

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA ELÉCTRICA



**“Desarrollo de una norma de pruebas en alta  
tensión basada en el generador de impulsos de  
la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la  
Universidad de El Salvador”**

PRESENTADO POR:

**SAÚL ERNESTO JAIME GÓMEZ**

**CARLOS EDUARDO RAMÍREZ ZAMORA**

PARA OPTAR AL TITULO DE:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE DE 2009

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTOR :**

**MSc. RUFINO ANTONIO QUEZADA SÁNCHEZ**

**SECRETARIO GENERAL :**

**LIC. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

**DECANO :**

**ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO**

**SECRETARIO :**

**ING. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ**

**ESCUELA DE INGENIERIA ELÉCTRICA**

**DIRECTOR :**

**ING. JOSÉ WILBER CALDERÓN URRUTIA**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

Título :

**“Desarrollo de una norma de pruebas en alta  
tensión basada en el generador de impulsos de  
la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la  
Universidad de El Salvador”**

Presentado por :

**SAÚL ERNESTO JAIME GÓMEZ  
CARLOS EDUARDO RAMÍREZ ZAMORA**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director :

**ING. LUIS ROBERTO CHÉVEZ PAZ.**

San Salvador, Noviembre de 2009.

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director :

**ING. LUIS ROBERTO CHÉVEZ PAZ.**

## ACTA DE CONSTANCIA DE NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, 5 de Noviembre de 2009, en la Sala de Lectura, a las 18:00 horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. José Wilber Calderón Urrutia  
Director
2. Ing. Salvador de Jesús German  
Secretario

Firma:

Wilber Calderón



Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

Firma:

- 1- Ing. Eduin Ruyé Mendoza
- 2- Ing. Armando Martínez Calderón

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

“Desarrollo de una norma de pruebas en alta tensión basada en el generador de impulsos de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador”

A cargo de los Bachilleres:

JAIME GÓMEZ, SAÚL ERNESTO  
RAMÍREZ ZAMORA, CARLOS EDUARDO

Habiendo obtenido el presente Trabajo una nota final, global de: 8.0

( Ocho punto cero )

## **AGRADECIMIENTOS.**

- Primeramente a Dios Todopoderoso por su ayuda, amparo y fortaleza en todos los momentos de mi vida.
- A mis padres René Ricardo y Ana María por toda su comprensión, consejos e imprescindible apoyo aún en los momentos más difíciles.
- A mi abuela Angelita por sus oraciones e intercesión permanente para que la voluntad de Dios se haga en mi vida.
- A mi hermano René Ricardo por su soporte técnico, colaboración desinteresada y por su amistad, gracias.
- A mi tía Frida por acogerme en su hogar cuando más lo necesité.
- A mis tías Tita y Nora por su aporte y confianza desde el principio de este proyecto, aun cuando no habían resultados palpables.
- A mi amigo y compañero de tesis “Carlitos” por todas las vivencias durante la carrera.
- A Juancito por todo su auxilio en momentos turbulentos.
- A todos los docentes que a lo largo de mi estudio brindaron mucho conocimiento a mi persona.
- A todos los compañeros y amigos de la EIE, gracias.

**Saúl Ernesto Jaime Gómez.**

## AGRADECIMIENTOS.

- A mi Señor, Dios todopoderoso, por el Don de la vida, por su infinito amor manifiesto en mi vida, por su infinita misericordia, por dar a su Hijo Único Mi Señor y Salvador Jesucristo que murió por mí, por brindarme salud, darme de su paz, por derramar por medio de su Espíritu Santo sabiduría e inteligencia, por guiar mis pasos; pero sobre todo por darme el título más importante en mi vida el ser un Hijo de Dios y reglarme así la Vida Eterna.
- A mi mamá, María de los Ángeles Zamora, por su interminable amor, por su cariño, comprensión, consejos, apoyo incondicional, protección y cuidado, por dar siempre más de lo que se puede dar, por sus muchos sacrificios tanto físicos y económicos, por haber inculcado en mí la cultura del estudio y de la responsabilidad. ¡Gracias mamá!
- A mi papá, Carlos Ernesto Ramírez, por su amor, por su apoyo, por sus consejos, por ser siempre el proveedor de mi casa, por ser siempre ese ejemplo de superación a pesar de la adversidad, por haberme regalado la bendición de poder estudiar. ¡Gracias Papá!
- A mis hermanas Verónica y Karla, por su apoyo, por su comprensión, por preocuparse por mí y darme siempre su apoyo incondicional.
- A mi abuelito Tino, por ser siempre ese ejemplo de trabajo arduo y sin descanso, por brindarme su cariño, por ser un segundo papá en mi vida, por estar siempre allí como un apoyo inigualable e incondicional.
- A mis abuelitos Chico (QDEP), Mila y Blanca por su cariño, consejos, y amor que me han brindado.
- A mi tío Juan (QDEP), estoy seguro que usted hubiera estado feliz por este logro, gracias por ser ese ejemplo de constante superación.
- A mi amada novia, Adriana Olivares, por brindarme su amor, amistad, paciencia, comprensión, apoyo, por estar siempre a mi lado incondicionalmente, junto con tu familia representan una gran bendición en mi vida.
- A mi hermanito más pequeño Gabrielito, tus te quiero mucho alegran mis días, sin duda alguna eres un ángel de Dios en mi vida.
- A mi compañero en este proyecto Saúl, gracias por la paciencia y los momentos vividos durante el desarrollo de nuestra carrera y de este trabajo.
- A mi amada Comunidad Católica El Salvador del Mundo, por ser ese canal de bendición en mi vida, por instruirme y guiarme en base a la Palabra de Dios, por darme la oportunidad de crecer en mi vida y servirle a mi Señor en mi amado grupo Jerusalén, donde Dios me prometió este logro personal, que ahora es una promesa hecha vida, gracias a todos mis hermanos en Cristo, principalmente a mi pastor René Alvarenga y a mi mejor amiga Fátima Valencia, sus palabras siempre me dieron aliento.
- A todos mis maestros tanto de mi etapa escolar como universitaria, por su ayuda, conocimiento transmitido, paciencia y dedicación.
- A los laboratoristas de la EIE, Sr. Posada y Juan Olano, gracias por su apoyo y ayuda brindada en el desarrollo de este trabajo de graduación.
- A todos mis compañeros de estudio, por compartir años inolvidables.
- A la empresa en la que laboro, EDESAL S.A. de C.V., por el apoyo constante, comprensión y paciencia, especialmente a mis jefes Ing. Leonel Bolaños e Ing. Francisco Solano.

**Carlos Eduardo Ramírez Zamora.**

## TABLA DE CONTENIDOS.

<b>INTRODUCCION.</b> .....	<b>6</b>
<b>PREFACIO.</b> .....	<b>8</b>
<b>P.1. ENSAYOS EN ALTA TENSION.</b> .....	<b>8</b>
<b>P.2. NIVEL BASICO DE AISLAMIENTO AL IMPULSO POR RAYO (NBI)</b> .....	<b>9</b>
<b>P.3. IMPULSOS DE TENSION.</b> .....	<b>10</b>
P.3.1. Impulsos tipo rayo y tipo maniobra. ....	10
<b>P.4. GENERACION EN LABORATORIO DE IMPULSOS TIPO RAYO.</b> .....	<b>11</b>
P.4.1. Generadores de varias etapas. ....	13
P.4.1.1. Fase de carga. ....	14
P.4.1.2. Fase de descarga. ....	14
<b>P.5. EL GENERADOR DE IMPULSOS TIPO RAYO DE LA ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR</b> .....	<b>15</b>
<b>NORMA DE PRUEBAS DE ALTA TENSION BASADAS EN EL GENERADOR DE IMPULSOS DE LA ESCUELA DE INGENIERIA ELÉCTRICA DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.</b> .....	<b>17</b>
<b>CAPITULO I.ASPECTOS GENERALES</b> .....	<b>17</b>
Artículo 1. CAMPO DE APLICACIÓN. ....	17
Artículo 2. OBJETO DE ESTAS NORMAS. ....	17
Artículo 3. CRITERIOS DEL EQUIPO PARA ENSAYOS. ....	17
<b>CAPITULO II. DEFINICIONES GENERALES PARA ENSAYOS DE IMPULSO TIPO RAYO.</b> .....	<b>17</b>
Artículo 4. IMPULSOS. ....	17
Artículo 5. IMPULSOS TIPO RAYO. ....	18
Artículo 6. DESCARGA DISRUPTIVA EN IMPULSOS TIPO RAYO.....	18
Artículo 7. VALOR DE LA TENSION DE ENSAYO EN UN IMPULSO TIPO RAYO.....	19
Artículo 8. TENSION DE DESCARGA DISRUPTIVA DE UN OBJETO BAJO ENSAYOS DE IMPULSO TIPO RAYO.....	19
Artículo 9. CARACTERÍSTICAS ESTADÍSTICAS DE LAS TENSIONES DE DESCARGA DISRUPTIVA PARA ENSAYOS DE IMPULSO TIPO RAYO.....	19
Artículo 10. PROBABILIDAD DE DESCARGA DISRUPTIVA P DE UN OBJETO EN ENSAYO DE IMPULSO TIPO RAYO. ....	19
Artículo 11. PROBABILIDAD DE TENSION SOPORTADA Q DE UN OBJETO EN ENSAYO DE IMPULSO TIPO RAYO.....	19
Artículo 12. TENSION 50% DE DESCARGA DISRUPTIVA $U_{50}$ DE UN OBJETO EN ENSAYO DE IMPULSO TIPO RAYO. ....	19

**CAPITULO III. CLASIFICACION DE LOS AISLAMIENTOS EN LOS OBJETOS EN ENSAYO..... 20**

Artículo 13. CLASIFICACION DE AISLAMIENTOS. .... 20  
Artículo 14. AISLAMIENTO EXTERNO..... 20  
Artículo 15. AISLAMIENTO INTERNO..... 20  
Artículo 16. AISLAMIENTO AUTORREGENERABLE..... 20  
Artículo 17. AISLAMIENTO NO AUTORREGENERABLE..... 20

**CAPITULO IV. CORRECCION ATMOSFERICA DE LA TENSION DE IMPULSO..... 21**

Artículo 18. ATMOSFERA NORMALIZADA DE REFERENCIA..... 21  
Artículo 19. CALIBRACION DE LOS DISPOSITIVOS DE MEDIDA DE LAS CONDICIONES ATMOSFERICAS AL MOMENTO DEL ENSAYO..... 21  
Artículo 20. FACTORES DE CORRECCION ATMOSFERICA..... 22  
Artículo 21. TENSION DE IMPULSO TIPO RAYO CORREGIDA..... 22  
Artículo 22. TENSION DE IMPULSO TIPO RAYO DE REFERENCIA..... 22  
Artículo 23. CONDICIONES ATMOSFERICAS DURANTE EL ENSAYO..... 22  
Artículo 24. FACTOR DE CORRECCIÓN DE LA DENSIDAD DEL AIRE  $K_d$ ..... 22  
Artículo 25. FACTOR DE CORRECCIÓN DE LA HUMEDAD  $K_h$ ..... 23  
Artículo 26. EXPONENTES  $m$ ,  $n$  y  $w$  PARA EL CALCULO DEL FACTOR DE CORRECCIÓN DE LA DENSIDAD DEL AIRE  $K_d$  Y DEL FACTOR DE CORRECCIÓN DE LA HUMEDAD  $K_h$ ..... 25

**CAPITULO V. CARACTERISTICAS Y PARAMETROS DE LA FORMA DE ONDA DE IMPULSO TIPO RAYO..... 26**

Artículo 27. IMPULSO TIPO RAYO PLENO..... 26  
Artículo 28. DURACION DEL FRENTE  $T_1$ ..... 26  
Artículo 29. ORIGEN CONVENCIONAL  $O_1$ ..... 26  
Artículo 30. DURACIÓN HASTA EL VALOR MITAD  $T_2$ ..... 26  
Artículo 31. IMPULSO TIPO RAYO NORMALIZADO..... 26  
Artículo 32. TOLERANCIAS DE LOS PARAMETROS DE LA FORMA DE ONDA DE IMPULSO TIPO RAYO NORMALIZADO..... 27  
Artículo 33. IMPULSO TIPO RAYO CORTADO..... 27  
Artículo 34. INSTANTE DEL CORTE EN IMPULSOS TIPO RAYO CORTADOS..... 28  
Artículo 35. DURACION HASTA EL INSTANTE DE CORTE  $T_c$ ..... 28  
Artículo 36. CARACTERISITCAS RELACIONADAS CON LA CAIDA DE TENSION DURANTE EL CORTE..... 28  
Artículo 37. IMPULSO TIPO RAYO CORTADO NORMALIZADO..... 28

**CAPITULO VI. METODOS DE INICIO DE LA DESCARGA DEL GENERADOR DE IMPULSOS DE LA EIE-UES..... 29**

Artículo 38. INICIO DE LA DESCARGA ENTRE LAS ESFERAS DE CADA ETAPA DEL GENERADOR..... 29

**CAPITULO VII. MEDIDA DE LA TENSION DE IMPULSO TIPO RAYO DE LOS ENSAYOS Y DETERMINACION DE LA FORMA DE IMPULSO..... 30**

Artículo 39. SISTEMA DE MEDICION DE LA TENSION DE IMPULSO TIPO RAYO..... 30  
Artículo 40. EL ESPINTEROMETRO DE PRUEBA..... 30  
Artículo 41. EL ESPINTEROMETRO DE ESFERAS..... 31  
Artículo 42. ESPECIFICIONES Y DIMENSIONES DE LAS ESFERAS PARA LAS DEL ESPINTEROMETRO DE LA EIE-UES..... 31  
Artículo 43. DIMENSIONES DE SOPORTES Y BASES Y LAS DIMENSIONES DEL LOCAL DE ENSAYO PARA EL ESPINTEROMETRO DE MEDICION DE LA EIE-UES..... 32

Artículo 44. CARACTERISTICAS ELECTRICAS DEL ESPINTEROMETRO DE MEDICION DE LA EIE-UES.....	33
Artículo 45. TENSIONES ESTANDAR MEDIBLES A PARTIR DEL ESPINTEROMETRO DE LA EIE – UES.....	33
Artículo 46. RESISTENCIA SERIE EN EL CIRCUITO DE MEDICION.....	34
Artículo 47. MEDICION DE LA TENSION DE IMPULSO TIPO RAYO MEDIANTE EL DIVISOR DE TENSION Y EL OSCILOSCOPIO.....	35
Artículo 48. DIVISOR DE TENSION CAPACITIVO DE LA ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.....	35
Artículo 49. CABLE COAXIAL DE CONEXIÓN DE DIVISOR CAPACITIVO DE TENSION Y OSCILOSCOPIO [4].....	36
<b>CAPITULO VIII. CALIBRACION DEL OSCILOSCOPIO MEDIANTE EL ESPINTEROMETRO DE MEDICION.....</b>	<b>37</b>
Artículo 50. CALIBRACION DE OSCILOSCOPIO PARA LA MEDICION DEL VALOR DE TENSION DE IMPULSO TIPO RAYO.....	37
Artículo 51. FACTOR DE AJUSTE PROMEDIO.....	37
Artículo 52. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACION.....	37
Artículo 53. ERROR PROMEDIO [3].....	38
Artículo 54. DESVIACION ESTANDAR DE LOS FACTORES DE AJUSTE [3].....	38
<b>CAPITULO IX. PRUEBAS DE INTERFERENCIA PARA EL SISTEMA DE MEDIDA DEL GENERADOR DE IMPULSO TIPO RAYO.....</b>	<b>39</b>
Artículo 55. PROCEDIMIENTO DE LAS PRUEBAS DE INTERFERENCIA [3].....	39
<b>CAPITULO X. MODALIDAD DE ENSAYO DE DESCARGA DISRUPTIVA.....</b>	<b>40</b>
Artículo 56. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO ARRIBA-ABAJO (UP & DOWN).....	40
<b>CAPITULO XI. ENSAYOS DIELECTRICOS DE DESCARGAS DISRUPTIVAS EN AIRE CON ELECTRODOS PUNTA-PUNTA Y PUNTA-PLANO.....</b>	<b>41</b>
Artículo 57. RUPTURA DIELECTRICA EN AIRE.....	41
Artículo 58. RELACIONES MATEMATICAS PARA ELECTRODOS PUNTA-PUNTA Y PUNTA-PLANO.....	41
Artículo 59. FACTOR DE ELECTRODO O FACTOR GAP.....	42
Artículo 60. ESPINTEROMETROS PUNTA-PUNTA.....	42
Artículo 61. CARACTERISITICAS FISICAS DE UN ESPINTEROMETRO PUNTA-PUNTA.....	43
Artículo 62. VALORES DE TENSION DISRUPTIVA PARA ESPINTEROMETRO PUNTA-PUNTA.....	43
Artículo 63. PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR GAP PARA UN ESPINTEROMETRO PUNTA-PUNTA.....	44
Artículo 64. ESPINTEROMETRO PUNTA-PLANO.....	45
Artículo 65. CARACTERISITICAS FISICAS DE UN ESPINTEROMETRO PUNTA-PLANO.....	45
Artículo 66. PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR GAP PARA UN ESPINTEROMETRO PUNTA-PLANO.....	46
<b>CAPITULO XII. ENSAYOS DIELECTRICOS DE TENSION DE DESCARGA DISRUPTIVA PARA EL DIMENSIONAMIENTO ELECTRICO DEL AISLAMIENTO EN INSTALACIONES DE ALTA TENSION.....</b>	<b>46</b>
Artículo 67. DISTANCIA DE FASE A TIERRA PARA TENSIONES DE IMPULSOS TIPO RAYO.....	46
Artículo 68. CALCULO TEORICO DE LA TENSION DE DESCARGA DISRUPTIVA PARA AISLAMIENTO SOMETIDO A IMPULSOS DE TENSION TIPO RAYO.....	46
Artículo 69. NUMERO DE AISLADORES DIMENSIONADOS.....	47

**Artículo 70. CALCULO EXPERIMENTAL DE LA TENSION DE DESCARGA DISRUPTIVA PARA AISLAMIENTO SOMETIDO A IMPULSOS DE TENSION TIPO RAYO..... 47**

**REFERENCIAS..... 48**  
**ANEXO A. DESCRIPCION DEL GENERADOR DE IMPULSOS DE LA ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR. .... 49**

<b>A-1. PLATAFORMA METÁLICA CON RUEDAS.....</b>	<b>49</b>
A-1.1. Motor de doble sentido de rotación.....	49
A-1.2. Transductor de rotación.....	49
A-1.3. Dispositivo de Seguridad.....	49
A-1.4. Placa de conectores.....	50
A-1.5. Estructura Aislante.....	50
A-1.6. Capacitores de cada etapa.....	50
A-1.7. Resistencias de forma de onda.....	51
A-1.7.1. Resistencia de frente.....	51
A-1.7.2. Resistencia de cola.....	51
A-1.7.3. Resistencia de salida.....	51
A-1.8. Resistores de carga.....	52
A-1.9. Espinterómetros.....	52
A-1.10. Condensador Trigatrón.....	52
A-1.11. Generador de corriente continua.....	53
A-1.11.1. Transformador elevador.....	53
A-1.11.2. Capacitor de duplicación.....	53
A-1.11.3. Diodos rectificadores.....	53
A-1.11.4. Resistencias de protección para los diodos.....	54
A-1.11.5. Resistencia de medida.....	54
A-1.12. Capacitor de carga/divisor tipo ILCD.....	54
A-1.13. El espinterómetro de medición.....	55
<b>A-2. BANCO DE MANDO.....</b>	<b>56</b>
A-2.1. Sección de carga.....	57
A-2.1.1. Rango de Voltaje (Voltaje Range low/high).....	57
A-2.1.2. Intervalo de tiempo.....	57
A-2.1.3. Ajuste del voltaje de carga.....	58
A-2.1.4. Número de disparos.....	58
A-2.1.5. Conmutador SIGN./ MUL.....	58
A-2.1.6. Sección de seguridad.....	58
A-2.1.7. Sección de separación de los Spark Gap.....	59
A-2.2. Sección de disparo.....	59
A-2.2.1. Retardo del inicio.....	60
A-2.2.2. Control de recorte.....	60
A-2.2.3. Retardo del recorte.....	60
A-2.2.4. Sección de voltímetro de esferas.....	60
A-2.2.5. Indicador de la distancia de entre esferas.....	60
A-2.3. Unidad de potencia.....	60
A-2.3.1. Parte posterior de la consola de mando.....	61
A-2.3.2. Conector de puesta a tierra.....	61
A-2.3.3. Conector del explosor de medición (Aux Input NR2).....	61
A-2.3.4. Transducer.....	61
A-2.4. El Objeto bajo prueba.....	61
A-2.5. Ajuste del voltaje de carga y su polaridad.....	62
A-2.6. Ajuste del tiempo entre impulsos sucesivos.....	63
A-2.7. Ajuste de la distancia entre los explosores de las etapas.....	63

<b>ANEXO B. EVALUACION DE IMPULSOS DE TENSION SEGÚN IEC 60060-1.</b>	<b>65</b>
<b>ANEXO C. COMPROBACION DE PARAMETROS DE LA FORMA DE ONDA NORMALIZADA DE LA TENSION DE IMPULSO DEL GENERADOR DE IMPULSOS DE LA ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR MEDIANTE SIMULACION.....</b>	<b>69</b>
<b>ANEXO D. COMPROBACION DE PARAMETROS DE LA FORMA DE ONDA NORMALIZADA DE IMPULSO DE TENSION TIPO RAYO DEL GENERADOR DE IMPULSOS DE LA ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.....</b>	<b>74</b>
<b>ANEXO E. PRUEBAS PARA SELECCIÓN DE RESISTENCIA SERIE EN EL CIRCUITO DE MEDICION.....</b>	<b>78</b>
<b>ANEXO F. FACTOR DE AJUSTE DE OSCILOSCOPIO A PARTIR DEL ESPINTEROMETRO DE MEDICION.....</b>	<b>87</b>
<b>ANEXO G. PRUEBAS DE INTERFERENCIA EN EL CIRCUITO DE MEDICION DEL GENERADOR DE IMPULSOS TIPO RAYO DE LA EIE-UES.....</b>	<b>92</b>
<b>ANEXO H. PRUEBAS DIELECTRICAS EN AIRE CON ELECTRODOS PUNTA/PUNTA Y PUNTA/PLANO. ....</b>	<b>97</b>
<b>H-1. Construcción de prototipo de espinterómetro punta-punta. ....</b>	<b>97</b>
<b>H-2. Pruebas de tensión de impulso tipo rayo de descarga disruptiva para prototipo de espinterómetro punta-punta. ....</b>	<b>98</b>
<b>H-3. Construcción de prototipo de espinterómetro punta-plano. ....</b>	<b>106</b>
<b>H-4. Pruebas de tensión de impulso tipo rayo de descarga disruptiva para prototipo de espinterómetro punta-plano. ....</b>	<b>107</b>
<b>ANEXO I. PRUEBAS DIELECTRICAS DE IMPULSO TIPO RAYO EN AISLADORES.....</b>	<b>115</b>
<b>I-1. Aisladores de Suspensión.....</b>	<b>115</b>
<b>I-2. Pruebas de impulso tipo rayo en aisladores de suspensión.....</b>	<b>119</b>
<b>I-2.1. Ensayo para NBI de aisladores de suspensión a voltaje nominal de 13.2 kV. ....</b>	<b>119</b>
<b>I-2.2. Ensayo para NBI de aisladores de suspensión a voltaje nominal de 23 kV. ....</b>	<b>122</b>
<b>ANEXO J. FORMATO DE HOJA DE ENSAYOS DE NBI. ....</b>	<b>125</b>

## **INTRODUCCION.**

Cualquier instalación destinada a la generación, transporte o distribución de energía eléctrica cuya tensión nominal sea superior a 1000 V se denomina de alta tensión.

Las líneas, centrales, subestaciones o centros de transformación de alta tensión utilizan seccionadores, interruptores, interruptores automáticos, junto con materiales y equipos de alta tensión como cables, aisladores, transformadores y pararrayos. Su correcto diseño y funcionamiento dependen de la capacidad para soportar las distintas sollicitaciones climáticas, térmicas, mecánicas y eléctricas a las que estarán sometidos durante su vida útil.

Una de las sollicitaciones eléctricas más importantes son las sobretensiones transitorias que se pueden presentar en un lugar y en un instante determinado de la red eléctrica, cuyo valor de cresta es superior al de la tensión nominal de funcionamiento.

Las sobretensiones transitorias se clasifican como de frente lento, rápido y muy rápido. Las de frente lento están causadas habitualmente por maniobras en las redes, mientras que las de frente rápido tienen su origen principalmente en los efectos del rayo. Los de frente muy rápido son debidas a los efectos de reflexiones por maniobras en subestaciones aisladas con gas, o por la interrupción de interruptores automáticos de vacío en instalaciones de media tensión.

El rayo puede dar lugar a la aparición de sobretensiones en las líneas e instalaciones de alta tensión por uno de los mecanismos siguientes: por caída directa sobre una línea o instalación de alta tensión o por inducción cuando el rayo cae próximo a ella. El primer mecanismo es prácticamente el único que tiene influencia sobre las instalaciones de tensión nominal superior o igual a 132 kV, mientras que el segundo es el predominante en las instalaciones de redes de distribución.

El rayo en el momento de su impacto con el suelo alcanza aproximadamente la décima parte de la velocidad de la luz, sigue el modelo de una fuente de intensidad con una intensidad de descarga principal entre 1 y 200 kA. Cuando un rayo cae directamente sobre los conductores de fase o sobre los hilos de guarda o apoyos con flameo posterior del arco a las fases, se originan en los conductores de la línea ondas de elevadas. Estas ondas se propagan a lo largo de la línea, atenuándose en su recorrido y sometiendo al material eléctrico de alta tensión a la correspondiente sobretensión.

Por lo anterior, cualquier material independiente de su nivel de tensión debe ser capaz de soportar una tensión normalizada con forma de onda tipo rayo.

Los ensayos para comprobar que efectivamente los materiales y equipos de alta tensión satisfacen los niveles de tensión soportada se realizan en laboratorios de alta tensión según las normativas, que sirve de referencia para ensayos con tensiones con impulsos de tensión

El objetivo principal de someter los equipamientos a determinados ensayos es demostrar si ellos son aptos para soportar los requisitos especificados. De esta forma se tiene una garantía de que los equipamientos podrán operar satisfactoriamente en las condiciones del sistema, simuladas durante los ensayos.

