



RESTAURACIÓN Y ENSAMBLE DE UN GENERADOR DE IMPULSO TIPO RAYO DE 3200 kV PARA LA EMPRESA INDUSTRIAS EXPLORER

**ALEX ELÍAS CRISTANCHO SÁNCHEZ
JACOB ENGATIVA TOLEDO**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL DUITAMA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA
DUITAMA
2015**

**RESTAURACIÓN Y ENSAMBLE DE UN GENERADOR DE IMPULSO TIPO
RAYO DE 3200 kV PARA LA EMPRESA INDUSTRIAS EXPLORER**

Autores

ALEX ELÍAS CRISTANCHO SÁNCHEZ
JACOB ENGATIVA TOLEDO

Trabajo de propuesta de grado en la modalidad PRACTICA EMPRESARIAL para
optar por el título de:
INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

DIRECTOR

JUAN CARLOS CASTRO GALEANO
INGENIERO ELECTRICISTA

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL DUITAMA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
DUITAMA
2015**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Este triunfo es dedicado a todas las personas que estuvieron presentes a lo largo de nuestra carrera y que formaron parte directa o indirecta de nuestra formación profesional y personal, a la universidad por abrirnos las puertas y acogernos como estudiantes y permitirnos realizar el sueño de ser ingenieros. A todos y cada uno de los directivos, profesores compañeros y personal administrativo que de alguna manera influyeron en estos años en la universidad.

Agradecemos a nuestros padres y familiares por apoyarnos día a día, por el sacrificio que hicieron para darnos educación, comida y techo. A los profesores, a la universidad, a Industrias Explorer por abrirnos las puertas y permitirnos realizar esta práctica, la cual trajo muchas experiencias enriquecedoras para nuestra vida profesional y personal, y a todos los que de una u otra manera hicieron parte de este proyecto, muchas gracias.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1 MARCO REFERENCIAL	17
1.1 SOBRETENSIONES	17
1.1.1 <i>Sobretensiones externas o atmosféricas.</i>	17
1.1.2 <i>Sobretensiones internas.</i>	18
1.2 TIPOS DE AISLAMIENTO EN EQUIPOS ELÉCTRICOS DE ALTA TENSIÓN	19
1.2.1 <i>Aislantes auto-regenerativos.</i>	20
1.2.2 <i>Aislantes no auto regenerativos.</i>	20
1.3 IMPORTANCIA DE LA PRUEBA DE IMPULSO EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA	20
1.4 PRINCIPIO BÁSICO DEL GENERADOR DE IMPULSOS	21
1.5 FORMA DE ONDA NORMALIZADA DE LA TENSIÓN DE IMPULSO	23
1.6 GENERADOR DE IMPULSO MULTITAPA	24
1.6.1 <i>Características nominales del generador de impulso multitapa.</i>	26
1.7 ESQUEMA COMPLETO DEL CIRCUITO DE PRUEBA DE IMPULSO	27
1.8 MÉTODOS DE INICIO DE LA DESCARGA DEL GENERADOR DE IMPULSO	29
1.9 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA TENSIÓN DE IMPULSO	32
1.9.1 <i>Medición de la tensión de impulso mediante divisor de tensión y osciloscopio.</i>	32
1.9.2 <i>Medición de la tensión de impulso mediante espinterómetro de esferas.</i>	34
2 METODOLOGÍA	37
2.1 DESCRIPCIÓN DEL GENERADOR DE IMPULSO ATMOSFÉRICO DE LA EMPRESA INDUSTRIAS EXPLORER....	37
2.1.1 <i>Características principales del generador.</i>	37
2.1.2 <i>Consideraciones a tener en cuenta.</i>	37
2.1.3 <i>Reducción de la capacidad del generador por condiciones ambientales.</i>	37
2.2 INVENTARIO Y DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES	38
2.2.1 <i>Resistencias de frente de onda.</i>	39
2.2.2 <i>Resistencias de cola de onda.</i>	40
2.2.3 <i>Resistencias de alimentación del disparo.</i>	40
2.2.4 <i>Condensadores de etapa.</i>	40
2.2.5 <i>Resistencias de carga.</i>	41
2.2.6 <i>Resistencias limitadoras.</i>	41
2.2.7 <i>Fuente 200 kV DC.</i>	41
2.2.8 <i>Fuente de alimentación del pulso de disparo.</i>	41
2.2.9 <i>Generador espiral.</i>	42
2.2.10 <i>Polytron Gaps (politrigratrón).</i>	42
2.2.11 <i>Interruptor de descarga accionado por solenoide.</i>	43
2.2.12 <i>Sistema de puesta a tierra neumático.</i>	43
2.2.13 <i>Tableros de control.</i>	44
2.2.14 <i>Instrumentos de medida.</i>	45
2.2.15 <i>Divisor de tensión para la medición de la tensión de carga.</i>	45
2.2.16 <i>Divisor de tensión para la medición de la tensión de impulso.</i>	45
2.2.17 <i>Estructura.</i>	46

2.2.18	<i>Electrodo Superior..</i>	46
2.3	RESTAURACIÓN	47
2.3.1	<i>Aplicación de soldaduras. .</i>	47
2.3.2	<i>Aplicación de pintura.</i>	47
2.3.3	<i>Limpieza de componentes. .</i>	48
2.4	CONSECUCIÓN DE ELEMENTOS FALTANTES.....	48
2.4.1	<i>Elementos adquiridos mediante compra.....</i>	49
2.4.2	<i>Elementos fabricados. .</i>	49
2.5	PRUEBAS PREVIAS AL ENSAMBLE	50
2.6	ENSAMBLE	50
2.7	PRUEBAS POSTERIORES AL ENSAMBLE	52
2.7.1	<i>Pruebas al divisor de tensión RC.....</i>	52
2.7.2	<i>Pruebas de funcionamiento al sistema neumático.....</i>	57
2.7.3	<i>Pruebas de funcionamiento a los tableros de control.</i>	59
2.8	LEVANTAMIENTO Y ACTUALIZACIÓN DE PLANOS.	62
3	SIMULACIÓN DEL GENERADOR DE IMPULSO.	65
3.1	SIMULACIÓN DE UNA ETAPA.....	65
3.2	SIMULACIÓN DE LAS OCHO ETAPAS DEL GENERADOR	69
	CONCLUSIONES	71
	RECOMENDACIONES	72
	BIBLIOGRAFIA	73
	ANEXOS	76

LISTA DE TABLAS

	pág.
TABLA 1. NIVELES BÁSICOS DE AISLAMIENTO.	21
TABLA 2. VALORES CORREGIDOS DE GENERADOR DE IMPULSO.	38
TABLA 3. INVENTARIO GENERAL DE COMPONENTES.	38
TABLA 4. LISTADO DE PIEZAS DEL ENSAMBLE.	51
TABLA 5. VALORES DE LOS COMPONENTES DEL DIVISOR.	54
TABLA 6. VALORES DE TENSIÓN COMPARATIVOS.	55
TABLA 7. RELACIÓN DE DIVISIÓN PARA EL DIVISOR RC.	55
TABLA 8. TABLA COMPARATIVA DE TENSIONES.	60
TABLA 9. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE UN CONTROL POR PLC Y UN CONTROL POR COMPUERTAS LÓGICAS.	61
TABLA 10. CONSTANTES DE TIEMPO PARA ALGUNAS FORMAS DE ONDA ESTANDARIZADAS.	66

LISTA DE FIGURAS

	pág.
FIGURA 1. MAPA DE NIVEL CERÁUNICO DE COLOMBIA.....	18
FIGURA 2. OSCILOGRAMA SOBRETENSIÓN POR MANIOBRA.....	19
FIGURA 3. CIRCUITOS BÁSICOS DE UN GENERADOR DE IMPULSOS.....	22
FIGURA 4. CIRCUITOS PARA EL ESTUDIO DEL GIT.....	23
FIGURA 5. ONDA TIPO RAYO NORMALIZADA.....	24
FIGURA 6. (A) ESQUEMA DE UN GENERADOR DE IMPULSO MULTITAPA. (B) CIRCUITO EQUIVALENTE DE LA FASE DE DESCARGA DE UN GENERADOR DE IMPULSO.....	25
FIGURA 7. CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN GENERADOR MULTITAPA.....	26
FIGURA 8. ESQUEMA COMPLETO DEL SISTEMA DE PRUEBA DE IMPULSO TIPO RAYO.....	28
FIGURA 9. SPARK GAP DE ESFERAS.....	29
FIGURA 10. PARTES DEL TRIGATRÓN.....	30
FIGURA 11. TRIGATRÓN. (A) GENERADOR DE IMPULSO DE 2000kV (B) GENERADOR DE IMPULSO DE 200kV.....	30
FIGURA 12. POLITRON.....	31
FIGURA 13. ESQUEMA ELÉCTRICO DEL POLITRON.....	31
FIGURA 14. ESQUEMA PARA LA MEDICIÓN DE LA TENSIÓN DE IMPULSO CON OSCILOSCOPIO.....	32
FIGURA 15. CONFIGURACIONES COMUNES DE DIVISORES DE TENSIÓN RESISTIVOS.....	33
FIGURA 16. DIVISORES CAPACITIVOS. (A) SIMPLE ACOPLE. (B) ACOPLE COMPENSADO. (C) DIVISOR AMORTIGUADO DE SIMPLE ACOPLE.....	34
FIGURA 17. PARTES DE UN SPARK GAP DE ESFERAS.....	35
FIGURA 18. ESPINTERÓMETRO VERTICAL DE ESFERAS.....	35
FIGURA 19. RESISTENCIA DE FRENTE.....	39
FIGURA 20. RESISTENCIAS DE COLA.....	40
FIGURA 21. RESISTENCIAS DEL TRIGGER.....	40
FIGURA 22. CONDENSADORES DE ETAPA.....	40
FIGURA 23. FUENTE DC (IZQUIERDA). CIRCUITO EQUIVALENTE (DERECHA).....	41
FIGURA 24. FUENTE DE ALIMENTACIÓN DEL PULSO DE DISPARO.....	42
FIGURA 25. (A) POLITRON. (B) AISLADOR CILÍNDRICO. (C) TRANSFORMADOR DE PULSOS.....	42
FIGURA 26. INTERRUPTOR ACCIONADO POR SOLENOIDE.....	43
FIGURA 27. (A) SISTEMA DE PUESTA A TIERRA NEUMÁTICO.....	44
FIGURA 28. CONSOLA DE CONTROL.....	44
FIGURA 29. INSTRUMENTOS DE MEDIDA. (A) OSCILOSCOPIO. (B) DIGITALIZADOR (C) ORDENADOR.....	45
FIGURA 30. (A) DIVISOR DE TENSIÓN RESISTIVO PARA LA MEDICIÓN DE CARGA. (B) DIVISOR DE TENSIÓN RC PARA LA MEDICIÓN DE TENSIÓN DE IMPULSO.....	45
FIGURA 31. (A) ELECTRODO SUPERIOR. (B) PLATO DEL ELECTRODO SUPERIOR. (C) PLACA BASE. (D) PLATAFORMA DE ETAPA. (E) COLUMNAS DE FRP. (F) EMPAQUE PARA LAS COLUMNAS. (G) TENSORES DIAGONALES. (H) PORTA FUSIBLE. (I) ESCALERA DIELÉCTRICA. (J) BRAZO CONECTOR PORTA RESISTENCIA. (K) PLATAFORMA DIELÉCTRICA.....	46
FIGURA 32. RESTAURACIÓN PLACA BASE.....	47
FIGURA 33. RESTAURACIÓN DE LAS PLATAFORMAS.....	47
FIGURA 34. LIMPIEZA DE COMPONENTES.....	48
FIGURA 35. EFECTOS DE LA LUZ UV EN LA DESCARGA DISRUPTIVA.....	48
FIGURA 36. (A) ARANDELAS Y BUJES AISLANTES PARA TORNILLOS DE LOS DIVISORES. (B) EMPAQUE PARA COLUMNAS. (C) AISLADOR DEL DIVISOR DE TENSIÓN DE IMPULSO. (D) AISLADOR DEL DIVISOR DE TENSIÓN DE CARGA.....	49
FIGURA 37. ENSAMBLE EN SOLIDEDGE.....	50
FIGURA 38. ENSAMBLE DEL GENERADOR DE IMPULSO DE TENSIÓN.....	52
FIGURA 39. GENERADOR ENSAMBLADO.....	52

FIGURA 40. ESQUEMA DEL DIVISOR DE TENSIÓN CAPACITIVO AMORTIGUADO.	53
FIGURA 41. SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA DEL DIVISOR DE TENSIÓN CON UNA SECCIÓN DEL BRAZO DE AT. (A) TENSIÓN A LA ENTRADA. (B) TENSIÓN A LA SALIDA.....	54
FIGURA 42. (A) TENSIÓN EN LA SALIDA DEL DIVISOR DE REFERENCIA RESISTIVO Y (B) TENSIÓN A LA SALIDA DEL DIVISOR BAJO PRUEBA.	55
FIGURA 43. ESQUEMA DE APLICACIÓN DE LA PRUEBA DE IMPULSO AL TRANSFORMADOR DE 60 MVA.....	56
FIGURA 44. FORMA DE ONDA OBTENIDA DEL DIVISOR DURANTE LA PRUEBA DEL TRANSFORMADOR DE 60000kVA.	57
FIGURA 45. CURVAS DE PASCHEN.	58
FIGURA 46. REGULADOR DE PRESIÓN DEL AIRE DENTRO DE LOS POLITRONES.	58
FIGURA 47. UNIDAD FRL PARA EL FILTRADO DEL AIRE.	59
FIGURA 48. TARJETAS DEL CIRCUITO DE CONTROL.....	60
FIGURA 49. DIAGRAMA GRAFCET.	62
FIGURA 50. CIRCUITO EQUIVALENTE DEL GENERADOR DE IMPULSO.	65
FIGURA 51. CAPACITANCIA NETA DEL GENERADOR VS CARGA.	67
FIGURA 52. RENDIMIENTO DEL GENERADOR DE IMPULSOS.	67
FIGURA 53. CIRCUITO GENERADOR DE IMPULSO. (A) CIRCUITO EN ORCAD PSPICE. (B) CIRCUITO EN ATPDRAW.....	68
FIGURA 54. TENSIÓN DE IMPULSO EN ORCAD PSPICE (IZQUIERDA) Y ATP DRAW (DERECHA)	68
FIGURA 55. FORMAS DE ONDA OBTENIDAS PARA VALORES DE RESISTENCIA REALES.....	69
FIGURA 56. SECCIÓN DEL CIRCUITO UTILIZADO EN LA SIMULACIÓN DEL GENERADOR DE OCHO ETAPAS.....	70
FIGURA 57. TENSIÓN OBTENIDA DE LAS OCHO ETAPAS DEL GENERADOR EN ATP (IZQUIERDA) Y ORCAD (DERECHA).	70

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
ECUACIÓN 1.TENSIÓN DE IMPULSO EN C2	22
ECUACIÓN 2.CARGA DEL CONDENSADOR C2.....	23
ECUACIÓN 3.CONSTANTE DE TIEMPO T1.....	23
ECUACIÓN 4.CONSTANTE DE TIEMPO T2.....	23
ECUACIÓN 5.SALIDA DE ALTA TENSIÓN	25
ECUACIÓN 6.RENDIMIENTO DEL GENERADOR	26
ECUACIÓN 7.TENSIÓN NOMINAL	26
ECUACIÓN 8.ENERGÍA NOMINAL	27
ECUACIÓN 9.TENSIÓN DE CARGA	28
ECUACIÓN 10.TENSIÓN DE SALIDA DEL DIVISOR RESISTIVO	33
ECUACIÓN 11.RELACIÓN DE DIVISIÓN PARA UN DIVISOR CAPACITIVO	34
ECUACIÓN 12.RELACIÓN DE DIVISIÓN DE UN DIVISOR RC	54
ECUACIÓN 13.LEY DE PASCHEN	57
ECUACIÓN 14.ECUACIÓN RESISTENCIA DE FRENTE	65
ECUACIÓN 15.ECUACIÓN RESISTENCIA DE COLA	66
ECUACIÓN 16.ECUACIÓN DE RENDIMIENTO DE UN GENERADOR	66
ECUACIÓN 17.TIEMPO DE FRENTE DE ONDA	67
ECUACIÓN 18.TIEMPO DE COLA	67
ECUACIÓN 19.RESISTENCIA AMORTIGUADORA	69

GLOSARIO

Capacitancia: propiedad de almacenar carga eléctrica entre dos conductores, aislados uno del otro.

Descarga disruptiva: falla de un aislamiento bajo un esfuerzo eléctrico, por superarse un nivel de tensión determinado que hace circular una corriente.

Electrodo: extremo de un conductor en contacto con un medio del que recibe o al que transmite una corriente eléctrica.

Espinterómetro: es un aparato que sirve para medir la rigidez dieléctrica de un material, la cual se mide por la cantidad de voltios que producen la perforación del material.

Inductancia: es la magnitud física que indica la capacidad de un inductor de generar un flujo de inducción magnética al circular una corriente a través de éste.

Nivel cerámico: número de días tormentosos al año.

RESUMEN.

En este documento se presenta el trabajo desarrollado en la empresa, Industrias Explorer Ingeniería S.A.S. correspondiente la Restauración y Ensamble de un generador de Impulsos tipo Rayo.

Inicialmente se realizó la identificación, diagnóstico e inventario de cada uno de los componentes del generador de impulsos, con el fin de conocer el estado físico, eléctrico y mecánico en que se encontraban; durante este proceso se detectó que había elementos faltantes y la mayoría de las piezas estaban el mal estado. Después se ejecutó la limpieza y restauración de las piezas que conforman la estructura del generador. De igual forma se hizo mediciones a los elementos eléctricos como: resistencias, condensadores, fuente DC y divisores de tensión.

En cuanto a los divisores de tensión, se calculó y diseño la resistencia de baja tensión para el divisor resistivo y se ensambló el divisor RC el cual fue probado con el generador de impulso de tensión de 2000 kV existente en la empresa. Se hicieron cotizaciones, compras de algunos componentes faltantes y se elaboraron los restantes. Se trabajó en la simulación del circuito equivalente del generador de impulsos y en la construcción de planos eléctricos y mecánicos. Todo esto con el fin de realizar el ensamble del generador de impulso de tensión. Una vez concluido el ensamble se realizaron pruebas de funcionamiento a tableros de control, tableros de medición, fuente DC, sistema neumático, sistema de puesta a tierra y divisores de tensión.

