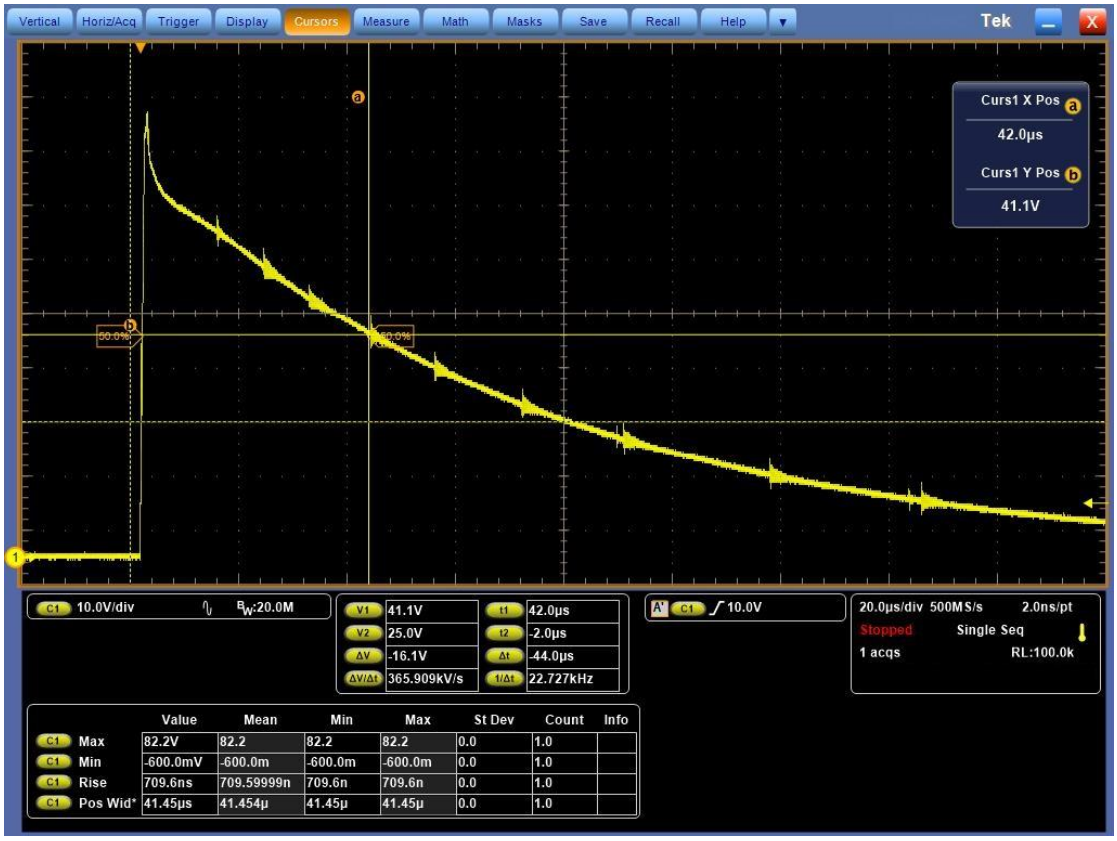


Figura 50. Impulso Tipo Rayo de 42,5kV en DPS BOWTHORFE
TOMADO DE: FUENTE PROPIA.

En la figura 50 se aprecia que hay una disminución en la amplitud de la señal captada por el osciloscopio, medida que en BT registra un máximo de 82,2V y al ser traducida a un valor en AT por medio de la relación del divisor capacitivo puro se obtienen 42,5 kV. Esta clase de equipo no modifica en gran medida la forma de onda que se obtiene luego de aplicar el impulso, dado que los tiempos de frente y de cola antes y después de colocar el equipo son comparables. Esta prueba demuestra que el descargador es capaz de recortar parte de la señal de impulso que se puede generar en el LEAT.