Los ensayos orientados a las solicitudes de sobretensiones transitorias por rayos pueden realizarse utilizando el generador de impulsos tipo rayo de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador, en base a esto, y reproduciendo y adaptando ensayos descritos en normativas internacionales para ensayos en alta tensión, es como se ha desarrollado la presente normativa.

Tomando como base los ensayos descritos en las normas IEC 60060-1 "High Voltage Test Techniques", Parte1: General Definitions and test requirements y la norma IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing, IEEE Std 4-1995; de donde se han reproducido y adaptando estos a las características propias del generador de impulsos de la Escuela de Ingeniería Eléctrica es como se ha logrado desarrollar la presente normativa, la cual desarrolla principalmente los ensayos para la comprobación del nivel básico de aislamiento al impulso de rayo en equipos instalados en redes o instalaciones de alta tensión.

## PREFACIO.

### **P.1. ENSAYOS EN ALTA TENSION.**

Los ensayos en alta tensión son pruebas a niveles mayores de 1000 V, que se hacen a equipos tales como: aisladores, transformadores, pararrayos, conductores, cuchillas, etc; en los cuales estos se someten a condiciones simuladas para demostrar si ellos son aptos para soportar los requisitos o características propias de cada uno, especificadas por los fabricantes según el equipo.

De esta forma se tiene una garantía de que los equipamientos podrán operar satisfactoriamente en las condiciones reales del sistema, las cuales son simuladas durante los ensayos.

Los ensayos a que cada equipamiento deberá ser sometido, están establecidos por las Normas referentes a cada equipamiento. Las normas están preparadas por entidades especializadas, normalmente con la colaboración de fabricantes y usuarios, estableciendo todas las características eléctricas, métodos de ensayos y cálculo de ciclos de trabajo que representan lo que el equipamiento deberá realizar en servicio. Evidentemente, esta normalización tiene efecto directo en la reducción del costo de los equipamientos.

Los ensayos requeridos en una especificación técnica están relacionados con cada uno de los equipos en particular, dichos ensayos pueden clasificarse básicamente en:

- **Ensayos de rutina:** Son los ensayos que deben ser realizados en todas las muestras que representan los equipamientos comprados, o en una determinada cantidad de la partida total, con el fin de verificar la calidad y la uniformidad de la fabricación y los materiales utilizados en la fabricación.
- **Ensayos de tipo:** Son los ensayos realizados apenas en uno o dos equipamientos idénticos o de tipo semejante, con el fin de verificar una determinada característica. Se trata en general de ensayos costosos, o de difícil interpretación.
- **Ensayos especiales:** Son los ensayos que la norma pertinente no considera ni de tipo ni de rutina, requiriendo para ser realizados un acuerdo previo entre fabricante y comprador.
- **Ensayos de mantenimiento:** Son los ensayos realizados con equipamientos que ya están en servicio, a fin de verificar su estado de conservación después de un cierto período de operación, o a la primera puesta en servicio los eventuales posibles daños resultantes del transporte y de la instalación.
- **Ensayos de campo:** Estos ensayos son realizados para evaluar el desempeño global de un sistema eléctrico, incluyendo la operación y ajuste de los sistemas de protección y control.

Las características o especificaciones eléctricas de los equipos que se comprueban por medio de los ensayos de alta tensión son las siguientes:

- Nivel Básico de Aislamiento, conocido por sus siglas NBI en español o BIL en inglés, (Flameo crítico al impulso positivo de rayo y flameo crítico al impulso negativo de rayo).
- Flameo crítico al impulso positivo de maniobra.
- Flameo crítico al impulso negativo de maniobra.
- Voltaje de perforación a baja frecuencia.
- Flameo de baja frecuencia en seco.
- Flameo de baja frecuencia en húmedo.
- Etc.

Para comprobar dichas características se utilizan los siguientes ensayos:

- Ensayos dieléctricos con tensión continua.
- Ensayos dieléctricos con tensión alterna.
- Ensayos dieléctricos con tensión de impulso.
- Ensayos con impulso de corriente.
- Ensayos combinados con los mencionados anteriormente.

El nivel básico de aislamiento al impulso por rayo (NBI), se comprueba en los equipamientos por medio de los ensayos con tensión de impulso tipo rayo.

## **P.2. NIVEL BASICO DE AISLAMIENTO AL IMPULSO POR RAYO (NBI)**

Los equipos de alta tensión vienen diseñados con un nivel de aislamiento, el cual es una resistencia de aislamiento expresado en función de un voltaje soportado.

El NBI (BIL por sus siglas en inglés) es el nivel básico de aislamiento para impulso por rayo, el cual es un nivel específico de aislamiento expresado en función del valor de cresta (máximo) de un impulso estándar tipo rayo.

El NBI es el valor de tensión máxima que el equipo soporta ante una solicitud de rayo en el sistema.

En la siguiente tabla se muestran los niveles básicos de aislamiento al impulso de rayo (tensión de aguante) para distintos voltajes nominales del sistema, para equipos de subestación:

Voltaje Nominal del sistema de fase a fase (kV)	NBI (kV)
4.4	75
6.9	95
13.8	110
24	150
34.5	200
46	250
69	350
115	550
138	650
161	750
230	900
400	1050

**Tabla P-1:** Nivel básico de aislamiento para diferentes voltajes de sistema

### **P.3. IMPULSOS DE TENSION.**

Un impulso es una tensión o una corriente transitoria aperiódica aplicada intencionalmente que por lo general crece rápidamente hasta un valor de cresta y después decrece más lentamente hasta cero. En los ensayos de alta tensión, se describen dos tipos de impulso:

- Impulso tipo rayo.
- Impulso tipo maniobra.

#### **P.3.1. Impulsos tipo rayo y tipo maniobra.**

Se efectúa una distinción entre los impulsos tipo rayo y los impulsos tipo maniobra basada en la duración del frente. Los impulsos con duraciones del frente hasta 20  $\mu$ s se consideran como impulsos tipo rayo, y aquellos con duración del frente más larga como impulsos tipo maniobra.

Generalmente, los impulsos tipo maniobra se caracterizan igualmente por duraciones totales considerablemente más largas que los impulsos tipo rayo.

Los impulsos tipo rayo y maniobra son coincidentes en la forma, pero difieren en sus tiempos, es decir presentan los mismos parámetros característicos antes mencionados para dichas formas de onda, pero los valores de las variables temporales difieren.

Los impulsos tipo maniobra o de frente lento se definen con un tiempo hasta el pico de tensión entre 20 $\mu$ s y 5 ms. La definición para la forma de onda de impulso tipo maniobra (tiempo de frente/tiempo de cola) es la siguiente:

$$\frac{250 \pm 20\%}{2500 \pm 60\%} \mu s$$

Los impulsos tipo rayo o de frente rápido, que tratan de reproducir las sobretensiones atmosféricas producidas por caídas de rayos sobre las líneas eléctricas, se caracterizan por un frente rápido (entre 0.1  $\mu$ s y 20  $\mu$ s). La forma de onda de impulso tipo rayo (tiempo de frente/tiempo de cola) se define como:

$$\frac{1.2 \pm 30\%}{50 \pm 20\%} \mu s$$

En concreto el impulso rayo normalizado según la norma IEC 60060-1 tiene la forma definida en la siguiente figura, siendo  $T_1 = 1.2 \mu$ s y  $T_2 = 50 \mu$ s con unas tolerancias especificadas.

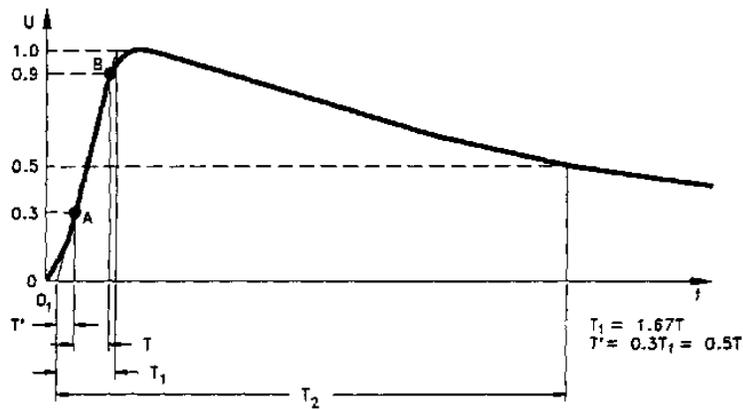


Figura P-1: Forma de onda de un impulso tipo rayo normalizado [1].

#### P.4. GENERACION EN LABORATORIO DE IMPULSOS TIPO RAYO.

Los impulsos tipo rayo normalizados se generan en los laboratorios de alta tensión mediante generadores tipo Marx, los cuales producen una forma de onda caracterizada por el valor de la amplitud máxima denominada tensión de ensayo y por dos variables temporales, la primera corresponde al intervalo en que se logra el valor de la tensión pico de la onda, el cual es conocido como tiempo de frente, y la segunda corresponde al intervalo en que se alcanza el 50% del valor pico de la onda en recorrido de descenso, y es conocido como tiempo de cola.

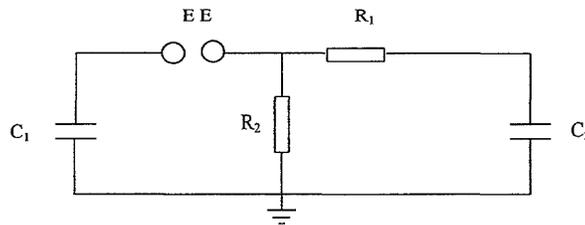


Figura P-2: Circuito equivalente de un generador tipo Marx.

Donde:

EE: explosor de esferas.

C1: condensador principal o de descarga.

R1: resistencia de frente.

C2: condensador de frente o de carga del generador.

R2: resistencia de cola del generador de impulsos.

En la siguiente figura se muestra un esquema más completo de cómo está formado un generador de impulsos de rayo:

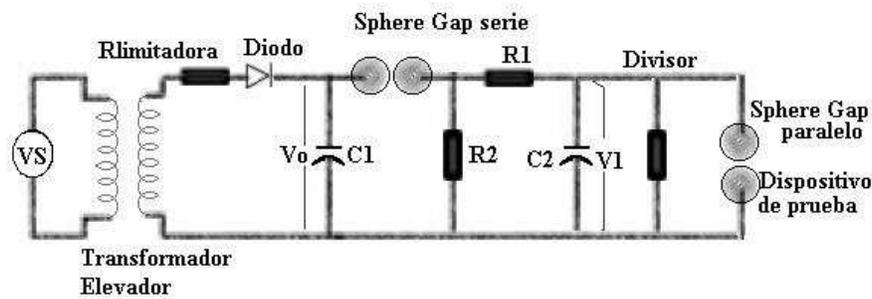


Figura P-3: Esquema de un generador de impulso tipo rayo.

En el generador de impulso de tensión de la figura P-3, la resistencia limitadora, se encarga de disminuir la corriente que fluye al resto del circuito, con el fin de proteger los equipos y los operarios.

El condensador principal o de descarga C1, se carga a través del diodo de alta tensión, que funciona como una fuente de corriente continua, cuando dicho condensador ha alcanzado un nivel determinado de tensión  $U_0$  y a continuación se aísla de la fuente y pasa a ser la fuente de tensión del circuito a su derecha.

El nivel de tensión de descarga  $U_0$  del condensador C1, es controlado por la separación de los electrodos del "sphere gap".

Cuando se produce la descarga (arco) en los electrodos, la corriente fluye inicialmente a través de la resistencia R1 (del orden de los cientos de ohms) siendo ésta, la responsable del control del tiempo del frente de la onda de impulso. Simultáneamente con el inicio de la descarga, se carga el condensador C2, también conocido como condensador de carga.

Posteriormente, cuando ambos condensadores C1 y C2 alcanzan el mismo nivel de energía, estos se cargan a través de la resistencia R2 (del orden de los k $\Omega$ ), la cual es la responsable del control del tiempo de cola de la onda de impulso.

La onda de impulso así formada, se aplica sobre el objeto de prueba, el cual se debería encontrar en paralelo con el divisor de voltaje y el espinterómetro de prueba (figura P-3)

El divisor de tensión reduce la alta tensión a valores tolerables por los equipos de medida, tales como osciloscopios y voltímetros.

El espinterómetro de prueba permite recortar la onda de impulso en el frente o en la cola de la misma. El espinterómetro, conocido también como "sphere gap", "spark gap", explosor, esferas céntricas y chispómetro, entre otros; es un elemento de impulso; puede ser usado a la vez como interruptor o como instrumento de medida. Cuando se usa como interruptor, origina la onda de impulso la cual puede ser plena o recortada y como instrumento de medida, permite conocer el nivel de tensión al cual dicha onda es generada y/o recortada.

#### P.4.1. Generadores de varias etapas.

El generador más utilizado se compone de  $n$  etapas similares a la descrita anteriormente que se cargan en paralelo y se descargan en serie, según la conexión propuesta por Marx. La figura P-4 muestra el circuito de este generador, pudiéndose observar que cada una de las etapas ( $n=3$  en este caso) está constituida por un capacitor  $C1$ , en la práctica separado del siguiente por un aislador de porcelana u otros aislantes, una resistencia de carga  $Rc$  un resistor de frente  $R1$  y otro de cola  $R2$ , que se utilizan también durante la carga y un explosor de esferas  $E$ .

La distancia entre esferas de las diversas etapas se regula simultáneamente por la general mediante un servomotor que acciona un eje roscado, el cual desplaza los soportes de las mismas; y el conjunto se alimenta con una fuente de AT continua, regulable desde el primario del transformador elevador con uno de los medios indicados oportunamente, a través de un resistor  $R$  de algunas decenas de kW. El funcionamiento de tal disposición es el siguiente:

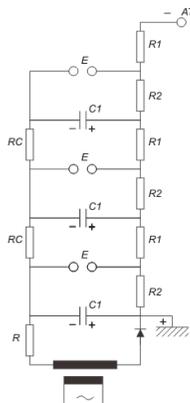


Figura P-4: Esquema de un generador de impulso de varias etapas.

#### P.4.1.1. Fase de carga.

Como en ella no interesan los explosores, el circuito puede reducirse al de la figura P-5, donde se aprecia claramente que los capacitores se cargan en paralelo a través de las resistencias mencionadas, y adquieren, en consecuencia una tensión final aproximadamente igual a la de la fuente de continua; es decir,  $\sqrt{2}$  veces la tensión eficaz secundaria.

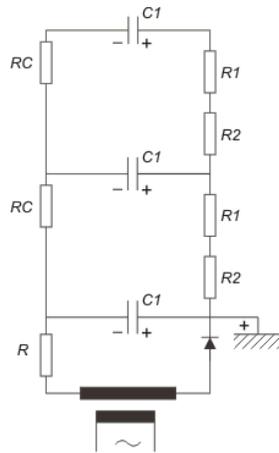


Figura P-5: Esquema de un generador de impulso de varias etapas en fase de carga.

#### P.4.1.2. Fase de descarga.

Debido a que los resistores de carga  $R_C$  son mucho mayores que los de cola  $R_2$  (20 o más veces), el circuito admite la simplificación que muestra la figura P-6, donde se ve que el arco en los explosores conecta los capacitores en serie, por tanto, en el terminal de AT se obtiene una tensión  $n$  veces mayor que la de una etapa.

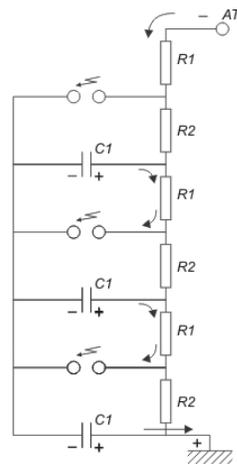
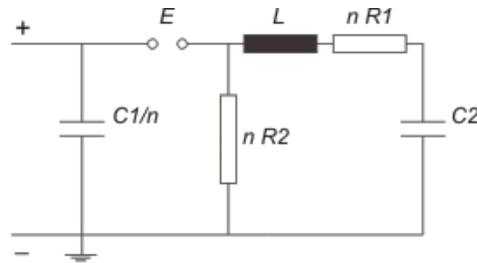


Figura P-6: Esquema de un generador de impulso de varias etapas en fase de descarga

Evidentemente, la capacitancia total del generador durante esta fase es igual a la de los  $n$  capacitores en serie, o sea  $C1/n$ , y sus resistencias de frente y de cola totales, las que ofrecen cada uno de esos  $n$  resistores en serie, es decir  $n.R1$  y  $n.R2$  respectivamente. Por eso los valores a asignar a dichas resistencias se calculan como si se tratase del generador de una sola etapa mostrado en la figura P-7, subdividiéndolas después en  $n$  partes iguales para obtener las necesarias en cada etapa.



**Figura P-7:** Circuito equivalente al generador de Marx durante la descarga.

Los parámetros característicos de un generador de impulsos de varias etapas son:

- N° de etapas, generalmente par y múltiplo de 4.
- Tensión de carga, normalmente 75 a 200 kV.
- Energía por impulso, igual a  $1/2C_{equiv}.U_2$  de carga max. y del orden de algunos kJ hasta algunos centenares de kJ.

### P.5. EL GENERADOR DE IMPULSOS TIPO RAYO DE LA ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.

El generador de impulsos que posee la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador es del tipo GTS, fabricado por PASSONI VILLA, y tiene las siguientes características técnicas:

Tensión nominal de carga	400 kV DC
Energía Nominal	10KJ
Numero de Etapas	4
Tensión de carga por etapa	100KV
Ritmo entre impulsos a 400 kV	30 s
Inductancia del generador	40uH
Temperatura	0 – 40° C
Humedad relativa	35 – 95%

**Tabla P-2:** Características técnicas del generador de impulsos de la EIE. **Tabla 3:** Características técnicas del generador de impulsos de la EIE.

En la siguiente figura se muestra al generador de impulsos de rayo de la EIE:



**Figura P-8:** Generador de impulsos tipo rayo de la EIE.

El generador de impulsos ha sido diseñado para generar la onda estándar impulso de rayo de 1.2/50 $\mu$ S de acuerdo a las normas establecidas para objetos bajo prueba cuya capacitancia a tierra esté en el rango hasta de 8500 pF, utilizando para ello la conexión adecuada.

Disponiendo de un juego de resistencias adicionales, los cuales pueden adquirirse opcionalmente, el generador también puede producir la onda estándar impulso tipo maniobra de 250/250  $\mu$ S.

El generador de impulsos es la base para el desarrollo de esta normativa, la cual va orientada a los ensayos para prueba del NBI (BIL) para equipamientos de instalaciones eléctricas de alta tensión, para niveles de distribución de hasta 23 kV.

# **NORMA DE PRUEBAS DE ALTA TENSIÓN BASADAS EN EL GENERADOR DE IMPULSOS DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.**

## **CAPITULO I.** **ASPECTOS GENERALES.**

### **Artículo 1. CAMPO DE APLICACIÓN.**

Estas normas se limitan a cubrir y desarrollar los ensayos dieléctricos de impulso tipo rayo, aplicables para el generador de impulsos tipo rayo de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador.

### **Artículo 2. OBJETO DE ESTAS NORMAS.**

- Definir los términos de aplicación particular para los ensayos de impulso tipo rayo mediante el generador de impulsos de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador.
- Presentar las prescripciones generales al objeto a ensayar y la modalidad de los ensayos de impulso tipo rayo.
- Describir el método para producir y medir las tensiones de impulso tipo rayo.
- Describir los métodos de interpretación de los resultados de los ensayos de impulso tipo rayo e indicar los criterios de aceptación o rechazo.

### **Artículo 3. CRITERIOS DEL EQUIPO PARA ENSAYOS.**

El generador de impulsos de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador está diseñado para la generación de impulsos con tensiones desde 10 kV hasta 400 kV, tanto de polaridad positiva como negativa (Ver Anexo A).

## **CAPITULO II.** **DEFINICIONES GENERALES PARA ENSAYOS DE IMPULSO TIPO RAYO.**

### **Artículo 4. IMPULSOS.**

Un impulso es una tensión transitoria aperiódica aplicada intencionalmente que por lo general crece rápidamente hasta un valor de cresta y después decrece más lentamente hasta cero.

El término impulso debe distinguirse del término sobretensión, que se refiere a los fenómenos transitorios que se producen en los equipos eléctricos y en las redes en servicio

## **Artículo 5. IMPULSOS TIPO RAYO [1].**

Los impulsos con duraciones del frente hasta 20  $\mu$ s se consideran como impulsos tipo rayo, son llamados también como impulsos de frente rápido y tratan de reproducir las sobretensiones atmosféricas producidas por caídas de rayos sobre líneas eléctricas, se caracterizan por un frente entre 0.1  $\mu$ s. y 20  $\mu$ s. La forma del impulso tipo rayo se define como:

$$\frac{1.2 \pm 30\%}{50 \pm 20\%} \mu s$$

La forma definida para un impulso tipo rayo se muestra en la figura P-1, sienta  $T_1 = 1.2 \mu$ s. y  $T_2 = 50 \mu$ s. con unas tolerancias especificadas.

La forma de onda del impulso tipo rayo producida por el generador de impulsos de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador se muestra en el anexo D (figuras D-1 y D-2).

## **Artículo 6. DESCARGA DISRUPTIVA EN IMPULSOS TIPO RAYO [1].**

El término descarga disruptiva o ruptura se aplica a los fenómenos asociados al fallo del aislamiento bajo una sollicitación eléctrica, para el caso, al aplicarse una tensión de impulso tipo rayo, durante los cuales la descarga cortocircuita completamente el aislamiento en ensayo, reduciendo la tensión aplicada entre los electrodos a un valor prácticamente nulo. Se aplica a la ruptura de dieléctricos sólidos, líquidos y sólidos o de sus combinaciones.

Pueden producir descargas no mantenidas durante las cuales el objeto en ensayo es momentáneamente cortocircuitado por un flameo o un arco. La tensión en los bornes del objeto en ensayo se reduce por tanto momentáneamente a cero o a un valor muy pequeño. En función de las características del circuito de ensayo y del objeto, la rigidez dieléctrica se puede recuperar, e incluso puede sobrepasarse la tensión de ensayo. Pueden producirse igualmente descargas no disruptivas sin reducción a cero de la tensión de ensayo, como aquellas entre electrodos o conductores intermedios. Las descargas disruptivas se denominan según el medio en el que se producen, así:

- Cuando una descarga disruptiva se produce en un medio gaseoso o líquido se utiliza el término cebado.
- Cuando una descarga disruptiva se produce sobre la superficie de un dieléctrico en un medio gaseoso o líquido se utiliza el término flameo o contorno, que es el caso de las descargas disruptivas en electrodos donde la rigidez dieléctrica la proporciona el aire.
- Cuando una descarga disruptiva se produce a través de un dieléctrico sólido, se utiliza el término perforación.

**Artículo 7. VALOR DE LA TENSION DE ENSAYO EN UN IMPULSO TIPO RAYO.**

Este valor de la tensión de ensayo, para un impulso tipo rayo sin oscilaciones, es el valor de cresta.

**Artículo 8. TENSION DE DESCARGA DISRUPTIVA DE UN OBJETO BAJO ENSAYOS DE IMPULSO TIPO RAYO.**

Es el valor de cresta de un impulso tipo rayo que provoca una descarga disruptiva en el objeto de ensayo.

**Artículo 9. CARACTERÍSTICAS ESTADÍSTICAS DE LAS TENSIONES DE DESCARGA DISRUPTIVA PARA ENSAYOS DE IMPULSO TIPO RAYO.**

Las tensiones de descargas disruptivas están sujetas a variaciones aleatorias y, en general, es preciso hacer un cierto número de observaciones para obtener un valor de la tensión que tenga una significación estadística. Los procedimientos de ensayos, descritos en esta norma, están basados generalmente en consideraciones estadísticas.

**Artículo 10. PROBABILIDAD DE DESCARGA DISRUPTIVA P DE UN OBJETO EN ENSAYO DE IMPULSO TIPO RAYO.**

Probabilidad  $p$  de que la aplicación de una tensión de impulso tipo rayo, de amplitud prevista y de forma dadas, conduzca a una descarga disruptiva sobre el objeto en ensayo. El parámetro  $p$  puede ser expresado en forma de porcentaje o fracción.

**Artículo 11. PROBABILIDAD DE TENSIÓN SOPORTADA Q DE UN OBJETO EN ENSAYO DE IMPULSO TIPO RAYO.**

Probabilidad  $q$  de que la aplicación de una tensión, de amplitud prevista y de formas dadas, no provoque una descarga disruptiva sobre el objeto en ensayo. Si  $p$  es la probabilidad de descarga disruptiva, la probabilidad de tensión soportada  $q$  es  $(1 - p)$ .

**Artículo 12. TENSIÓN 50% DE DESCARGA DISRUPTIVA U50 DE UN OBJETO EN ENSAYO DE IMPULSO TIPO RAYO.**

Valor de la tensión de impulso tipo rayo prevista que posee una probabilidad del 50% de producir una descarga disruptiva sobre el objeto ensayado.

### **CAPITULO III.**

## **CLASIFICACION DE LOS AISLAMIENTOS EN LOS OBJETOS EN ENSAYO.**

#### **Artículo 13. CLASIFICACION DE AISLAMIENTOS.**

Los sistemas de aislamiento de los equipos o de las estructuras de alta tensión se clasificarán como aislamientos autorregenerables o no autorregenerables. Pueden incluir aislamientos externos y/o internos. Los aparatos o equipos de alta tensión incluyen siempre una combinación de aislamientos autorregenerables y no autorregenerables. Ciertas partes pueden degradarse por las aplicaciones sucesivas o permanentes de tensión.

#### **Artículo 14. AISLAMIENTO EXTERNO.**

Está constituido por los espacios de aire y las superficies expuestas de los aislamientos sólidos de un equipo que están sometidos a la vez a las sollicitaciones dieléctricas y a la influencia de las condiciones atmosféricas o de agentes externos tales como la contaminación, la humedad y los animales.

#### **Artículo 15. AISLAMIENTO INTERNO.**

Está constituido por los elementos internos sólidos, líquidos o gaseosos del aislamiento de un equipo, que están protegidos de la influencia de las condiciones atmosféricas o de otros agentes externos tales como la contaminación, la humedad y los animales.