Finalmente, se desarrolló en Microsoft Excel, una herramienta que facilita el cálculo de los valores de las resistencias de frente y cola, del generador Hipotronics para configurar los tiempos de frente y de cola. De igual forma, se elaboró una guía para la simulación de transitorios RC y RLC utilizando los software OrCAD Capture y ATP Draw.

**RESTAURACIÓN Y ENSAMBLE DE UN GENERADOR DE IMPULSO TIPO
RAYO DE 3200 kV PARA LA EMPRESA INDUSTRIAS EXPLORER**

INTRODUCCIÓN.

Con el aumento de la demanda de energía y el crecimiento de la industria en Colombia se hace necesario transportar la energía eléctrica a grandes distancias y elevadas tensiones, es por esto que los sistemas eléctricos de potencia y los elementos que los componen, se hacen ineludibles pues se requiere que estos se encuentren en óptimas condiciones de funcionamiento y durabilidad para garantizar un mejor servicio a los usuarios.

Por esta razón, en el laboratorio de pruebas eléctricas de industrias Explorer, se debe simular las condiciones a las cuales estos elementos van a estar expuestos para garantizar una gran confiabilidad. Una de estas es la prueba de impulso de tensión, la cual se realiza con un equipo conocido como generador de impulso de tensión tipo rayo, simula una descarga atmosférica que se aplica directamente sobre el elemento, para verificar la calidad del aislamiento.

Con el objetivo de expandir y mejorar su calidad de servicios Industrias Explorer adquirió un segundo generador de impulso de tensión de 3200kV con características especiales de funcionamiento que lo diferencian de otros generadores que comúnmente se encuentran en el mercado, este generador fue restaurado y ensamblado para ser puesto en servicio en una etapa posterior, llevando a cabo la misión de expansión y apertura de nuevos servicios encaminados al crecimiento de la demanda que le exige el mercado eléctrico nacional e internacional, ofreciendo servicios de repotenciación, mantenimiento reparación y rediseño de transformadores de hasta 100MVA y 230kV, cuenta con un laboratorio de pruebas eléctricas que en la actualidad posee un generador de impulso de 2000 kV realizando la prueba de impulso de tensión cumpliendo con los estándares de calidad exigidos actualmente, obteniendo certificaciones de calidad que la acreditan como una de las mejores empresas de la región. Entre sus principales clientes están la empresa de energía de Boyacá EBSA, empresas públicas de Medellín EPM.

CAPÍTULO UNO

“La vida es y siempre seguirá siendo una ecuación incapaz de resolver, pero tiene ciertos factores que conocemos”

Nikola Tesla

En este capítulo se hace una recopilación de los conceptos fundamentales que se involucraron en el desarrollo del proyecto, acerca de sobretensiones, tipos de aislamiento en equipos eléctricos de alta tensión, la importancia de las pruebas de impulso en los sistemas eléctricos, principios básicos del generador y finalmente los métodos de inicio de descarga de un generador.

1 MARCO REFERENCIAL

1.1 SOBRETENSIONES

Una sobretensión es una variación de la tensión con relación al tiempo donde su valor pico, es superior a la tensión máxima del sistema e involucra las fases o fase y tierra. Las sobretensiones a que puede estar sometido un sistema eléctrico de potencia pueden clasificarse en internas y externas¹.

1.1.1 Sobretensiones externas o atmosféricas. “Las descargas atmosféricas se deben a la formación de nubes cargadas con electricidad estática (generalmente carga negativa en la parte inferior, y positiva en lo superior de la nube). Como consecuencia de estas cargas, se genera un campo eléctrico cada vez más intenso entre nubes vecinas, así como entre las nubes y tierra. La descarga se inicia en aquel punto en el que el campo eléctrico excede circunstancialmente el valor de la ruptura del aire (5 a 110 kV /cm). Tiene una duración que es variable entre un 20 a 30 μ s y unos 2 a 3 ms”².

1.1.1.1 Nivel cerámico de Colombia. A nivel espacial las influencias meteorológicas de tipo sinóptico en Colombia, como la zona de confluencia intertropical (ZCIT) y la incidencia de los sistemas de vientos alisios del Nordeste y Sudeste (asociados con la ZCIT), repercuten sobre las condiciones locales originando, por ejemplo, mayor nubosidad en áreas extensas y determinando en algunas regiones los periodos de mayor y menor incidencia de actividades de tormenta eléctrica atmosférica.

También la actividad convectiva, por condiciones especiales de inestabilidad atmosférica, producto de factores térmicos y de la formación de lluvias por el factor orográfico, contribuye al aumento de la probabilidad de formación de tormentas.

En Colombia, el estrechamiento de las cadenas montañosas, principalmente en las Cordilleras Oriental (Noroeste de Cundinamarca y Sudoeste de Boyacá) y Central (Nordeste de Caldas, Sudeste de Antioquia), y los vientos que se aproximan a ellas, marcan la principal influencia en la definición del mayor o menor nivel cerámico y por tanto de la mayor actividad eléctrica atmosférica, como puede apreciarse en los gradientes más altos de nivel cerámico en los pie de montes de las cordilleras.

Alrededor de la Sierra Nevada de Santa Marta, en el Mar Caribe, se presenta un fuerte gradiente con niveles iguales o superiores a 90 días

¹ TORA GALVAN, José Luis. Transporte de la Energía Eléctrica. Madrid, España.: Universidad Pontificia de Comillas, 1997. 461 p.

² TORRES SÁNCHEZ, Horacio. Protección contra rayos. 2 ed. Bogotá D.C.: Instituto Colombiano de normas Técnicas y Certificación, ICONTEC, 2010. 425 p.

tormentosos/año como se muestra en la figura 1. La parte media del Valle del Río Magdalena (o mejor conocido como Magdalena Medio) se caracteriza por la presencia de un sistema de alto nivel cerámico, con valores promedio entre 120 y 160, en la región conocida como Catatumbo en zona limítrofe con Venezuela y las más altas densidades de rayos a tierra, documentadas y comparadas con las de otros sitios del planeta³.

Figura 1. Mapa de nivel cerámico de Colombia.



Fuente: ¿Qué rayos sabemos?

1.1.2 Sobretensiones internas. Se clasifican en dos tipos:

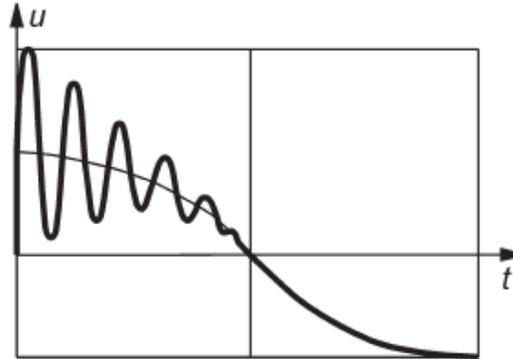
1.1.2.1 Sobretensiones por maniobra (STM). Son causadas por la operación de interruptores, puede involucrar las tres fases. Esto ocasiona transitorios, los cuales pueden producir sobretensiones. En la figura 2 se muestra un oscilograma de un impulso de tensión por maniobra. La duración y forma varía de acuerdo al tipo de interruptor y la configuración de la red.

1.1.2.2 Sobretensiones temporales (STT). Este tipo de sobretensiones tienen una duración en el orden de segundos. Ocurre en un punto definido del sistema, son de naturaleza oscilatoria y pueden ser generadas por las siguientes causas:

- “Rechazo de carga. Sobretensión de 1,1 a 1,4 pu. Duración de varios segundos causada por pérdida de carga.

³ TORRES SÁNCHEZ, Horacio. Academia Colombiana de Ciencias Exactas. Bogotá D.C. Junio, 2010, vol. 34, no. 131. ISSN 0370-3908.

Figura 2. Oscilograma sobretensión por maniobra.



Fuente: Testing of Power Transformers-ABB.

- *Falla monopolar.* Cortocircuito de una fase produciéndose una sobretensión de 1,2 a 1,73 pu, dependiendo de la configuración del neutro⁴.
- *Ferro resonancia.* “Este es un fenómeno de resonancia no lineal que afecta las redes eléctricas”⁵.
- *Efecto Ferranti.* “Es una sobretensión que se presenta en líneas de transmisión muy largas con poca carga o en circuito abierto. Esto es debido a la capacitancia distribuida de la línea”⁶.

1.2 TIPOS DE AISLAMIENTO EN EQUIPOS ELÉCTRICOS DE ALTA TENSIÓN

Los materiales aislantes son sustancias que no poseen electrones libres y por tanto, tienen una alta resistencia al paso de la corriente en presencia de un campo eléctrico externo. En equipos eléctricos de alta tensión se pueden encontrar aislantes en estado líquido, sólido o gaseoso⁷.

De acuerdo a los cambios que sufra el aislamiento después de haber recibido una descarga disruptiva, los materiales aislantes se clasifican en auto regenerativos y no auto regenerativos.

⁴ ABB. Testing of Power Transformers. Routine tests, Type tests and Special Tests. Zürich.: Pro Print GmbH, 2003. 296 p. ISBN 3-00-010400-3.

⁵ FERRACCI, Philippe. Cuaderno Técnico n° 190. La ferorresonancia. Traducido por P. Rodón. Barcelona.: Schneider Electric España S.A, 2000. 31 p.

⁶ PAZMIÑO VILLACIS, Wilson Humberto. Efecto de las sobretensiones de frecuencia industrial en la selección y coordinación de aislamiento de redes de distribución. Tesis de Especialización. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Eléctrica, 1986. 134 p.

⁷ GALLO, Juan y VILLEGAS, Carlos. Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión. Guayaquil: ESPOL, 2009.

1.2.1 Aislantes auto-regenerativos. Este tipo de aislantes logran recuperar totalmente sus características dieléctricas después de una descarga disruptiva generalmente se encuentran en estado líquido o gaseoso⁸. En pruebas a aislamientos auto regenerativos se puede permitir la disrupción y aplicar múltiples tensiones de prueba para realizar un análisis estadístico de la tensión soportable⁹.

1.2.2 Aislantes no auto regenerativos. Los aislantes de este tipo no logran recuperar totalmente sus características dieléctricas después de una descarga disruptiva, generalmente son aislantes en estado sólido como el papel kraft que cubre los devanados de un transformador⁹. Para poder realizar un análisis estadístico de pruebas a aislamientos no auto regenerativos donde se presente disrupción habría que dejar inutilizables muchos especímenes lo cual sería demasiado costoso. Por esta razón, en pruebas a aislamientos no auto regenerativos se debe aplicar un número limitado de tensiones de impulso, por ejemplo tres y se considera que la prueba es satisfactoria si no se presenta disrupción, indicando así que el aislamiento es capaz de soportar tensiones de hasta el valor de la tensión aplicada durante la prueba¹⁰.

1.3 IMPORTANCIA DE LA PRUEBA DE IMPULSO EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Debido al creciente número de aplicaciones tecnológicas, domésticas, industriales y el crecimiento de la población, la demanda de energía eléctrica ha aumentado, haciendo necesario que las empresas del sector eléctrico, amplíen la infraestructura para satisfacer la demanda, y la construcción de nuevas líneas de transmisión y distribución, las cuales se encuentran expuestas a sobretensiones por descargas atmosféricas, de maniobra y temporales. Motivo por el cual, el aislamiento en los equipos pertenecientes a los sistemas de potencia, como aisladores, pararrayos, transformadores de medida y protección, transformadores de potencia, entre otros, deben soportar un determinado valor de sobretensión sin presentar disrupción.

⁸ U.T.N, Facultad Regional Rosario. Cátedra: Transmisión y Distribución de la energía Eléctrica. Principios para la coordinación de los niveles de aislación de aparatos e instalaciones en redes eléctricas de A.T. Rosario, 2006. 25 p.

⁹ MORALES MARIÑO, Náthali Elizabeth. Coordinación de Aislamiento en subestaciones a nivel de 500 kV. Trabajo de grado Ingeniero Eléctrico. Quito.: Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 2008. 258 p.

¹⁰ SIMON COMIN, Pascual. Investigación de los parámetros característicos del comportamiento de medios dieléctricos frente a sobretensiones tipo rayo no normalizadas en alta tensión. Tesis Doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, 2004. 197 p.

El propósito de la prueba de impulso, es verificar el buen estado y rigidez dieléctrica de los aislamientos de estos equipos, con el fin garantizar la aptitud de soporte del nivel básico de aislamiento (BIL) establecido en la tabla 1, para garantizar el servicio a los usuarios y prevenir posibles fallas o suspensiones del servicio.

Tabla 1. Niveles básicos de aislamiento.

Tensión máxima del sistema (Fase-Fase) kV, rms	Nivel Básico de Aislamiento al impulso de rayo (BIL) Fase-Tierra kV, Cresta
15	95
	110
34,5	150
	200
48,3	250
115	450
	550
242	650
	750
	900
	1050
550	1300
	1550
800	1800
	1925
1200	2100
	2250
	2400
	2700

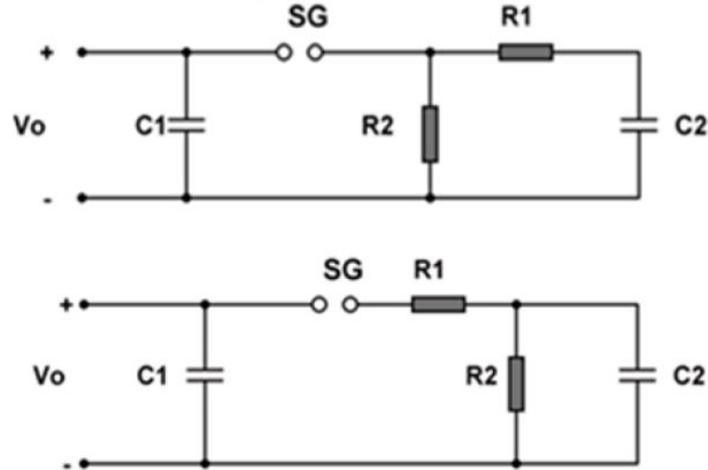
Fuente: IEEE Std C62.82.1-2010.

1.4 PRINCIPIO BÁSICO DEL GENERADOR DE IMPULSOS

Un generador de impulso de tensión consiste principalmente en un circuito RC el cual consta de un grupo de condensadores que se cargan en paralelo y se descargan en serie. Para simplificar su análisis se realiza un circuito equivalente como el mostrado en la figura 3. “Los impulsos tipo rayo se generan en los laboratorios de alta tensión mediante generadores tipo Marx, que producen una forma de onda característica o normalizada”¹¹

¹¹ SIMON COMIN, Pascual. Investigación de los parámetros característicos del comportamiento de medios dieléctricos frente a sobretensiones tipo rayo no normalizadas en alta tensión. Tesis Doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, 2004. 197 p.

Figura 3. Circuitos básicos de un generador de impulsos.



Fuente: Diagnóstico del generador de impulso de la empresa CAIVET

Dónde:

V_0 = Tensión de alimentación en voltios

C_1 = Condensador de etapa en micro faradios

SG = Espinterómetro (Spark Gap)

C_2 = Capacitancia del objeto de prueba en micro faradios

R_1 = Resistencia de frente en ohmios

R_2 = Resistencia de cola en ohmios

Al analizar los circuitos se obtiene que C_1 (el cual representa el generador de impulsos) es cargado con tensión continua V_0 proveniente de la fuente DC, de polaridad positiva o negativa, y luego es súbitamente descargado en un circuito conformado por las resistencias R_1 y R_2 y el condensador C_2 . Este proceso de descarga se inicia en el instante en el cual se establece entre las esferas del espinterómetro SG un arco eléctrico y la tensión se transfiere a C_2 que representa el objeto bajo prueba. La tensión de impulso en C_2 se expresa de la forma (1).

$$V_{C_2}(t) = V_0 \cdot K \cdot (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

Dónde:

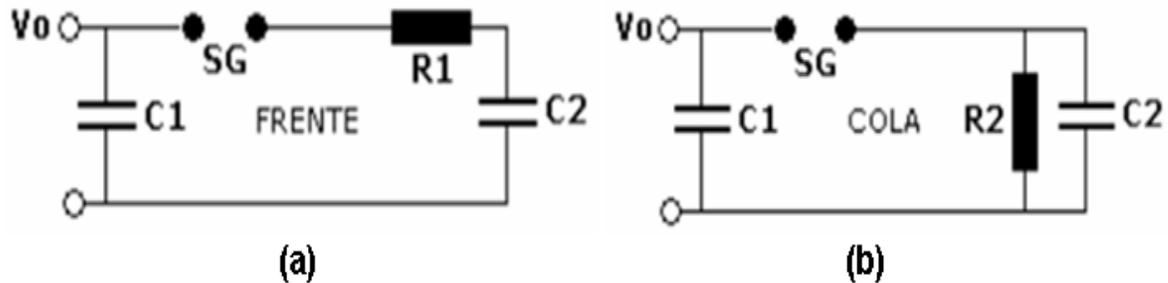
V_0 = es la tensión de carga del condensador C_1

K = una constante que depende de la configuraciones mostradas en la figura 3.

α y β = Son las raíces de la ecuación característica del sistema.

Tomando el primer circuito de la figura 3 y analizándolo separadamente en dos circuitos se obtienen los circuitos de la figura 4. Durante el frente de onda la energía almacenada en el condensador C_1 pasa a través de R_1 y debido a que $R_2 \gg R_1$ el circuito se simplifica como se observa en la figura 4 (a).

Figura 4. Circuitos para el estudio del GIT.



Fuente: Generadores de impulsos de tensión su aplicación en ensayos de transformadores.