BIBLIOGRAFIA

- *High Voltage Engineering, Second Edition 2000, E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel.*
- *High Voltage Engineering, Second Edition 1995, M S Naidu, V Kamaraju.*
- *High Voltage Engineering, Second Edition 1995, M S Naidu, V Kamaraju.*
- *Nelson Alfredo Gutiérrez Rivera, Alexander Sepúlveda Fajardo, Diseño Y Construcción De Un Espinterómetro Para La Generación De Impulsos De Tensión Hasta 140 Kv Pico, Monografía De Trabajo De Grado, Ingeniería En Distribución Y Redes, 2005*
- *Juan Carlos Carreño Pérez, Daniel Andrés Correa Pico, Gonzalo Arturo Gómez Arévalo Diseño Y Construcción De Un Tablero De Control Para Un Transformador De Alta Tensión (0.220/180kv- 2kva) Monografía De Trabajo De Grado Tecnología En Electricidad 2005*
- *Juan Carlos Monroy Gonzalez, Alexander Rodriguez Ardila Diseño Y Construccion De Conectores Y Terminales Para 140[Kvp] Libres De Efecto Corona Monografía De Trabajo De Grado Tecnología En Electricidad 2006*
- *Alejandro Castillo Sánchez, Jaiver Campos Guevara Diseño De Las Guías Y De Los Montajes Para El Laboratorio Con Ondas Viajeras Monografía De Trabajo De Grado Tecnología En Electricidad 2006*
- *Juliana Isabel Riaño Rojas,Hermes Rubiel Pérez González Diseño Y Construcción De Un Condensador Para Generación De Altas Tensiones Dc A 140 Kv Monografía De Trabajo De Grado Ingeniería En Distribución Y Redes 2006*
- *Arbey Quintero Contreras - Pedro Javier Medina Lozano Diseño Y Construcción De Un Divisor Resistivo Compensado A 140kv Monografía De Trabajo De Grado Ingeniería En Distribución Y Redes 2007*
- *Yesid Alexander Roldan Beltran - Jose Alejandro Lopez Aroca Diseño Y Construcción De Un Divisor Capacitivo Amortiguado De 140kv Pico Para El Laboratorio De Alta Tensión De La Universidad Distrital Monografía De Trabajo De Grado Ingeniería En Distribución Y Redes 2007*
- *Luis Antonio Noguera Vega, Oscar Roberto Duran Marín Diseño Y Construcción De Dos Diodos De Alta Tensión A 20MA Y 140KV De Pico Inverso Monografía De Trabajo De Grado Ingeniería En Distribución Y Redes 2007*
- *Diego Alexander Flechas Rocha Software De Evaluación De Confiabilidad Y Predictivo Para Circuitos De Distribución Eléctrica Monografía De Trabajo De Grado Ingeniería En Distribución Y Redes 2007*
- *Javier Leonardo Vargas - Yaqueline Garzon Rodriguez Diseño Y Construcción De Un Divisor Resistivo Puro De 140 Kv Monografía De Trabajo De Grado Ingeniería En Distribución Y Redes 2004*
- *EDINSON ANDRES PAÑUELA PEREZ - IVAN DARIO MOLANO CELIS DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN DIVISOR CAPACITIVO PURO DE 140KV MONOGRAFÍA DE TRABAJO DE GRADO INGENIERÍA EN DISTRIBUCIÓN Y REDES 2007*
- *JAVIER ALVARADO LOPEZ - ALEXANDER MORENO LOZANO - YOVANNY OLARTE NOVOA DISEÑO Y CONSTRUCCION DE RESISTENCIAS DE PROTECCION PARA LOS TRANSFORMADORES DE ALTA TENSION DE 100KV RMS Y DE 180KV RMS MONOGRAFÍA DE TRABAJO DE GRADO INGENIERÍA EN DISTRIBUCIÓN Y REDES 2008*
- *JHON JAIRO CASTAÑEDA MARTÍN - MAURICIO SANABRIA PEÑA - JOHN JAIRO BAUTISTA NIÑO - WILSON JESÚS ROJAS BAYONA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GENERADOR DE IMPULSOS DE CORRIENTE 8/20 [MS] MONOGRAFÍA DE TRABAJO DE GRADO TECNOLOGÍA EN ELECTRICIDAD 2008*
- *CARLOS HUMBERTO GELVEZ ORTEGA - JOSE GUILLERMO MARTINEZ OSPINA - EDGAR MANUEL MEZA GOMEZ DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LAS RESISTENCIAS DE FRENTE Y DE COLA PARA EL GENERADOR DE IMPULSOS DE TENSION MONOGRAFÍA DE TRABAJO DE GRADO INGENIERÍA EN DISTRIBUCIÓN Y REDES 2008*

ANEXOS

Anexo1

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
LABORATORIO ESPECIALIZADO DE ALTA TENSIÓN, COMPATIBILIDAD Y ENSAYOS TERMOELÉCTRICOS