#### **Artículo 16. AISLAMIENTO AUTORREGENERABLE.**

Aislamiento que recupera íntegramente sus propiedades aislantes después de una descarga disruptiva producida por la aplicación de una tensión de ensayo.

#### **Artículo 17. AISLAMIENTO NO AUTORREGENERABLE.**

Aislamiento que pierde sus propiedades aislantes, o no las recupera íntegramente, después de una descarga disruptiva producida por la aplicación de una tensión de ensayo.

## CAPITULO IV. CORRECCION ATMOSFERICA DE LA TENSION DE IMPULSO.

### Artículo 18. ATMOSFERA NORMALIZADA DE REFERENCIA [1].

La atmosfera normalizada es:

- Temperatura:  $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Presión:  $P_0 = 101.3 \text{ kPa}$  (760 mm. Hg.)
- Humedad Absoluta:  $h_0 = 11 \text{ g/m}^3$

Una presión de 101.3 kPa corresponde a una altura barométrica de 760 mm de mercurio a 0 °C. Si la altura barométrica es H mm de mercurio, la presión atmosférica en kilopascales es aproximadamente:

$$P = 0.1333 H \text{ kPa}$$

La corrección de la altura de la columna de mercurio en función de la temperatura puede considerarse despreciable.



**Figura IV-1:** Barómetro, termómetro e higrómetro para la medición de presión, temperatura y humedad relativa en el laboratorio para ensayos de impulso tipo rayo con el generador de la EIE-UES.

### Artículo 19. CALIBRACION DE LOS DISPOSITIVOS DE MEDIDA DE LAS CONDICIONES ATMOSFERICAS AL MOMENTO DEL ENSAYO.

Los parámetros de temperatura, presión y humedad deben medirse por medio de termómetros, barómetros e higrómetros respectivamente, los cuáles deben estar correctamente calibrados en laboratorios nacionales aprobados (laboratorios de CONACYT), ya que dichos parámetros al medirse deben presentar la exactitud adecuada para no afectar los resultados obtenidos por medio de los ensayos

#### **Artículo 20. FACTORES DE CORRECCION ATMOSFERICA [1].**

La descarga disruptiva de un aislamiento externo depende de las condiciones atmosféricas de su entorno. Habitualmente la tensión de flameo de un espacio dado en el aire aumenta por aumento de la densidad del aire o de la humedad.

Aplicando los factores de corrección, una tensión de flameo medida en unas condiciones de ensayo dadas (temperatura  $t$ , presión  $b$ , humedad  $h$ ), puede ser convertida al valor que se habría obtenido bajo las condiciones atmosféricas de referencia normalizadas ( $t_0$ ,  $b_0$ ,  $h_0$ ). Recíprocamente, una tensión de ensayo especificada para las condiciones de referencia puede ser convertida al valor equivalente en las condiciones existentes durante el ensayo.

La tensión de descarga disruptiva es proporcional al factor de corrección  $K_t$  que resulta de la multiplicación de dos factores de corrección:

- El factor de corrección de la densidad del aire  $k_d$ .
- El factor de corrección de la humedad  $k_h$ .

$$K_t = k_d / k_h$$

#### **Artículo 21. TENSION DE IMPULSO TIPO RAYO CORREGIDA.**

La tensión de impulso tipo rayo  $U$ , a aplicar durante un ensayo de un aislamiento externo se calcula multiplicando la tensión de ensayo especificada  $U_0$  por  $K_t$ .

$$U = U_0 K_t$$

#### **Artículo 22. TENSION DE IMPULSO TIPO RAYO DE REFERENCIA.**

Las tensiones de impulso tipo rayo de descarga disruptiva medidas  $U$  se corrigen a tensiones  $U_0$  correspondientes a las condiciones atmosféricas de referencia normalizadas, dividiendo por  $K_t$ :

$$U_0 = U / K_t$$

#### **Artículo 23. CONDICIONES ATMOSFERICAS DURANTE EL ENSAYO.**

El informe del ensayo debe mencionar siempre las condiciones atmosféricas reales durante el ensayo, y los factores de corrección aplicados.

#### **Artículo 24. FACTOR DE CORRECCIÓN DE LA DENSIDAD DEL AIRE $K_d$ [4].**

El factor de corrección de la densidad del aire depende de la densidad relativa del aire, y puede expresarse generalmente como:

$$K_d = \left[ \frac{P}{P_0} \right]^m \cdot \left[ \frac{273+t_0}{273+t} \right]^n$$

En donde:

P: Presión atmosférica al momento del ensayo.

P<sub>0</sub>: Presión atmosférica normalizada (101.3 kPa ó 760 mm. Hg).

t: Temperatura al momento del ensayo.

t<sub>0</sub>: Temperatura normalizada (20 °C).

Las temperaturas t y t<sub>0</sub> se expresan en grados Celsius y la presión atmosférica P en la misma unidad (Kilopascales o milibares) que P<sub>0</sub>.

#### Artículo 25. FACTOR DE CORRECCIÓN DE LA HUMEDAD Kh. [4].

El factor de corrección de la humedad puede expresarse como:

$$K_h = k^w$$

Donde k es un parámetro función del tipo de la tensión de ensayo y que, para las necesidades prácticas, puede expresarse aproximadamente en función de la humedad absoluta (gr/m<sup>3</sup>), para ensayos con tensión de impulso, la gráfica es la siguiente:

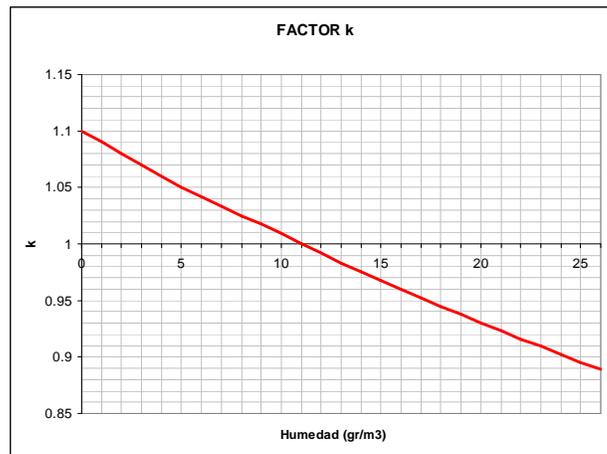
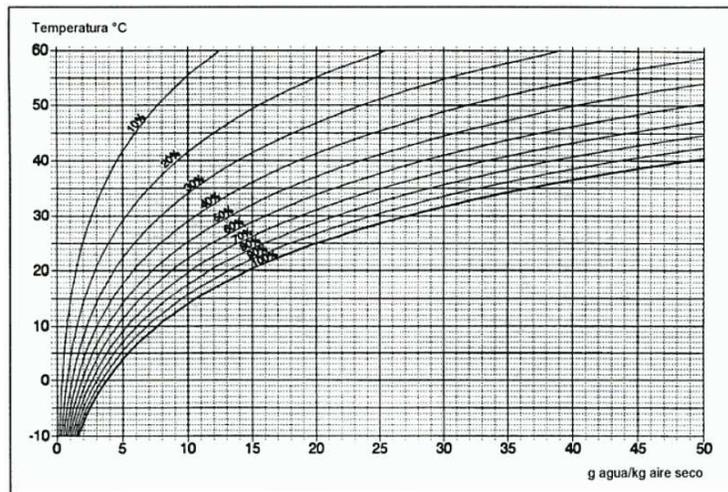


Figura IV-2: Factor k en función de la humedad absoluta para tensiones de impulso<sup>[4]</sup>.

La humedad absoluta se obtiene (gr/m<sup>3</sup>), de multiplicar el peso específico del aire  $\gamma$  (Kg<sub>aire seco</sub> /m<sup>3</sup>), por el valor de humedad absoluta (gr<sub>agua</sub>/Kg<sub>aire seco</sub>), dicho valor se obtiene de la siguiente gráfica:



**Figura IV-3:** Humedad absoluta (gr agua/kg aire seco) en función de la temperatura (°C) y la humedad relativa (%).

Los datos tabulados de la gráfica de la figura IV-3 se muestran a continuación:

TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%)									
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
0	0.20	0.70	1.00	1.20	1.80	2.20	2.60	3.00	3.30	3.90
1	0.30	0.75	1.10	1.50	2.00	2.30	2.80	3.20	3.80	4.20
2	0.35	0.80	1.30	1.50	2.10	2.60	3.00	3.50	4.00	4.30
3	0.40	0.85	1.40	1.80	2.30	2.80	3.30	3.80	4.30	4.70
4	0.45	0.90	1.50	1.90	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00
5	0.50	0.95	1.60	2.00	2.60	3.20	3.90	4.30	4.90	5.30
6	0.55	1.00	1.70	2.20	2.80	3.50	4.10	4.70	5.20	5.90
7	0.60	1.10	1.80	2.30	3.00	3.70	4.40	5.00	5.50	6.10
8	0.65	1.20	2.00	2.60	3.20	4.00	4.70	5.30	6.00	6.70
9	0.70	1.30	2.10	2.80	3.50	4.30	5.00	5.80	6.50	7.10
10	0.80	1.40	2.20	3.00	3.80	4.60	5.30	6.00	7.00	7.70
11	0.90	1.60	2.40	3.20	4.00	4.90	5.70	6.50	7.30	8.00
12	0.95	1.80	2.60	3.40	4.20	5.20	6.00	7.00	7.80	8.80
13	1.00	1.90	2.80	3.80	4.70	5.60	6.50	7.50	8.40	9.30
14	1.05	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
15	1.10	2.10	3.10	4.10	5.20	6.30	7.30	8.40	9.60	10.50
16	1.15	2.20	3.30	4.50	5.60	6.80	8.00	9.00	10.20	11.30
17	1.20	2.30	3.50	4.80	6.00	7.20	8.30	9.60	10.90	12.00
18	1.30	2.60	3.80	5.00	6.50	7.70	9.00	10.30	11.70	13.00
19	1.40	2.75	4.10	5.50	7.00	8.20	9.60	11.00	12.40	14.00
20	1.50	2.85	4.30	5.90	7.20	8.80	10.20	11.80	13.20	14.80
21	1.60	3.00	4.60	6.10	7.60	9.20	10.70	12.40	14.00	15.50
22	1.70	3.20	4.90	6.50	8.20	10.00	11.30	13.00	14.80	16.30
23	1.80	3.50	5.20	7.00	8.80	10.50	12.30	14.00	16.00	17.70
24	1.90	3.80	5.50	7.30	9.30	11.00	13.00	15.00	17.00	19.00
25	2.00	4.00	6.00	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00	18.00	20.00
26	2.10	4.20	6.20	8.30	10.30	12.50	15.00	17.00	19.00	21.30
27	2.20	4.40	6.70	8.90	11.10	13.20	15.60	18.00	20.20	22.30
28	2.30	4.60	7.00	9.50	11.90	14.20	16.70	19.00	21.70	24.00
29	2.50	5.00	7.50	10.00	12.50	15.10	17.90	20.30	23.00	25.50
30	2.60	5.20	7.80	10.50	13.10	16.00	18.90	21.80	24.00	27.00
31	2.80	5.50	8.30	11.10	14.00	17.00	20.00	23.00	26.00	28.50
32	2.90	5.90	8.90	11.90	15.00	18.00	21.00	24.00	27.00	30.00
33	3.10	6.20	9.40	12.50	16.00	19.00	22.50	25.80	29.00	32.00
34	3.20	6.60	10.00	13.20	16.80	20.00	23.80	27.00	31.00	34.70
35	3.50	7.00	10.50	14.00	17.50	21.20	25.00	28.60	32.50	36.50
36	3.70	7.30	11.00	15.00	18.80	22.70	26.50	30.40	34.50	38.70
37	3.90	7.80	11.90	15.70	20.00	24.00	28.00	33.00	37.00	41.00
38	4.10	8.20	12.40	16.60	21.00	25.50	30.00	34.50	39.00	43.50
39	4.30	8.80	13.00	17.80	22.20	27.00	31.80	36.50	41.00	46.00
40	4.50	9.20	13.80	18.60	23.50	28.20	33.20	38.00	43.20	48.10

**Tabla IV- 1:** Humedad absoluta (gr agua/kg aire seco) en función de la temperatura (°C) y la humedad relativa (%).

El peso específico del aire depende de la temperatura y de la presión barométrica y se obtiene de la siguiente relación:

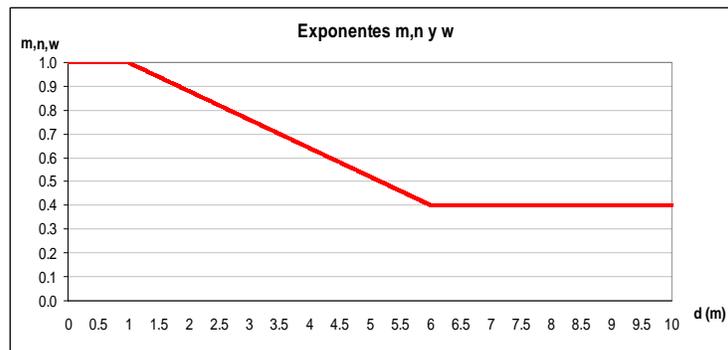
$$\gamma = 1.293 \cdot \left( \frac{273}{273+t} \right) \cdot \left( \frac{P}{760} \right)$$

Donde:

- $\gamma$ : Peso específico del aire (Kg/m<sup>3</sup>).
- t: Temperatura del aire al momento del ensayo (°C).
- P: Presión barométrica al momento del ensayo (mmHg)
- 1.293: Peso específico del aire a 0 °C.
- 273: Cero absoluto de temperatura (K).
- 760: Presión barométrica a 0 m. normalizada (mmHg).

**Artículo 26. EXPONENTES m, n y w PARA EL CALCULO DEL FACTOR DE CORRECCIÓN DE LA DENSIDAD DEL AIRE Kd Y DEL FACTOR DE CORRECCIÓN DE LA HUMEDAD Kh [4].**

Los exponentes m, n y w dependen de la distancia de chispeo o de flameo (d), generalmente los parámetros m y n se asumen iguales. En la gráfica de la figura se establece el valor de dichos exponentes en función de la distancia de flameo:



**Figura IV-4:** Valores de los exponentes m, n y w.

**CAPITULO V.**  
**CARACTERISTICAS Y PARAMETROS DE LA FORMA DE ONDA DE IMPULSO**  
**TIPO RAYO.**

**Artículo 27. IMPULSO TIPO RAYO PLENO.**

Impulso tipo rayo que no está interrumpido por una descarga disruptiva (Figura P-1).

**Artículo 28. DURACION DEL FRENTE  $T_1$  [1].**

La duración del frente de un impulso tipo rayo es un parámetro convencional definido como 1.67 veces el intervalo de tiempo  $T'$  comprendido entre los instantes en que la tensión alcanza el 30% y el 90 del valor de cresta (puntos A y B de las figuras P-1). Su valor se define por medio de la siguiente expresión:

$$T_1 = 1.67 T'$$

En donde:

$$T' = T_{90} - T_{30}$$

Por tanto:

$$T_1 = 1.67 * (T_{90} - T_{30})$$

**Artículo 29. ORIGEN CONVENCIONAL  $O_1$  [1].**

En un impulso tipo rayo, el origen convencional  $O_1$  es el instante que precede en  $0.3T_1$  al que corresponde al punto A (ver figura P-1).

**Artículo 30. DURACIÓN HASTA EL VALOR MITAD  $T_2$  [1].**

La duración hasta el valor mitad  $T_2$  de un impulso tipo rayo es un parámetro convencional definido como el intervalo de tiempo comprendido entre el origen convencional  $O_1$  y el instante en que la tensión ha decrecido a la mitad del valor de la cresta. (Ver figura P-1). Su valor se define por medio de la siguiente expresión:

$$T_2 = (T_{50} + 0.5 * T_{90} - 1.5 * T_{30})$$

**Artículo 31. IMPULSO TIPO RAYO NORMALIZADO [1].**

El impulso tipo rayo normalizado es el que tiene una duración del frente  $T_1$  de  $1.2 \mu s$  y una duración hasta el valor mitad  $T_2$  de  $50 \mu s$ . y es denominado como 1.2/50.

### Artículo 32. TOLERANCIAS DE LOS PARAMETROS DE LA FORMA DE ONDA DE IMPULSO TIPO RAYO NORMALIZADO.

Las diferencias entre los valores especificados para los impulsos normalizados y los valores realmente medidos son:

- Valor de cresta:  $\pm 3\%$
- Duración del frente:  $\pm 30\%$
- Duración hasta el valor mitad:  $\pm 20\%$

El cumplimiento de los parámetros de la forma de onda de impulso tipo rayo normalizado que se obtiene en el generador de impulsos de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador se muestra en mayor detalle en los anexos C y D.

### Artículo 33. IMPULSO TIPO RAYO CORTADO [1].

Impulso tipo rayo que está repentinamente interrumpido por una descarga disruptiva la cual provoca una caída de tensión brusca, prácticamente hasta cero, esto se puede observar en la siguiente figura:

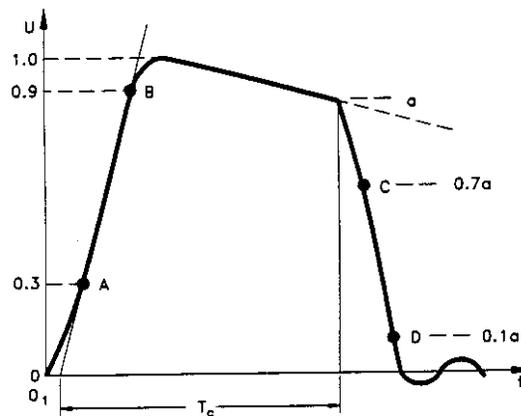


Figura V-1: Impulso tipo rayo cortado en la cola <sup>[1],[2]</sup>.

El corte se puede efectuar con un explosor de corte exterior, o puede sobrevenir por una descarga disruptiva en el aislamiento interno o externo del objeto en ensayo. Para el generador de impulsos tipo rayo de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, el impulso tipo rayo cortado se produce generalmente en la cola, haciendo uso del explosor de esferas.

#### **Artículo 34. INSTANTE DEL CORTE EN IMPULSOS TIPO RAYO CORTADOS.**

El instante del corte es el instante inicial en el que se produce la caída de tensión brusca característica.

#### **Artículo 35. DURACION HASTA EL INSTANTE DE CORTE TC [1].**

La duración hasta el corte es un parámetro convencional definido como el intervalo de tiempo entre el origen convencional O1 y el instante de corte (Ver Anexo F, tabla F-3; Anexo G, tabla G-1; Anexo H, tablas H-9, H-18).

#### **Artículo 36. CARACTERISITCAS RELACIONADAS CON LA CAIDA DE TENSION DURANTE EL CORTE [1].**

Las características convencionales de la caída de tensión durante el corte son definidas por dos puntos C y D situados al 70% y al 10% de la tensión en el instante del corte (ver figura V-1). La duración de la caída de tensión es de 1.67 veces el intervalo de tiempo entre los puntos C y D. La pendiente de la caída de tensión es la relación entre la tensión en el momento del corte y la duración de la caída de tensión. Los parámetros C y D se utilizan únicamente por necesidad de las definiciones; su empleo no implica que la duración y la pendiente del corte puedan ser medidas con cierta precisión por los circuitos de medida convencionales (Ver anexo G, tabla G-2 y anexo H, tablas H-10 e H-19).

#### **Artículo 37. IMPULSO TIPO RAYO CORTADO NORMALIZADO [1].**

El impulso tipo rayo normalizado que se corta con un explosor externo al cabo de 1.5  $\mu$ s a 5  $\mu$ s. En razón a las dificultades prácticas relativas a las medidas, la duración de la caída de tensión durante el corte no puede ser especificada con mucha exactitud dentro de esta norma (Ver Anexo F, tabla F-3; Anexo G, tabla G-1 y Anexo H, tablas H-9 e H-18).

## CAPITULO VI. METODOS DE INICIO DE LA DESCARGA DEL GENERADOR DE IMPULSOS DE LA EIE-UES.

### **Artículo 38. INICIO DE LA DESCARGA ENTRE LAS ESFERAS DE CADA ETAPA DEL GENERADOR.**

El inicio de la descarga entre las esferas de cada una de las 4 etapas (ver figura VI-1) del generador se hace de forma “natural” o mediante el uso de un sistema auxiliar (trigger). El primer método (descarga natural), se aplica para obtener la tensión de impulso deseada con alguno de los siguientes procedimientos:

- Con las esferas ajustadas a una distancia superior a la del inicio de la descarga, el generador es cargado a una tensión prefijada. Luego, se disminuye la separación interelectrónica con el accionamiento a distancia del generador de la EIE-UES 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.

Una alternativa al método de ruptura natural es el empleo del sistema auxiliar (trigger) 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 reducción de la dispersión de campo eléctrico que se verifica en el caso de inicio natural.



**Figura VI-1:** Generador de impulsos de la EIE-UES, donde se puede apreciar las 4 Etapas del generador y su par de esferas por etapa para el inicio de la descarga.

**CAPITULO VII.**  
**MEDIDA DE LA TENSION DE IMPULSO TIPO RAYO DE LOS ENSAYOS Y**  
**DETERMINACION DE LA FORMA DE IMPULSO.**

**Artículo 39. SISTEMA DE MEDICION DE LA TENSION DE IMPULSO TIPO RAYO.**

En la prueba de impulso es necesario efectuar la medición de la tensión que se aplica al objeto de prueba, la cual se puede hacer utilizando algunos de los siguientes métodos:

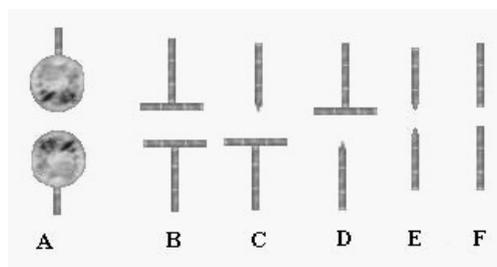
- A través de un espinterómetro.
- Por medio del divisor de tensión conectado a un osciloscopio.

**Artículo 40. EL ESPINTEROMETRO DE PRUEBA.**

El espinterómetro de prueba permite recortar la onda de impulso en el frente o en la cola de la misma. El espinterómetro, conocido también como “sphere gap”, “spark gap”, explosor, esferas excéntricas y chispómetro entre otros; es un elemento constitutivo de los generadores de impulso; puede ser usado a la vez como interruptor o como instrumento de medida. Cuando se usa como interruptor, origina la onda de impulso la cual puede ser plena o recortada y como instrumento de medida, permite conocer el nivel de tensión al cual dicha onda es generada y/o recortada.

El funcionamiento del espinterómetro está fundamentado en la descarga en gases. Dichas descargas dependen de varios factores, tales como: tipo de gas, forma de los electrodos, polaridad de los electrodos, tipo de tensión aplicada y las condiciones atmosféricas.

En las técnicas de alta tensión, el gas más empleado es el aire, ya que es el medio más común para originar descargas, ya que se encuentra libre en la naturaleza y no es necesario someterlo a procesos artificiales como el caso de otros dieléctricos.



**Figura VII-1:** Forma de los electrodos. A. Arreglo esferas, B. arreglo placas, C. arreglo punta – placa, D. arreglo placa – punta, E. arreglo puntas, F. arreglo barras

#### **Artículo 41. EL ESPINTEROMETRO DE ESFERAS.**

El espinterómetro de esferas se define como “un dispositivo constituido por dos electrodos metálicos, esféricos y de igual diámetro, donde la distancia que los separa es regulada a voluntad”. Al aplicar entre dichas esferas un potencial, la descarga a cierta distancia de ruptura ocurre a un valor de tensión predeterminado. En la prueba de impulso tipo rayo, este valor es el voltaje pico de la onda o nivel básico de aislamiento (NBI) del equipo a ensayar. El espinterómetro de esferas es uno de los métodos estándar para la medición del valor máximo de tensiones de impulso tipo rayo de cualquier polaridad, tiene que cumplir la condición de que el impulso este dentro de una forma de onda con un tiempo de frente de al menos 1 us. y un tiempo de cola de al menos 5 us. La disposición de las esferas del espinterómetro de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador es de forma vertical.

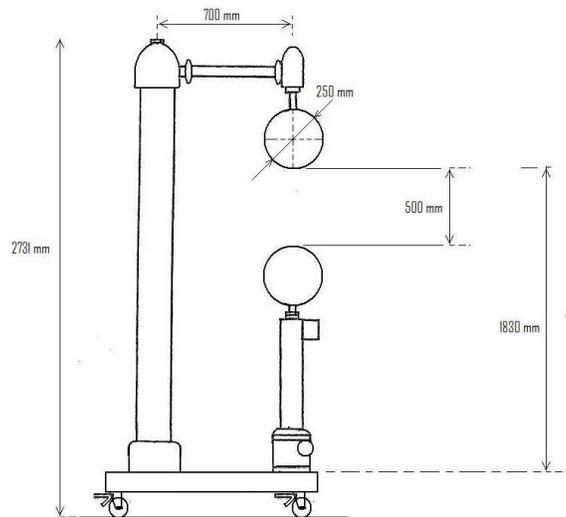


**Figura VII-2:** Espinterómetro o explosor de Esferas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador.

#### **Artículo 42. ESPECIFICACIONES Y DIMENSIONES DE LAS ESFERAS PARA LAS DEL ESPINTEROMETRO DE LA EIE-UES.**

Los requerimientos en cuanto a las dimensiones y montaje de las esferas que constituyen al espinterómetro establecen que las mismas deben ser de tal manera que sus superficies sean lisas, libres de irregularidades (en especial en los puntos de ruptura dieléctrica), que la curvatura sea lo más uniforme posible y además limpias y secas. Asimismo, el diámetro de la esfera medido entre dos puntos cualesquiera de su superficie no debe exceder el 2% de su valor nominal.