El condensador C_2 se carga con la constante de tiempo T_1

$$-\frac{1}{\beta} = T_1 = R1 * \frac{C1 * C2}{C1 + C2} \quad (2)$$

Asumiendo que $C_1 \gg C_2$ la ecuación (2) se simplifica a:

$$T_1 \approx R1 * C_2 \quad (3)$$

Al descargarse el condensador C_1 el arco entre los terminales del espinterómetro SG se extingue el arco eléctrico y el condensador C_2 se descarga a través de R_2 durante el tiempo de cola de onda con una constante de tiempo T_2 .

$$-\frac{1}{\alpha} = T_2 = R2(C1 + C2)$$

Y con la suposición de que $C_1 \gg C_2$ se simplifica a la expresión (4)

$$T_2 \approx R2 * C_1 \quad (4)$$

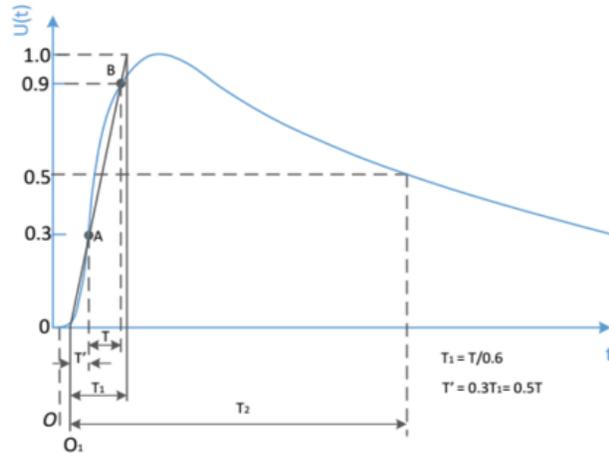
1.5 FORMA DE ONDA NORMALIZADA DE LA TENSIÓN DE IMPULSO

“Aunque las formas de onda de las sobretensiones atmosféricas poseen gran variedad, se han estandarizado algunas de ellas para realizar pruebas de impulso en equipos y maquinas eléctricas. Como onda normalizada de tensión se entiende aquella que posee unas características bien definidas respecto a la amplitud y duración de la misma”¹², y para el caso de la sobretensión atmosférica, la norma

¹² CEDIEL ZAMBRANO, Vilensky Aldrin. Diagnóstico del generador de impulsos de la empresa C.A.V.E.T. Informe final de pasantía. Ingeniero Electricista. Buruta: Universidad Simón Bolívar. Coordinación de Energía Eléctrica, 2006. 121 p.

IEEE Standard 4 de 1995 establece las características de la figura 5.

Figura 5. Onda tipo rayo normalizada



Fuente: IEEE Standad 4-1995. Techniques for high voltage Testing

$O_1 = 0.3T_1 =$ Origen virtual

$A_R = \frac{U_{09}-U_{08}}{T}$ = rango de pendiente

$T_e = \frac{U_{100\%}}{A_R}$ = Tiempo de voltaje pico

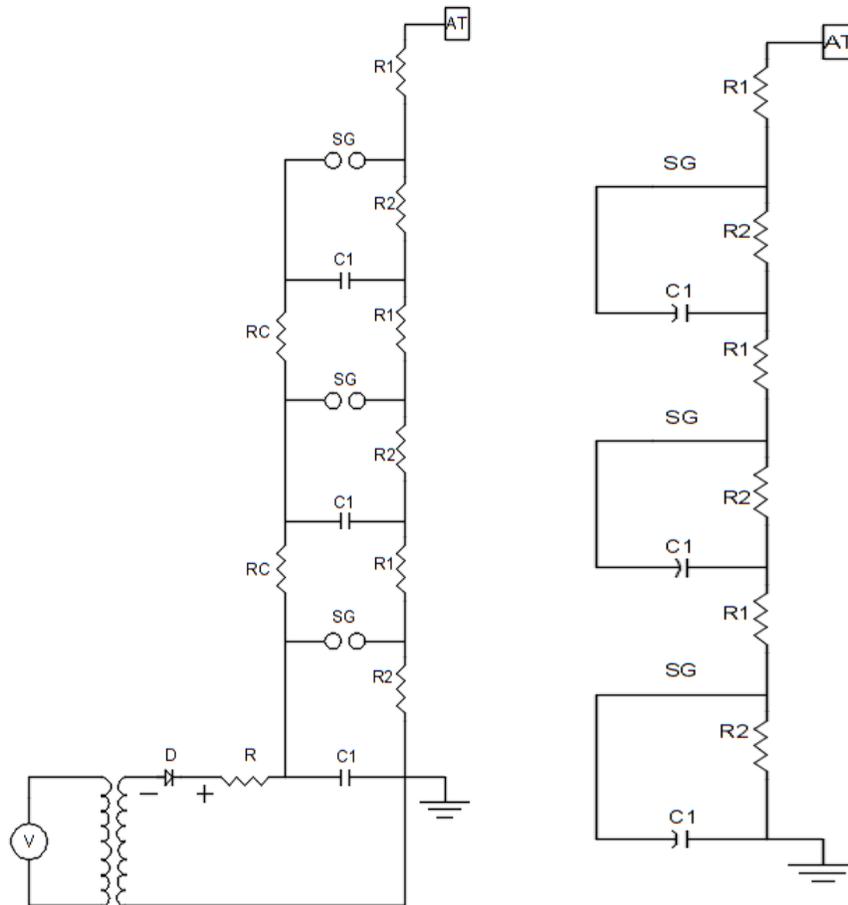
$T_2 =$ Tiempo donde la curva decrece al 50% de su voltaje máximo

1.6 GENERADOR DE IMPULSOS MULTITAPA

El empleo de un generador de una sola etapa es válido para pruebas en las que el nivel de tensión no supera los 200 kV de diseño de la etapa dependiendo de la configuración de los condensadores ya sea en serie o en paralelo. A medida que se hace necesario obtener un rango amplio de ondas de impulso de tensión, es más difícil generar este tipo de señales, debido a que se requiere capacitores que soporten niveles más altos de tensión de carga y que la fuente DC que los alimenta sea de mayor tensión. “Por tal motivo la forma más conveniente de incrementar las tensiones de prueba para el impulso fue propuesta en 1923 por Erwin Marx (Figura 6) y consiste en emplear múltiples etapas de condensadores que se cargan en paralelo, y posteriormente, se reconfiguran en serie para lograr el mismo efecto del circuito básico de la figura 3, y generar el impulso a la tensión deseada”¹³

¹³ GARCÍA, Diego Fernando y RINCÓN, Diego Fernando. Diseño y construcción de un generador de impulso de voltaje de 10 kV. Tecnura, vol 12, no. 24, 2009, p. 4-13.

Figura 6. (a) Esquema de un generador de impulso multietapa. (b) Circuito equivalente de la fase de descarga de un generador de impulso.



Fuente: Diagnóstico del generador de impulsos de la empresa CAIVET.

Cada una de las etapas del generador se carga a través de la resistencia de frente R_1 , la resistencia de cola R_2 y resistencia de carga R_C esta última con un valor más grande que las demás.

Cuando todos los condensadores se cargan a la tensión determinada por el nivel máximo de tensión que se requiera para la prueba, el generador está listo para iniciar la descarga sobre el objeto de prueba.

Durante la fase de descarga y considerando que la resistencia de carga $R_C \rightarrow \infty$, el circuito se puede reducir al mostrado en la figura 6 (derecha).

Al provocarse la carga disruptiva en los espinterómetros, las n etapas se “conectan” en serie y en la salida de alta tensión AT del generador aparecerá una tensión dada por la relación (5).

$$V_{AT} = \eta \cdot n \cdot \sqrt{2} \cdot V \quad (5)$$

Donde;

n = número de etapas

V = valor eficaz de la tensión de salida (V)
 η = rendimiento de una etapa y está dado por la expresión (6)

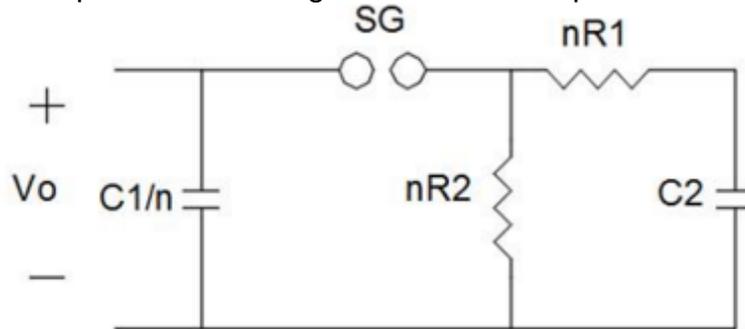
$$\eta = \frac{V_P}{V_o} \quad (6)$$

V_P = voltaje pico a la salida del generador

V_o = voltaje del condensador de etapa

Se puede resaltar en la figura 7, que con respecto a la carga C_2 , el generador es un circuito de una etapa con capacitancia equivalente C_1/n , resistencia de frente equivalente $n.R_1$ y resistencia de cola equivalente $n.R_2$.

Figura 7. Circuito equivalente de un generador multietapa.



Fuente: Inducor Ingeniería

Este circuito es muy útil al momento de calcular los parámetros del generador puesto que se reduce al circuito señalado en la figura 1¹⁴.

1.6.1 Características nominales del generador de impulso multietapa. El generador de impulso es una máquina eléctrica, y como todas las máquinas este está definido por varios datos que representan sus características eléctricas,

- **Tensión nominal.** La tensión nominal de salida de un generador de n etapas es la tensión máxima de la carga V_o multiplicado por el número de etapas, como se muestra en (7).

$$V_n = n.V_o \quad (7)$$

¹⁴ INDUCOR INGENIERÍA, Electrical Testing Group. Marco referencial de los generadores de impulsos. Inducor Ingeniería S.A. Argentina, 2009, 50 p.

La tensión máxima de impulso V_p que puede ser aplicada al objeto de prueba es menor que $n \cdot V_o$ ya que el rendimiento en la generación de tensión de impulso es menor al 100%.

- **Capacitancia Nominal.** “La capacitancia nominal C_1/n de un generador de impulsos, es la capacitancia por etapa C_1 dividida entre el número de etapas n . Generalmente, C_1/n es mínimo cinco veces la capacitancia del objeto de prueba o de lo contrario la eficiencia de tensión será muy baja”¹⁵; la capacitancia por etapa del generador de impulso del presente proyecto es de 0,5 μ F.
- **Energía nominal.** La energía nominal de un generador está dada por la máxima energía que éste puede almacenar; y se puede calcular empleando la expresión (8).

$$W = \frac{1}{2} \cdot n \cdot C_1 \cdot V_o^2 \quad (8)$$

- **Número de etapas.** “La selección del número de etapas depende de varios factores. Para formas de onda con oscilaciones apreciables, es necesario reducir la inductancia L del circuito y esto se logra limitando las etapas y por consiguiente, el número de resistencias de frente y cola se mantienen en la mínima cantidad posible. El otro factor es la tensión de carga V_o , que indica la cantidad de condensadores de carga a utilizar y por ende el número de etapas n ”¹⁶.

1.7 ESQUEMA COMPLETO DEL CIRCUITO DE PRUEBA DE IMPULSO

Al circuito generador de impulso multietapa o tipo Marx se le debe anexar los equipos necesarios para la medición de la tensión de carga V_o de las etapas del generador, y la medición de la tensión de impulso V_p aplicada al objeto de prueba. La figura 8 muestra el esquema completo para realizar una prueba de impulso tipo rayo 1,2/50 μ s.

El sistema de prueba está conformado por el generador de impulsos, el alimentador DC para la carga de los condensadores de etapa con su respectivo divisor Óhmico en la primera etapa, resistencia limitadora (R), el divisor de tensión para la medición de la tensión de impulso y el objeto de prueba.

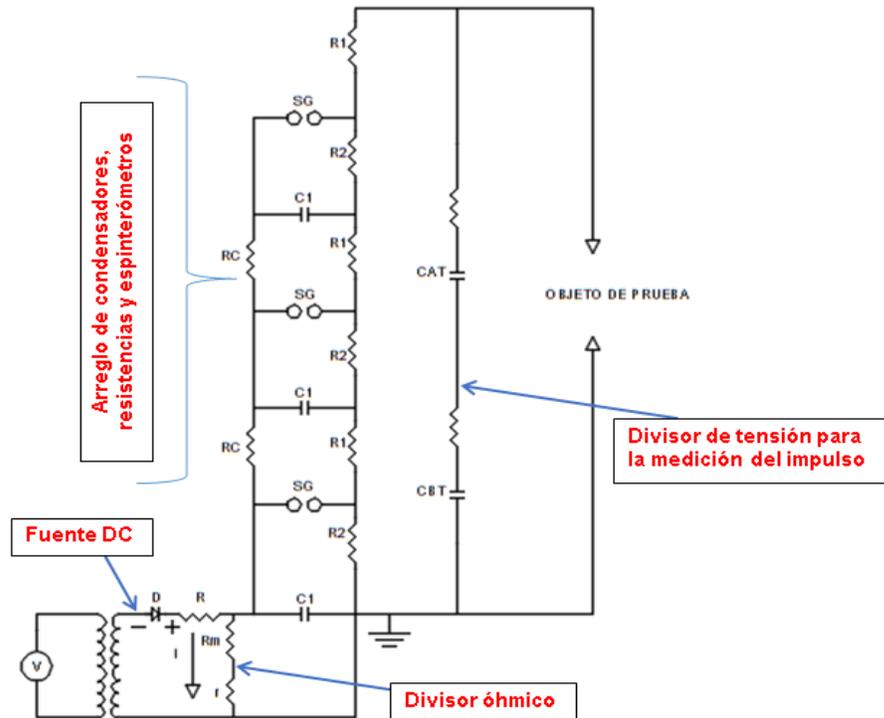
¹⁵ CEDIEL ZAMBRANO, Vilensky Aldrin. Diagnóstico del generador de impulsos de la empresa C.A.V.E.T. Informe final de pasantía. Ingeniero Electricista. Buruta: Universidad Simón Bolívar. Coordinación de Energía Eléctrica, 2006. p. 16.

¹⁶ Ibid., p. 16.

La medición de la tensión de carga V_o se realiza por medio del divisor de tensión óhmico de la figura 8, siendo $R_m + r$ el valor total de la resistencia e I la corriente que la circula, por lo que la tensión está dada por la ley de Ohm (9).

$$V_o = (R_m + r).I \quad (9)$$

Figura 8. Esquema completo del sistema de prueba de impulso tipo rayo



Fuente: Autores.

Dónde:

D=Diodo rectificador

R=Resistencia limitadora de corriente (Ω)

C1=Condensador de etapa (μF)

R1=Resistencia de frente de onda (Ω)

R2=Resistencia de cola de onda (Ω)

Rc=Resistencia de carga (Ω)

SG=Espinterómetro

CAT=Condensador del brazo de alta tensión del divisor (μF)

CBT=Condensador del brazo de baja tensión del divisor (μF)

Rm y r= Resistencias del divisor óhmico (Ω)

CAT=Condensador del brazo de alta tensión del divisor

CBT= Condensador del brazo de baja tensión del divisor

Rm y r= Resistencias del divisor óhmico

Por otra parte, la medición de la tensión de impulso se efectúa mediante el divisor de tensión RC amortiguado, que disminuye la tensión a un valor adecuado para ser registrado por un osciloscopio.

Los elementos constituyentes del divisor de tensión como lo son la resistencia de alta tensión, resistencia de baja tensión, inductancia y capacitancia; pueden incidir directamente en la forma de onda de la tensión de impulso¹⁷.

1.8 MÉTODOS DE INICIO DE LA DESCARGA DEL GENERADOR DE IMPULSO

El inicio de la descarga entre las esferas de cada etapa del generador se hace de forma “natural” o mediante el uso de un sistema auxiliar. El primer método (descarga natural), se aplica para obtener la tensión de impulso deseada como se describe a continuación:

Como se muestra en la figura 9, las esferas se ajustan a una distancia superior a la del inicio de la descarga, el generador es cargado a una tensión prefijada. Luego, se disminuye la separación interelectródica con un accionamiento a distancia hasta provocar la ruptura del aire. Las esferas de la primera etapa se ajustan a una distancia correspondiente a la tensión de descarga. Luego, se aumenta pausadamente la tensión de carga hasta que ocurra la ruptura.

Figura 9. Spark Gap de esferas.



Fuente: Industrias Explorer.

Una alternativa al método de ruptura natural es el empleo de un sistema auxiliar para el inicio de la descarga, el cual posee como principal ventaja una mayor precisión del valor de la tensión provista por el generador, resultando en la

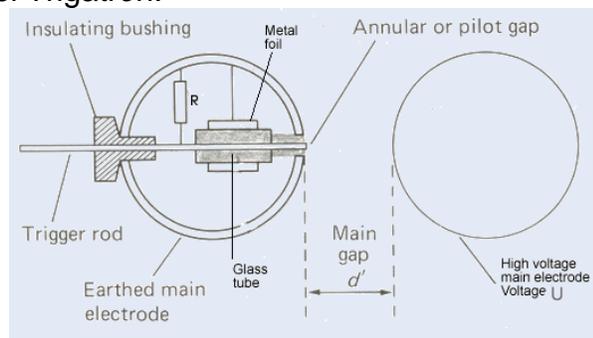
¹⁷ CEDIEL ZAMBRANO, Vilensky Aldrin. Diagnóstico del generador de impulsos de la empresa C.A.V.E.T. Informe final de pasantía. Ingeniero Electricista. Buruta: Universidad Simón Bolívar. Coordinación de Energía Eléctrica, 2006. p. 17.

reducción de la dispersión de campo eléctrico que se verifica en el caso de inicio natural.

A continuación se describen algunas técnicas empleadas para iniciar la descarga con sistemas auxiliares.

- **Trigatrón.** El espinterómetro de la primera etapa del generador está constituido por dos esferas, dentro de una de estas se instala un electrodo eléctricamente aislado (aproximadamente de un milímetro de diámetro) que tiene como función iniciar el arco que conduce a la descarga completa entre el espinterómetro. El esquema y forma real se muestran en las figuras 10 y 11 respectivamente.

Figura 10. Partes del Trigatrón.



Disponible en: http://nptel.ac.in/courses/108104048/ui/Course_home5_29.htm

Figura 11. Trigatrón. (a) Generador de impulso de 2000kV (b) Generador de impulso de 200kV.



Fuente: Industrias Explorer.

La aplicación de una tensión de varios kilovoltios (alrededor de 4 kV a 10 kV) entre el electrodo interno y la esfera provoca una distorsión del campo eléctrico que asegura una descarga controlable entre los dos electrodos principales (esfera-esfera) a un valor de tensión disruptiva más bajo que el requerido en condiciones de ruptura natural.