FECHA → DÍA:_____MES:_____AÑO: _____

PERSONA QUE REALIZA LA LISTA DE CHEQUEO
NOMBRE: CÓDIGO: CÓDIGO DE GRUPO:

TÍTULO DE LA PRÁCTICA:

ASIGNATURA: NOMBRE DEL DOCENTE:

CONDICIONES ATMOSFÉRICAS — TEMPERATURA: _____ HUMEDAD:_____ PRESIÓN: _____

PERSONAL A CARGO DEL LABORATORIO → NOMBRE:

CONDICIONES

ITEM	CONDICIÓN	VERIFICADO
1	Verificar la conexión del transformador de alta tensión con el sistema de referencia	
2	Verificar la conexión de la pértiga con el sistema de referencia	
3	Verificar la conexión del conjunto de flejes de cobre ("protoboard"), con el sistema de referencia	
4	Verificar la conexión del módulo de mando con el sistema de referencia	
5	Verificar la conexión del sistema de apantallamiento (jaula de Faraday), con el sistema de referencia	
6	Verificar la conexión del conjunto de puertas, ventanas, canaletas, y en general cualquier otro elemento que haga parte del **ÁREA DE PRUEBA,** con el sistema de referencia	
7	Verificar la adecuada conexión de alimentación en baja tensión del transformador (LÍNEA-LÍNEA-TIERRA)	
8	Realizar inspección visual para determinar el buen estado de las sondas de medición	
9	**PARA LA SONDA DE MEDICIÓN:** Verificar la continuidad de sus partes: **Conductor de cobre** y **blindaje de cobre trenzado** entre sus extremos	
10	**RAMA DE ALTA TENSIÓN**: Verificar el valor de la rama. Ésta deberá marcar, usando un multímetro o cualquier otro equipo, un valor dependiendo del tipo que sea, ejemplo, resistivo puro, capacitivo puro, etc. Esto se realizará entre la parte superior y la parte interna de la salida del mismo (**Conector UHF**). Asimismo, realizar inspección visual para determinar el buen estado del elemento	
12	**RAMA DE BAJA TENSIÓN**: Verificar el valor de la rama. Ésta deberá marcar, usando un multímetro o cualquier otro equipo, un valor dependiendo del tipo que sea, ejemplo, resistivo puro, capacitivo puro, etc. Esto se realizará entre la parte interna y externa del **conector UHF** en cada lado de la rama. Asimismo, realizar inspección visual para determinar el buen estado del elemento Verificar la continuidad (0 Ω) entre los extremos (parte interna y externa por separado), del **Conector UHF**. Si dicho sistema cuenta con una resistencia de acople, esta medida deberá marcar 75 Ω aproximadamente.	
13	Verificar el buen estado de los equipos de instrumentación, en este caso: multímetros, osciloscopios, sonda de alta tensión, etc. Asimismo, verificar el tipo de variables y las escalas a utilizar durante la práctica.	
14	Verificar el funcionamiento del **FINAL DE CARRERA** presente en la puerta de acceso al **ÁREA DE PRUEBA**. Esto debido a que sirve como una de las medidas de protección redundantes del **LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN**	

OBSERVACIONES: _____

NOTA 1: SÓLO AL TERMINAR DE REALIZAR ESTA LISTA DE CHEQUEO CORRECTAMENTE, PODRÁ HACER USO DEL ESPACIO Y LOS EQUIPOS DEL LABORATORIO.
NOTA2: LA PERSONA QUE DILIGENCIA ESTE FORMATO CONOCE EL REGLAMENTO, LAS NORMAS DE SEGURIDAD Y LOS PROCEDIMIENTOS ESTABLECIDO EN EL LABORATORIO ESPECIALIZADO DE ALTA TENSIÓN, COMPATIBILIDAD Y ENSAYOS TERMOELÉCTRICOS. ASIMISMO, CONOCE LOS RIESGOS INHERENTES AL USO DEL MISMO.

FIRMA
PERSONA QUE REALIZA LA LISTA DE CHEQUEO

FIRMA:
PERSONAL A CARGO DEL LABORATORIO

PROCEDIMIENTO PARA EL DESARROLLO DE LA LISTA DE CHEQUEO LABORATORIO ESPECIALIZADO DE ALTA TENSIÓN Y ENSAYOS TERMOELÉCTRICOS

A continuación, se establece el procedimiento para el desarrollo de la lista de chequeo para eluso del laboratorio de alta tensión. Esta se debe realizar al inicio de cada sesión.