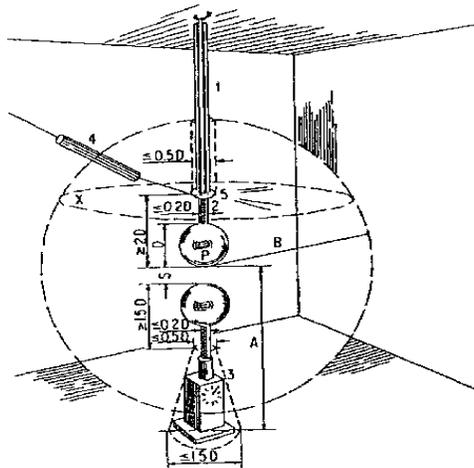
El valor del diámetro estándar de las esferas para el generador de impulsos de la EIE-UES, es de 250 mm. En la figura VII-3 se observan las especificaciones y dimensiones del espinterómetro:



**Figura VII-3:** Características físicas del espinterómetro de medición del generador de impulsos de EIE-UES.

**Artículo 43. DIMENSIONES DE SOPORTES Y BASES Y LAS DIMENSIONES DEL LOCAL DE ENSAYO PARA EL ESPINTEROMETRO DE MEDICION DE LA EIE-UES [4].**

Las dimensiones mostradas en la figura VII-4, son las distancias exigidas a los soportes y bases de las esferas, donde A y B son las distancias mínimas a tierra (clearances) del espinterómetro respecto a cualquier objeto circundante.



**Figura VII-4:** Distancias exigidas a soportes y bases del espinterómetro con respecto a cualquier objeto o pared circundante [4].

Como una de las esferas es aterrizada, la distancia desde el punto de chispa (puntos en las dos esferas que están más cerca los unos a los otros, donde se producen las descargas disruptivas) de la esfera de alta tensión al plano de tierra donde la esfera aterrizada es conectada, debe estar dentro de los límites que aparecen en la tabla VII-1:

Diámetro de las esferas "D"(mm)	Valor Mínimo de la distancia A	Valor Máximo de la distancia A	Valor Mínimo de la distancia B
250	4D (1,000 mm.)	7D (1,750 mm.)	10S

**Tabla VII-1:** Distancia del punto de chispa respecto al plano de tierra y paredes.

La altura A comprende la medida entre el punto de chispa del espinterómetro (esfera de alto voltaje) y el plano de tierra. Por otra parte, la distancia B entre el punto de chispa (esfera de alto voltaje) y objetos extraños como paredes, techo, transformadores, generadores de impulso, etc., la define como se ve en la tabla anterior la distancia S, donde S es la distancia de separación entre las esferas del espinterómetro.

**Artículo 44. CARACTERISTICAS ELECTRICAS DEL ESPINTEROMETRO DE MEDICION DE LA EIE-UES [6].**

El espinterómetro de medición tiene las siguientes características eléctricas a tomar en cuenta al momento de los ensayos:

- Mínimo voltaje pico negativo de impulso tipo rayo: 31.7 kV.
- Máximo voltaje pico negativo de impulso tipo rayo: 275 kV.
- Mínimo voltaje pico positivo de impulso tipo rayo: 31.7 kV.
- Máximo voltaje pico positivo de impulso tipo rayo: 291 kV.

**Artículo 45. TENSIONES ESTANDAR MEDIBLES A PARTIR DEL ESPINTEROMETRO DE LA EIE – UES [4].**

Por considerarse un dispositivo estándar y en base a las características eléctricas especificadas en el Artículo 44, con el espinterómetro se pueden medir las tensiones que se muestran en la tabla VII-2, en función de la distancia de separación de sus esferas:

Espacio Esferas (mm.)	Voltaje (kV pico) polaridad positiva	Voltaje (kV pico) polaridad negativa
20	59	-
25	72.7	72.5
30	86	86
40	112	112
50	138	137
60	163	161
70	187	184
75	199	195
80	211	206
90	233	226
100	254	244
110	273	261
120	291	275

**Tabla VII-2:** Voltajes pico de flameo de esferas espinterómetro EIE-UES según distancia de separación, para impulsos de voltaje tipo rayo con polaridad positiva y polaridad negativa <sup>[4]</sup>.

Los valores de la tabla VII-2 corresponden a condiciones atmosféricas estándar (ver artículo 18), cualquier desviación de estos valores, se tendrá que usar un factor de corrección para obtener el valor correcto de la tensión que se mide (ver artículo 20)

Según los datos de la tabla VII-2 del espinterómetro y los valores de tensión del artículo 44, para el espinterómetro de la EIE-UES se pueden medir valores de tensión hasta una distancia máxima de 120 mm. de separación entre las esferas.

De la tabla VII-2, los valores de las distancia A mínima y máxima son 1,350 mm. y 1,450 mm. respectivamente (dentro del rango establecido en tabla VII-1).

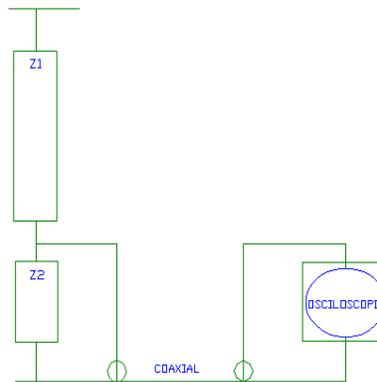
#### **Artículo 46. RESISTENCIA SERIE EN EL CIRCUITO DE MEDICION [4].**

La conexión de alta tensión del generador de impulsos con el espinterómetro debe hacerse a través de una resistencia anti-inductiva (máximo  $L=30 \mu\text{H}$ ) que no debe exceder el valor de  $500 \Omega$ . Esto con la finalidad de eliminar las oscilaciones de alta frecuencia (ocasionadas por las ondas viajeras reflejadas por efecto de desacoplamiento de las impedancias características de las líneas de interconexión) entre el espinterómetro y el conductor conectado al mismo. La resistencia serie instalada en el circuito de medición del generador de impulsos de la EIE-UES tiene un valor de  $25 \Omega$  obtenido en pruebas, (ver anexo E).

**Artículo 47. MEDICION DE LA TENSION DE IMPULSO TIPO RAYO MEDIANTE EL DIVISOR DE TENSION Y EL OSCILOSCOPIO [4].**

Este es el método de medición de tensión de impulso ampliamente utilizado. El divisor de tensión, al conectarse en el terminal de alta tensión del sistema de prueba, reduce el voltaje a un valor accesible para la medición con el osciloscopio (algunas decenas de voltios) y la interconexión se hace vía cable coaxial, como se muestra en la figura VII-5.

El divisor consta de dos impedancias en serie Z1 y Z2 (con  $Z1 \gg Z2$ ) donde la tensión de impulso a ser medida es aplicada entre los terminales exteriores de la configuración y el osciloscopio es conectado entre el terminal intermedio y el externo inferior.



**Figura VII-5:** Esquema básico para la medición de la tensión de impulso mediante divisor de tensión y osciloscopio.

**Artículo 48. DIVISOR DE TENSION CAPACITIVO DE LA ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR [4].**

El divisor de voltaje del generador de impulso de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador, se muestra en la figura VII-6. Los valores de capacitancia medidos en este divisor son 4157pF y 977nF respectivamente, con un valor de voltaje nominal de 400 kV. Con dichos valores el voltaje de prueba es reducido en función de:

$$V_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_1$$

Donde  $C_1$  corresponde al valor de capacitancia de 4157 pF, y  $C_2$  corresponde al valor de capacitancia de 977 nf.

La relación de voltaje  $V_2/V_1$  es igual a  $4.24 \cdot 10^{-3}$ , es decir una relación 236:1.

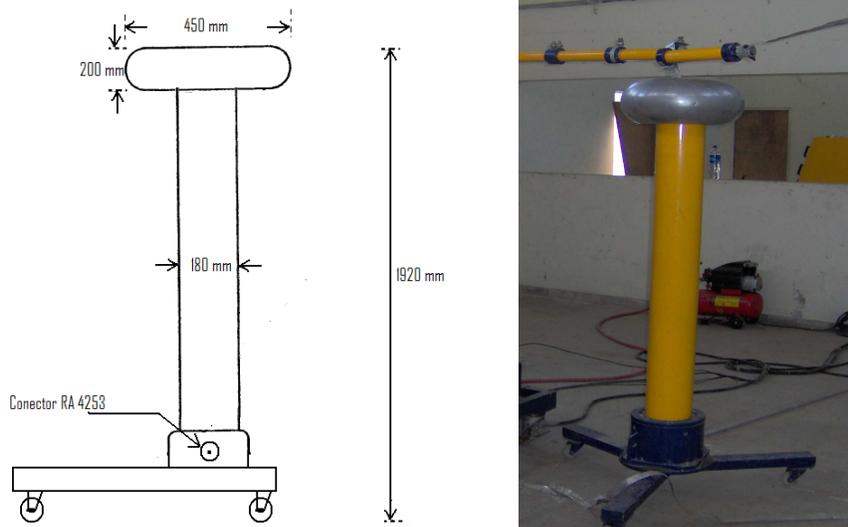


Figura VII-6: Divisor de tensión capacitivo del generador de impulsos EIE-UES.

#### Artículo 49. CABLE COAXIAL DE CONEXIÓN DE DIVISOR CAPACITIVO DE TENSION Y OSCILOSCOPIO [4].

Para complementar el circuito de medición de la tensión de impulso tipo rayo, el divisor capacitivo del generador de impulso de la EIE-UES, tiene en su base un conector especial llamado RA 4253, donde se debe conectar un cable coaxial RG 11 de 75 ohmios, el cual debe ir resguardado en tubería metálica conduit de ½ pulg. de diámetro. La longitud de este cable no debe exceder 15 metros. Una resistencia de 75 ohmios en la caja de registro antes de la unión del cable coaxial con la punta del osciloscopio, se utiliza para la disminución de ruido y para cerrar el circuito a tierra. El circuito equivalente es el que se presenta a continuación:

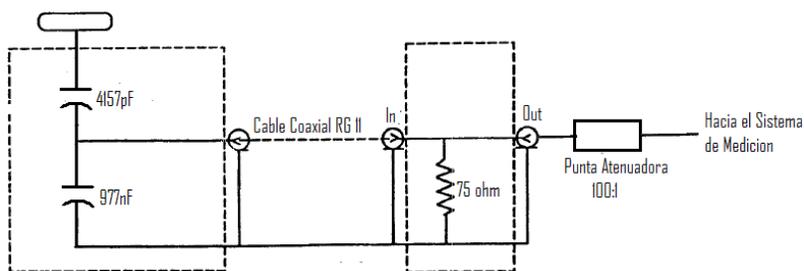


Figura VII-7: Circuito equivalente sistema de medición por división de tensión del generador de impulsos de EIE-UES.

## CAPITULO VIII. CALIBRACION DEL OSCILOSCOPIO MEDIANTE EL ESPINTEROMETRO DE MEDICION.

### **Artículo 50. CALIBRACION DE OSCILOSCOPIO PARA LA MEDICION DEL VALOR DE TENSION DE IMPULSO TIPO RAYO.**

La calibración consiste en establecer una relación entre la indicación o registro de tensión obtenido en el osciloscopio y una medida de la misma tensión realizada con el instrumento aprobado, el cual es el explosor o espinterómetro de esferas.

### **Artículo 51. FACTOR DE AJUSTE PROMEDIO [3].**

Es el valor promedio resultante de la relación entre la medida de tensión obtenida del espinterómetro (instrumento aprobado para medición) y el valor de tensión medido por el osciloscopio. El factor de ajuste luego de obtenido se utilizará para multiplicar los valores de tensión medidos por medio del osciloscopio en ensayos posteriores. Se obtiene de la siguiente expresión:

$$FC_{promedio} = \frac{\sum_{n=1}^{n=10} \frac{U_{espinterometro}}{U_{osciloscopio}}}{n}$$

Donde:

$U_{espinterometro}$ : valor de tensión de la tabla VII-2 corregido a las condiciones atmosféricas al momento de las pruebas,

$U_{osciloscopio}$ : valor tensión medido en el osciloscopio para cada prueba.

n: número de mediciones realizadas.

### **Artículo 52. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACION.**

La calibración del osciloscopio a partir del espinterómetro de esferas se realiza siguiendo el siguiente procedimiento:

- Medir las condiciones atmosféricas al momento de la prueba y calcular los factores de corrección atmosférica.
- Corregir los valores para el espinterómetro de medición de la tabla VII-2 a las condiciones atmosféricas medias al momento de realizar las pruebas.

- Realizar 10 lecturas de la tensión de descarga disruptiva con el osciloscopio, utilizando para cada una de las pruebas, los valores de tensión indicados en la tabla VII-2 corregidos a la atmosfera al momento de la prueba, ajustando las distancias entre las esferas y los valores de tensión indicados en dicha tabla.
- Calcular un factor de ajuste para cada una de las 10 pruebas, por medio de la relación entre los valores de tensión corregidos obtenidos por medio de la tabla VII-2 y la lectura tomada por medio del osciloscopio.
- Calcular un factor de ajuste promedio de los obtenidos en cada medición.

En el anexo F se observa el procedimiento anterior para la calibración del osciloscopio del laboratorio de pruebas de impulso tipo rayo de la EIE-UES:

### Artículo 53. ERROR PROMEDIO [3].

El error promedio entre el valor medido en el osciloscopio y el valor de voltaje de flameo de las esferas del espinterómetro indicado en la tabla VII-2 con corrección atmosféricas debe tener un valor menor al 10%. Se calcula sacando el promedio del error resultante de cada una de las 10 pruebas. La expresión para encontrar el error viene dada por:

$$\%ERROR_{promedio} = \frac{\sum_{n=1}^{n=10} \left| \frac{U_{espinterometro} - U_{osciloscopio}}{U_{espinterometro}} \right|}{n} * 100$$

Donde:

$U_{espinterometro}$ : valor de tensión de la tabla VII-2 corregido a las condiciones atmosféricas al momento de las pruebas,

$U_{osciloscopio}$ : valor tensión medido en el osciloscopio para cada prueba.

n: número de mediciones realizadas..

### Artículo 54. DESVIACION ESTANDAR DE LOS FACTORES DE AJUSTE [3].

La desviación estándar de los factores de ajuste de cada prueba con respecto al factor de ajuste promedio no debe de ser mayor del 5%. La desviación estándar se obtiene de la siguiente expresión:

$$S_v = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{n=1}^{n=10} (FC - FC_{promedio})^2}$$

Donde:

n: número de mediciones realizadas.

FC: factor de ajuste calculado de cada medición realizada.

FC<sub>promedio</sub>: Factor de ajuste promedio.

## **CAPITULO IX.** **PRUEBAS DE INTERFERENCIA PARA EL SISTEMA DE MEDIDA DEL** **GENERADOR DE IMPULSO TIPO RAYO.**

### **Artículo 55. PROCEDIMIENTO DE LAS PRUEBAS DE INTERFERENCIA [3].**

Las pruebas de interferencia deben realizarse en el sistema de medición, con el cable coaxial, el cual debe estar cortocircuitado en su terminal de entrada sin cambiar las conexiones del cable. Una condición de interferencia se produce en la entrada del sistema de medición (para mediciones de tensión por descarga disruptiva con un impulso representativo de la forma de onda que debe aplicarse) y la salida debe ser registrada. La prueba se hará en la medición de la tensión nominal, es decir en la señal de salida del divisor capacitivo de tensión. El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Realizar la medición de un impulso tipo rayo a un valor de tensión cualquiera con el cable coaxial conectado al divisor capacitivo de tensión.
- Realizar nuevamente la descarga del impulso tipo rayo al mismo valor de tensión, con la diferencia que el cable coaxial no está conectado al divisor capacitivo de tensión, sino que colocado cerca de la salida de señal de este, el cable coaxial debe tener su terminal de entrada cortocircuitada, es decir la línea de la señal y la línea de la tierra deben estar unidas y estas dos a la vez unidas a la tierra del sistema.
- Luego de tener los registros de las mediciones de ambos impulsos (con cable coaxial conectado y sin cable coaxial conectado al divisor capacitivo de tensión), estos se restan, quitando al primer impulso obtenido los registros del segundo impulso el cual contiene la señal de interferencia.

En el anexo G se observa el procedimiento anterior para las pruebas de interferencia en el circuito de medición del generador de impulsos tipo rayo de la EIE-UES:

## CAPITULO X. MODALIDAD DE ENSAYO DE DESCARGA DISRUPTIVA.

### Artículo 56. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO ARRIBA-ABAJO (UP & DOWN).

El valor de descarga disruptiva  $U_{50}$ , se determina en los laboratorios de alta tensión por métodos experimentales. El procedimiento a seguir es muy usado y conocido como de "Arriba-Abajo" (Up & Down), Este procedimiento consiste en lo siguiente:

- Estimar un valor inicial para la tensión de descarga disruptiva ( $U_{50}$ ).
- Estimar un valor para la desviación estándar. Para impulsos tipo rayo se puede suponer una desviación estándar en por unidad de 0.03 para ondas de impulso por rayo.
- Realizar las correcciones atmosféricas a los valores de las condiciones al momento de la prueba.
- Aplicar el impulso tipo rayo al valor estimado inicial de  $U_{50}$  con las correcciones atmosféricas correspondientes..
- Si no hay flameo, se incrementa el voltaje aplicado en el valor de la desviación estándar:  
 $U_v = U_v + S_v$
- Si se presenta flameo, se reduce el valor del voltaje aplicado en el valor de la desviación estándar:  
 $U_v = U_v - S_v$
- Para cada nivel de voltaje aplicado se debe contar el número de impulsos realizados.
- El proceso se continúa por al menos 20 ensayos.
- El ritmo de los impulsos debe hacerse respetando los tiempos entre cada impulso según el nivel de voltaje del ensayo, basándose en la gráfica que se muestra a continuación para el generador de impulsos de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador.

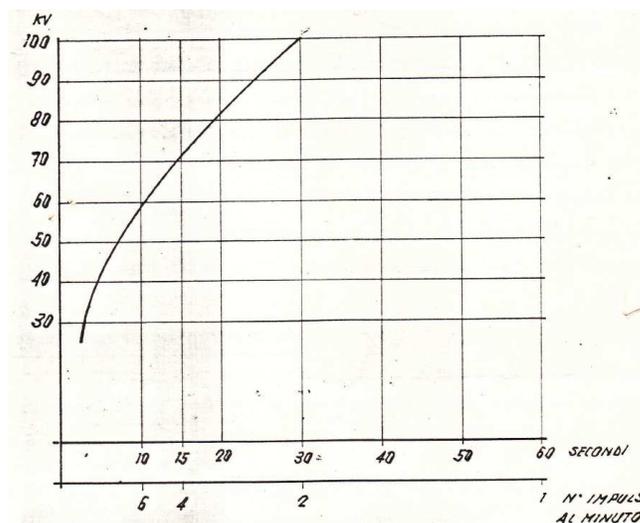


Figura X-1: Ritmo entre impulsos para el generador de impulsos de la EIE-UES.

- El valor de la tensión de descarga disruptiva se encuentra por medio de la siguiente fórmula:

$$U_{50} = \frac{\sum(N_v * U_v)}{\sum N_v}$$

Donde:

$N_v$  = Número de impulsos tipo rayo aplicados.

$U_v$  = Valor del nivel de tensión para cada impulso tipo rayo aplicado.

## **CAPITULO XI.** **ENSAYOS DIELECTRICOS DE DESCARGAS DISRUPTIVAS EN AIRE CON ELECTRODOS PUNTA-PUNTA Y PUNTA-PLANO.**

### **Artículo 57. RUPTURA DIELECTRICA EN AIRE.**

El dimensionamiento dieléctrico está basado en relaciones semiempíricas, obtenidas de datos experimentales, es decir de simulación de descargas disruptivas en aire, sobre distintas configuraciones de electrodos (espinterómetros), entre las cuales están:

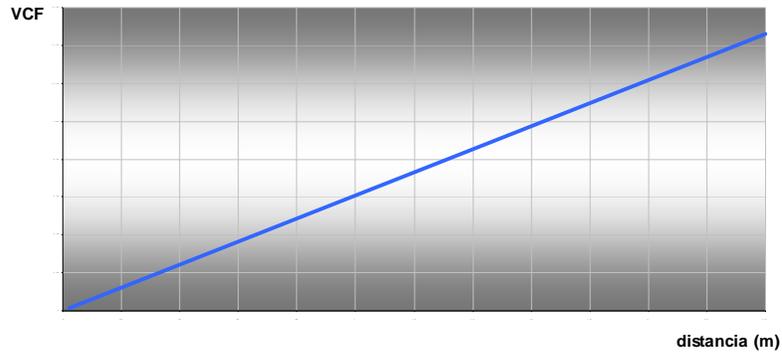
- La configuración punta-punta.
- La configuración punta-plano.

Por tratarse de ruptura dieléctrica en aire, el valor de la tensión disruptiva está afectada por las condiciones ambientales como son: presión barométrica, temperatura y humedad, por lo que en dichas pruebas es necesario realizar las correcciones atmosféricas sobre las expresiones referidas por lo general a condiciones estándar.

### **Artículo 58. RELACIONES MATEMATICAS PARA ELECTRODOS PUNTA-PUNTA Y PUNTA-PLANO.**

Para impulsos tipo rayo, las descargas disruptivas en aire para los electrodos punta-punta y punta-plano presentan una relación matemática aproximadamente lineal entre la tensión de descarga disruptiva en función de la distancia entre los electrodos.

RELACION TENSION DE DESCARGA DISRUPTIVA - DISTANCIA ELECTRODOS  
PARA ONDA DE IMPULSO TIPO RAYO



**Figura XI-1:** Relación entre la tensión de descarga disruptiva y la distancia de separación entre los electrodos de las configuraciones punta-punta y punta-plano.

**Artículo 59. FACTOR DE ELECTRODO O FACTOR GAP.**

La relación matemática que define la gráfica de la figura XI-1, presenta la siguiente expresión:

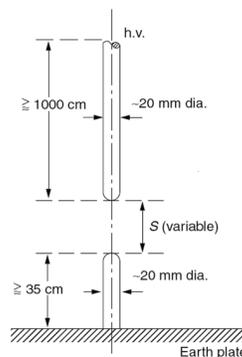
$$VCF = K_3 * d \text{ (kV)}$$

Donde la pendiente  $K_3$  de la recta, es el coeficiente de proporcionalidad, factor de electrodo o factor gap, su valor está entre 500-700 kV/m, el cual es utilizado en los cálculos para dimensionamiento dieléctrico en instalaciones de alta tensión.

**Artículo 60. ESPINTEROMETROS PUNTA-PUNTA [4].**

Son utilizados para la medición de tensiones de impulso tipo rayo, pero debido a la gran dispersión de la tensión de ruptura dieléctrica y de las incertidumbres de la fuerte influencia de humedad, no es posible que sean utilizados como aparatos de medición (Ver figura VII-1).

Las distancias y la configuración para un espinterómetro punta/punta puede ser según la figura:



**Figura XI-2:** Distancias y configuración para un electrodo punta-punta.

**Artículo 61. CARACTERISITICAS FISICAS DE UN ESPINTEROMETRO PUNTA-PUNTA.**

La longitud de las barras de los electrodos debe ser de 15 a 75 cm. y la distancia de separación entre los electrodos varía de 2 a 200 cm. Las barras por lo general consta de dos electrodos de varilla de 1.27 cm. cuadrados de sección cuadrada en su extremo.

**Artículo 62. VALORES DE TENSION DISRUPTIVA PARA ESPINTEROMETRO PUNTA-PUNTA [4].**

Para unas barras de 1.27 cm. cuadrados, temperatura a 20 °C, presión de 760 mm. de Hg. y humedad absoluta de 11 g/cm<sup>2</sup>, los valores de voltaje para la tensión de descarga disruptiva a diferentes distancias para voltajes de impulso tipo rayo se muestran en la siguiente tabla:

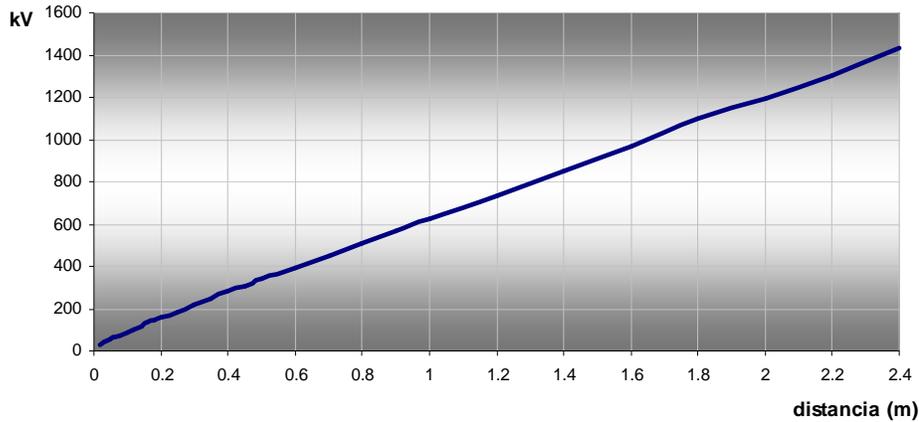
DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS (cm)	VOLTAJE CRITICO DE FLAMEO (kV pico)		DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS (cm)	VOLTAJE CRITICO DE FLAMEO (kV pico)	
	forma de onda (1.2 x 50 us)			forma de onda (1.2 x 50 us)	
	Positivo	Negativo		Positivo	Negativo
2	31	31	40	281	313-348*
3	41	41	45	309	347-375*
4	50	50	50	339	382-392*
5	59	61	60	392	455
6	64	69	70	450	525
8	75-76*	84	80	510	585
10	87-91*	99	90	570	670
12	100-107*	116	100	625	715
14	114-125*	132	120	735	835
16	129-142*	147	140	850	965
18	139-153*	158	160	965	1,090
20	154-161*	176	180	1,100	1,240
25	184	217	200	1,195	1,340
30	217	249-260*	220	1,300	1,470
35	250	283-306*	240	1,430	1,605

\*Valores dobles se deben a las condiciones inestables, las causas se desconocen. El error en la descarga de voltaje en electrodo punta/punta puede ser del valor de 8%.

**Tabla XI-1:** Valores de la tensión de descarga disruptiva para distintas distancias de separación entre los electrodos punta-punta<sup>[4]</sup>.