- **Politron.** Es un tipo de Trigatrón compuesto por varios electrodos en serie. Se encuentra alojado dentro de un compartimento presurizado

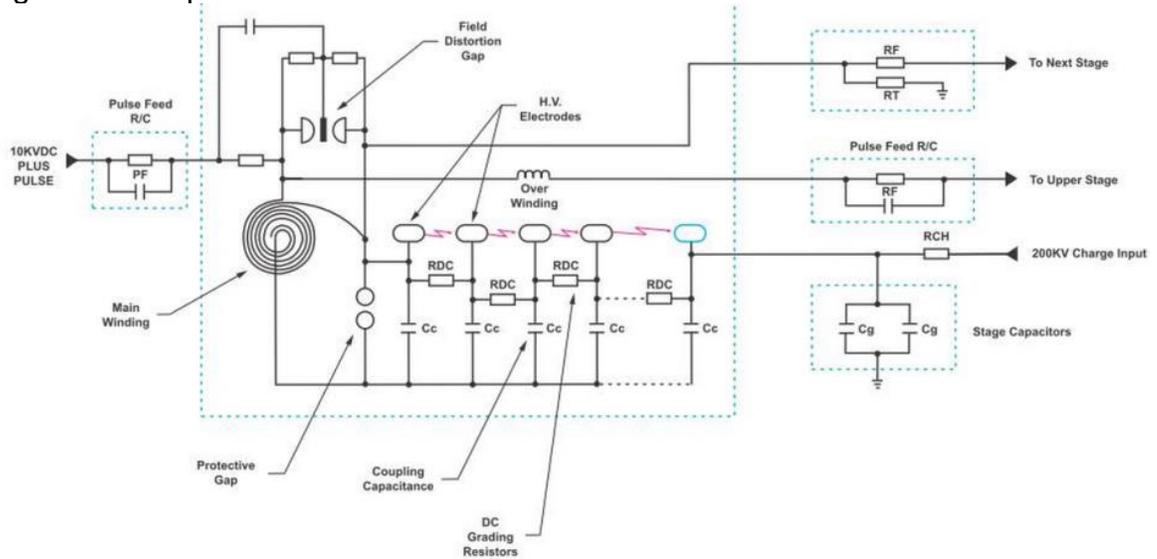
con un gas dieléctrico, generalmente aire aunque puede ser sustituido por algún otro gas como el SF₆ o aceite dieléctrico para ampliar aún más la tensión de funcionamiento. En la figura 12 se muestra un Politron del generador de impulso de tensión de 3200kV de Industrias Explorer; este funciona con aire a presión. El esquema eléctrico de conexión del Politron se observa en la figura 13.

Figura 12. Politron.



Fuente: Autores

Figura 13. Esquema eléctrico del Politron.



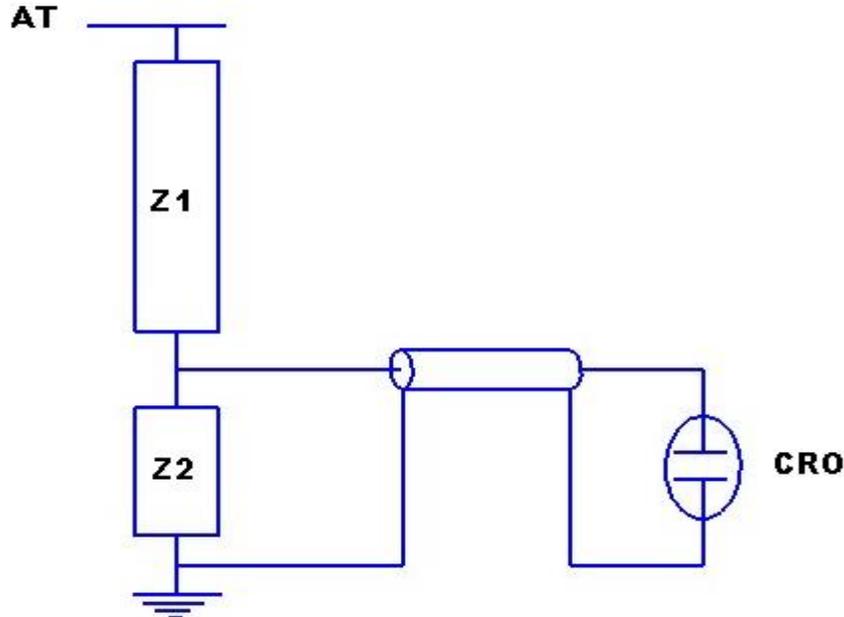
Fuente: Catalogo Hipotronics.

1.9 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA TENSIÓN DE IMPULSO

1.9.1 Medición de la tensión de impulso mediante divisor de tensión y osciloscopio. El divisor de tensión al conectarse en el terminal de alta tensión del sistema de prueba, reduce la tensión a un valor accesible para la medición en el osciloscopio y la interconexión se hace vía cable coaxial, como se muestra en la figura 14.

El divisor consta de dos impedancias en serie Z_1 y Z_2 (con $Z_1 \gg Z_2$) donde la tensión de impulso a ser medida, es aplicada entre los terminales exteriores de la configuración, el osciloscopio es conectado entre el terminal intermedio y el externo inferior¹⁸.

Figura 14. Esquema para la medición de la tensión de impulso con osciloscopio



Fuente: Marco referencial de los generadores de impulsos. Inducor Ingeniería.

- **Tipos de divisores de tensión:**

- *Divisores resistivos.*

Por su simplicidad de construcción, tamaño y fácil portabilidad son los más utilizados para niveles de tensión inferiores a los 500kV.

¹⁸ CEDIEL ZAMBRANO, Vilensky Aldrin. Diagnóstico del generador de impulsos de la empresa C.A.V.E.T. Informe final de pasantía. Ingeniero Electricista. Buruta: Universidad Simón Bolívar. Coordinación de Energía Eléctrica, 2006. p. 27.

La figura 15 muestra las formas más comunes de este tipo de divisores de tensión.

Las resistencias R_3 y R_4 se usan para acoplar la impedancia del cable coaxial que lleva la señal al osciloscopio.

Las ecuaciones que definen los circuitos de la figura 15 se describen a continuación:

$$V_2 = \frac{Z_1}{Z_1 + R_1} V_1$$

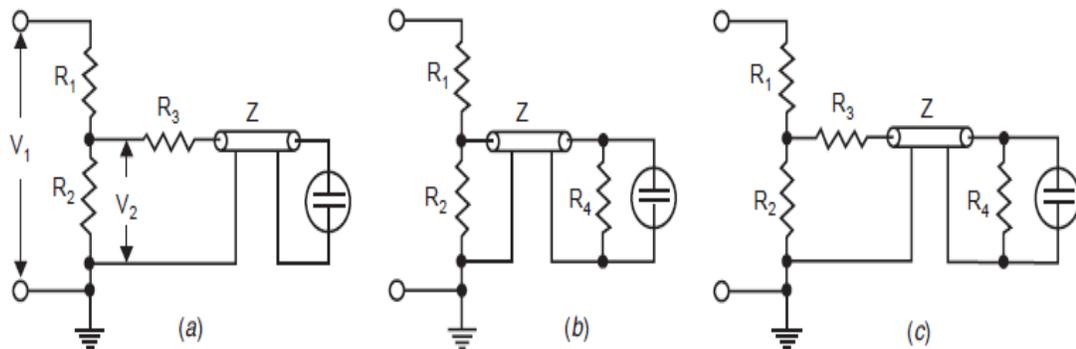
Donde Z_1 es la impedancia equivalente entre R_2 paralela a $(Z + R_3)$, entonces,

$$V_2 = \frac{R_2 V_1}{(R_2 + R_1) + \frac{R_1 R_2}{Z}}$$

Normalmente $Z \approx R_2$ por tanto,

$$V_2 = \frac{R_2 V_1}{2R_1 + R_2}$$

Figura 15. Configuraciones comunes de divisores de tensión resistivos.



Fuente: High Voltage Engineering

En el circuito de la figura 15 (c) si se desea que no haya reflexión de onda en el cable debe cumplirse que $R_3 = R_4$ y la tensión vista en el aparato de medida sería la mitad de la tensión V_2 .

$$V_2 = \frac{R_2 V_1}{2(R_1 + R_2)} \quad (10)$$

➤ *Divisores capacitivos.*

Pueden utilizarse para medición de tensiones superiores a 1MV, generalmente se construyen con varias secciones de condensadores montadas unas sobre otras, tienen tamaño mayor a los divisores de tipo resistivo por esta razón se utilizan en laboratorios fijos.

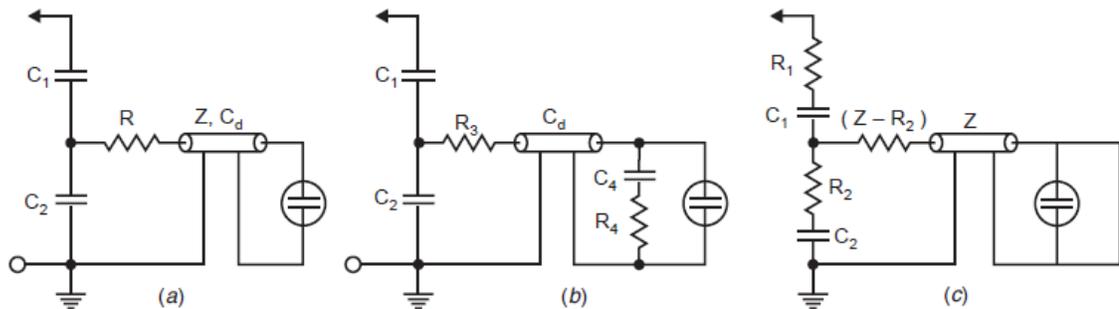
La relación de división K depende de los valores de C_1 y C_2 ,

$$K = \frac{C_1 + C_2}{C_1}$$

Para valores muy altos de frecuencia en la ecuación anterior se debe incluir la capacitancia del coaxial de la siguiente forma,

$$K = \frac{C_1 + C_2 + C_d}{C_1} \quad (11)$$

Figura 16. Divisores capacitivos. (a) Simple acople. (b) Acople compensado. (c) Divisor amortiguado de simple acople.

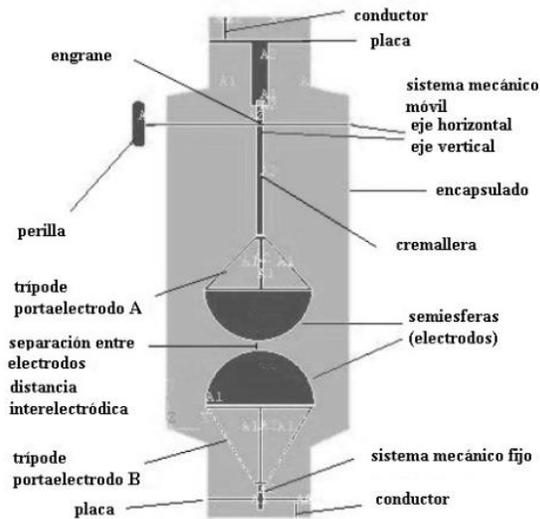


Fuente: High Voltage Engineering.

1.9.2 Medición de la tensión de impulso mediante espinterómetro de esferas. El nivel de tensión al cual ocurre la descarga disruptiva en un espinterómetro de esferas es función principalmente del diámetro, la distancia interelectródica y las condiciones ambientales del lugar donde se encuentra instalado. Si se conocen estas variables es posible calcular la tensión de impulso.

En la figura 17 se observan las partes de un spark gap de esferas, y en la figura 18 se muestra el espinterómetro vertical de esferas que se encuentra en el laboratorio de alta tensión de la Universidad nacional de Colombia. Su uso como instrumento de medida se ha reducido debido a la aparición de osciloscopios que ofrecen un mejor registro de la tensión de impulso. No obstante, su utilidad como dispositivo de protección contra sobretensiones, para proteger el objeto bajo prueba de posibles tensiones de impulso superiores a las soportadas por este, han hecho que se continúe utilizando en algunos laboratorios de alta tensión.

Figura 17. Partes de un Spark Gap de esferas.



Fuente: Diseño y construcción de un Espinterómetro para un Generador de Impulso de Alta Tensión.

Figura 18. Espinterómetro vertical de esferas.



Disponible en: <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ingenieria/2001601/cap06/Aplica03.html>

CAPÍTULO DOS

“Somos arquitectos de nuestro propio destino.”
Albert Einstein

En este capítulo, se presentan las actividades llevadas a cabo durante la restauración y ensamble del generador de impulso de tensión marca HIPOTRONICS, del año 1994, en la Empresa Industrias Explorer, describiendo las etapas de levantamiento de componentes, pruebas eléctricas a los principales componentes y tableros de control. Finalmente se presentan las pruebas realizadas a los componentes de los mecanismos del sistema neumático y de puesta a tierra.

2 METODOLOGÍA

2.1 DESCRIPCIÓN DEL GENERADOR DE IMPULSO ATMOSFÉRICO DE LA EMPRESA INDUSTRIAS EXPLORER

2.1.1 Características principales del generador.

Marca: HIPOTRONICS
Modelo: IG 1600-160
Tensión máxima por etapa: 200 kV
Energía máxima por etapa: 20 kJ
Número de condensadores de etapa: 16
Fecha de fabricación: 07-1994

2.1.2 Consideraciones a tener en cuenta.

Condiciones ambientales en Duitama.
Altura : 2590 msnm
Presión atmosférica : 1020 hPa
Temperatura promedio : 16 ° C
Humedad relativa : 60 %
Precipitación : Lluvias escasas.
Meses de lluvia : Abril y octubre.

2.1.3 Reducción de la capacidad del generador por condiciones ambientales. Con base en que el generador de impulso está diseñado para trabajar en condiciones normalizadas, es decir, a una altura de 1000 metros sobre el nivel del mar para generar 1600 kV, y considerando que la altura de Duitama es de 2590 msnm, el voltaje máximo al que se puede usar el generador respecto a la altura de Duitama realizando las correcciones sugeridas la IEEE Std-4 de 1995, el voltaje se reduce en un 1% por cada 100 metros por arriba de los 1000 msnm, en consecuencia para una altura de 2590 m, el máximo voltaje que se puede obtener con el generador se reducirá en un 16 %, y la energía en un 29,4 %, es decir, es necesario aplicar un factor de corrección por altura de 0,84 para el voltaje y 70,6 para la energía, en la tabla 2 están registrados los valores corregidos para un generador de impulso de tensión.

Tabla 2. Valores corregidos de generador de impulso.

Datos característicos del Generador	A 1000 msnm (Condiciones normalizadas)	A 2590 msnm (Altura de Duitama)
Máximo voltaje de impulso tipo rayo. Configuración serie	3200 kV	3024 kV
Máximo voltaje de impulso tipo rayo. Configuración paralelo	1600 kV	1344 kV
Máxima cantidad de energía obtenida	160 kJ	112.96 kJ

Fuente: Autores.

2.2 INVENTARIO Y DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES

La primera actividad consistió en la identificación de los componentes del generador de impulso tipo rayo. La lista de componentes se registra en la tabla 3.

Tabla 3. Inventario general de componentes.

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
CIRCUITO ELÉCTRICO	
1	Fuente DC 200 kV
2	Resistencias limitadoras
90	Resistencias de frente
9	Resistencias de alimentación trigger
24	Resistencia de cola
16	Condensadores
8	Politrigratrón
1	Aislador soporte de resistencia limitadora
9	Generador Espiral
7	Resistencias de carga
TABLEROS DE CONTROL Y MEDIDA	
1	Control regulador y sección de Potencia
1	Consola de control
1	Osciloscopio Digital TDS3032B
1	Digitalizador RTD-710A
1	Computador para adquisición de datos

Tabla 3. (Continuación)

SISTEMA PUESTA A TIERRA	
Cantidad	Descripción
1	Brazo de descarga de alta tensión, accionado por solenoide
1	Sistema puesta a tierra neumático
DIVISORES DE TENSIÓN	
1	Divisor capacitivo con acople para lectura de tensión de impulso
1	Divisor resistivo, medición tensión de la fuente DC
ESTRUCTURA	
	Elementos de electrodo superior
1	Placa base
8	Plataformas porta-condensadores
32	Columnas aislantes de 1,35 m
8	Columnas aislantes de 0,68 m
80	Empaques de asbesto
14	Diagonales
ACCESORIOS DE ESTRUCTURA	
98	Porta resistencia
4	Escaleras dieléctricas
8	Soportes resistencia de carga
2	Plataformas dieléctricas

Fuente: Autores

2.2.1 Resistencias de frente de onda. Estas resistencias tienen diferentes colores de acuerdo a sus valores que van desde decenas de ohmios hasta los kilo-ohmios, en la figura 19 se observa una fotografía de una de estas resistencias. Estas instalan en un compartimento con espacio para la conexión de cinco resistencias en paralelo junto a la cubierta de los Spark Gaps. Están construidas con un diseño especial para lograr una baja inductancia y aisladas con resina epoxi.

Figura 19. Resistencia de frente.



Fuente: Autores.

2.2.2 Resistencias de cola de onda. Construidas con el mismo proceso de las resistencias de frente pero con un valor de resistencia mayor. Se pueden instalar máximo dos resistencias en paralelo por etapa el generador cuenta con tres tipos dependiendo su valor óhmico (anexo A) en la figura 20 se observa una resistencia de cola.

Figura 20. Resistencias de cola.



Fuente: Autores.

2.2.3 Resistencias de alimentación del disparo. Conectan la fuente de pulso de tensión de 10 kV dc con el generador en espiral de cada etapa a través de ojales en los extremos como se observan en la figura 21. Tiene un valor promedio de 92,5 k Ω y está en paralelo con una capacitancia que acopla los pulsos de disparo de cada generador espiral.

Figura 21. Resistencias del trigger.



Fuente: Autores.

2.2.4 Condensadores de etapa. Están contruidos con un sistema dieléctrico mixto conformado por papel kraft, película de polipropileno, y aceite de ricino. Con un diseño de la caja de aislamiento sin bujes de alta tensión externos reduciéndose de esta manera la inductancia del circuito. Tienen una capacitancia de 0.5 μ F, \pm 5%, soportan una tensión máxima de 220 kV, una corriente pico de 20 kA y su encapsulado es como el que se observa en la figura 22.

Figura 22. Condensadores de etapa.