1. Verificación de equipotencialización de elementos

   Todos los elementos con potencial cero (0 Voltios) deben estar referenciados al sistema general del laboratorio. Además de la respectiva medición de continuidad, se realizará una inspección visual para determinar el buen estado de los mismos.

   1.1. Verificar la conexión del transformador de alta tensión con el sistema de referencia.
   1.2. Verificar la conexión de la pértiga con el sistema de referencia.
   1.3. Verificar la conexión del conjunto de flejes de cobre ("protoboard"), con el sistema dereferencia.
   1.4. Verificar la conexión del módulo de mando con el sistema de referencia.
   1.5. Verificar la conexión del sistema de apantallamiento (jaula de Faraday), con el sistema dereferencia.
   1.6. Verificar la conexión del conjunto de puertas, ventanas, canaletas y, en general, cualquierotro elemento que hagan parte del **ÁREA DE PRUEBA,** con el sistema de referencia.

2. Verificar la adecuada conexión de alimentación en baja tensión del transformador (LÍNEA-NEUTRO-TIERRA).

3. Verificación de las sondas de medición.

   Todas las sondas que se vayan a usar para la medida de **TENSIONES** en baja, deberán serrevisadas.

   3.1. Realizar inspección visual para determinas el buen estado las sondas.
   3.2. Verificar la continuidad de sus partes**: Conductor de cobre** y **blindaje de cobre trenzado** entre sus extremos.

4. Verificación de los sistemas de medida en alta y baja tensión. Cada divisor que

   se vaya a usar en la práctica deberá ser revisado

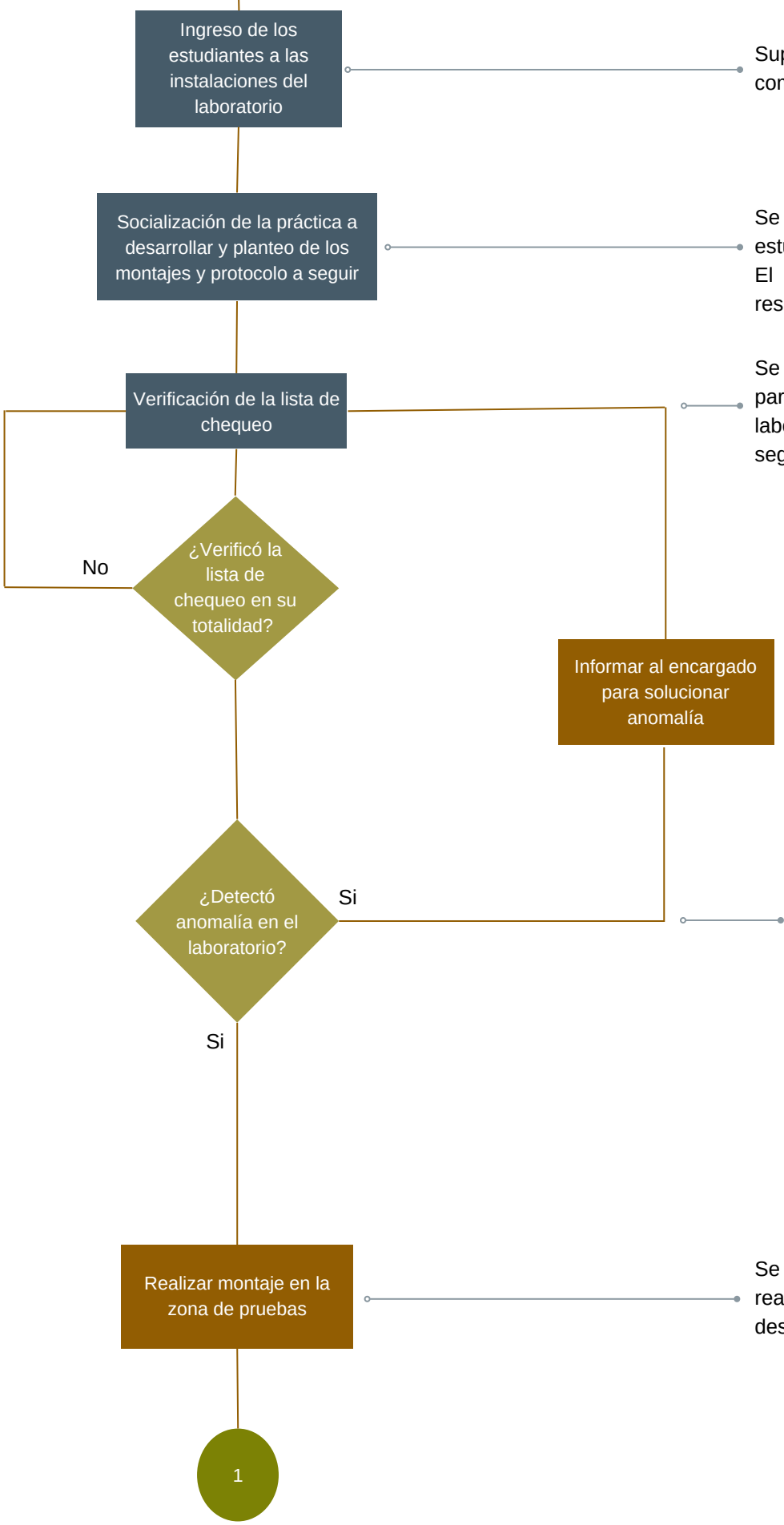
   4.1. Realizar inspección visual para determinas el buen estado de los sistemas de medida en bajatensión.
   4.2. **RAMA DE ALTA TENSIÓN**: Verificar el valor de la rama. Ésta deberá marcar, usando un multímetro o cualquier otro equipo, un valor dependiendo del tipo que sea, ejemplo, resistivo puro, capacitivo puro, etc. Esto se realizará entre la parte superior y la parte interna de la salida del mismo (**Conector UHF**). Asimismo, realizar inspección visual para determinar el buen estado del elemento.
   4.3. **RAMA DE BAJA TENSIÓN**: Verificar el valor de la rama. Ésta deberá marcar, usando un multímetro o cualquier otro equipo, un valor dependiendo del tipo que sea, ejemplo, resistivo puro, capacitivo puro, etc. Esto se realizará entre la parte interna y externa del **conector UHF** en cada lado de la rama. Asimismo, realizar inspección visual para determinar el buen estado del elemento.
   Verificar la continuidad (0 Ω) entre los extremos (parte interna y externa por separado), del **Conector UHF**. Si dicho sistema cuenta con una resistencia de acople, esta medida deberá marcar 75 Ω aproximadamente.