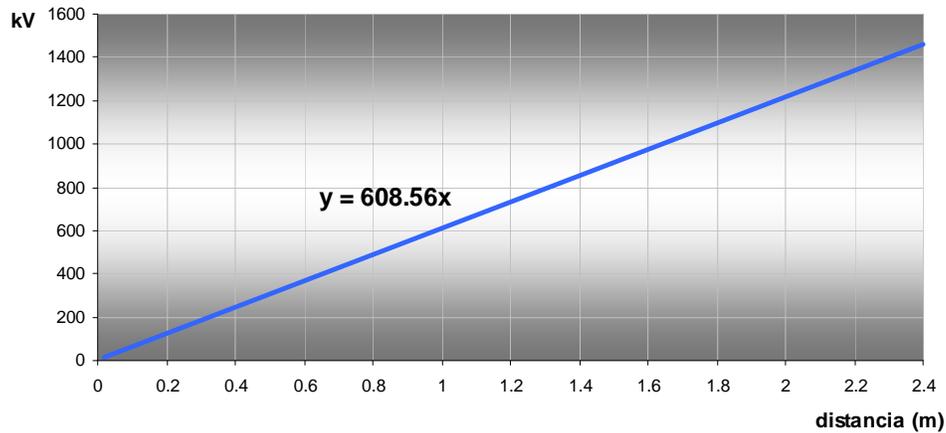
La siguiente grafica para los datos de la tabla XI-1, muestra una tendencia lineal en el comportamiento de la tensión de descarga disruptiva, en función de la distancia de separación de los electrodos punta-punta:

**GRAFICA DE TENSION DE DESCARGA DISRUPTIVA VRS DISTANCIA ELECTRODOS PUNTA-PUNTA**



**Figura XI-3:** Gráfica de tensión de descarga disruptiva en función de la distancia para electrodos punta-punta.

**GRAFICA DE TENSION DE DESCARGA DISRUPTIVA VRS DISTANCIA DE ELECTRODOS PUNTA/PUNTA APLICANDO REGRESION LINEAL**



**Figura XI-4:** Gráfica de tensión de descarga disruptiva en función de la distancia para electrodos punta-punta aplicando regresión lineal.

Al aplicar una regresión de tendencia lineal a la gráfica de la figura XI-3, se obtiene un factor gap  $K_3 = 608.56 \text{ kV/m}$ .

**Artículo 63. PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR GAP PARA UN ESPINTEROMETRO PUNTA-PUNTA.**

Para obtener el factor gap de un espinterómetro punta-punta debe de seguirse el siguiente procedimiento (ver anexo H-2):

- Para cada distancia de separación de los electrodos punta-punta, calcular un valor de tensión de descarga disruptiva  $U_{50}$  por medio del procedimiento ARRIBA-ABAJO descrito en el artículo 56.
- Graficar los datos de los valores de tensión  $U_{50}$  obtenidos para cada distancia de separación entre los electrodos punta-punta.
- Aplicar una regresión lineal a la gráfica y obtener la ecuación de la recta.
- La pendiente de dicha recta corresponde al factor gap para dicho espinterómetro punta-punta.

#### Artículo 64. ESPINTEROMETRO PUNTA-PLANO.

Al igual que el espinterómetro de electrodos punta-punta, el espinterómetro de electrodos punta-plano se utiliza para la medición de tensión pico de impulsos de voltaje, formando entre sus electrodos un campo eléctrico no uniforme, a continuación se muestra un montaje de un espinterómetro punta-plano, con un campo no homogéneo y polaridad positiva (Ver figura VII-1). La configuración para la instalación de un electrodo punta-plano se tiene en la figura XI-5.

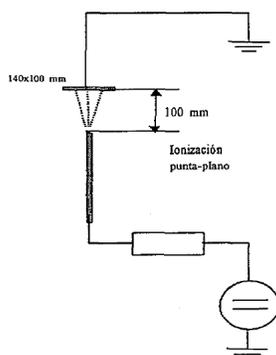


Figura XI-5: Configuración para electrodos punta-plano.

#### Artículo 65. CARACTERISITICAS FISICAS DE UN ESPINTEROMETRO PUNTA-PLANO.

La longitud de las barras de los electrodos debe ser de 15 a 75 cm. y la distancia de separación entre los electrodos varía de 2 a 200 cm. Las barras por lo general consta de dos electrodos, uno en el lado de alta tensión correspondiente a una varilla de 1.27 cm. cuadrados de sección cuadrada en su extremo (electrodo punta) y en el lado de aterrizamiento, una lámina de aluminio de sección cuadrada de 50 cm de lado hasta 1 m. de lado (electrodo plano).

**Artículo 66. PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR GAP PARA UN ESPINTEROMETRO PUNTA-PLANO.**

Para la obtención del valor del factor gap para espinterómetros punta-plano debe seguirse el mismo procedimiento indicado en el artículo 63 para el espinterómetro punta-punta. (Ver anexo H-4)

**CAPITULO XII.**  
**ENSAYOS DIELECTRICOS DE TENSION DE DESCARGA DISRUPTIVA PARA**  
**EL DIMENSIONAMIENTO ELECTRICO DEL AISLAMIENTO EN**  
**INSTALACIONES DE ALTA TENSION.**

**Artículo 67. DISTANCIA DE FASE A TIERRA PARA TENSIONES DE IMPULSOS TIPO RAYO.**

La distancia que debe tener la fase con respecto a la tierra y que corresponde a la distancia que debe cubrir un aislamiento en instalaciones de alta tensión se obtiene de la siguiente expresión:}

$$U_{50} = K_3 \cdot d \quad (\text{kV})$$

Donde:

$U_{50}$ : tensión de descarga disruptiva o tensión crítica de flameo corregida a las condiciones ambientales correspondientes.

$K_3$ : Factor gap, o factor de electrodo, en este valor se puede utilizar el factor gap del espinterómetro con electrodos punta-plano.

$d$ : distancia de fase a tierra.

**Artículo 68. CALCULO TEORICO DE LA TENSION DE DESCARGA DISRUPTIVA PARA AISLAMIENTO SOMETIDO A IMPULSOS DE TENSION TIPO RAYO**

La tensión de descarga disruptiva o tensión crítica de flameo se relaciona con el nivel básico de aislamiento al impulso (NBI), considerando una desviación estándar del 3% y está dado por la expresión:

$$NBI = U_{50} \cdot (1.0 - 1.3 \cdot Sv)$$

Donde:

La desviación estándar  $Sv$  puede considerarse para ensayos en seco para aislamiento en aire y tensiones aplicadas tipo rayo, igual a  $Sv = 3\%$ .

NBI: corresponde al valor del nivel básico de aislamiento para el nivel de tensión para el que se desea definir el aislamiento.

$U_{50}$ : tensión de descarga disruptiva o tensión crítica de flameo sin aplicar correcciones atmosféricas con probabilidad de descarga del 50%.

Por lo descrito anteriormente:

$$NBI = 0.961 * U_{50}$$

Combinando las dos últimas expresiones y realizando la corrección atmosférica, se obtiene:

$$U_{50} = \frac{NBI.K_t}{0.961}$$

#### **Artículo 69. NUMERO DE AISLADORES DIMENSIONADOS.**

El número de aisladores estándar a instalar para el nivel de tensión correspondiente, viene dado por la siguiente expresión:

$$No\ de\ aisladores = \frac{d}{l}$$

Donde  $l$  es igual a la longitud del aislador.

#### **Artículo 70. CALCULO EXPERIMENTAL DE LA TENSION DE DESCARGA DISRUPTIVA PARA AISLAMIENTO SOMETIDO A IMPULSOS DE TENSION TIPO RAYO**

Teniendo dimensionado teóricamente el aislamiento, debe calcularse el valor experimental de la tensión  $U_{50}$  sometiendo al mismo a ensayos de tensión de impulso tipo rayo, siguiendo el procedimiento ARRIBA-ABAJO descrito en el artículo 56. El valor de tensión de descarga disruptiva  $U_{50}$  obtenido experimentalmente debe compararse con el obtenido teóricamente, si dicho resultado experimental es mayor que el resultado teórico, el aislamiento está bien dimensionado, así como también el aislamiento cumple las características de diseño del fabricante para el nivel básico de aislamiento al someterse a tensiones de impulsos tipo rayo, caso contrario el aislamiento debe ser rechazado (ver anexo I).

## REFERENCIAS.

- [1] Internacional Electrotechnical Commission IEC.  
Publication 60-1: High Voltage Test Techniques.  
Parte1: General Definitions and test requirements.  
Second Edition 1989.
- [2] UNE 21-308-94  
Ensayos en alta tension.  
Parte 1: Definiciones y Prescripciones Generales relativas a los ensayos.  
1994.
- [3] Internacional Electrotechnical Commission IEC.  
Publication 60-2: High Voltage Test Techniques.  
Part 2: Measuring Systems.  
Edition 1996.
- [4] IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing.  
IEEE Std 4-1995.
- [5] High Voltage Engineering.  
C.L. Wadhwa.  
Second Edition.
- [6] Passoni Villa.  
Manual de Instrucciones.  
1988.
- [7] ANSI C29.2-1992  
Wet-Process Porcelain and Toughened Glass—Suspension Type
- [8] Internacional Electrotechnical Commission IEC.  
Publication 71-2: Insulation coordination.  
Parte2: Application Guide.  
Third Edition 1996.

**ANEXO A.**  
**DESCRIPCION DEL GENERADOR DE IMPULSOS DE LA ESCUELA DE**  
**INGENIERIA ELECTRICA DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.**

El generador de impulsos tipo rayo de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador consta de las siguientes partes:

**A-1. PLATAFORMA METÁLICA CON RUEDAS.**

En esta plataforma se encuentran montados dispositivos auxiliares para el control a distancia del generador desde el banco de mando. Veámoslos a continuación:

**A-1.1. Motor de doble sentido de rotación.**

Este sirve para regular el espaciamiento entre los explosores de esferas de cada una de las etapas del generador, al accionar un sistema de transmisión de árbol giratorio y de engranajes el cual permite el desplazamiento sobre el eje horizontal del hemisferio móvil de cada uno de los explosores en forma sincronizada.

**A-1.2. Transductor de rotación.**

Está acoplado al motor de doble sentido de rotación, cumple la función de transmitir hacia el banco de mando la indicación de la distancia entre los hemisferios de los explosores de las etapas.

**A-1.3. Dispositivo de Seguridad.**

Es un dispositivo neumático para poner a tierra toda la instalación, que posee comando de bloqueo para evitar la conexión del transformador de alta tensión cuando el divisor esta cerrado. Consiste de:

- Un cilindro de aire neumáticamente operado.
- Un tanque con capacidad de 5 litros.
- un switch detector de presión mínima requerida.
- un set de electro válvulas para el control.

Para la operación idónea de este dispositivo se requiere un compresor con una capacidad de 4.5/6 bars de presión. Este compresor no se activará automáticamente ya que esta siendo controlado por un contactor con su respectiva botonera, por tanto cuando la presión caiga por debajo del nivel mínimo permisible no se encenderá para la protección del mismo.

Cuando el dispositivo de seguridad se activa los capacitores se descargan con una constante de tiempo de algunas décimas de milisegundos. Ambos electrodos de los capacitores son aterrizados. El bushing de alto voltaje se aterriza a través de los resistores de carga, la carcasa metálica a través de las resistencias de cola.

#### **A-1.4. Placa de conectores.**

Esta placa aloja los conectores hasta donde llegan los diferentes cables de medición, control entre el banco de mando y el generador. Dichos conectores son:

- *Auxiliar Service Multipolar:* contiene el cable que transmite señales de control para servicios auxiliares al generador de impulsos.
- *Trigatron Conector:* transmite la señal de disparo para el generador de impulsos, la cual es generada en el dispositivo trigatrón ubicado en la consola de control.
- *Spark Gap regulation:* este transmite las señales de medición y control de la distancia entre los hemisferios de los espinterómetros de las etapas del generador.
- *Measuring Connector:* transmite en el banco de mando una medida del voltaje de carga del generador, la cual es realizada por la resistencia de medición.
- *Compressed Air Connector:* en este ducto se conecta una manguera flexible que transmite la presión de aire proveniente del compresor.

#### **A-1.5. Estructura Aislante.**

Esta conformada con postes de polipropileno colocados en vitrorresina en cada etapa para soportar los diferentes componentes: capacitares, resistencias y espinterometros.

#### **A-1.6. Capacitores de cada etapa.**

Están fabricados de papel impregnado en aceite ecológico y confinado en cajas metálicas con aislante pasante de porcelana. A continuación podemos ver sus características técnicas:

Tensión nominal en corriente continua	100KV
Capacitancia Nominal	0.5uF
Tolerancia sobre el valor nominal de la capacitancia	5-10%
Inductancia propia	0.5uH
Temperatura de funcionamiento	-10°C +40°C

**Tabla A-2:** Características técnicas de los capacitores de cada etapa del generador de impulsos de la EIE.

### A-1.7. Resistencias de forma de onda.

El generador ha sido suministrado con un juego de resistencias de valores apropiados a fin de generar la onda de impulso 1.2/50uS, siendo clasificados según la función que cumplen dentro del circuito. Cada una de las resistencias están formadas por dos alambres esmaltados de Ni-Cr enrollados paralelamente y en sentido contrario sobre un tubo de resina de vidrio clase H. Cada resistor es capaz de soportar una tensión nominal de 100KV de cada etapa y son del tipo antiinductivo. Veamos las siguientes características:

#### A-1.7.1. Resistencia de frente.

Valor Nominal	12Ω
Inductancia de la resistencia	1.5uH
Capacidad térmica para un ritmo de 1 impulso cada 30 segundos	2.5KJ

**Tabla A-3:** Características técnicas de la resistencia de frente del generador de impulsos de la EIE.

#### A-1.7.2. Resistencia de cola.

Valor Nominal	120Ω
Inductancia de la resistencia	2uH
Capacidad térmica para un ritmo de 1 impulso cada 30 segundos	2.5KJ

**Tabla A-4:** Características técnicas de la resistencia de cola del generador de impulsos de la EIE.

#### A-1.7.3. Resistencia de salida.

La resistencia de salida esta equipada con derivaciones para ajustar su valor de acuerdo al valor de la capacitancia a tierra del objeto de prueba, en el rango especificado para el generador se detallara mas adelante.

Valor Nominal (25+25+25)	75Ω
Inductancia de la resistencia	Menor de 2uH
Capacidad térmica para un ritmo de 1 impulso cada 30 segundos	10KJ

**Tabla A-5:** Características técnicas de la resistencia de salida generador de impulsos de la EIE.

#### A-1.8. Resistores de carga.

Las resistencias de carga son las que transmiten la carga a los capacitores.

Valor Nominal (25+25+25)	3.5KΩ
Capacidad térmica para un ritmo de 1 impulso cada 30 segundos	2.5KJ

**Tabla A-6:** Características técnicas de los resistores de carga del generador de impulsos de la EIE.

#### A-1.9. Espinterómetros.

Cada una de las cuatro etapas tiene su respectivo explosor de esferas (espinterómetro). Cada uno de ellos esta formado por dos hemisferios de cobre de 125 mm de diámetro. Uno de los hemisferios de cada etapa puede moverse a lo largo de su eje horizontal en forma sincronizada con los respectivos hemisferios de las otras etapas, siendo estos accionados por un motor de doble sentido de giro, controlado desde la consola de mando.

El espinterómetro de la primera etapa esta equipado en uno de sus hemisferios con un mecanismo de disparo (Trigatrón), el cual permite obtener un control preciso sobre el disparo del generador.

Mediante un transductor acoplado al eje del motor se transmite hacia el banco de mando una lectura de espaciamento entre las esferas.

#### A-1.10. Condensador Trigatrón.

Este condensador es el que transmite la señal de disparo del generador, la cual es generada por un dispositivo electrónico de precisión (ETR) ubicado en el banco de mando, hacia el espinterómetro de la primera etapa del generador. Veamos sus características:

Tensión nominal de DC	100KV
Capacitancia Nominal	750pF
Resistencia nominal	900Ω

**Tabla A-7:** Características técnicas del condensador trigatrón generador de impulsos de la EIE.

### A-1.11. Generador de corriente continúa.

Este se genera a partir de 220V AC, los 100KV de salida máxima a la que puede cargarse cada una e las etapas del generador de impulsos.

El generador DC esta confinado en un recipiente cilíndrico aislante lleno de aceite mineral. A la salida y encima del recipiente están colocados los diodos cuya polaridad se monitorea desde el banco de mando.

Veamos también sus características técnicas:

Tensión de alimentación a 50-60Hz	220V
Tensión de salida en DC	100KV
Corriente Nominal	20mA

**Tabla A-8:** Características técnicas del generador de corriente continúa del generador de impulsos de la EIE.

El generador esta compuesto de las siguientes partes:

#### A-1.11.1. Transformador elevador.

Este eleva el voltaje de 220V a un nivel del orden de los KV.

Potencia Nominal	3KV
Tensión de entrada nominal AC	220V
Tensión de salida AC	44KV

**Tabla A-9:** Características técnicas del transformador elevador del generador de impulsos de la EIE.

#### A-1.11.2. Capacitor de duplicación.

Tensión nominal	50KV
Capacitancia Nominal	5nF

**Tabla A-10:** Características técnicas del capacitor de duplicación del generador de impulsos de la EIE.

#### A-1.11.3. Diodos rectificadores.

Tensión de inversa	150KV
Corriente nominal	225mA

**Tabla A-11:** Características técnicas de los diodos rectificadores del generador de impulsos de la EIE.

#### A-1.11.4. Resistencias de protección para los diodos.

Estos limitan la corriente que llega a la sección de rectificación.

Tensión nominal	100KV
Resistencia Nominal	15k $\Omega$

**Tabla A-12:** Características técnicas de las resistencias de protección de los diodos generador de impulsos de la EIE.

#### A-1.11.5. Resistencia de medida.

Tiene un bajo coeficiente de temperatura y alta estabilidad ante variaciones de voltaje. Esta resistencia permite una medida directa del voltaje de carga por medio del miliamperímetro instalado en el banco de mando.

Tension Nominal en servicio continuo	100KV
Resistencia Nominal	180M $\Omega$
Tolerancia sobre el valor nominal.	+/- 5%

**Tabla A-13:** Características técnicas de la resistencia de medida del generador de impulsos de la EIE.

#### A-1.12. Capacitor de carga/divisor tipo ILCD.

Este tiene la doble función de capacitor de carga y divisor capacitivo. Este proporciona una muestra reducida de la forma de onda de voltaje producida por el generador, preestablecida para los objetos sometidos a prueba, en el campo nominal de su capacidad.

Los elementos capacitivos que lo conforman están hechos de papel impregnado en aceite mineral y con armaduras salientes de modo que las conexiones entre los elementos sean cortas y robustas y se reduzca así el valor de la inductancia.

Toda la estructura del divisor esta encerrada en una envoltura de polipropileno y dotada con un electrodo Terminal.

El capacitor de carga consiste de:

- Una base de hierro equipada con ruedas para permitir su desplazamiento. Posee las siguientes características técnicas:

Capacitancia Nominal	4000pF
Voltaje Nominal	400KV

**Tabla A-14:** Características técnicas del capacitor de carga del generador de impulsos de la EIE.

- Un electrodo hemisférico en la parte superior fabricado con una aleación de aluminio colado. Este sirve para resistir los esfuerzos electrodinámicos que produce el alto voltaje en el divisor
- Un adaptador a bajo voltaje para conectar un osciloscopio o un voltímetro de pico de impulso. Para ello dispone un conector especial.

#### **A-1.13. El espinterómetro de medición.**

Es del tipo MSG-25 y se utiliza como instrumento de ajuste y verificación del voltaje de cresta de onda. Posee las siguientes características técnicas:

Diámetro de las esferas	250mm
Máxima distancia entre las esferas	250mm
Tensión máxima permisible con impulsos atmosféricos Onda Neg.	275KV
Tensión máxima permisible con impulsos atmosféricos Onda Pos.	291KV

**Tabla A-15:** Características técnicas del espinterómetro de medición del generador de impulsos de la EIE.

Dicho espinterómetro consiste de:

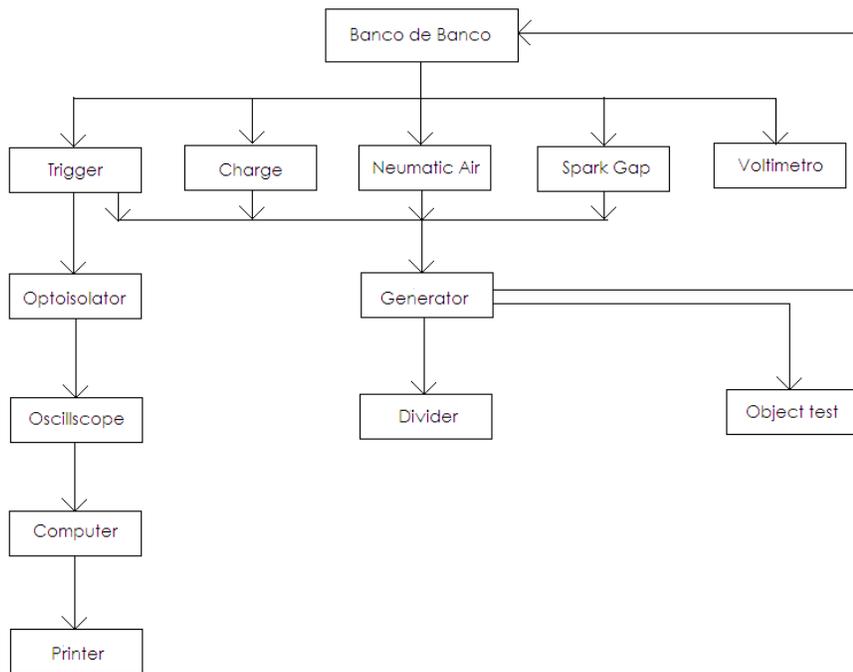
- a) una base con perfiles soldados en hierro y aluminio, la cual esta equipada con ruedas para permitir su desplazamiento.
- b) Una esfera superior de lámina de cobre.
- c) Un soporte para la esfera superior formado por un tubo de Vitro resina y por un brazo metálico horizontal.
- d) Una esfera inferior de lamina de cobre, la cual puede moverse axialmente ya sea controlada desde el banco de mando, o bien moverse manualmente al accionar una palanca instalada en el soporte de esta esfera. Cuando se coloca la palanca para operación manual se bloquea el control desde la consola de mando.
- e) Una varilla metálica graduada en mm integrada al soporte de la esfera inferior, la cual provee una lectura directa de la distancia entre las esferas.
- f) Un mando a distancia para mover axialmente la esfera inferior, el cual esta formado por:
  - Un cilindro activado por un moto reductor.
  - Un equipo que evita que el árbol gire durante el desplazamiento axial de la esfera inferior.
  - Dos interruptores de final de carrera para frenar el movimiento vertical de la esfera.

- Un potenciómetro que permite la lectura a distancia entre las esferas a través de un instrumento montado sobre el banco de mando.

## A-2. BANCO DE MANDO.

Esta consola se encarga de controlar el funcionamiento global del generador de impulsos, no así del sistema en general, ya que dicho gabinete no controla el funcionamiento del osciloscopio y la computadora. Contiene las tarjetas y los circuitos necesarios para realizar las siguientes actividades:

- Control de voltaje de carga del generador-
- Sincronismo del sistema de disparo del generador y el osciloscopio.
- Control e indicación del sistema neumático de seguridad.
- Variación y medición de la distancia entre las esferas que inician la descarga de condensadores (Spark Gap).
- Variación y medición de la distancia entre las esferas del voltímetro.
- Control del tiempo entre impulsos.



**Figura A-1:** Diagrama de la arquitectura del sistema.

Del diagrama se observa que existe retroalimentación del generador al control, esta es necesaria para poder establecer las condiciones del generador y así poder realizar adecuadamente su función de controlador.

El control se puede subdividir en las siguientes secciones:

- Sección de carga.
- Sección de seguridad.
- Sección de disparo.
- Sección de separación de los “spark gap”.
- Sección del voltímetro de esferas.

### A-2.1. Sección de carga.

Este sistema controla el proceso mediante el cual, los condensadores son cargados al voltaje deseado por el operador, además proporciona la lectura de la corriente y el voltaje de carga.

Esta sección es un sistema de control automático, que retroalimenta una muestra de corriente que depende del valor del voltaje en los capacitores. Por medio de dicha corriente se compara el nivel de voltaje con el que están siendo cargados los capacitores con el valor preestablecido, esto permite detener la carga cuando el voltaje alcanza el valor deseado.

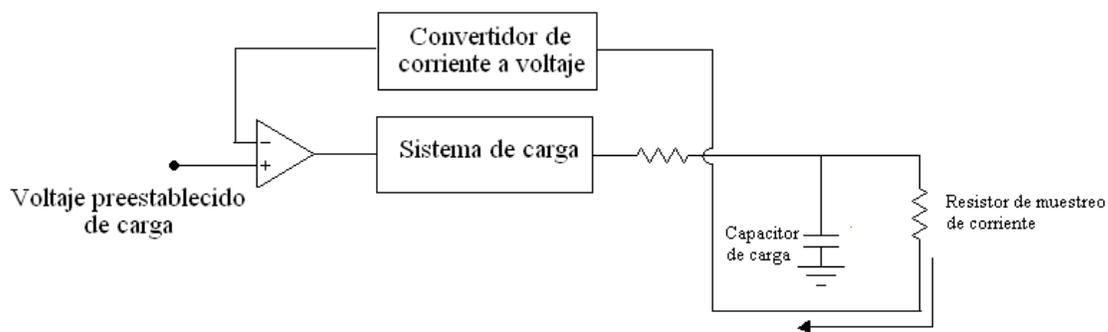


Figura A-2: Diagrama de control de carga.

#### A-2.1.1. Rango de Voltaje (Voltaje Range low/high)

Este conmutador permite seleccionar el rango de voltaje de carga a generar, según el voltaje de salida demandado del generador. En la posición Low se puede generar hasta 50KV de carga por etapa, y en la posición High se pueden generar arriba de 50KV, hasta un máximo de 99.9 KV por etapa.

#### A-2.1.2. Intervalo de tiempo.

Este permite la regulación de la pausa que debe hacerse entre impulsos consecutivos, lo cual dependerá del voltaje de carga del generador. Girando en sentido horario aumenta el tiempo de

espera, en sentido contrario disminuye. Una luz amarilla encendida indicara que debe esperarse para reiniciar la carga.

#### **A-2.1.3. Ajuste del voltaje de carga.**

Este consiste de un potenciómetro digital con el cual se puede seleccionar un voltaje de carga entre 10 y 99.9KV. (El punto no aparece en el potenciómetro, por lo que se vera 999).