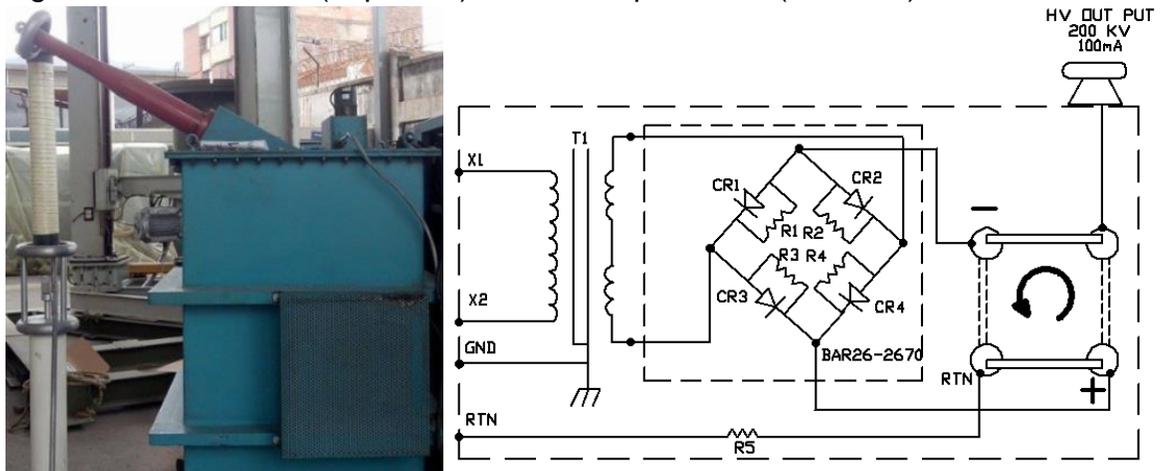
Fuente: Autores.

2.2.5 Resistencias de carga. Las resistencias de carga son de gran valor Óhmico (15 kΩ en promedio), con una construcción similar a la de las resistencias de frente y cola de onda. Se ubica una por etapa de forma diagonal soportadas sobre los brazos aislantes que van unidos a las plataformas de etapa.

2.2.6 Resistencias limitadoras. Son dos resistencias de baja inductancia conectadas en serie entre la salida de la fuente y la primera etapa de condensadores y van apoyadas sobre dos aisladores de FRP. Una de estas resistencias se usa para la descarga segura de la primera etapa del generador por medio de un brazo accionado por solenoide.

2.2.7 Fuente 200 kV DC. La fuente DC es un bloque cerrado dentro del cual se encuentra el transformador elevador, el rectificador de onda completa y el motor inversor de polaridad en la parte superior al lado del buje de alta tensión como se muestra en la figura 23.

Figura 23. Fuente DC (Izquierda). Circuito equivalente (Derecha).



Fuente: Autores.

2.2.8 Fuente de alimentación del pulso de disparo. Suministra un pulso de 10 kV dc al transformador de pulsos o generador espiral que está conectado con el Spark Gap de cada etapa, garantizando que se produzca una tensión de cebado que permita la descarga disruptiva del polítron.

Su funcionamiento se basa en la carga de un condensador a 10 kV y su posterior descarga mediante la acción del tiratrón de hidrógeno 5C22 el cual soporta una tensión pico de hasta 16 kV. En la figura 24 se observa la foto de la fuente del pulso de disparo.

Figura 24. Fuente de alimentación del pulso de disparo.

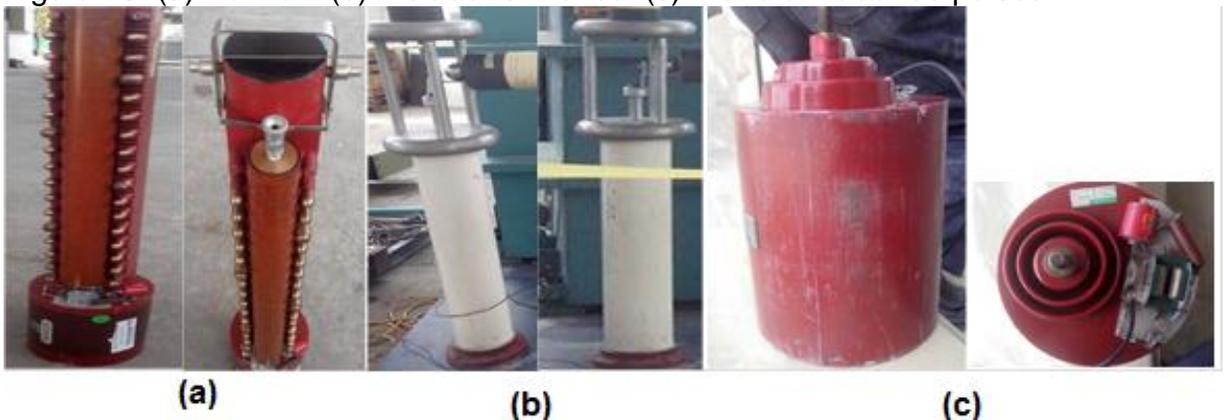


Fuente: Autores.

2.2.9 Generador espiral. Es un transformador de pulsos que eleva la tensión suministrada por la fuente de alimentación del pulso de disparo de 10 kV a 70 kV para permitir que los Spark Gaps del Polytron (Politrigatrón) sean disparados. La duración del pulso es menor a 100 ns (figura 25 c).

2.2.10 Polytron Gaps (politrigatrón). A diferencia de la mayoría de generadores de impulsos en los cuales la tensión del impulso se controla variando la distancia entre los spark gaps, y la descarga de los condensadores se inicia con un único trigatrón ubicado en la primera etapa del generador; el generador de la práctica consta de un sistema de politrigatrón o politrón presurizado por cada etapa sumando un total de ocho politrones. No requiere ajuste físico de la distancia entre los spark gaps. Para controlar que el disparo no ocurra antes se regula la presión dentro del compartimento hermético que protege el Spark Gap principal, unido este se encuentran cinco electrodos en serie de cobre con una capa superficial en tungsteno (figura 25 a).

Figura 25. (a) Politron. (b) Aislador cilíndrico. (c) Transformador de pulsos.



Fuente: Autores

El transformador de pulsos se conecta directamente con el politrón y ambos se encuentran aislados de las condiciones ambientales dentro de un alojamiento tubular. Adicionalmente el Sphere Gap principal tiene una ventana de cuarzo por la cual entra la radiación UV producida por la descarga entre un par de electrodos situados sobre la superficie superior del generador espiral, esta radiación facilita la ionización del aire presente entre los electrodos del Gap principal.

2.2.11 Interruptor de descarga accionado por solenoide. Para la descarga de la primera etapa de condensadores el generador de impulso cuenta con un brazo accionado por solenoide el cuál se conecta siempre que la fuente dc esté desenergizada. Este mecanismo se puede ver en la figura 26.

Figura 26. Interruptor accionado por solenoide.



Fuente: Autores

2.2.12 Sistema de puesta a tierra neumático. Cada etapa debe llevar un sistema de puesta a tierra para brindar máxima seguridad en caso de ocurrir una falla o cuando se requiera descargar los condensadores para cambiar la configuración de las resistencias. El sistema consiste en barras de aluminio accionadas por cilindros neumáticos de simple efecto con retroceso por muelle. En la figura 27 se observa el sistema neumático ensamblado.

Figura 27. (a) Sistema de puesta a tierra neumatico.



Fuente: Autores.

2.2.13 Tableros de control.

2.2.13.1 Regulador de control. Dentro de este se encuentra el conjunto de valvulas y reguladores de presión del sistema neumático, la fuente de alimentación del pulso de disparo, el contactor principal de la fuente DC y el tiristor que controla el nivel de tensión de carga.

2.2.13.2 Consola de control. En la figura 28 (a) se muestra la parte frontal de la consola de control de la fuente el cual está compuesto por cuatro partes que son:

- Medición y ajuste de la carga por etapa
- Trigger y recortador de onda
- Encendido principal remoto o manual
- Cambio de polaridad en la fuente y función de carga

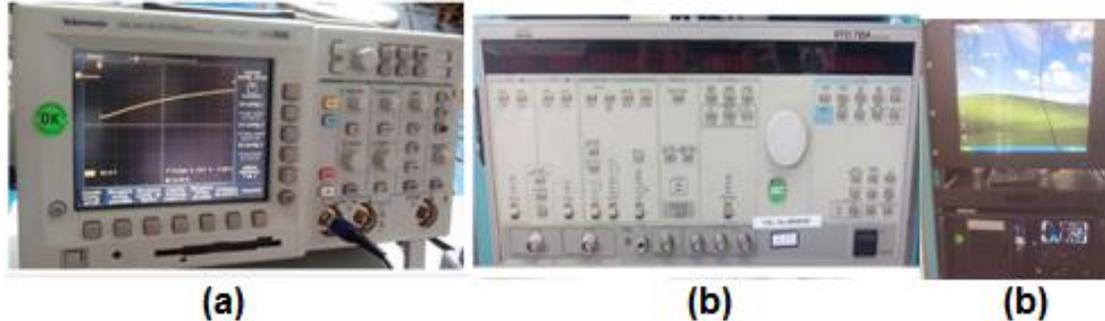
Figura 28. Consola de control.



Fuente: Autores.

2.2.14 Instrumentos de medida. Se encuentran dentro de un gabinete de medición compuesto por un ordenador, un osciloscopio Tektronix modelo TDS-3032B y un digitalizador RTD-710A.

Figura 29. Instrumentos de medida. (a) Osciloscopio. (b) Digitalizador (c) Ordenador.



Fuente: Autores.

2.2.15 Divisor de tensión para la medición de la tensión de carga. Es de tipo resistivo (figura 30 a), conectado entre el primer condensador de etapa del generador y la primera resistencia de carga del generador de impulso, ocupan junto con la fuente de alimentación de 200 kV una base de acero desmontable que se acopla a la base principal del generador de impulso.

2.2.16 Divisor de tensión para la medición de la tensión de impulso. Este divisor está compuesto por dos secciones de tipo RC serie para la alta tensión y una sección capacitiva para la baja tensión (figura 30 b).

Figura 30. (a) Divisor de tensión resistivo para la medición de carga. (b) Divisor de tensión RC para la medición de tensión de impulso.



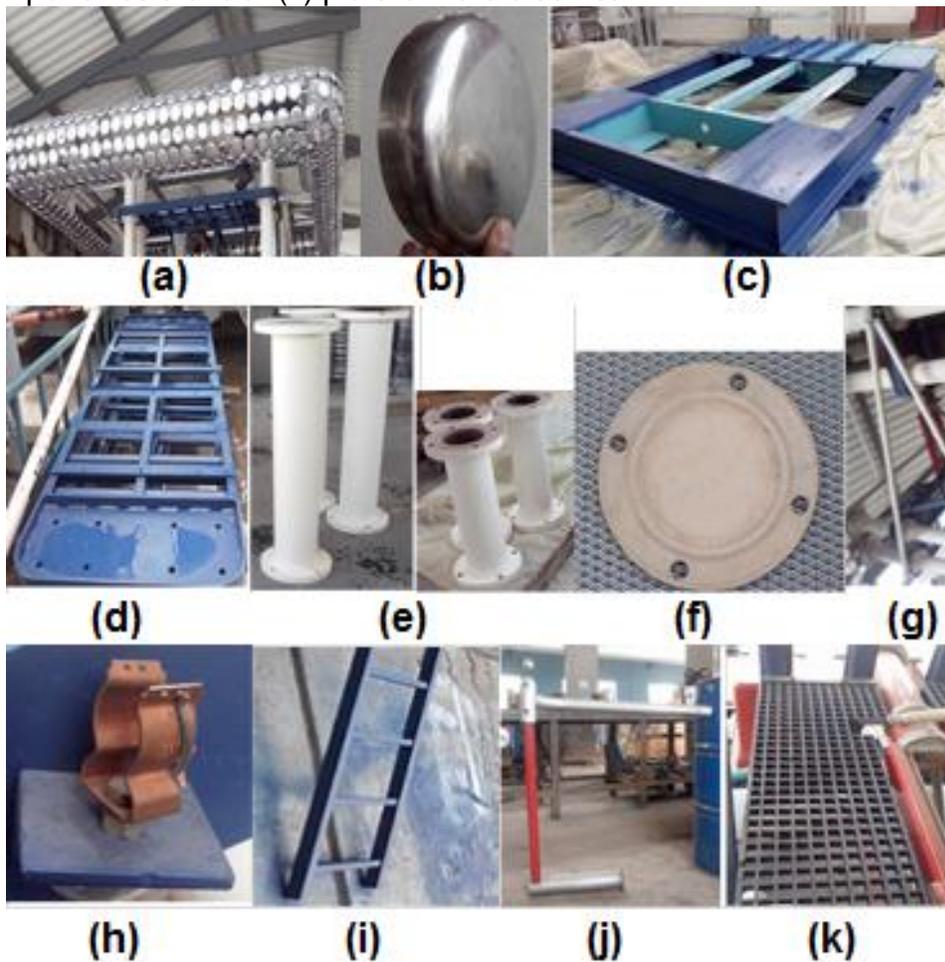
Fuente: Autores

2.2.17 Estructura. Sirve para soportar los demás elementos del generador como resistencias, condensadores de etapa, politrones y el sistema puesta a tierra neumático.

Está compuesta por una base de acero, columnas aislantes de FRP, tirantes diagonales, plataformas y brazos porta-resistencias.

2.2.18 Electrodo Superior. El electrodo superior es una estructura construida con láminas y tubos de aluminio, sobre estos últimos se sujetan con tornillos placas circulares de aluminio, como se muestra en la figura 19. Se utiliza para evitar descargas por efecto punta hacia el techo u objetos cercanos cuando la tensión en el generador de impulso es demasiado alta.

Figura 31. (a) Electrodo superior. (b) Plato del electrodo superior. (c) Placa base. (d) Plataforma de etapa. (e) Columnas de FRP. (f) Empaque para las columnas. (g) Tensores diagonales. (h) Porta fusible. (i) Escalera dieléctrica. (j) Brazo conector porta resistencia. (k) plataforma dieléctrica.



Fuente: Autores

2.3 RESTAURACIÓN

2.3.1 Aplicación de soldaduras. Se aplicó la soldadura con electrodo recubierto a las siguientes partes: placa base, plataformas de etapa y base del divisor. Se soldó el electrodo superior y las partes de aluminio con soldadura tipo TIG.

2.3.2 Aplicación de pintura. Después de soldar las piezas se les aplicó masilla, anticorrosivo y pintura epóxica.

Figura 32. Restauración placa base.



Fuente: Autores

Figura 33. Restauración de las plataformas.



Fuente: Autores

2.3.3 Limpieza de componentes. Se realizó la limpieza e inspección de los elementos para verificar su estado físico, en esta actividad se utilizaron sopletes, alcohol, toallas de papel, lijas y aerosol limpiador de equipos electrónicos. En la figura 34 se observa la limpieza de algunas piezas.

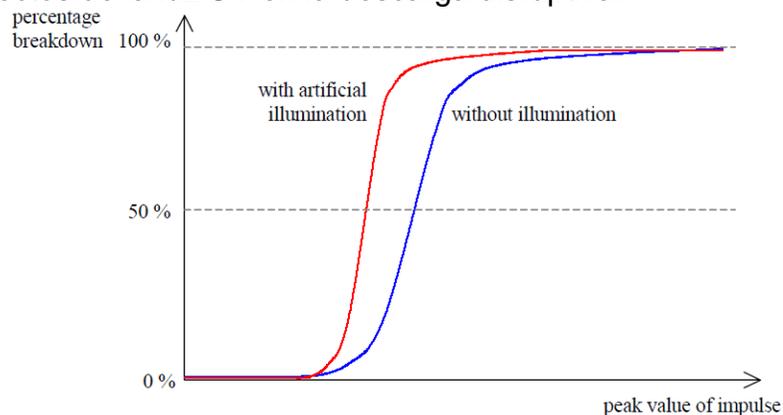
Figura 34. Limpieza de componentes.



Fuente: Autores

Un factor importante en el funcionamiento de los politrones, es la iluminación con luz ultravioleta de los sphere gaps principales, por esta razón se realizó una limpieza de las ventanas de cuarzo que permiten la iluminación. En la figura 35 se muestra el efecto de la radiación UV en la descarga disruptiva.

Figura 35. Efectos de la luz UV en la descarga disruptiva.



Fuente: High Voltage Engineering – J R Lucas, 2001.

2.4 CONSECUCIÓN DE ELEMENTOS FALTANTES

Debido a que algunos elementos faltaban o estaban en mal estado y ya que la empresa contaba con algunas materias primas se optó por la fabricación de algunos elementos y la compra de otros.

2.4.1 Elementos adquiridos mediante compra. Con base en las especificaciones técnicas que ofrecía cada distribuidor, se realizaron cotizaciones de los componentes faltantes con empresas nacionales e internacionales. Las cotizaciones se encuentran en el Anexo B.

A continuación se listan los elementos que fueron adquiridos mediante compra.

Manguera neumática

Tornillos, arandelas y tuercas

Accesorios para la conexión del sistema neumático

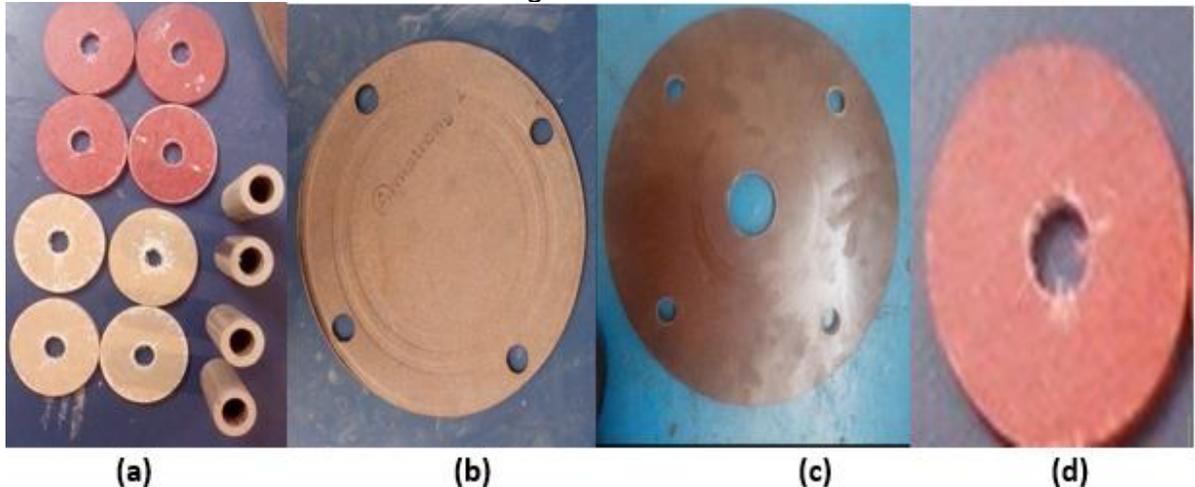
Cables para la conexión de los tableros de control

Conectores para cable coaxial

Conectores para cable multiconductor

2.4.2 Elementos fabricados. Se fabricaron los aisladores de los divisores de tensión utilizando fibras dieléctricas termoestables como: baquelita, UTR (poliéster reforzado con fibra de vidrio) y SG200 (poliéster-fibra de vidrio con recubrimiento de caucho siliconado). También se construyó el Solenoide para accionar brazo de puesta a tierra, los bujes y arandelas dieléctricas fabricadas en UTR.