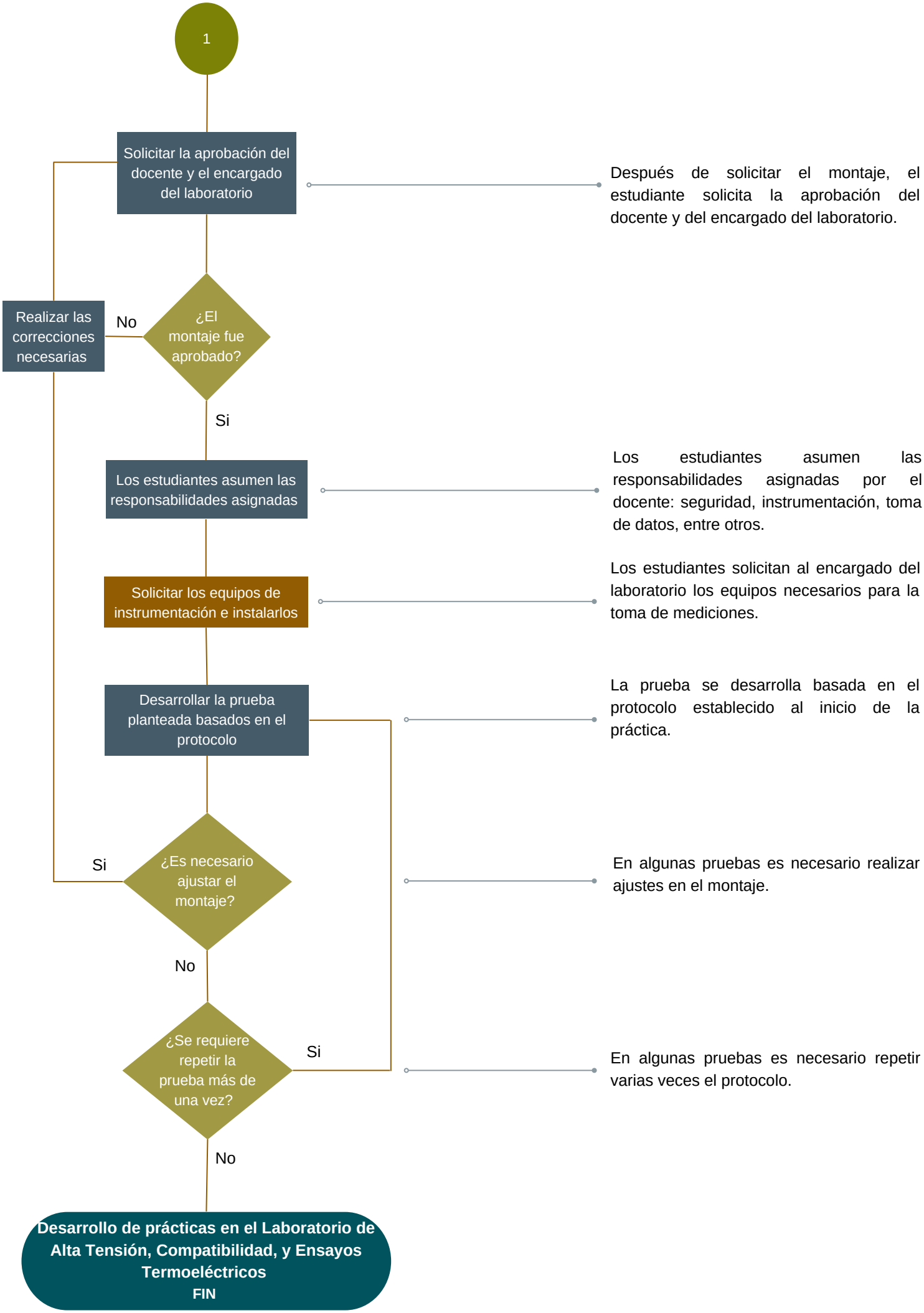
5. Verificar el funcionamiento del **FINAL DE CARRERA** presente en la puerta de acceso al **ÁREA DE PRUEBA**. Esto debido, a que sirve como una de las medidas de protección redundantes del **LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN**