#### **A-2.1.4. Número de disparos.**

Este es el control mediante el cual se fija el número de impulsos consecutivos a producir en el modo de funcionamiento automático y con el conmutador SIGN. /MUL, en la posición MUL. Para fijar el número de impulsos a producir debe presionarse simultáneamente el botón independiente y el botón que corresponde al dígito que se desea cambiar.

#### **A-2.1.5. Conmutador SIGN./ MUL**

Este conmutador se utiliza para el funcionamiento en ciclo automático y permite seleccionar si se hará una generación de impulsos sencilla o múltiple.

#### **A-2.1.6. Sección de seguridad.**

Es un sistema neumático utilizado para la seguridad de los operadores del generador y los equipos. Consta de un compresor el cual suministra aire a presión a un pistón, y este a su vez mueve el electrodo que tiene como función cuando se encuentra en la posición activa proporcionar una trayectoria a tierra para la descarga de los condensadores. La posición del pistón es controlada por medio de una electro válvula. Además, cuenta con un interruptor activado por aire que inhibe toda actividad de carga cuando detecta ausencia la presión mínima de aire requerida.

- Luz Roja: Indica que el generador no esta puesto a tierra.
- Luz verde: indica que el generador esta puesto a tierra.

El generador también tiene un apagado de emergencia (emergency off), el cual es un pulsador en forma de hongo el cual detiene todas las operaciones y pone a tierra toda la instalación. Para activarlo basta con presionarlo y a la vez se activara un warning aural que puede pararse al presionar ALARM STOP.

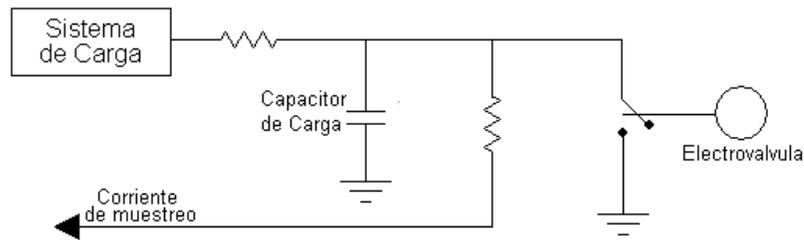


Figura A-3: Diagrama de sistema de seguridad.

#### A-2.1.7. Sección de separación de los Spark Gap.

Esta sección controla la distancia de separación entre los explosores de esferas, utilizados para conectar en serie los capacitores del generador y así obtener la suma de sus voltajes.

El movimiento de los explosores se logra a través de un servo mecanismo. La posición de los explosores es obtenida por medio de un potenciómetro, que gira bajo la acción del servo mecanismo, y proporciona una señal de voltaje variable en función de la posición. La posición es desplegada en la consola.

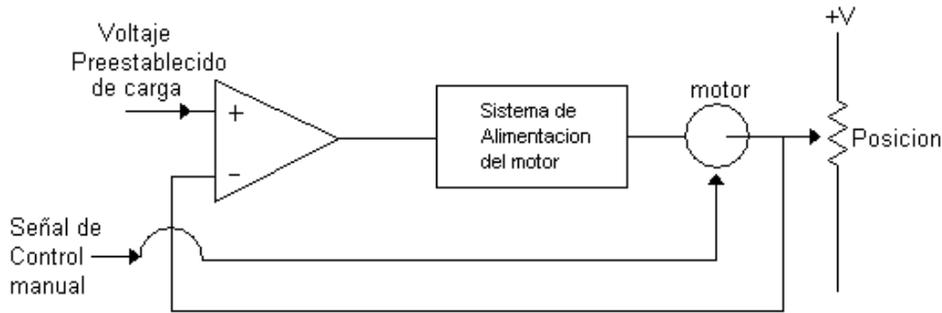


Figura A-4: Diagrama de Control de separación de esferas.

#### A-2.2. Sección de disparo.

Tiene la función de:

- Activar el dispositivo de disparo final (FTR) ubicado en la plataforma del generador.
- Generar una señal de disparo para el osciloscopio.
- Generar la señal de disparo para el generador.
- Genera la señal de disparo del dispositivo de recorte.

Tiene la opción de disparo manual, y consiste de un pulsador de contacto momentáneo el cual sirve para activar el disparo del osciloscopio. Cuando se opera en modo múltiple se oprime solo una vez y la generación de impulsos es automática.

#### **A-2.2.1. Retardo del inicio.**

Este es un potenciómetro digital por medio del cual se ajusta el retardo de tiempo que existirá entre el disparo del osciloscopio y el disparo de generador.

#### **A-2.2.2. Control de recorte.**

Este es un pulsador luminoso, con el cual se activa el disparo para el dispositivo de recorte.

#### **A-2.2.3. Retardo del recorte.**

Potenciómetro digital por medio del cual se fija el retardo de tiempo que deberá existir entre el disparo del osciloscopio y el disparo del generador.

#### **A-2.2.4. Sección de voltímetro de esferas.**

Este es un espinterómetro de mayor volumen que los que posee el generador para capacitor, una de sus funciones consiste en flamear a un nivel de voltaje determinado, lo que permite recortar el impulso generado y realizar pruebas con ondas recortadas. También sirve para calibrar el equipo de medición, porque el voltaje de flameo solo depende de la separación y el diámetro de las esferas.

En la consola de control, esta sección la encontramos ubicada en la parte superior del panel frontal. Tiene como funciones:

- Medir la distancia entre las esferas.
- Ajustar la distancia entre las esferas al controlar el movimiento de la esfera inferior.

#### **A-2.2.5. Indicador de la distancia de entre esferas.**

Indica la distancia en milímetros existentes entre las esferas. Para impedir el movimiento de las esferas durante el impulso, esta unidad queda desactivada al estar activa la unidad de disparo trigger.

#### **A-2.3. Unidad de potencia.**

La consola de mando también tiene una sección de potencia que consta de las siguientes partes:

- a) Interruptor general Main Power.
- b) Juego de 12 fusibles.

F1: Fusible de 2A. Cuando esta abierto el banco de mando no puede energizarse.

F2: Fusible de 2A. Cuando esta abierto inhabilita la unidad de regulación.

F3: Fusible de 2A. realiza una función idéntica a F1.

F4: Fusible de 6A. abierto desactiva la unidad de disparo, la unidad de control del espinterómetro y las funciones de seguridad.

F5: Fusible de 6A. Efecto idéntico al fusible F4.

F6: Fusible de 6A. En la posición abierto tiene el control parcial sobre el ajuste de la distancia entre los explosores de las etapas de tal forma que esta solo puede aumentarse y no disminuirse.

F7: Fusible de 6A. Cuando esta abierto desactiva el control de la distancia entre los explosores de las etapas.

F8: Fusible de 6A. En la posición de abierto la distancia entre los explosores de las etapas solo puede disminuirse y no aumentarse.

F9: Fusible de 2ª. Cuando esta abierto hace que el control de la distancia entre los explosores de las etapas reduzca la distancia a la mínima posible, inhabilitando además el modo de ajuste automático. La distancia, sin embargo es posible ajustarla manualmente.

F10: Fusible de 2ª. Tiene la misma función que F9.

F11. Fusible de 4ª. En la posición abierta desactiva el control del espinterómetro de medición.

F12: fusible de 4ª. Este fusible es idéntico a F11.

#### **A-2.3.1. Parte posterior de la consola de mando.**

En la parte trasera de la consola se encuentran los diferentes conectores, para acoplar los cables que transmiten las señales de medición y control desde la consola hacia el generador, equipo auxiliar y viceversa.

#### **A-2.3.2. Conector de puesta a tierra.**

A través de un cable de cobre este debe conectarse a tierra a efecto de descargar cualquier voltaje que pudiera inducirse en la estructura metálica de la consola.

#### **A-2.3.3. Conector del explosor de medición (Aux Input NR2).**

Conector multipolar para el espinterómetro. Aquí se conecta un cable el cual transmite señales de medición y control hacia y desde el espinterómetro.

#### **A-2.3.4. Transducer.**

Este conector aloja al cable el cual transmite señales de medición y control de la distancia entre los hemisferios de los explosores de cada una de las etapas del generador.

#### **A-2.4. El Objeto bajo prueba.**

La variedad de objetos que pueden someterse a prueba esta determinada por el valor de voltaje de salida requerido por estos y por el valor de la capacitancia a tierra de los objetos en relación a la

capacitancia máxima que el generador puede manejar. En este caso dicho valor es de 8500 pF para la conexión que permite un voltaje de salida máximo de 100KV

De acuerdo con las características del generador de impulsos, el cual puede dar una salida máxima de 400KV podrían someterse a impulso de rayo:

- Transformadores de distribución y sus aisladores asociados los cuales tengan una clase de aislamiento comprendida entre 1.2 KV y 69KV, cuyos valores de BIL so 30KV y 350 KV.
- Aisladores de suspensión y aisladores de espiga, utilizando el generador para determinar la tensión crítica de flameo conociendo de antemano el valor BIL correspondiente al voltaje de transmisión o distribución. La tensión crítica de flameo esta íntimamente relacionada con el dimensionamiento dieléctrico en líneas de transmisión.
- Cables de potencia especificados para un voltaje de operación de hasta 30KV, para el cual el voltaje de impulso es de 400 KV
- Seccionadores de cuchilla cuyo BIL sea menor o igual a 400KV.

#### **A-2.5. Ajuste del voltaje de carga y su polaridad.**

Para determinar el voltaje de carga se determina dividiendo el voltaje de salida requerido entre el número de etapas del generador que quedaran conectadas en serie.

Además, debe conocerse la polaridad del voltaje de salida. Esto en general lo determina el objeto a ser sometido a prueba. Para equipos inmersos en aceite se recomienda la polaridad negativa y para e quipos tipo seco se recomienda la polaridad positiva. Una vez encontrado el voltaje de carga, este se fija con el potenciómetro digital (VOLTAJE SETTING), ubicado en la sección de regulación. Si el voltaje de carga es menor o igual a 50KV, entonces el conmutador VOLTAJE RANGE (LOW/HIGH), debe estar en la posición low; si por el contrario el valor de voltaje es mayor a 50KV, entonces el conmutador debe estar en la posición HIGH.

Para seleccionar el tipo de polaridad a utilizar debe operarse una manivela ubicada en el generador de impulsos en uno de los extremos del compartimiento que contiene los diodos rectificadores y que se ubica sobre el generador DC.

Si asumimos que el generador esta entregando voltaje de polaridad positiva, entonces la manivela estará presionada y girada en sentido antihorario. No girara mas en este sentido por que no lo permite el limitador de giro.

En la sección de servicios de la consola de mando se encontrara encendida la luz indicadora de la polaridad positiva. Para cambiar a polaridad negativa basta con girar la manivela en sentido horario y tirarse de ella hacia fuera.

### **A-2.6. Ajuste del tiempo entre impulsos sucesivos.**

El generador de impulsos puede producir un impulso cada vez que sea disparado manualmente desde la unidad de disparo, o bien producir un número de impulsos previamente fijado debiendo para ello dispararlo para el primer impulso, produciéndose automáticamente los impulsos restantes. Sin embargo, no importa cual de los modos de operación se este utilizando debe existir un intervalo de tiempo entre impulsos sucesivos y esto se debe a la capacidad térmica de las resistencias.

Por ejemplo, si se efectúan impulsos con tensión de carga de cada etapa de 60KV, no deben efectuarse mas de 6 impulsos por minuto, con un intervalo de 10 segundos entre ellos. Y si la tensión de carga de cada etapa es de 100KV solo deben efectuarse 2 impulsos por minuto, con un intervalo de tiempo de 30 segundos entre ellos. Todo esto, usando la curva característica de relación entre tensión de carga y ritmo entre impulsos consecutivos.

Para fijar el tiempo entre impulsos sucesivos debe utilizarse un control ubicado en la sección de regulación de la consola de mando llamado TIME INTERVAL. Asociado a este control y ubicada a la par de ese se encuentre una luz amarilla la cual mientras este encendida indica que debe esperarse el tiempo fijado antes de iniciar un nuevo proceso de carga.

Mientras la luz este encendida el proceso de carga no se iniciara aun cuando se presione el control de inicio de carga.

También en la unidad de regulación se encuentra el control SHOT NR, con el cual se fija el número de impulsos que se producirán automáticamente, en el caso que se desee este modo de operación. Cada vez que se produzca un impulso el control disminuye en un uno el número de disparos fijado, cuando se llega al valor cero, el equipo es puesto a tierra, y no puede iniciarse un nuevo proceso de carga hasta que el valor del SHOT NR sea diferente de cero.

### **A-2.7. Ajuste de la distancia entre los explosores de las etapas.**

La consola de mando consta tiene una lectura directa de la distancia entre los explosores de la primera etapa. Pero como el mecanismo de árbol giratorio engranaje, acoplado al motor de giro de doble sentido produce un movimiento sincronizado para todas las etapas, indirectamente se tiene un control de la distancia de los explosores de las tres etapas restantes. La lectura de la distancia en mm del explosor de la primera etapa se obtiene en el lado derecho de la sección de servicios. Para ajustar la distancia entre los explosores, puede hacerse de dos formas:

*Automática:* en esta opción la distancia entre los explosores es ajustada por un mecanismo automático instalado en la consola de mando en proporción al voltaje de carga fijado. A mas voltaje de carga, mayor distancia y a menor voltaje de carga menor distancia.

Para obtener el modo de operación automático debe girarse el conmutador AUTO/MAN a la posición AUTO. Puede tenerse un pequeño incremento en la distancia hasta del 7%, al girar en

sentido horario el control rotulado REG ADJ; o bien disminuir en una pequeña cantidad la distancia fijada (7%) al girar el control en el sentido antihorario.

Es importante mencionar que el control REG. ADJ solo tiene efecto con distancias correspondientes a voltajes de carga mayores a 10KV.

*Manual:* Para este modo de ajuste el conmutador debe girarse a la posición MAN. En este modo de operación la distancia entre los explosores se ajustan manualmente con el control rotulado MAN. CONTROL. La distancia debe ajustarse en forma proporcional al voltaje de carga, leyéndose la distancia que se ha ajustado en el control rotulado SPHERE GAP DISTANCE. Para ello veamos la siguiente tabla:

<b>Tensión de Carga (KV)</b>	<b>Distancia entre las esferas (mm)</b>
10	4.5
20	9.0
30	13.5
40	18.0
50	22.5
60	27.0
70	31.5
80	36.0
90	40.5
100	45.0

**Tabla A-16:** Distancia entre las esferas de los explosores con respecto a la tensión de carga.

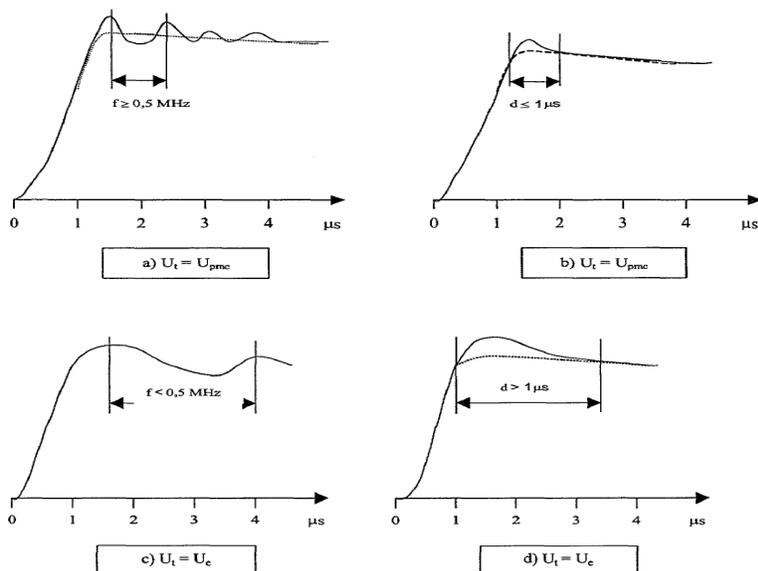
Los valores anteriores son solo de referencia. Para ajustar la distancia adecuada deben hacerse las pruebas que sean necesarias hasta ajustar el valor adecuado. Para comprobar si la distancia es correcta, debe darse orden de cargar y observar si el voltaje de carga alcanza el valor fijado y espera la orden de disparo manual. Si no es así, la distancia debe irse aumentando gradualmente.

## ANEXO B. EVALUACION DE IMPULSOS DE TENSION SEGÚN IEC 60060-1.

Para tener en cuenta los ensayos con impulso tipo rayo con oscilaciones superpuestas que el laboratorio no es capaz de eliminar, la norma fundamental que define la forma de efectuar los ensayos en alta tensión IEC 60060-1 considera como ondas tipo rayo normalizadas aquellas que presentan oscilaciones o una sobretensión superpuesta al impulso al impulso en la zona de la cresta, siempre que su amplitud no supere el 5% del valor de la máxima amplitud del impulso. La amplitud de dichas oscilaciones o sobretensión se deberá medir mediante sistemas de medida conforme UNE-EN 60060-2.

Este límite del 5% resulta en la práctica un valor pequeño siendo imposible en ocasiones la realización práctica de los ensayos con impulsos normalizados.

En impulsos tipo rayo con oscilaciones o una sobretensión superpuesta cuya amplitud no supere el 5% del valor de la máxima amplitud del impulso, las reglas para determinar la tensión de ensayo según IEC 60060-1 dependen de la frecuencia de las oscilaciones o de la duración de la sobretensión. En concreto, según la norma, si la frecuencia de las oscilaciones es menor a 0.5 MHz, o la duración de la sobretensión es mayor de 1  $\mu$ s, la tensión de ensayo será el valor de la máxima amplitud del impulso. En los casos excluidos anteriormente (frecuencia  $\geq 0.5$  MHz, o duración de sobretensión  $\leq 1 \mu$ s) será necesario trazar una curva media, de forma que la tensión de ensayo será el valor de la máxima amplitud de la curva media, como se muestra en la figura C-1.



**Figura B-1:** Reglas de evaluación de impulsos tipo rayo con oscilaciones o sobretensión, según la norma IEC 60060-1.

Se puede establecer una correspondencia entre las frecuencias de las oscilaciones y la duración de la sobretensión, al considerar esta última como una oscilación amortiguada de medio período de duración, y cuya frecuencia equivalente sería:

$$f = 1/(2d)$$

Donde:

$f$  : frecuencia equivalente de la sobretensión.

$d$  : duración de la sobretensión.

Al hablar de oscilaciones se considera cubierto también el caso de la sobretensión, al ser éste un caso particular de aquellas cuando el amortiguamiento es muy elevado.

Las normas de evaluación anteriores, enunciadas en la norma de forma textual, se pueden resumir mediante la expresión:

$$U_t = U_{pmc} + k.(U_e - U_{pmc})$$

Donde:

$U_t$  : Tensión de ensayo.

$U_{pmc}$  : máxima amplitud de la curva media.

$k$  : factor de la tensión de ensayo.

$U_e$  : máxima amplitud del impulso registrado.

En el diagrama de flujo de la figura B-3, se resume el procedimiento de evaluación de impulsos tipo rayo de la norma IEC 60060-1, representando los valores del factor "k" mediante una gráfica en función de la frecuencia. El factor de la tensión de ensayo vale la unidad para frecuencias menores de 0.5 MHz, y cero para frecuencia igual o mayor.

Existen numerosas formas de onda (figura B-2 e, f, g y h) para las cuales no es posible calcular los parámetros característicos, ni efectuar por tanto los correspondientes ensayos. En estos casos será necesario revisar el circuito de ensayo y el generador hasta conseguir la forma de onda adecuada.

Las cuatro formas de onda de la figura B-2 (e, f, g y h) son no normalizadas por distintos motivos, en concreto, los casos e y g corresponden a formas de onda muy distorsionadas que no consiguen la evolución de un impulso tipo rayo. La onda f tiene un tiempo de cola muy inferior a los valores normalizados, mientras que la onda h tiene un tiempo de frente muy inferior a los valores normalizados.

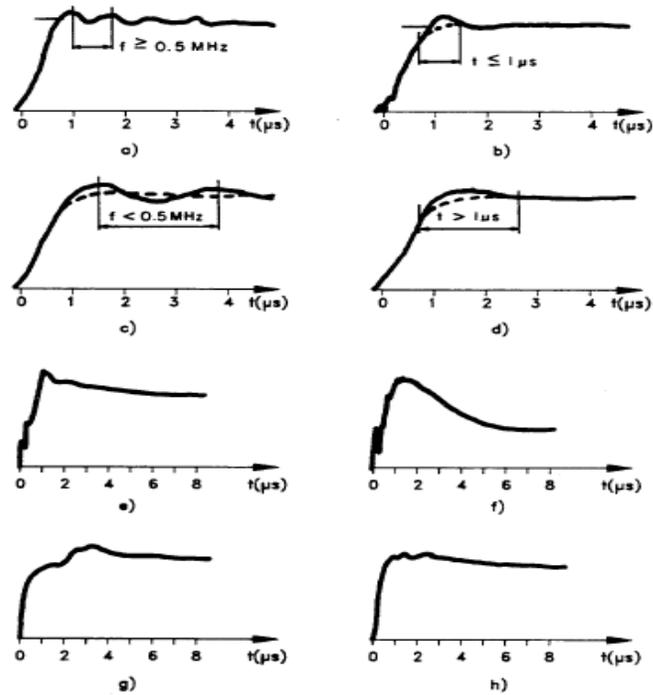


Figura B-2: Ejemplos de impulsos tipo rayo con oscilaciones o sobreimpulsos.

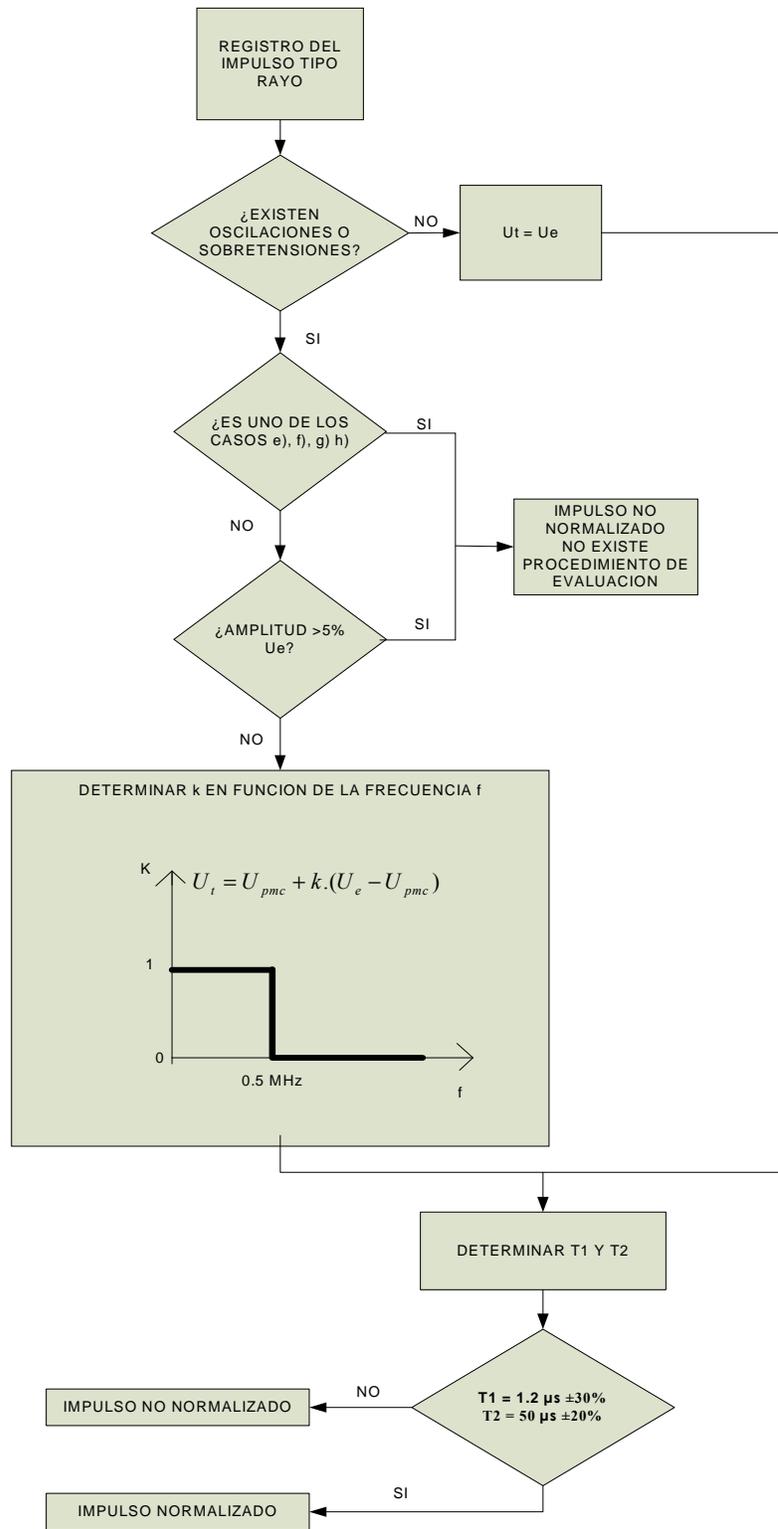


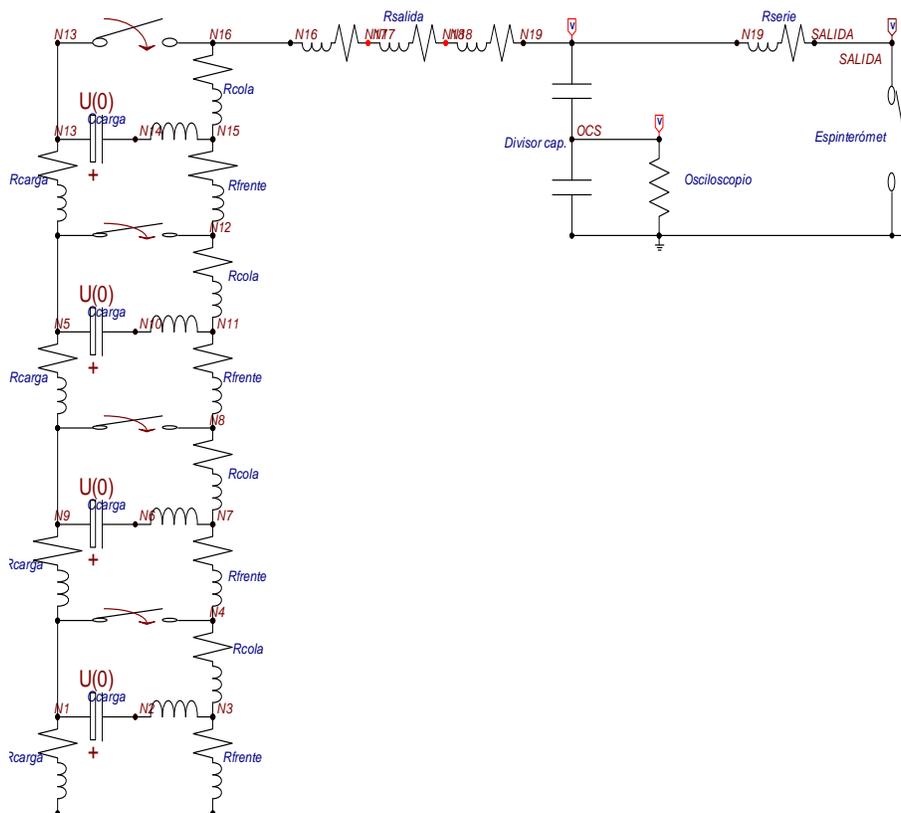
Figura B-3: procedimiento de evaluación de impulsos tipo rayo de la norma IEC 60060-1.