Figura 36. (a) arandelas y bujes aislantes para tornillos de los divisores. (b) Empaque para columnas. (c) Aislador del divisor de tensión de impulso. (d) Aislador del divisor de tensión de carga.



Fuente: Autores

Los empaques para las columnas se fabricaron con corcho, debido a que presenta alta resistencia a la compresión y propiedades dieléctricas.

Tabla 4. Listado de piezas del ensamble.

Número de Elemento	Nombre	Cantidad
1	Placa base	1
2	Conjunto brazo porta-resistencia	8
3	Columna corta	8
4	Bujes	28
5	tirante-Diagonal	14
6	Conjunto electrodo superior	1
7	Columna larga	32
8	Tornillo 3/4" x 5"	224
9	Plataforma	8
10	Tornillo 3/4" x 3"	32

Fuente: Autores.

En el capítulo de simulaciones se explica por qué se obtiene un mayor rendimiento del generador cuando $C1$ es al menos $20C2$, por esta razón se decidió seguir el esquema propuesto por el manual del generador, es decir, conectar dos condensadores en paralelo por etapa.

Realizada la restauración y mantenimiento de las piezas, medición de componentes eléctricos, consecución de los elementos faltantes y simulación del circuito equivalente; se realizó el ensamble del generador utilizando equipos y personal capacitado para el movimiento de cargas. La instalación donde se efectuó el ensamble no tenía la altura suficiente para realizar el ensamble completo de la estructura Como se observa en la figura 38, por esta razón se ensamblaron solamente las primeras cinco etapas. Sin embargo, los elementos de las etapas restantes también fueron restaurados y se encuentran buenas condiciones para ser ensambladas posteriormente. En la figura 39 se muestra las cinco etapas del generador de impulso ensamblado.

Figura 38. Ensamble del generador de impulso de tensión.



Figura 39. Generador ensamblado



Fuente: Autores

2.7 PRUEBAS POSTERIORES AL ENSAMBLE

Luego de realizado el ensamble del generador se procedió a realizar pruebas de funcionamiento.

2.7.1 Pruebas al divisor de tensión RC.

Equipos utilizados:

- Generador de impulso de tensión Haefely
- Osciloscopio TDS3032B
- Multímetro Fluke
- Divisor resistivo
- Transformador de 60MVA

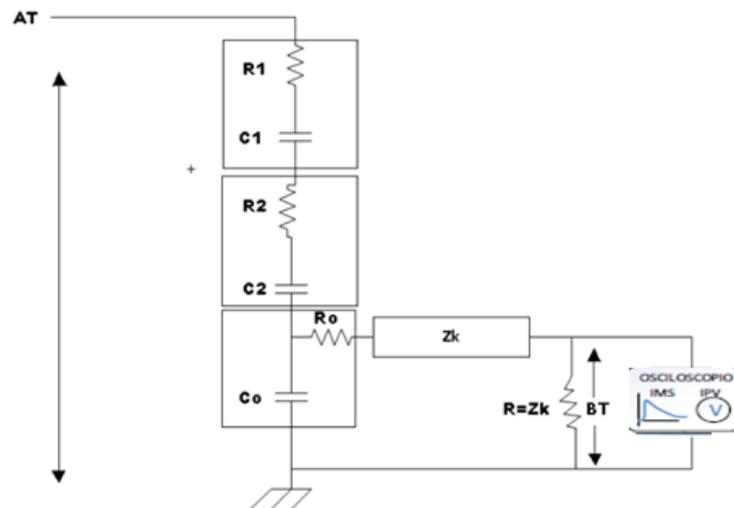
Procedimiento:

Con la ayuda del generador de impulso que se encuentra en funcionamiento en la empresa, se realizaron pruebas para observar su respuesta a un impulso y poder medir su relación de división.

En la figura 40, se observa la configuración del divisor. Como se puede ver el divisor cuenta con dos secciones RC serie para el brazo de alta tensión y una sección capacitiva para la baja tensión, unida a esta se encuentran unas resistencias de acople. Los valores de los componentes del divisor se registran en la tabla 5.

Previamente se hizo la simulación del divisor en OrCAD Pspice la cual se puede observar en la figura 41. Los resultados de la simulación se registran en la tabla 7.

Figura 40. Esquema del divisor de tensión capacitivo amortiguado.



Fuente: Autores

Dónde:

AT= Alta tensión

BT=Baja tensión.

C1 y **R1**= Capacitancia y resistencia de alta tensión. Módulo superior.

C2 y **R2**= Capacitancia y resistencia de alta tensión. Módulo inferior.

Co = Capacitancia de baja tensión.

Zk= Impedancia característica del cable coaxial.

Ro=Resistencia serie a la salida de baja tensión.

Tabla 5. Valores de los componentes del divisor.

ELEMENTO	C1	C2	R1	R2	Co	Ro=Zk=R
VALOR	1462 pF	1447 pF	39,96 Ω	38,67 Ω	882,25 nF	75 Ω

Fuente: Autores

En el cálculo de la relación de división se empleó la siguiente ecuación:

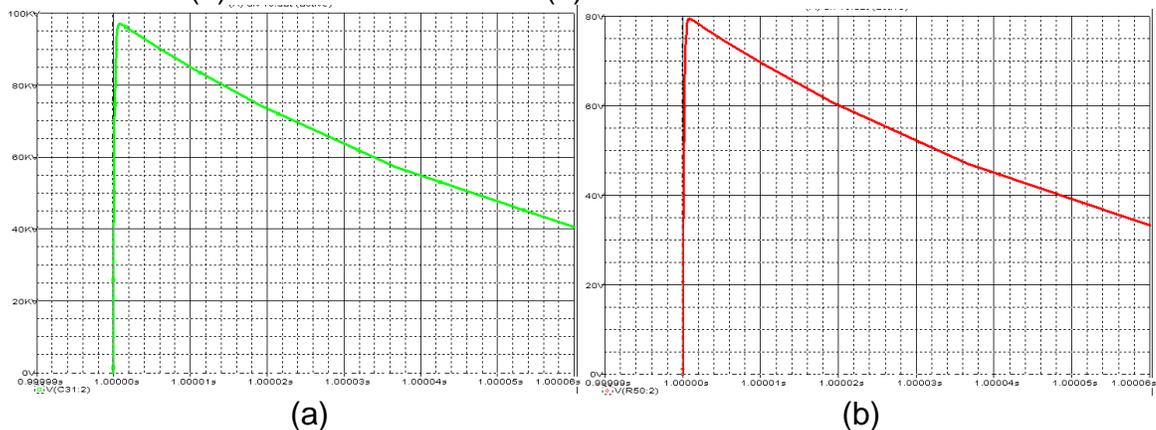
$$k = \frac{AT [V]}{BT [V]} = 1 + \frac{Z_{BT}}{Z_{AT}} = 1 + \frac{Z_0}{Z_{eq1} + Z_{eq2}} = \frac{C_{eq} + C_o}{C_{eq}} \quad (12)$$

Dónde:

- K= relación de división
- AT= alta tensión (V)
- BT=baja tensión (V)
- Z_{BT} =impedancia de baja tensión (Ω)
- Z_{AT}= impedancia de alta tensión (Ω)
- Z_O= impedancia de salida (Ω)
- Z_{eq}= impedancia equivalente (Ω)
- C_{eq}= capacitancia equivalente (μF)
- C_O= capacitancia de salida (μF)

Como se observa en la figura 40, *R_o* y *R* forman un divisor resistivo, por tal razón la relación de división es *2k*. Obteniendo una relación de división de 1221,4:1 utilizando solamente la sección inferior de alta tensión.

Figura 41. Simulación de la respuesta del divisor de tensión con una sección del brazo de AT. (a) Tensión a la entrada. (b) Tensión a la salida

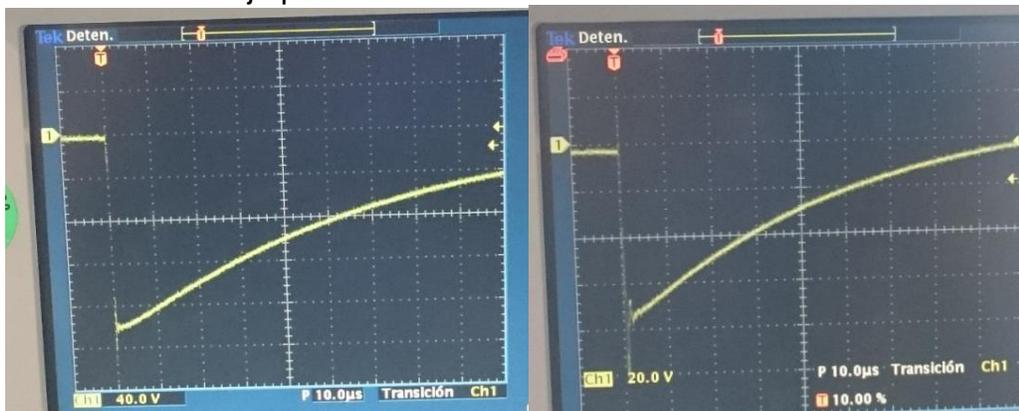


Fuente: Autores

Con el uso de los cursores se determinó que la relación de división simulada es de 1221,6:1; muy similar a la obtenida con las ecuaciones.

En el laboratorio se comparó la tensión medida con un divisor resistivo utilizado en las pruebas de los transformadores fabricados en la empresa, con la tensión del divisor RC bajo prueba. En la figura 42 se observan dos impulsos de tensión, uno medido con un divisor resistivo figura 42 (a) y el otro con un divisor RC Figura 42 (b). Los datos de la tensión que se aplico en la prueba fueron consignados en la tabla 6.

Figura 42. (a) Tensión en la salida del divisor de referencia resistivo y (b) tensión a la salida del divisor bajo prueba.



Fuente: Autores

Tabla 6. Valores de tensión comparativos.

Tipo de divisor	Relación del divisor	Voltios por división (V)	N° de cuadros	Tensión en el osciloscopio (V)	Tensión aplicada (V)
Resistivo	493:1	40	4.7	188	92684
RC	1219.5:1	20	3.8	76	92684

Fuente: Autores

Posteriormente se realizaron pruebas de alta tensión en vacío para los dos módulos del brazo de alta tensión del divisor. Estos resultados fueron comparados con los obtenidos de forma teórica y mediante simulación, como se muestra en la tabla 7.

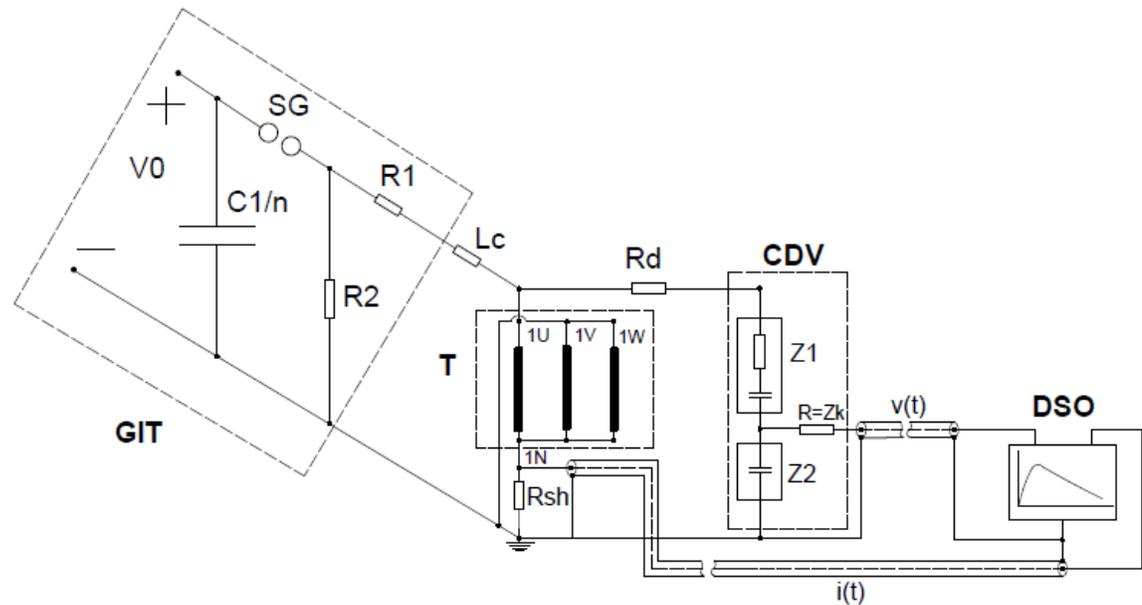
Tabla 7. Relación de división para el divisor RC.

RELACIÓN DE DIVISIÓ			
N° MÓDULOS BRAZO DE AT	TEÓRICO	SIMULACIÓN	PRUEBAS DE LABORATORIO
1	1221,4	1221,6	1219,5
2	2428	2427,3	2430

Fuente: Autores

Realizadas las pruebas en vacío, se hizo una prueba a un transformador de 60000kVA utilizando el divisor RC, el esquema de aplicación de la prueba se muestra en la figura 43. Para esta prueba se aplicó una tensión de 200kV y se consiguió una respuesta satisfactoria en la forma de onda a la salida del divisor. La figura 44 muestra la onda adquirida en el osciloscopio.

Figura 43. Esquema de aplicación de la prueba de impulso al transformador de 60 MVA.



Fuente: Autores.

Dónde:

GIT= Generador de impulso de tensión

V_0 = Tensión de alimentación (V)

C_1 = Condensador de etapa (μ)

R_1 = Resistencia de frente (Ω)

R_2 = Resistencia de cola (Ω)

$L_c = n =$ número de etapas

SG = Espinterómetro (Spark Gap)

$L_c = n =$ número de etapas

R_d = resistencia amortiguadora

R_{sh} = Resistencia shunt para la medición de corriente

CDV= Divisor de tensión capacitivo amortiguado

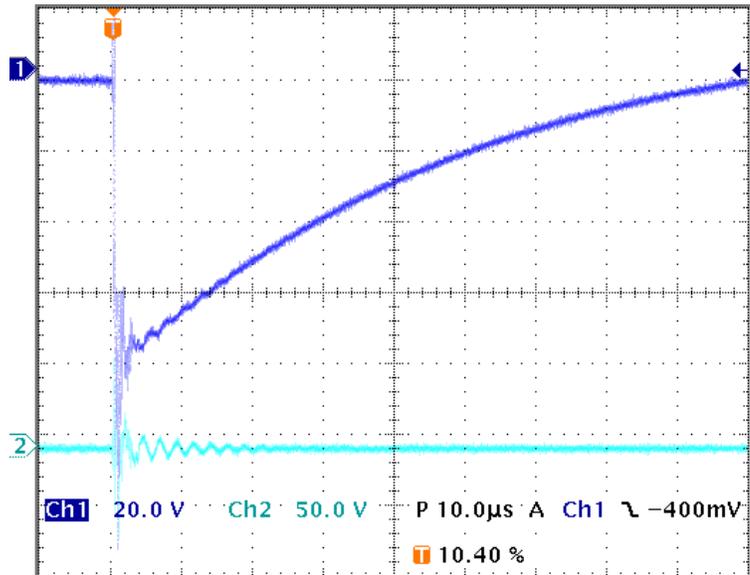
Z_1, Z_2 = Impedancias del divisor de tensión capacitivo amortiguado

$R=Z_k$ = Impedancia de acople del cable coaxial

DSO= Osciloscopio digital

T= Transformador de potencia bajo prueba

Figura 44. Forma de onda obtenida del divisor durante la prueba del transformador de 60000kVA.



Fuente: Autores

2.7.2 Pruebas de funcionamiento al sistema neumático.

Equipos utilizados:

- Compresor
- Herramientas para el ajuste de las válvulas
- Variac

Procedimiento:

Teniendo en cuenta que el generador de impulso cuenta con mecanismos de bloqueo que no permiten realizar la carga de los condensadores de alta tensión si no se cumplen ciertas condiciones, una de estas condiciones es tener una apropiada presión del aire dentro de los politrones. Como dice Albella¹⁹, la descarga disruptiva es función de la presión y la distancia inter-electródica como se describe en la siguiente ecuación:

$$V = \frac{apd}{\ln(pd)+b} \quad (13)$$

Donde:

V = tensión disruptiva, en voltios

p = presión del gas, en Torr

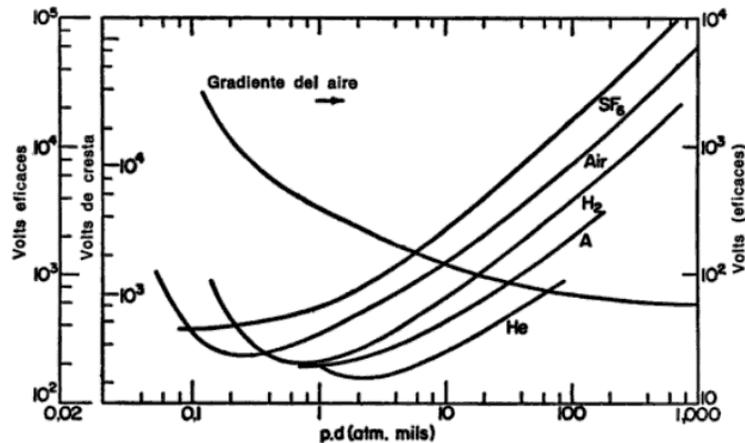
¹⁹ ALBELLA MARTÍN, José María. Láminas delgadas y recubrimientos. Preparación, propiedades y aplicaciones. Madrid.: CSIC Press, 2003. 704 p.

d = distancia inter-electródica, en metros.

a y b = constantes que dependen de la naturaleza del gas. Para el aire a una presión de 760 Torr; $a = 43,6 \times 10^6$ y $b = 12,8$.