6. Verificar el buen estado de los equipos de instrumentación, en este caso, multímetro, osciloscopios, sonda de alta tensión, etc. Asimismo, verificar el tipo de variable y las escalas a utilizar durante la práctica.

Desarrollo de prácticas en el Laboratorio de Alta Tensión, Compatibilidad y Ensayos Termoeléctricos

Anexo2




1
Solicitar la aprobación del docente y el encargado del laboratorio
Después de solicitar el montaje, el estudiante solicita la aprobación del docente y del encargado del laboratorio.
Realizar las correcciones necesarias
No
¿El montaje fue aprobado?
Si
Los estudiantes asumen las responsabilidades asignadas
Los estudiantes asumen las responsabilidades asignadas por el docente: seguridad, instrumentación, toma de datos, entre otros.
Solicitar los equipos de instrumentación e instalarlos
Los estudiantes solicitan al encargado del laboratorio los equipos necesarios para la toma de mediciones.
Desarrollar la prueba planteada basados en el protocolo
La prueba se desarrolla basada en el protocolo establecido al inicio de la práctica.
Si
¿Es necesario ajustar el montaje?
En algunas pruebas es necesario realizar ajustes en el montaje.
No
¿Se requiere repetir la prueba más de una vez?
Si
En algunas pruebas es necesario repetir varias veces el protocolo.
No
Desarrollo de prácticas en el Laboratorio de Alta Tensión, Compatibilidad, y Ensayos Termoeléctricos
FIN

Anexo3

Última fecha de modificación: Agosto de 2022

RECOMENDACIONES Y PROCEDIMIENTOS DE SEGURIDAD BÁSICOS PARA EL USO DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN

Con el ánimo de proteger la integridad y salud de las personas que usan el laboratorio de Alta Tensión de la Facultad Tecnológica y, en segunda instancia, el de salvaguardar el buen estado de los equipos que allí se utilizan, se recomienda tener presente los siguientes ítems:

RECOMENDACIONES

- En el caso de descarga directa sobre una persona que provoque fibrilación ventricular o cualquier otra consecuencia, prestar los primeros auxilios si se cuenta con los conocimientos necesarios, además se debe acudir inmediatamente a la enfermería y/o llamar al centro médico más cercano, sin dejar por un instante al afectado solo.
- Haber realizado previamente los cálculos de variables eléctricas tales como corrientes, voltajes, potencia, energía; además, establecer relaciones de transformación, tiempos, ratas de crecimiento, temperaturas, etc. según la práctica a desarrollar. Asimismo, haber realizado simulaciones previas que den indicios de las magnitudes o fenómenos presentes.
- Cortocircuitar cualquier elemento que almacene energía y que no sea utilizado en la práctica, pero que se encuentre cerca de un nodo energizado con **ALTA TENSIÓN**, o en su defecto, alejarlo lo suficiente con el fin de que no se almacene carga por inducción.
- En el caso de pruebas generales o especiales como generación de impulsos de tensión, impulso de corriente, impulsos transferidos, etc., se debe tener en cuenta:

    - La referencia (tierra aislada) de los equipos de medida y del sistema montado para la prueba, es decir, no tener nodos de referencias flotantes donde se puedan generar diferencia de potencial perjudicial para las personas o los equipos.
    - Para la realización de pruebas específicas, trabajar con los equipos de medida sin conexión a la red, para este caso se recomienda la alimentación a través de sus baterías y/o con una UPS

- Respetar las distancias de seguridad conforme se establezcan en normas nacionales y/o internacionales o cualquier documento técnico vigente donde se haga referencias a trabajos con **ALTA TENSIÓN**.

PROCEDIMIENTOS DE SEGURIDAD

1. Antes de realizar una práctica en el laboratorio de Alta Tensión se debe estar 100% seguro de los montajes y/o experimentos que se deseen realizar. Asimismo, contar con el suficiente conocimiento de las características técnicas de los equipos, la información conceptual y los datos matemáticos que se requieran.

2. Antes de entrar a la zona de pruebas o quedar en exposición directa con cualquier elemento sometido a altas tensiones, se debe verificar que estén totalmente desenergizado y proceder a aterrizar todas sus partes activas utilizando la pértiga del sistema de puesta a tierra con el fin de descargarlos.
3. Mientras se realicen los montajes pertinentes o se desarrollen actividades dentro de la zona de pruebas, se debe dejar permanentemente conectada la pértiga al transformador de alta tensión.
4. Antes de realizar medidas de parámetros eléctricos con los diferentes equipos, se debe verificar el estado de los cables de conexión y los elementos acondicionadores de los diferentes divisores de tensión.
5. Verificar que los dispositivos empleados para la respectiva práctica, son los adecuados (valores de energía, potencia, tensión, corriente, etc.) y que estén correctamente conectados. Asimismo, que entre ellos se mantengan las distancias de seguridad o de fuga mínimas requeridas para el nivel de tensión empleado.
6. Como parte de seguridad para el personal y los equipos del laboratorio, se sugiere realizar una inspección, visual y a través de los equipos adecuados, de la referencia (TIERRA) y de todos los elementos que conforman el sistema (Transformador, puerta de seguridad, banco de control, malla de protección, pértiga, etc.).
7. Antes de salir de la zona de pruebas se debe retirar la pértiga del transformador de alta tensión y dejarla anclada en la malla de protección del cerramiento. Con dicha acción se debe garantizarse que durante la práctica la pértiga, por accidente, no pueda quedar en contacto directo con una parte energizada.
8. Una vez se tenga el montaje listo y verificado por el respectivo grupo, usuario, docente y/o encargado del laboratorio, se procede a cerrar el recinto comprobando que no halla quedado algún elemento extraño. Asimismo, se verificará que el interruptor de posición o final de carrera quede accionado.
9. Se debe verificar que los instrumentos de medida estén en las escalas de tensión y corriente adecuadas; del mismo modo, que sus conexiones estén correctamente aseguradas.
10. Antes de energizar el sistema se debe coordinar, con el grupo de clase o personal del laboratorio, la secuencia en la que se registrarán los datos pertinentes del ensayo, así como los responsables de la acción. De igual manera, se comunicará al responsable del laboratorio o docente de lo realizado, quien autorizará la continuación de la práctica una vez se realice una verificación.
11. Posteriormente, se procederá a indicar al encargado del laboratorio o docente quien será el responsable de operar el banco de control, quien, en dado caso, será el único responsable de aplicar, elevar o reducir la tensión, así como de interrumpir **EL SISTEMA** en el caso de que se presenta disrupción o efectos adversos no contemplados para dicha práctica.
12. Por ninguna razón deben quedar personas dentro de la zona de pruebas y, de ningún modo, introducir objetos por la malla de protección, así como, interrumpir los dispositivos de bloqueo y de seguridad del sistema.
13. En caso de presentarse dudas o eventos que representen peligro, el responsable de la manipulación del banco de control deberá desconectar inmediatamente EL SISTEMA; el restablecimiento se debe realizar una vez estos inconvenientes sean despejados o aclarados.