**ANEXO C.**  
**COMPROBACION DE PARAMETROS DE LA FORMA DE ONDA**  
**NORMALIZADA DE LA TENSION DE IMPULSO DEL GENERADOR DE**  
**IMPULSOS DE LA ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA DE LA**  
**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR MEDIANTE SIMULACION.**

Los parámetros del circuito del generador de impulsos utilizados para la simulación en ATP v5.3 son los siguientes:

- Capacitores de carga:  $C = 0.5 \mu\text{F}$  y  $L = 0.4 \mu\text{H}$ .
- Resistencias de carga:  $R = 1500 \Omega$  y  $L = 2.8 \mu\text{H}$ .
- Resistencias de frente:  $R = 12 \Omega$  y  $L = 1.4 \mu\text{H}$ .
- Resistencias de cola:  $R = 120 \Omega$  y  $L = 1.9 \mu\text{H}$ .
- Resistencia de salida: 3 resistencias de  $R = 25 \Omega$  y  $L = 1.5 \mu\text{H}$ .
- Resistencia serie al sistema de medición:  $R = 25 \Omega$  y  $L = 1.5 \mu\text{H}$ .
- Divisor de tensión capacitivo:  $C1 = 4157 \text{ pF}$  y  $C2 = 977 \text{ nF}$ .

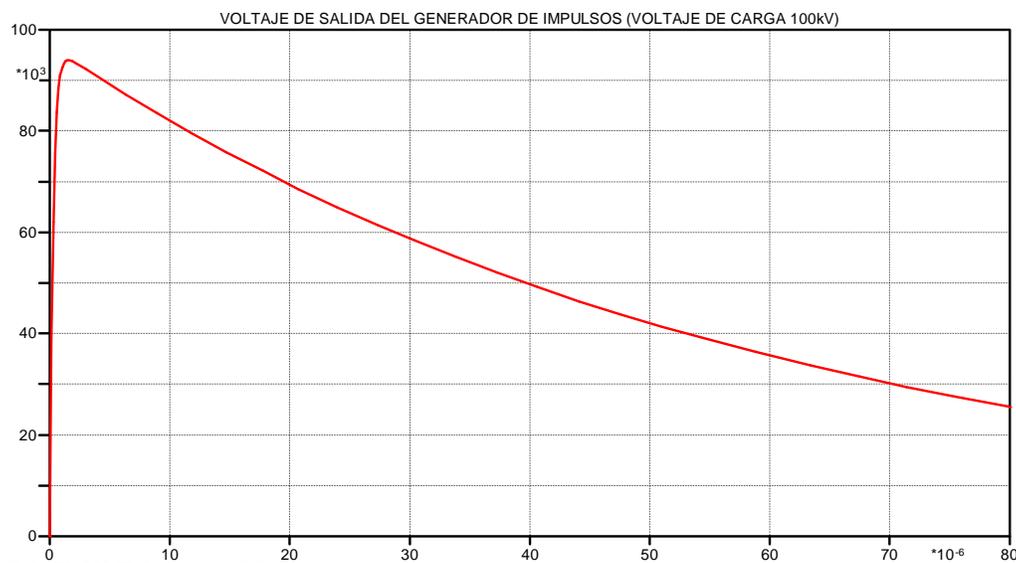
El esquema del circuito utilizado es el siguiente:



**Figura C-1:** Esquema de circuito del generador de impulsos de EIE-UES.

Dicho circuito se utilizó para la comprobación de los parámetros propios de la forma de onda de impulso completo tipo rayo.

Para la comparación de los parámetros de la forma de onda normalizada de impulso tipo rayo con los resultantes de la simulación del circuito del generador de impulsos, se muestra la siguiente figura con la grafica resultante para un impulso con voltaje de carga de 100 kV.



**Figura C-2:** Forma de onda de impulso tipo rayo, generador de impulsos simulado, a 100kV.

Los parámetros de tiempo de frente y tiempo de cola resultantes se muestran en la siguiente tabla:

PARAMETROS	Vpico	V30%	V90%	V50%
VOLTAJE (kV)	93.985	28.1955	84.5865	46.9925
TIEMPO (us)	1.5539	0.1003	0.6266	43.409

**Tabla C-1:** Parámetros de forma de onda de impulso tipo rayo simulado para prueba a 100 kV.

De la tabla anterior los parámetros de la forma de onda son los siguientes:

- Tiempo de frente:  $T_1 = 1.67 T'$ ;  $T' = T_{90} - T_{30}$   
 $T' = 0.6266 - 0.1003 = 0.5263 \text{ us}$   
 $T_1 = 1.67 * 0.5263 \text{ us} = 0.8789 \text{ us}$
- Tiempo de cola:  $T_2 = T_{50} + 0.5 T_{90} - 1.5 T_{30}$   
 $T_2 = 43.409 \text{ u} + 0.5 (0.6266 \text{ u}) - 1.5 (0.1003 \text{ u})$   
 $T_2 = 43.5719 \text{ us}$

De los resultados obtenidos en la simulación, la forma de onda de impulso tipo rayo cumple con los parámetros de tiempo de frente y tiempo de cola.

En las siguientes gráficas se muestran con mayor detalle, los tiempos de frente y de cola para la simulación anterior:

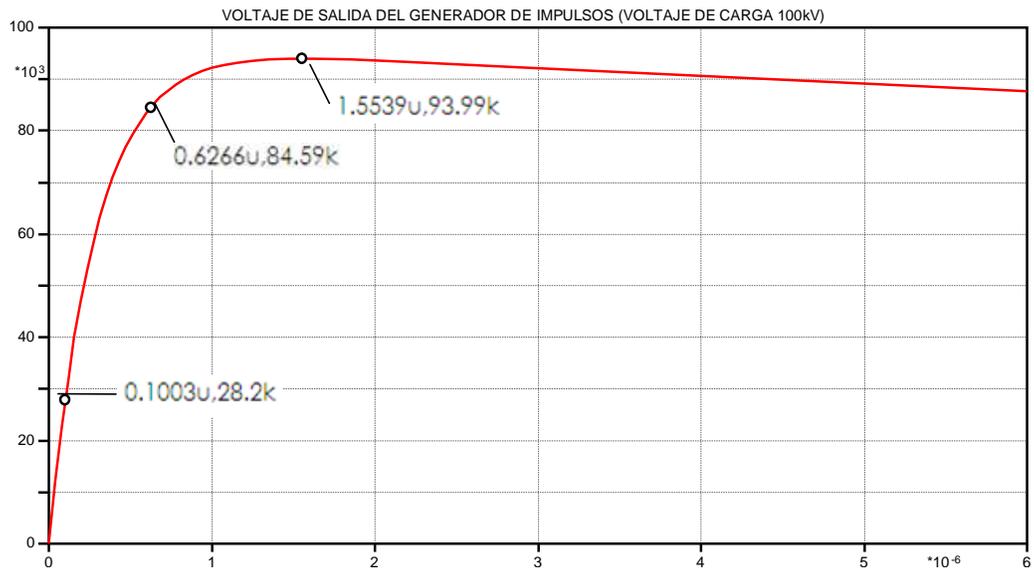


Figura C-3: Forma de onda de impulso tipo rayo simulada, parámetros para tiempo de frente, prueba a 100kV.

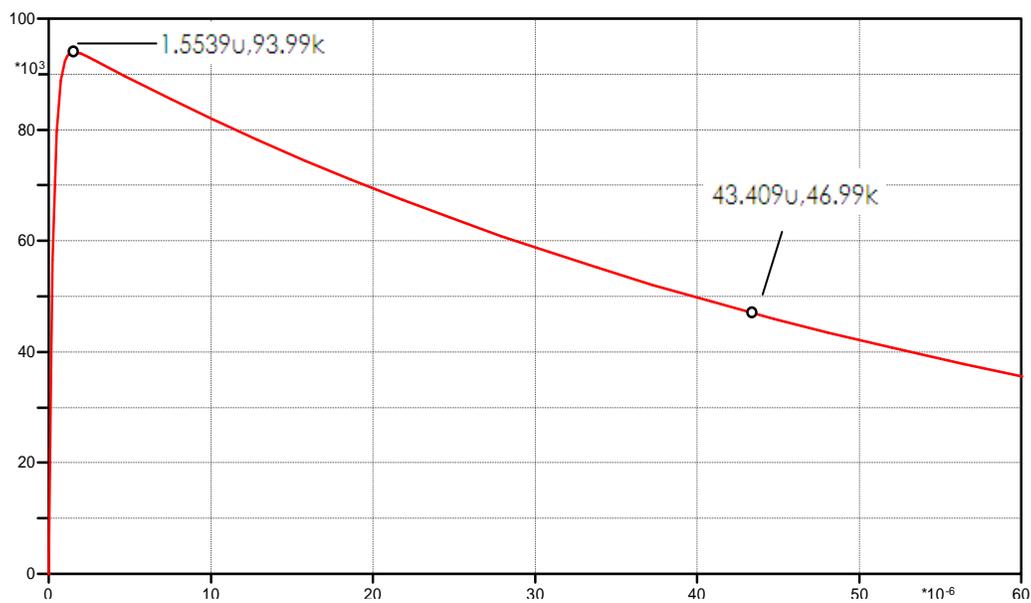
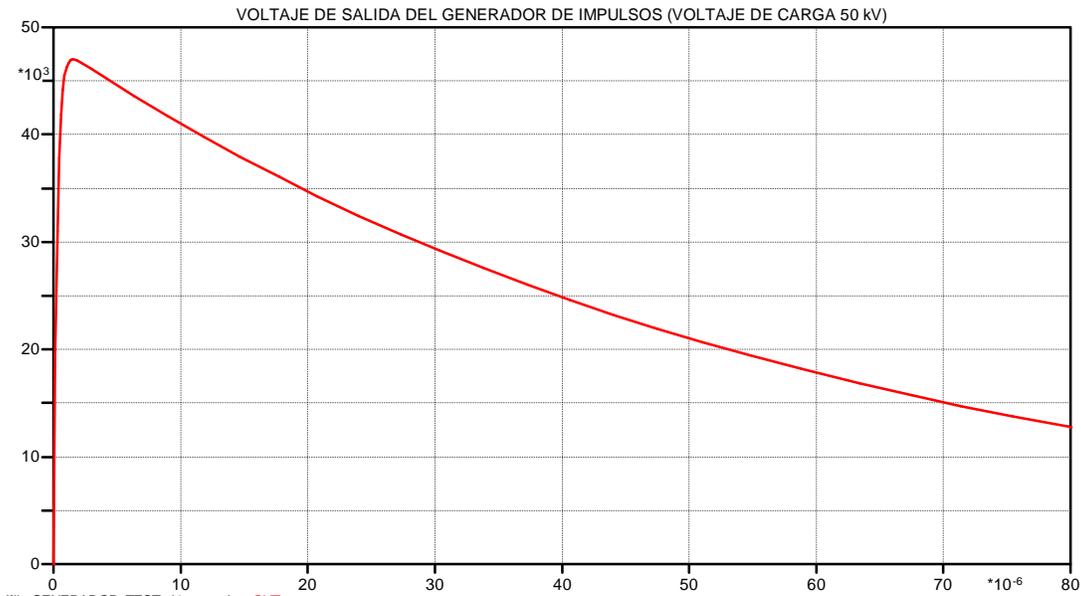


Figura C-4: Forma de onda de impulso tipo rayo simulada, parámetros para tiempo de cola, prueba a 100kV.

Para un voltaje de carga de 50 kV, se obtiene la siguiente forma de onda de impulso tipo rayo:



**Figura C-5:** Forma de onda de impulso tipo rayo, generador de impulsos simulado, a 50kV.

De la gráfica anterior os resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

PARAMETROS	Vpico	V30%	V90%	V50%
VOLTAJE (kV)	46.99	14.097	42.291	23.495
TIEMPO (us)	1.5848	0.0994	0.6316	43.4

**Tabla C-2.** Parámetros de forma de onda de impulso tipo rayo simulado para prueba a 50 kV.

De la tabla anterior los parámetros de la forma de onda de impulso completo tipo rayo son los siguientes:

- Tiempo de frente:  $T_1 = 1.67 T' = 1.67*(0.6316\mu - 0.0994\mu) = \mathbf{0.8888 \mu s.}$
- Tiempo de cola:  $T_2 = T_{50\%} + 0.5 T_{90} - 1.5 T_{30} = \mathbf{43.5667 \mu s.}$

Ambos resultados están dentro de las tolerancias permitidas para el tiempo de frente y de cola respectivamente, y se aprecian de forma más clara en las siguientes figuras:

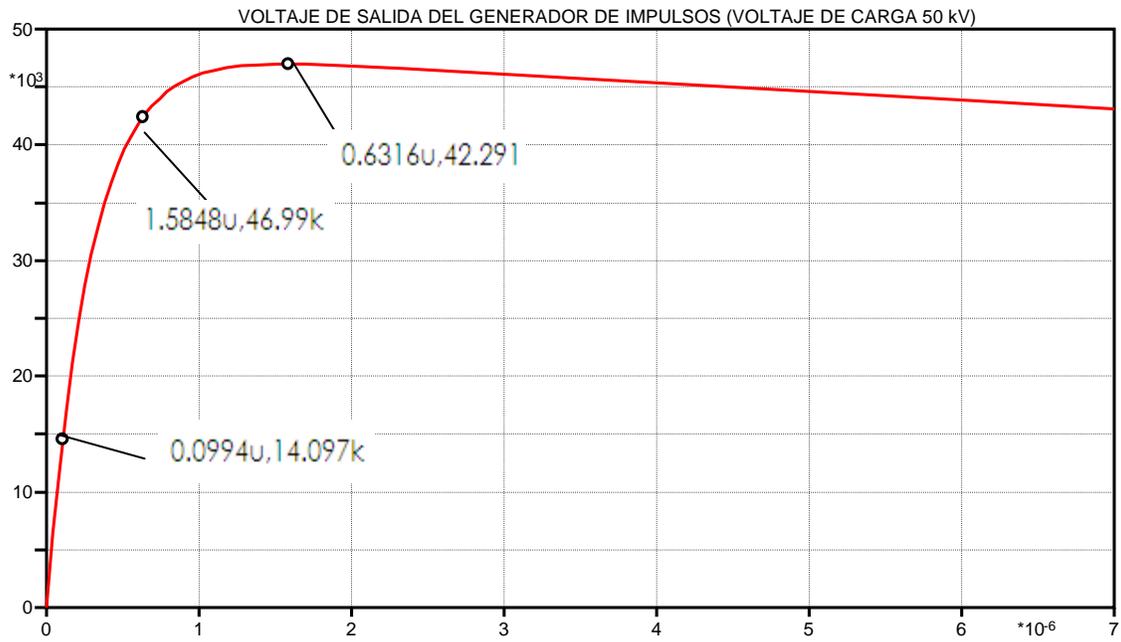


Figura C-6: Forma de onda de impulso tipo rayo simulada, parámetros para tiempo de frente, prueba a 100kV.

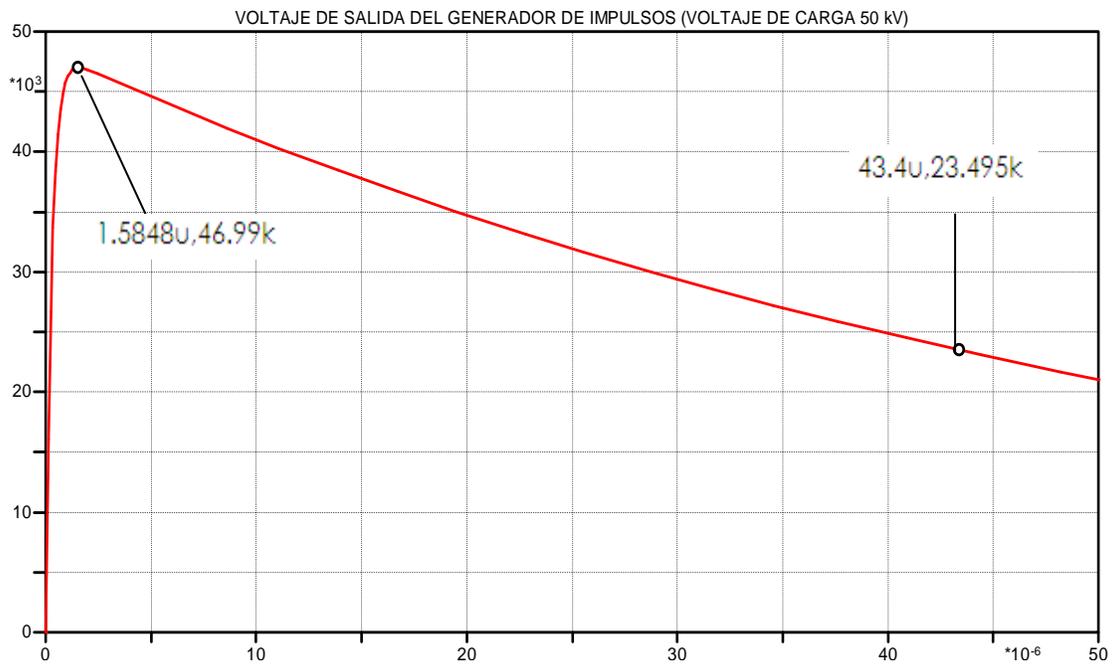
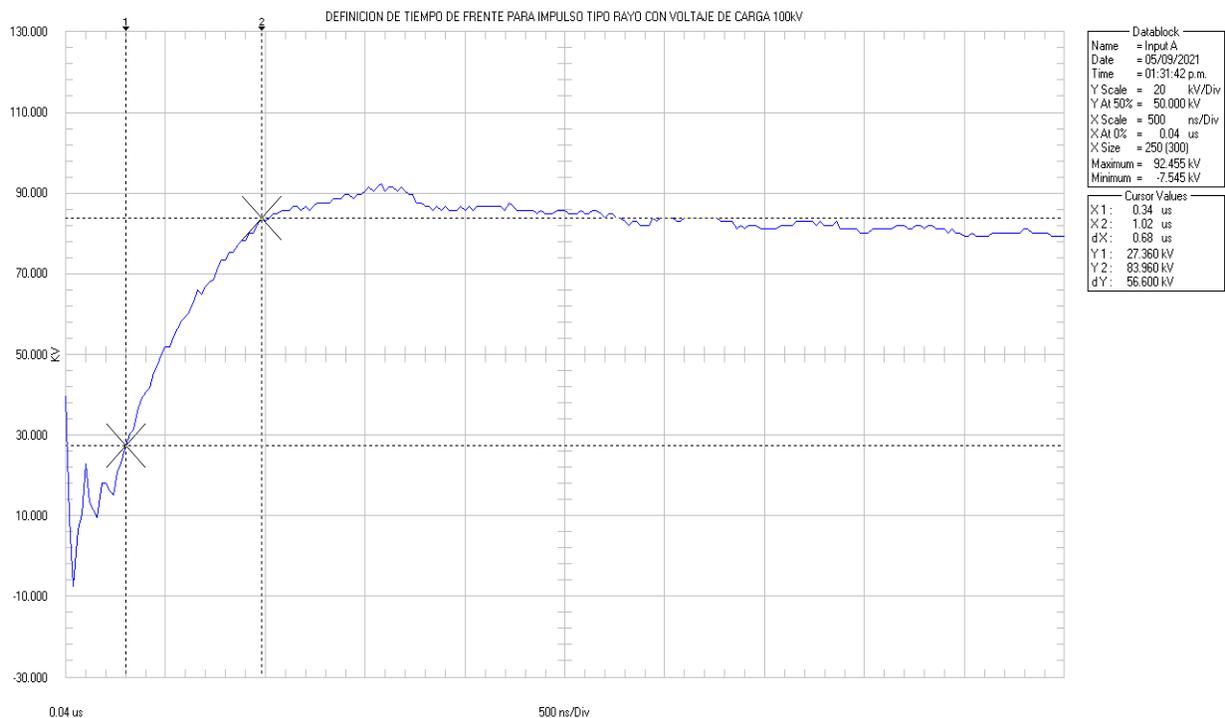


Figura C-7: Forma de onda de impulso tipo rayo simulada, parámetros para tiempo de cola, prueba a 50 kV.

**ANEXO D.**  
**COMPROBACION DE PARAMETROS DE LA FORMA DE ONDA**  
**NORMALIZADA DE IMPULSO DE TENSION TIPO RAYO DEL GENERADOR**  
**DE IMPULSOS DE LA ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA DE LA**  
**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.**

Para la comprobación de los parámetros de la forma de onda de impulso completo resultante del generador, se realizaron pruebas con el espinterómetro sin llegar a flamear; con voltajes de carga de 100 kV y 180 kV.

Para el impulso a 100 kV se obtuvo la forma de onda que se muestra en la siguiente figura:



**Figura D-1:** Forma de onda normalizada para prueba de impulso en generador EIE-UES para voltaje de carga de 100 kV, comprobación de tiempo de frente.

De la gráfica anterior se obtuvieron los resultados aproximados que se muestran en la tabla siguiente:

PARAMETROS	Vpico	V30%	V90%
VOLTAJE (kV)	92.455	27.36	83.96
TIEMPO (us)	1.62	0.34	1.02

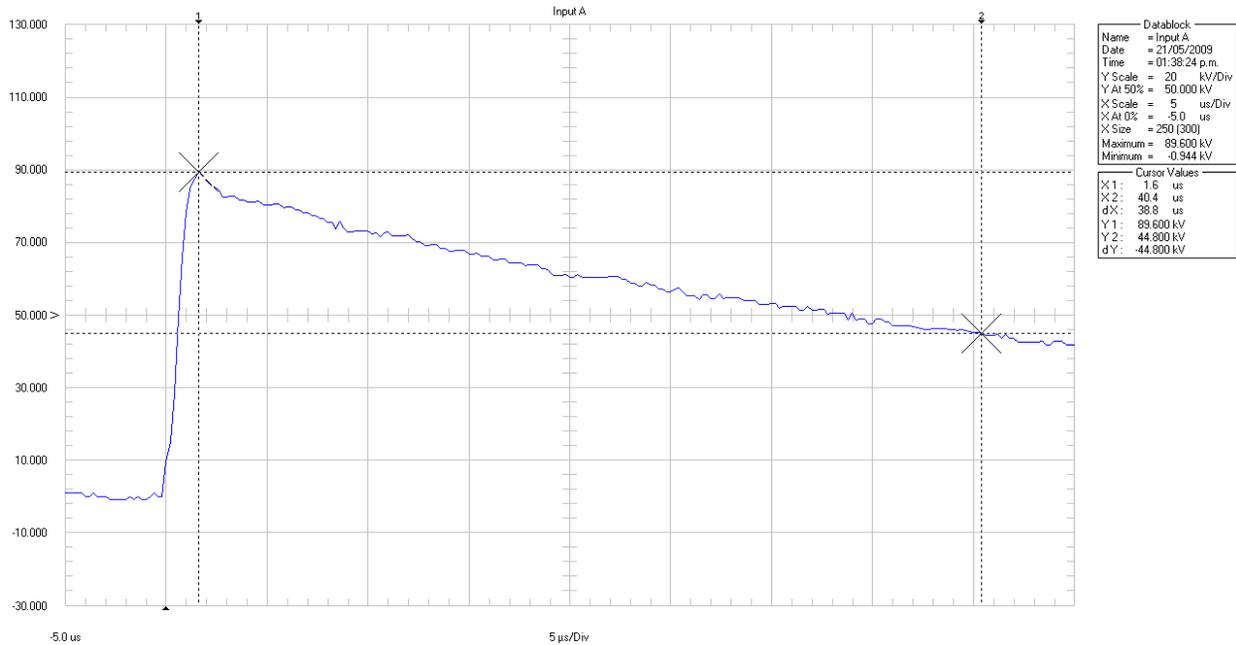
**Tabla D-1:** Parámetros forma de onda de impulso normalizado a voltaje de carga de 100 kV, comprobación de tiempo de frente.

De la tabla anterior, se define el tiempo de frente:

$$T_1 = 1.67 T'; T' = T_{90} - T_{30}$$

$$T_1 = 1.67 * (1.02 \mu - 0.34 \mu) = 1.1356 \mu s.$$

Se procedió a realizar otra prueba con un voltaje de carga de 100 kV para comprobar el tiempo de cola de la forma de onda normalizada de impulso tipo rayo, el cual se muestra en la siguiente gráfica:



**Figura D-2:** Forma de onda normalizada para prueba de impulso en generador EIE-UES para voltaje de carga de 100 kV, comprobación de tiempo de cola.

De la gráfica anterior se obtuvieron los resultados aproximados que se muestran en la tabla siguiente, para los tiempos con voltaje al 30% y al 90% del valor pico se suponen los mismos valores de la prueba anterior, ya que el tiempo del voltaje pico de ambos impulsos es aproximadamente igual.

PARAMETROS	Vpico	V30%	V90%	V50%
VOLTAJE (kV)	89.6	27.36	83.96	44.8
TIEMPO (us)	1.6	0.34	1.02	40.4

**Tabla D-2:** Parámetros forma de onda de impulso normalizado a voltaje de carga de 100 kV, comprobación de tiempo de cola.