Como se observa, la tensión de ruptura es función del producto de la presión p y la distancia d , en los politrones del generador la distancia se mantiene fija y se hace variar la presión. En la figura 45 se ilustran algunas curvas de Paschen para distintos gases.

Figura 45. Curvas de Paschen.



Fuente: Manual práctico de electricidad para ingenieros.

Con base en la importancia de una presión correcta se graduaron las válvulas de alta y baja presión, hasta obtener una presión de 46 psia dentro de cada politrón y se verificó que no quedarán fugas de aire en las conexiones de los accesorios del circuito neumático.

Después se alimentaron los cilindros que accionan el sistema de puesta a tierra y se verificó que el mecanismo operara correctamente.

Figura 46. Regulador de presión del aire dentro de los politrones.



Fuente: Autores.

2.7.3 Pruebas de funcionamiento a los tableros de control.

Equipos utilizados:

- Variac
- Multímetro Fluke

Procedimiento:

Realizadas correctamente todas las conexiones de los tableros, se verificó que estos no dieran ninguna señal de alerta de bloqueo, ya fuese por falta de presión en los politrones o mal funcionamiento del sistema de puesta a tierra neumático. Con la ayuda de la unidad de mantenimiento (FRL) ubicada en la parte lateral del tablero regulador (Figura 47) se determinó que la presión aceptable para que el indicador “AIR ON” se habilite debe ser de 60 psia.

Figura 47. Unidad FRL para el filtrado del aire.



Fuente: Autores.

Verificado esto, se procedió a realizar un “SELFTEST” (opción que permite simular una prueba de impulso); todas las acciones que se ordenaban en la consola de control como habilitar alta tensión, cambiar polaridad, se cumplieron.

Luego de un corto tiempo de estar encendidos los tableros de control se evidencio que algunos indicadores dejaron de funcionar, posterior a esto se intentó ejecutar un nuevo SELF TEST pero cada acción que se efectuaba con los botones de control, no se concluía. Dicho problema se volvió más crítico ya que dejó de funcionar la gran mayoría de los indicadores, por esta razón se determinó que lo más viable era inspeccionar las placas de los circuitos de control, comenzando por la sección que contiene los relés, se estableció que estaban en perfectas condiciones. Luego se procedió a verificar la sección de control digital que se encuentra en la parte superior de la consola de control, lo que corresponde al módulo de carga y de disparo; se evidenció que estos circuitos habían sido manipulados porque algunos integrados no se encontraban en los sockets. A continuación se tomaron referencias de las compuertas lógicas CMOS que se encontraron en las placas, al verificar las hojas datos del anexo D, se observó que

la alimentación de estos estaban entre 3 y 15 VDC, 5V para el Enable. Se confirmó que las tensiones suministradas por las fuentes del tablero no eran correctas como se observa en la tabla 8.

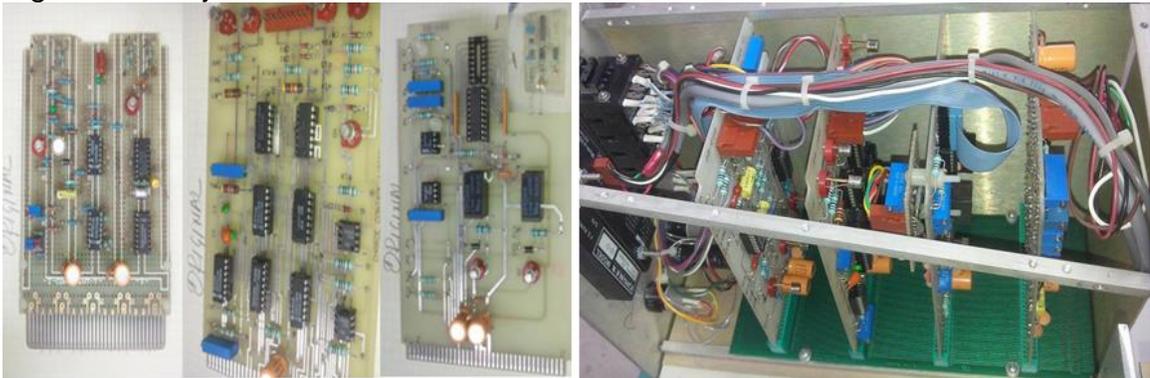
Tabla 8. Tabla comparativa de tensiones.

TENSIÓN PERMITIDA [VDC]	TENSIÓN MEDIDA [VDC]	FUNCIÓN
15	17,5	Alimentación de las compuertas CMOS
5	5	Enable, circuito lógico
24	35,3	Alimentación indicadores y relés

Fuente: Autores.

De la anterior tabla se concluye que las fuentes estaban suministrando más tensión de la permitida, por esta razón se graduaron las fuentes hasta obtener la tensión correcta. Luego se procedió al desmonte y reemplazo de algunas de las compuertas dañadas como se observa en la figura 48.

Figura 48. Tarjetas del circuito de control.



Fuente: Autores.

Después de reemplazar las compuertas y ante la dificultad de conseguir algunas referencias por ser escasas o simplemente estaban fuera del mercado, se procedió a energizar los tableros de control, dando como resultado que el tablero no respondió a las órdenes. Se sugirió al dueño de la empresa la consecución total de todas las compuestas lógicas y la revisión por parte de un experto de los circuitos para descartar daños en condensadores y resistencias.

También se planteó una alternativa de solución basada en el control automatizado, teniendo en cuenta las señales de salida y entrada del tablero de control, para esto se realizó un cuadro comparativo entre las ventajas y desventajas que tiene la implementación de circuitos con compuertas CMOS respecto a un PLC, en la tabla 9 se observan las ventajas y desventajas de un control implementado con CMOS y un control por PLC.

Tabla 9. Ventajas y desventajas de un control por PLC y un control por compuertas lógicas.

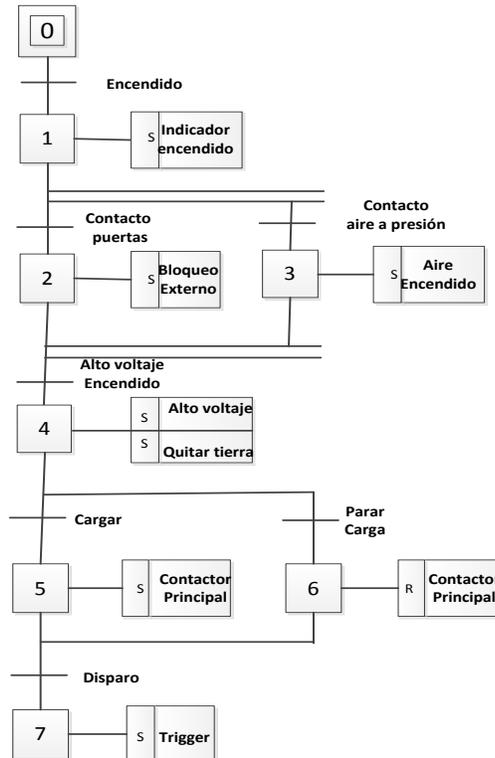
COMPUERTAS CMOS		PLC	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Baja disipación de potencia	Velocidad de procesamiento un poco lenta en comparación a los micro-controladores.	Es posible automatizar tareas o robotizarlas, depende de cómo se lo quiera ver. Al hacerlo, se ahorra mano de obra, y los costos finales del proyecto disminuyen.	La gran desventaja de un PLC es que antes de automatizar una tarea en la industria, es necesario tener en cuenta todos
Permiten una mejor calidad de la señal	Si la salida de la señal supera la alimentación entra en conducción afectando la señal de salida	Es de fácil programación	los detalles de lo que se debe hacer para que nada salga mal
El diseño del circuito es fácil	Son sensibles a la electrostática.		
Se pueden conseguir referencias muy económicas		No es necesario cambiar toda la estructura mecánica para cambiar de tarea.	El costo inicial de lo que implica automatizar una tarea con un PLC es muy elevado. Ésta es una clara desventaja.

Fuente: Autores

Como se puede ver, las ventajas de un PLC son mejores respecto al control por circuito lógico y relevadores, por tal razón se sugiere un control con PLC. El primer paso fue realizar el Grafcet de la Figura 49, teniendo en cuenta la secuencia normal de operación del generador descrita en el Anexo E.

Posteriormente se elaboró un diagrama ladder, este y su principio de funcionamiento se encuentran en el Anexo F. El diseño de este control nos permite tener alternativas para solucionar la falla que se presentó en los tableros con miras a la puesta en servicio del equipo.

Figura 49. Diagrama grafcet.



Fuente: autores

2.8 LEVANTAMIENTO Y ACTUALIZACIÓN DE PLANOS.

Al inicio del proyecto no se contaba con planos que indicaran la forma correcta de ensamblar la estructura del generador de impulso ni el sistema de puesta a tierra neumático, de igual forma los esquemas de conexión de cada uno de los circuitos se encontraban en mal estado e incompletos puesto que habían sido fotocopiados varias veces.

Teniendo en cuenta esto, se hicieron planos de la estructura del generador para facilitar su ensamblaje cuando se requiera reubicar el generador. También se dibujó el plano eléctrico de la fuente DC, éste ayudó en el momento de realizar las pruebas a la fuente.

En el Anexo G se presentan los planos de interconexión debido a que estos se encontraban incompletos o poco legibles porque la tinta de la copia estaba

desvanecida; se redibujaron estos planos complementándolos con las conexiones que se encontraron en los tableros de control físicos.

En cuanto al circuito neumático que acciona el sistema de puesta a tierra se realizó un esquema donde se representan los componentes que lo conforman y su conexión. En el Anexo G.1 se encuentra el plano del sistema de control electro neumático para la puesta a tierra.

CAPÍTULO TRES

“Nada es demasiado maravilloso para ser cierto si obedece a las leyes de la naturaleza.”
Michael Faraday

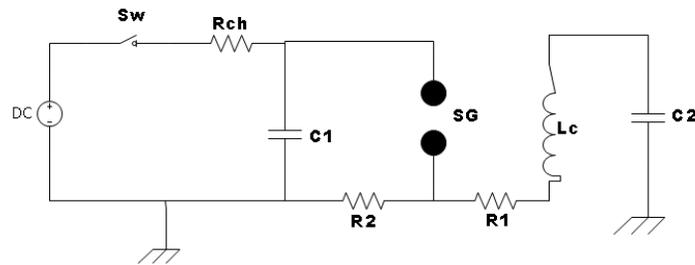
En este capítulo se presenta la simulación del generador de impulso de tensión tipo rayo en las herramientas computacionales PSPICE Y ATP y los procedimientos para obtener la forma de onda normalizada, partiendo de del ingreso de los valores de cada uno de los elementos del generador. Como resultado de las simulaciones, se definió un circuito equivalente del generador que permitió descifrar el correcto ensamble y conexión del generador.

3 SIMULACIÓN DEL GENERADOR DE IMPULSO.

3.1 SIMULACIÓN DE UNA ETAPA

Tomando como referencia la configuración recomendada por el manual del generador de impulso HIPOTRONICS de la empresa, se diseñó el circuito equivalente de la figura 50 para simularlo en los software OrCAD-PSpice y ATPDraw y poder representar la forma de onda aproximada del generador de impulso tipo rayo.

Figura 50. Circuito equivalente del generador de impulso.



Fuente: Manual del generador de impulso HIPOTRONICS.

Dónde:

SW=Interruptor de protección de la fuente DC

Rch=Resistencia de carga

C1=Condensador de etapa

C2=Sumatoria de las capacitancias del objeto de prueba, condensador de precarga y divisor de tensión.

Lc=Inductancia del conductor de alta tensión.

SG=Spark Gap

R1=Resistencia de frente de onda

R2=Resistencia de cola de onda

Sabiendo que la capacitancia por etapa con la configuración actual del generador es de $1\mu\text{F}$ en promedio, se procedió a encontrar los valores de resistencia de frente y cola de onda que generen una forma de onda normalizada $1,2/50\ \mu\text{s}$ utilizando las ecuaciones (14) y (15),

$$R1 = \frac{1}{2 * C2} \left[\left(\frac{1}{\alpha1} + \frac{1}{\alpha2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha1} + \frac{1}{\alpha2} \right)^2 - \frac{4(C1' + C2)}{C1' * \alpha1 * \alpha2}} \right] \quad (14)$$

$$R2 = \frac{1}{2(C1'+C2)} \left[\left(\frac{1}{\alpha1} + \frac{1}{\alpha2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha1} + \frac{1}{\alpha2} \right)^2 - \frac{4(C1'+C2)}{C1' * \alpha1 * \alpha2}} \right] \quad (15)$$

Donde:

$\frac{1}{\alpha1}$ y $\frac{1}{\alpha2}$ = Constantes de tiempo

$C1'$ = Capacitancia equivalente en serie de todas las etapas del generador de impulso.

$R1$ = Resistencia de frente de onda

$R2$ = Resistencia de cola de onda

$C2$ = Sumatoria de las capacitancias del objeto de prueba, condensador de precarga y divisor de tensión.

En la tabla 10, se muestran los valores de las constantes de tiempo $\frac{1}{\alpha1}$ y $\frac{1}{\alpha2}$ para diferente tiempo de frente $T1$, tiempo de cola $T2$ y tiempo pico Tp . Todos los tiempos expresados en μs .

Tabla 10. Constantes de tiempo para algunas formas de onda estandarizadas.

T1/T2 [μs]	$Tp/T2$ [μs]	$1/\alpha1$ [μs]	$1/\alpha2$ [μs]
1.2/5	-	3.48	0.80
1.2/50	-	68.2	0.405
1.2/200	-	284	0.381
250/2500	-	2877	104
-	250/2500	3155	62.5

Fuente: High Voltage Engineering Fundamentals

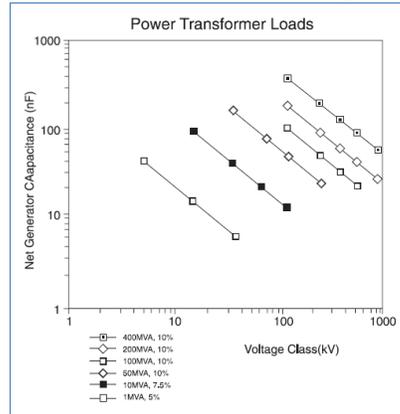
Para definir los valores de capacitancia de carga ($C2$) en la figura 51 se observa la capacitancia neta que debe tener el generador para diferentes valores de capacitancia de carga.

De la ecuación para el rendimiento se concluye que el rendimiento depende de la expresión $\frac{C2}{C1}$

$$n = \frac{1}{1 + \frac{C2}{C1}} \quad (16)$$

La figura 52 muestra que ocurre un rendimiento máximo cuando $\frac{C2}{C1} = 0,05$; por lo tanto $C1$ debe ser $20C2$ para obtener un buen rendimiento del generador.

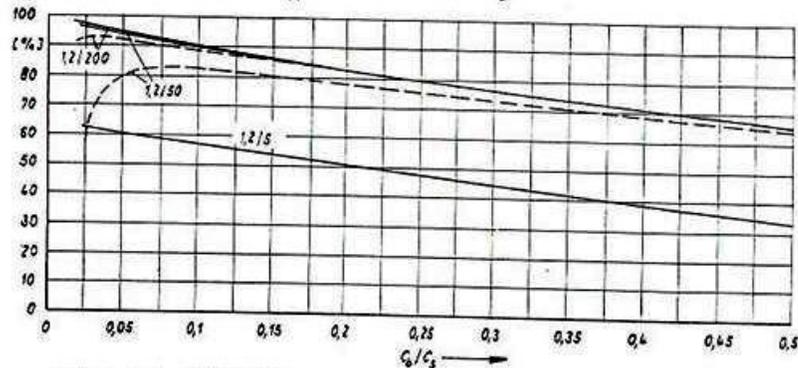
Figura 51. Capacitancia neta del generador vs carga.



Load Range Data.

Fuente: HV Impulse Test Equipment-HIPOTRONICS.

Figura 52. Rendimiento del generador de impulsos.



Fuente: Marco referencial de los generadores de impulso-INDUCOR

Si la capacitancia neta del generador para una etapa es $C_1 = 1 \mu F$ entonces, $C_2 \leq 50 nF$. Los demás elementos son, $R_{ch} = 15 k\Omega$ y $V_{dc} = 200 kV$. Se reemplazan los valores en las ecuaciones (14) Y (15) se obtiene, $R_1 = 8,51 \Omega$ y $R_2 = 64,93 \Omega$.

Para verificar que se cumplen los tiempos $1,2 \pm 30\%$ y $50 \pm 20\% \mu s$, se utilizan las ecuaciones (17) y (18),

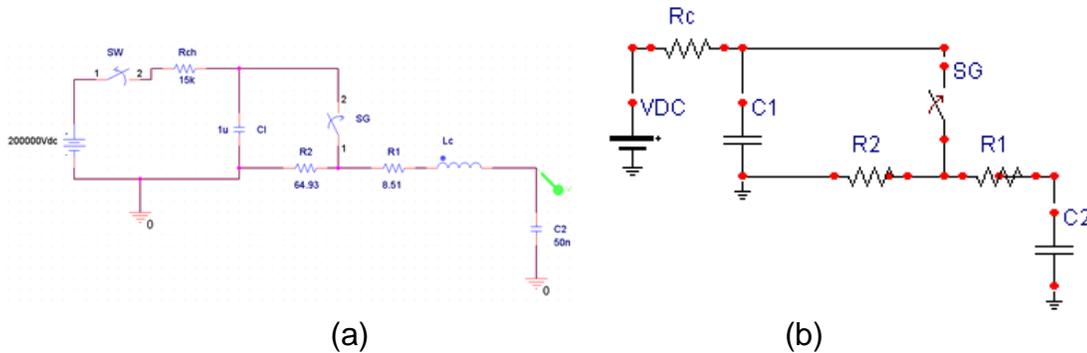
$$t_1 = 3R_1 \frac{C_1 * C_2}{C_1 + C_2} \tag{17}$$

$$t_2 = 0,69(R_1 + R_2)(C_1 + C_2) \tag{18}$$

Reemplazados los valores en las ecuaciones se obtiene un tiempo de frente $t_1 = 1,22 \mu s$ y un tiempo en el cuál la tensión disminuye al 50% de su valor pico $t_2 = 53,2 \mu s$ cumpliéndose las tolerancias especificadas por la IEEE std.4-1995.