14. Una vez finalizada la práctica o si se requiere hacer alguna modificación al montaje se procederá a:

    a. Operar los diferentes controles del banco para que la tensión en el primario del transformador sea de cero voltios.
    b. Se retirará la llave del interruptor de seguridad del banco y con ello se dará la autorización para abrir la puerta de la zona de prueba.
    c. Una vez realizado lo anterior, se procederá, por parte del encargado de manipular la pértiga, a descargar todos los elementos energizados (a los condensadores se les debe realizar una segunda descarga como maniobra redundante de seguridad), siguiendo la secuencia desde el equipo más alejado al transformador, finalizando con éste mismo.
    d. Una vez descargados todos los equipos se dejará anclada la pértiga en el transformador y se autorizará el ingreso de personal para desmontar y/o modificar los diferentes equipos, iniciando por desconectar los cables de medición y los elementos de posición horizontal.

Cordialmente,

Ing. Henry Felipe Ibáñez Olaya
Coordinador de Laboratorios
Tecnología en Electricidad

Anexo4

Última fecha de modificación: Agosto de 2022

RECOMENDACIONES Y PROCEDIMIENTOS DE SEGURIDAD BÁSICOS PARA EL USO DEL GENERADOR DE IMPULSOS DE CORRIENTE (GIC)

A continuación, se mencionan algunas recomendaciones que se deben tener en cuenta antes de manipular el GIC:

1. La manipulación del GIC, debe estar regido bajo todas las normas de seguridad y procedimientos estipuladas por el laboratorio de **ALTA TENSIÓN**.
2. Se debe verificar que el punto a tierra del GIC, este sólidamente conectado al sistema de puesta a tierra del campo de pruebas del laboratorio de alta tensión.
3. Es muy importante tener en cuenta que, en la conexión en serie de los condensadores, el voltaje de energización de los condensadores no debe superar 7900 [Vdc] y para la conexión en paralelo el voltaje de carga no debe superar 3900 [Vdc].
4. No se deben dejar objetos extraños tales como herramienta, cuadernos, lapiceros, flejes sueltos, entre otros; sobre la estructura de madera (mesa), al momento de energizar el GIC.
5. Luego de desenergizar el GIC y antes de desplazar la mesa que contiene sus elementos se debe verificar que el punto de conexión a tierra este suelto para evitar que al momento de desplazar la mesa no se presenten esfuerzos mecánicos que puedan dañar las terminales de conexión a tierra del mismo.
6. Luego de desenergizar el GIC, se debe descargar los condensadores teniendo en cuenta el siguiente procedimiento:
    a. Verificar que el campo de pruebas se encuentre totalmente desenergizado.
    b. Ubicar la pértiga de puesta a tierra en los ganchos que cada condensador tiene dispuesto para este propósito.
    c. Si los condensadores están conectados en serie realice lo siguiente; coloque la pértiga en el gancho del condensador 2, luego tome el caimán que se encuentra en la mesa y ubique un punto del caimán en el gancho donde se encuentra la pértiga, posteriormente ubique la pértiga en el condensador 1 y finalmente ponga el otro punto del caimán en este mismo gancho. A los condensadores se les debe realizar una segunda descarga como maniobra redundante de seguridad.
7. Evitar en lo posible mover los condensadores del GIC, y en el caso de ser necesario hacerlo de forma cuidadosa ya que estos se encuentran totalmente sumergidos en aceite y presentan un peso de 30 kg cada uno.
8. Debido a que hay dos posibles configuraciones del GIC, las cuales son configuración en serie y configuración en paralelo, se recomienda tener como referencia para dichos montajes el "**Manual de instrucciones para el tablero de control AT 220-5**" en el cual se dan todas las indicaciones requeridas.

Cordialmente,

Ing. Henry Felipe Ibáñez Olaya
Coordinador de Laboratorios
Tecnología en Electricidad