En el software ATPDraw y OrCAD Pspice se representó el spark Gap como un interruptor esto se aprecia en la figura 53.

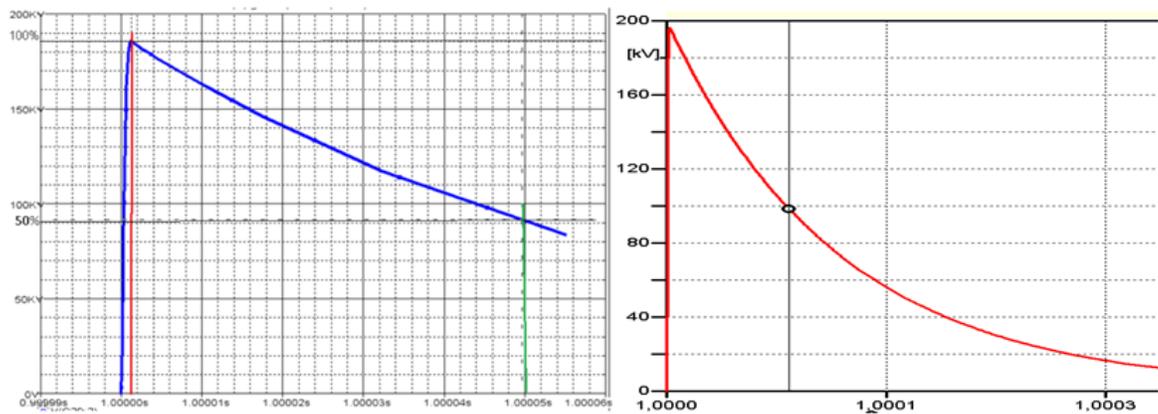
Figura 53. Circuito generador de impulso. (a) Circuito en OrCAD Pspice. (b) Circuito en ATPDraw.



Fuente: Autores

En las gráficas que se muestran en la figura 54 se puede observar que el tiempo t_1 y t_2 , son similares a los encontrados matemáticamente utilizando las ecuaciones (17) y (18). Además se ve una diferencia en la forma de onda de las dos gráficas, esto es debido a que el software OrCAD permite visualizar con mayor resolución en comparación al programa ATP.

Figura 54. Tensión de impulso en OrCAD Pspice (Izquierda) y ATP Draw (Derecha)



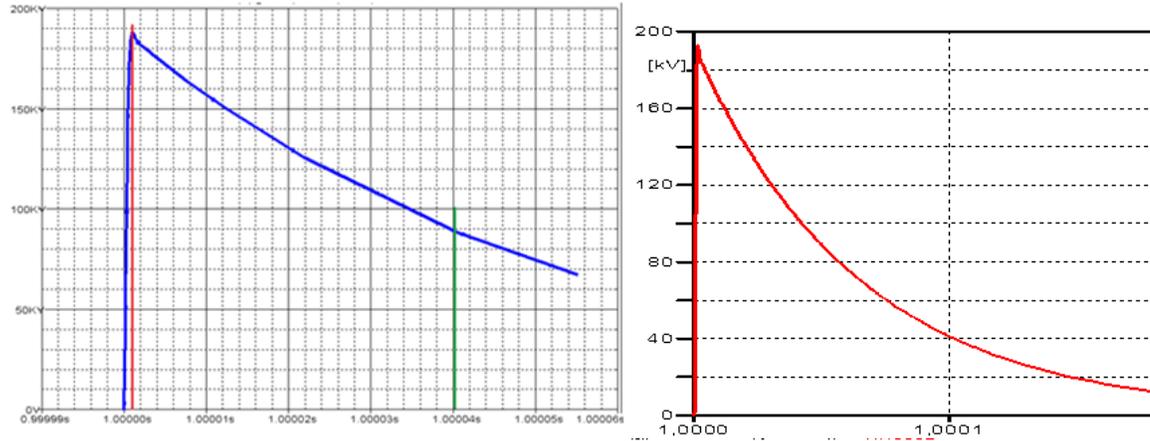
Fuente: Autores

A continuación se hizo la simulación de una etapa del generador con los valores reales de las resistencias que hacen parte del inventario e incluyendo una inductancia aproximada de 5mH para el conductor de alta tensión obteniéndose las curvas que se muestran en la figura 55.

Se eligen tres resistencias de frente en paralelo con base en los calculados con la herramienta desarrollada en Excel. (Anexo H), se seleccionaron resistencias de 20,9 Ω , 21 Ω y 21,1 Ω obteniendo $R_1=7 \Omega$. Para obtener $R_2=51,4 \Omega$ se escogieron dos resistencias en paralelo de 103 Ω y 102,8 Ω . Al reemplazar estos valores en

las ecuaciones (17) y (18). Da como resultado un tiempo de frente $t_1=1 \mu s$ y un tiempo de cola $t_2=42,3 \mu s$.

Figura 55. Formas de onda obtenidas para valores de resistencia reales.



Fuente: Autores

El efecto inductivo se ve reflejado en las oscilaciones que se presentan en la cresta de la onda, sin embargo, los tiempos siguen siendo similares a los calculados con las ecuaciones (14) y (15) y están dentro de la tolerancia permitida por la IEEE standard 4 de 1995, ésta también recomienda usar una resistencia amortiguadora (R_d) en el conductor de alta tensión cuando las oscilaciones superan el 5% de la tensión de cresta, el valor de esta resistencia se calcula con la ecuación (19).

$$R_d = 2 * \sqrt{\frac{Lc}{C2}} \quad (19)$$

R_d =Resistencia amortiguadora. [Ω].

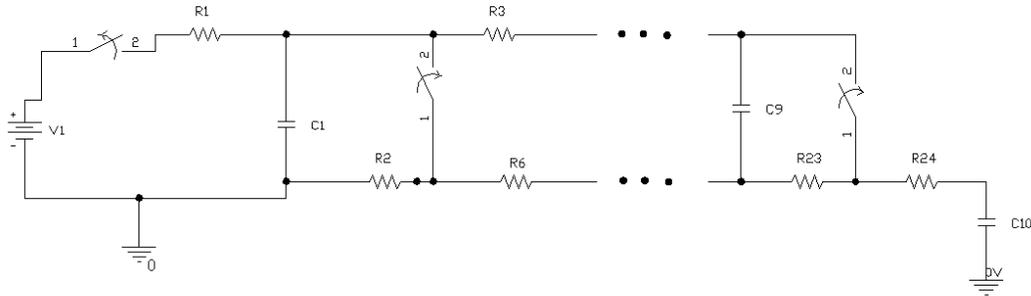
Lc =Inductancia del conductor de alta tensión. [H].

$C2$ =Capacitancia de la carga del generador de impulso. [F].

3.2 SIMULACIÓN DE LAS OCHO ETAPAS DEL GENERADOR

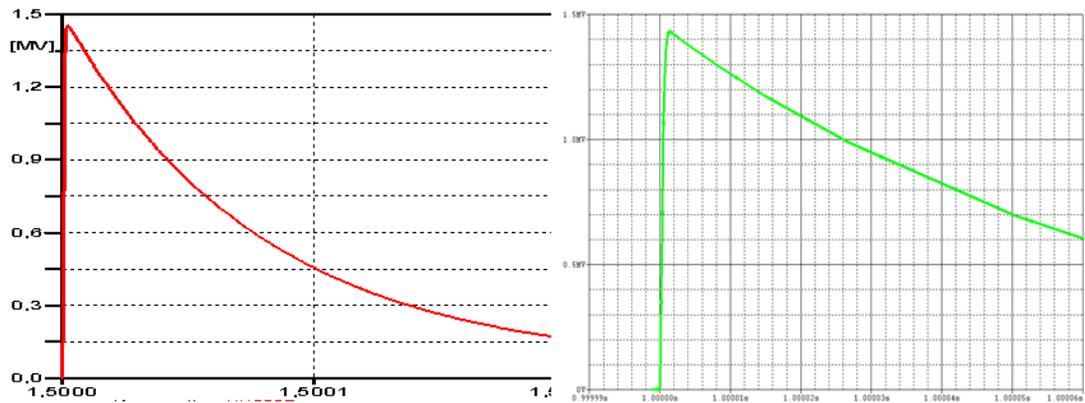
Con el fin de entender el comportamiento eléctrico del generador, poder ensamblarlo correctamente y aproximar los valores de las resistencias necesarias para la generación de la onda tipo rayo se realizó la simulación del circuito mostrado en la figura 56.

Figura 56. Sección del circuito utilizado en la simulación del generador de ocho etapas.



Fuente: Autores

Figura 57. Tensión obtenida de las ocho etapas del generador en ATP (Izquierda) y OrCAD (Derecha).



Fuente: Autores

Finalmente se realizó una guía práctica para la simulación de este tipo de circuitos en ATP Draw y OrCAD Pspice. Esta guía se encuentra en el Anexo I.

CONCLUSIONES

- La aplicación de nuevas tecnologías y el crecimiento de la industria, ha hecho que la demanda de energía eléctrica aumente haciendo que cada vez se expandan más los circuitos de transmisión, exponiéndolos a descargas atmosféricas, contaminación ambiental, entre otros factores que afectan la calidad del aislamiento. Es por esta razón, que las pruebas que se realicen a los elementos del sistema eléctrico de potencia, deben ser lo más acertadas posible y han de brindar la mayor confiabilidad, se hace necesario que las empresas del sector eléctrico, implementen más y mejores equipos de laboratorio para garantizar una mayor eficiencia en la prestación de servicios, supliendo la demanda del mercado nacional e internacional.

El generador de impulso de tensión tipo rayo es un equipo que permite generar una descarga atmosférica directamente sobre el elemento a probar, esto se convierte en una gran ventaja ya que se pueden predecir fallas de una manera pronta y así evitar las consecuencias que podría traer una falla en el circuito o la red de transmisión durante su operación.

- Es importante resaltar la importancia del uso de herramientas computacionales, como ATPDraw y OrCAD Pspice, para el modelamiento y simulación de circuitos de prueba de alta tensión, como es el caso de los generadores de impulso de tensión, donde el circuito básico corresponde a un circuito RC, el cual en principio parece ser fácil de analizar, pero los efectos capacitivos e inductivos de la alta tensión y alta frecuencia, ocasionan un comportamiento diferente a los circuitos RC de baja tensión.
- El análisis de los oscilogramas de tensión, es importante para entender el comportamiento de los aislamientos sometidos a un impulso de tensión, y así determinar si la prueba fue satisfactoria o no.
- El generador de impulso de tensión tipo rayo que se ensambló en INDUSTRIAS EXPLORER, es la etapa inicial de un proceso de estudio basado en pruebas y recolección de datos, para lograr que este equipo este funcionando y alcance su máxima capacidad sin ningún inconveniente, es necesario apoyarse en las pautas que se dejan en este documento que son el resultado de la recolección de datos de las pruebas realizadas, análisis de los planos estructurales, de conexión y sistemas que componen el generador.

RECOMENDACIONES

- Considerando que el generador ensamblado es del año 1994, y su etapa de control ha presentado inconvenientes además de que sus elementos se encuentran obsoletos, se propone la implementación de un modelo de control a partir de un controlador lógico programable PLC, reemplazando las compuertas lógicas y simplificando el cableado de control.
- El equipo debe ser reubicado a un sitio más amplio y con mayor altura debido a que donde se encuentra ubicado se presenta acumulación de polvo y humedad.
- Antes de energizar el equipo se recomienda leer la guía de operación del mismo con el fin de evitar posibles accidentes o poner en riesgo a las personas y al equipo.
- Se recomienda el uso del programa en EXCEL elaborado para el cálculo de resistencias de frente y cola, el cual facilita la obtención de los tiempos de frente y cola de la onda, reduciendo las pruebas a tensión reducida y ahorrando tiempo en la ejecución de la prueba.
- Adquirir los elementos faltantes que no fueron importados tales como circuitos integrados, cables multiconductor y cilindros neumáticos para lograr poner a punto el generador de impulsos.
- Ensamblar las etapas faltantes del generador de impulso que no fueron ensambladas por falta de espacio, para que no se pierdan sus elementos que se encuentran en riesgo de pérdida o daño.
- Realizar la calibración del divisor de tensión para su uso con el generador Hipotronics y el generador Haefely ensamblado en el año 2012.

BIBLIOGRAFÍA

ABB. Testing of Power Transformers. Routine tests, Type tests and Special Tests. Zürich.: Pro Print GmbH, 2003. 296 p. ISBN 3-00-010400-3.

ALBELLA MARTÍN, José María. Láminas delgadas y recubrimientos. Preparación, propiedades y aplicaciones. Madrid.: CSIC Press, 2003. 704 p.

ARORA, Ravindra. High voltage Engineering. IIT Kanpur. Disponible En:. http://nptel.ac.in/courses/108104048/ui/Course_home5_29.htm.

BEDOYA BEDOYA, Duvier y ROLDAN, Francisco. Diseño Y Construcción De Un Espinterómetro Para Un Generador De Impulso De Alta Tensión. En: Scientia et Technica Año XI No 28 Octubre de 2005 UTP. ISSN 0122-1701.

CARROLL, John. CASAS, Jorge. y FINK, Donald. Manual práctico de electricidad para ingenieros. España.: Reverté, 1981. ISBN 84-291-3026-8.

CEDIEL ZAMBRANO, Vilensky Aldrin. Diagnóstico del generador de impulsos de la empresa C.A.I.V.E.T. Informe final de pasantía. Ingeniero Electricista. Buruta: Universidad Simón Bolívar. Coordinación de Energía Eléctrica, 2006. 121 p.

COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 90708 (30, agosto, 2013). Por la cual se expide el nuevo Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas-RETIE. Bogotá D.C.: El Ministerio, 2013. 205 p.

FERRACCI, Philippe. Cuaderno Técnico nº 190. La ferorresonancia. Traducido por P. Rodón. Barcelona.: Schneider Electric España S.A, 2000. 31 p.

GALLO, Juan y VILLEGAS, Carlos. Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión. Guayaquil: ESPOL, 2009.

GARCÍA, Diego Fernando y RINCÓN, Diego Fernando. Diseño y construcción de un generador de impulso de voltaje de 10 kV. Tecnura, vol 12, no. 24, 2009, p. 4-13.

GONZÁLES VIVAS, Orlando y OTALORA CHAPARRO, Yebrail. Simulación y aplicación de la prueba de impulso tipo rayo 2000 kV para la evaluación del aislamiento eléctrico interno en transformadores de potencia. Tesis Ingeniero Electromecánico. Duitama: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Ingeniería Electromecánica. 2014.

HIPOTRONICS, The measure of a leader. HV Impulse Test Equipment. 200 Series Impulse Generators. Hipotronics Inc. Brewster, N.Y, 2009. 28 p.

HIPOTRONICS, The measure of a leader. User's Guide. Model: D Series Impulse Generator. Brewster N.Y.: Hipotronics. Inc, 1994.

INDUCOR INGENIERÍA, Electrical Testing Group. Marco referencial de los generadores de impulsos. Inducor Ingeniería S.A. Argentina, 2009. 50 p.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing. IEEE Std 4-1995. New York.: IEEE, 1995. 129 p.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Standard for Insulation Coordination-Definitions, Principles and Rules. IEEE Std C62.82.1-2010. New York.: IEEE, 2011. 22 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Bogotá D.C.: El instituto, 2008. 36 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Protección Contra Rayos. Principios generales. NTC 4552. Bogotá D.C.: El instituto, 2004. 45 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Referencias Bibliográficas. Contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá D.C.: El instituto, 2008. 33 p.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. High-voltage test techniques –Part 1: General definitions and test requirements. IEC 60060-1. 3 ed. Geneve, Suiza.: IEC, 2010. 154 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Documentation. Abstracts for publications and documentation. ISO 214:2000. Geneve, Suiza.: ISO, 2000. 6 p.

JIMÉNEZ MEZA, Obed Renato. Subestaciones eléctricas. Transformador de potencial y corriente. Nuevo León.: FIME, 2005. 34 p.

LUCAS, J. Rohan. High Voltage Engineering. Sri Lanka.: University of Moratuwa, 2001. 204 p.

MEGGER, Group Limited. Evaluación de Estado de Equipos de Subestación. Norristown USA.: Megger, 2006. 40 p.

SIMON COMIN, Pascual. Investigación de los parámetros característicos del comportamiento de medios dieléctricos frente a sobretensiones tipo rayo no

normalizadas en alta tensión. Tesis Doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, 2004. 197 p.

TORRES SÁNCHEZ, Horacio. *¿Qué rayos Sabemos?* Academia Colombiana de Ciencias Exactas. Bogotá D.C. Junio, 2010, vol. 34, no. 131. ISSN 0370-3908.

TORRES SÁNCHEZ, Horacio. Norma técnica colombiana de protección contra rayos. En: Seminario internacional seguridad, riesgo, calidad y protecciones eléctricas, Medellín, Colombia, 2006.

TORRES SÁNCHEZ, Horacio. Protección contra rayos. 2 ed. Bogotá D.C.: Instituto Colombiano de normas Técnicas y Certificación, ICONTEC, 2010. 425 p.

UNAL, <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ingenieria/2001601/cap06/Aplica03.html>

VIKON, Conductores Monterrey . Equipo eléctrico y su aplicación. En: Manual Eléctrico. 2 ed México D.F. Conductores Monterrey S.A. de C.V, 2011. p. 156-336.

ANEXOS

- A. Inventario de resistencias
- B. Cotizaciones.
- C. Pruebas previas.
- D. Datasheets circuitos integrados
- E. Manual de procedimientos
- F. Programa en PLC para el control del generador de impulso de tensión
- G. Planos
- H. Herramienta para el cálculo de resistencias
- I. Guia práctica de simulación