De la tabla anterior, se define el tiempo de cola:

$$T_2 = T_{50} + 0.5 T_{90} - 1.5 T_{30}$$

$$T_2 = 40.4 \mu s + 0.5 * (1.02 \mu s) - 1.5 (0.34 \mu s)$$

$$T_2 = 40.4 \mu s.$$

Para la prueba de impulso con voltaje de carga a 100 kV se obtuvieron los tiempos de frente  $T_1 = 1.1356 \mu s$  y de cola  $T_2 = 40.4 \mu s$ , los cuales están dentro de las tolerancias permitidas, por lo que el generador de impulsos de EIE-UES produce la forma de onda normalizada.

Con los resultados anteriores se puede hacer una comparación entre los resultados de la simulación del ANEXO C y los resultados experimentales obtenidos para el impulso tipo rayo pleno a una tensión de 100 kV.

	Vpico (kV)	V30% (kV)	V50% (kV)	V90% (kV)	T1(μs)	T2(μs)
Simulación	93.985	28.1955	46.99	84.58	0.8789	43.57
Experimental	92.455	27.36	44.8	83.96	1.13	40.4
Error (%)	1.63	2.96	4.66	0.73	28.57	7.28

Tabla D-3. Comparación entre simulación y resultado de laboratorio

Para comprobar el parámetro de tiempo de frente en un impulso con voltaje de carga a 180 kV, se obtuvo la siguiente gráfica:

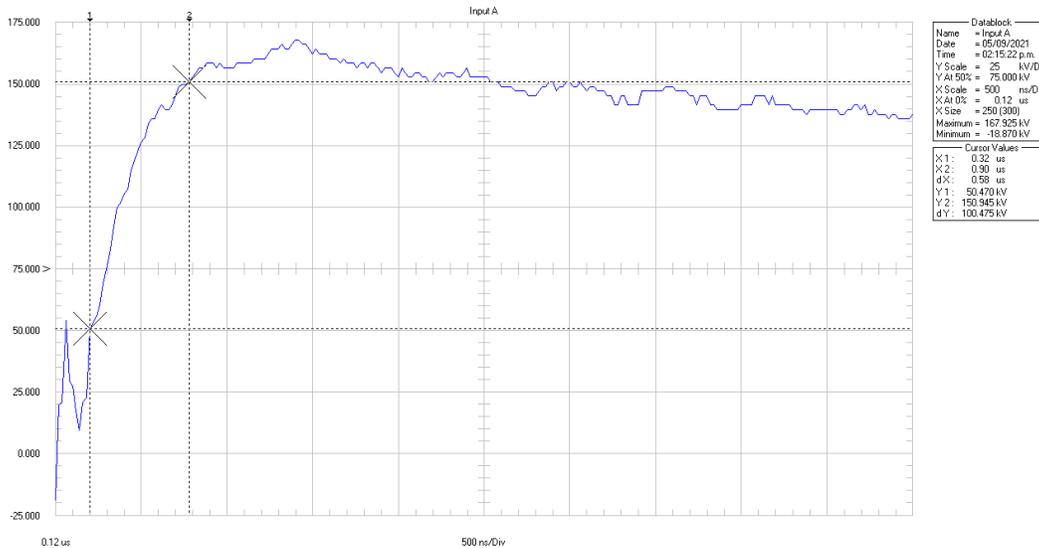


Figura D-3: Forma de onda normalizada para prueba de impulso en generador EIE-UES para voltaje de carga de 180 kV, comprobación de tiempo de frente.

De la gráfica anterior se obtuvieron los resultados aproximados que se muestran en la tabla siguiente:

PARAMETROS	Vpico	V30%	V90%
VOLTAJE (kV)	167.925	50.47	150.945
TIEMPO (us)	1.52	0.32	0.9

Tabla D-4: Parámetros forma de onda de impulso normalizado a voltaje de carga de 180 kV, comprobación de tiempo de frente.

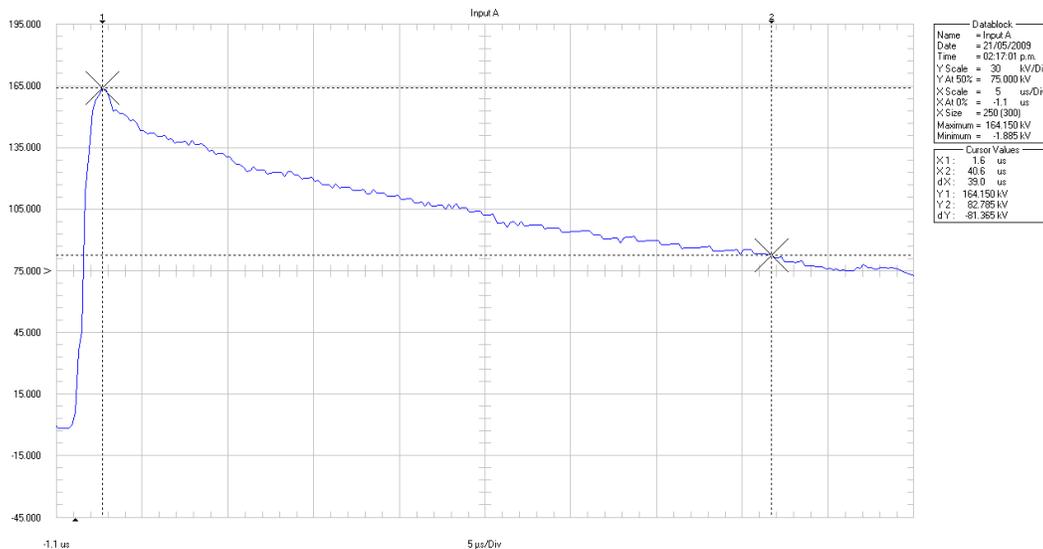
De la tabla anterior, se define el tiempo de frente:

$$T_1 = 1.67 T'; T' = T_{90} - T_{30}$$

$$T_1 = 1.67*(0.9\mu - 0.32\mu) = \mathbf{0.9686 \mu s.}$$

En la gráfica, se observan oscilaciones en la forma de onda, pero dichas oscilaciones son menores que el valor máximo permitido que corresponde al 3% del voltaje de cresta, que para esta prueba corresponde a 5.04 kV.

Para la comprobación del tiempo de cola para la prueba de impulso con voltaje de carga a 180kV, se obtuvo la siguiente grafica:



**Figura D-4:** Forma de onda normalizada para prueba de impulso en generador EIE-UES para voltaje de carga de 180 kV, comprobación de tiempo de cola.

De la gráfica anterior se obtuvieron los resultados aproximados que se muestran en la tabla siguiente, para los tiempos con voltaje al 30% y al 90% del valor pico se suponen aproximados los mismos valores de la prueba anterior.

PARAMETROS	Vpico	V30%	V90%	V50%
VOLTAJE (kV)	164.15	50.47	150.945	82.785
TIEMPO (us)	1.6	0.32	0.9	40.6

**Tabla D-5:** Parámetros forma de onda de impulso normalizado a voltaje de carga de 180 kV, comprobación de tiempo de cola.

De la tabla anterior, se define el tiempo de cola:

$$T_2 = T_{50} + 0.5 T_{90} - 1.5 T_{30}$$

$$T_2 = 40.6 \text{ us} + 0.5*(0.9 \text{ us}) - 1.5 (0.32 \text{ us})$$

$$T_2 = 40.57 \text{ us.}$$

Para la prueba de impulso a 180 kV, los tiempos de frente  $T_1 = 1.1356 \text{ us}$  y de cola  $T_2 = 40.4 \text{ us}$ , están dentro de los rangos permitidos, por lo que se puede establecer que la forma de onda producida por el generador de impulsos de la EIE-UES es la normalizada para dichas pruebas.

### **ANEXO E.** **PRUEBAS PARA SELECCIÓN DE RESISTENCIA SERIE EN EL CIRCUITO DE MEDICIÓN.**

Al realizar pruebas utilizando el espinterómetro de medición, puede darse el efecto de oscilaciones de alta frecuencia ocasionadas por las ondas viajeras reflejadas por efecto de desacoplamiento de las impedancias características de las líneas de interconexión, como se mencionó anteriormente, esto se da entre la conexión del generador y el espinterómetro.

Para comprobar si este fenómeno se da en las pruebas con espinterómetro en el generador de impulsos de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador, se procedió a realizar pruebas a un voltaje adecuado para que se diera flameo entre las esferas del espinterómetro, utilizando como base para las pruebas los voltajes para flameo del espinterómetro de 25 cm. de diámetro que se muestra en la tabla VII-2, haciendo las correcciones atmosféricas correspondientes.

Las condiciones atmosféricas a las que se realizaron las pruebas son las siguientes:

- Temperatura: 29 °C
- Presión: 946 HPa.
- Humedad Relativa: 70%.
- Humedad absoluta: 20 gr/m<sup>3</sup>.

De la metodología de cálculo de los factores de corrección atmosférica se obtuvieron los siguientes valores:

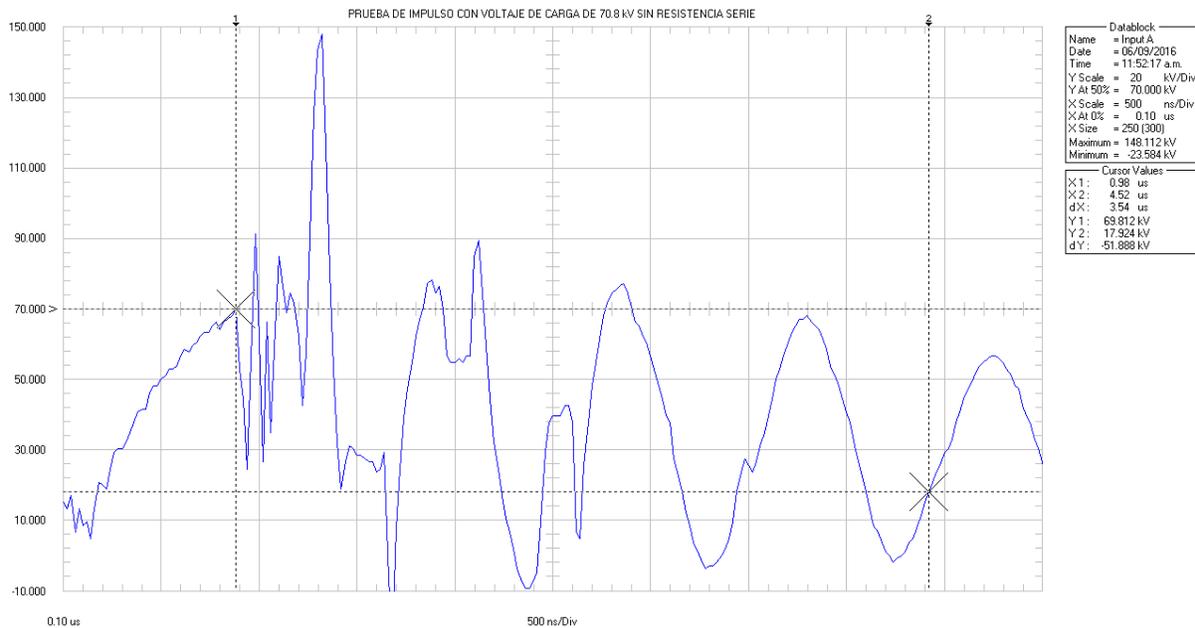
- Factor de corrección de densidad:  $K_d = 0.91$ .
- Factor de corrección de humedad:  $K_h = 0.93$ .
- Factor de corrección atmosférico:  $K_t = 0.97$ .

Los valores de voltaje para las pruebas se encuentran en la siguiente tabla, tanto los especificados a una atmosfera estándar como los ya corregidos a las condiciones de la prueba:

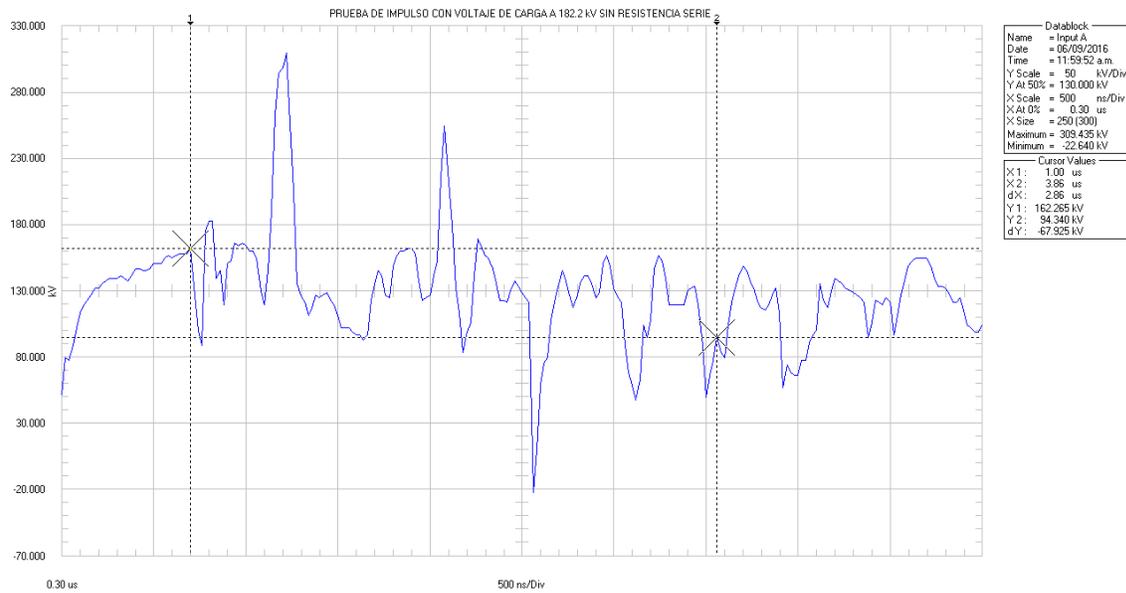
ESPACIO ESFERAS (mm.)	Voltaje (kV pico) polaridad positiva	Voltaje (kV pico) polaridad positiva corregido
5	-	-
10	-	-
15	-	-
20	59	57.5
25	72.7	70.8
30	86	83.8
35	-	-
40	112	109.1
45	-	-
50	138	134.4
55	-	-
60	163	158.8
62.5	-	-
70	187	182.2
75	199	193.9
80	211	205.6
90	233	227
100	254	247.5

**Tabla E-1:** Voltajes para prueba sin resistencia serie en circuito de medición.

De la tabla anterior, se procedió a realizar la prueba de impulso para las distancias de las esferas del espinterómetro de 25 mm. y 70 mm, los resultados se muestran en las siguientes gráficas:

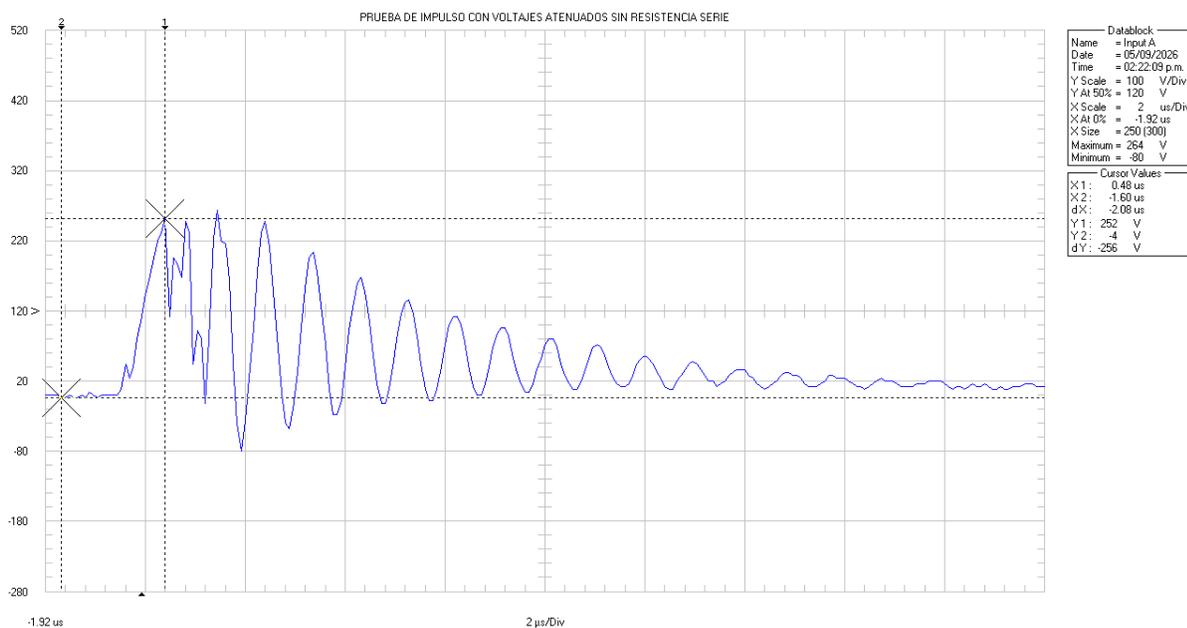


**Figura E-1:** Prueba de impulso con voltaje de carga 70.8 kV sin resistencia serie en el circuito de medición.



**Figura E-2:** Prueba de impulso con voltaje de carga 182.2 kV sin resistencia serie en el circuito de medición.

Como se puede observar en las gráficas de las figuras anteriores, cuando el circuito de medición, específicamente en la conexión generador-espinterómetro, se genera oscilaciones de alta frecuencia, dichas oscilaciones pueden dañar incluso equipos conectados a la red eléctrica de la instalación donde se realizan las pruebas de impulso, en la gráfica siguiente se puede observar con más claridad dichas oscilaciones que tienen un comportamiento subamortiguado.



**Figura E-3:** Forma de onda completa para prueba de impulso sin resistencia serie en el circuito de medición.

Para eliminar o disminuir este problema es necesario agregar una resistencia cuyo valor no puede exceder los 500  $\Omega$ , esta debe colocarse entre el generador y el espinterómetro y tienen que tener una baja impedancia o anti-inductiva (no mayor a 30  $\mu\text{H}$ ).

En la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador, se cuentan con resistencias que cumplen dichas características, los valores de las cuales son: 12  $\Omega$ , 25  $\Omega$ , 120  $\Omega$ . Con dichas resistencias se puede hacer las pruebas utilizando las siguientes combinaciones: 12, 25, 37 y 120  $\Omega$ . Se realizaron pruebas de impulso haciendo flamear las esferas del espinterómetro utilizando estos 4 valores de resistencia en serie en el circuito de medición, los resultados se describen a continuación:

Las condiciones atmosféricas a las que se realizaron las pruebas son las siguientes:

- Temperatura: 28  $^{\circ}\text{C}$
- Presión: 946 HPa.
- Humedad Relativa: 52%.
- Humedad absoluta: 14 gr/m<sup>3</sup>.
- 

De la metodología de cálculo de los factores de corrección atmosférica se obtuvieron los siguientes valores:

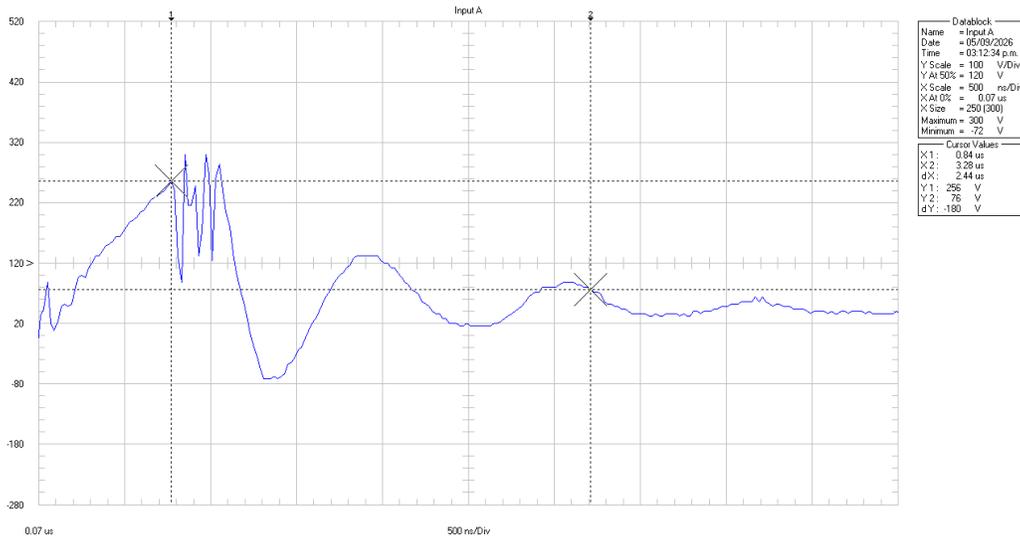
- Factor de corrección de densidad:  $K_d = 0.91$ .
- Factor de corrección de humedad:  $K_h = 0.98$ .
- Factor de corrección atmosférico:  $K_t = 0.93$ .
- 

Los valores de voltaje para las pruebas se encuentran en la siguiente tabla, tanto para condiciones de atmosfera estándar como los ya corregidos a las condiciones de la atmosfera al momento de las pruebas:

ESPACIO ESFERAS (mm.)	Voltaje (kV pico) polaridad positiva	Voltaje (kV pico) polaridad positiva corregido
5	-	-
10	-	-
15	-	-
20	59	55
25	72.7	67.8
30	86	80.2
35	-	-
40	112	104.4
45	-	-
50	138	128.7
55	-	-
60	163	152
62.5	-	-
70	187	174.3
75	199	185.5
80	211	196.7
90	233	217.2
100	254	236.8

**Tabla E-2:** Valores de voltaje corregido para pruebas con resistencia serie de 12, 25, 37 y 120  $\Omega$ .

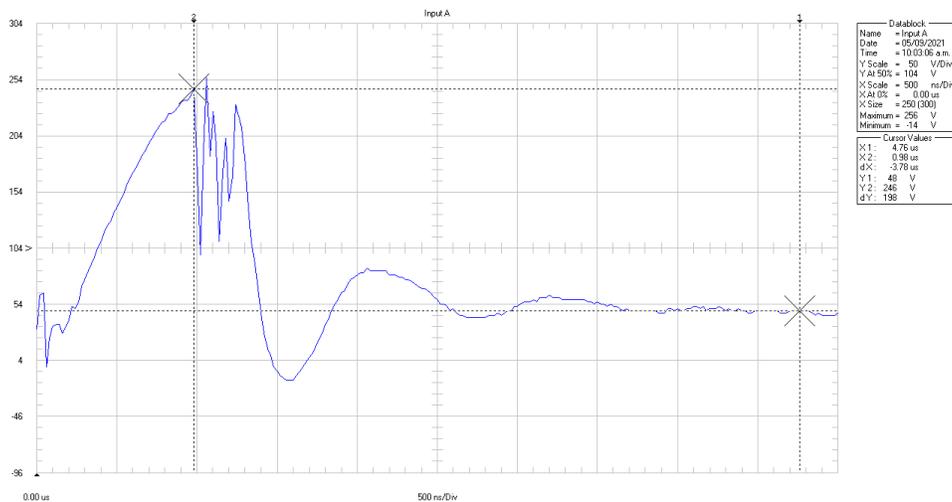
Con la resistencia serie de  $12\ \Omega$ , con un voltaje de carga de  $67.8\ \text{kV}$  y la distancia de las esferas del espinterómetro en  $25\ \text{mm}$ , se obtuvo el siguiente resultado:



**Figura E-4:** Prueba de impulso con resistencia serie de  $12\ \Omega$ , voltaje de carga  $67.8\ \text{kV}$  y distancia esferas espinterómetro de  $25\ \text{mm}$ .

En la figura anterior se observa que las oscilaciones de alta frecuencia han disminuido considerablemente, pero aún así se dan en la cola, asimismo, también al momento del corte. El voltaje de corte medido en el osciloscopio es de  $256\ \text{V}$ , ya normalizado corresponde a aproximadamente  $60.34\ \text{kV}$ .

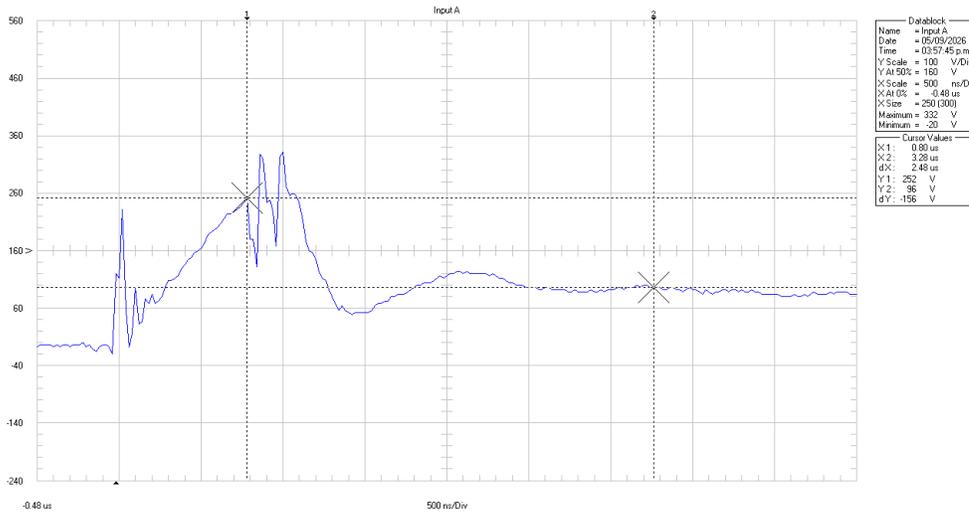
Con la resistencia de  $25\ \Omega$ , con voltaje de carga de  $67.8\ \text{kV}$  y distancia de las esferas del espinterómetro de  $25\ \text{mm}$ , se obtuvo la gráfica que se muestra a continuación:



**Figura E-5:** Prueba de impulso con resistencia serie de  $25\ \Omega$ , voltaje de carga  $67.8\ \text{kV}$  y distancia esferas espinterómetro de  $25\ \text{mm}$ .

En la gráfica de la figura anterior se observa menores oscilaciones luego del corte, el cual se da a un voltaje medido en el osciloscopio de 246 V, que corresponde a 58.01 kV ya normalizado. El resultado con la resistencia de 25  $\Omega$  es mejor que el obtenido con la resistencia de 12  $\Omega$ .

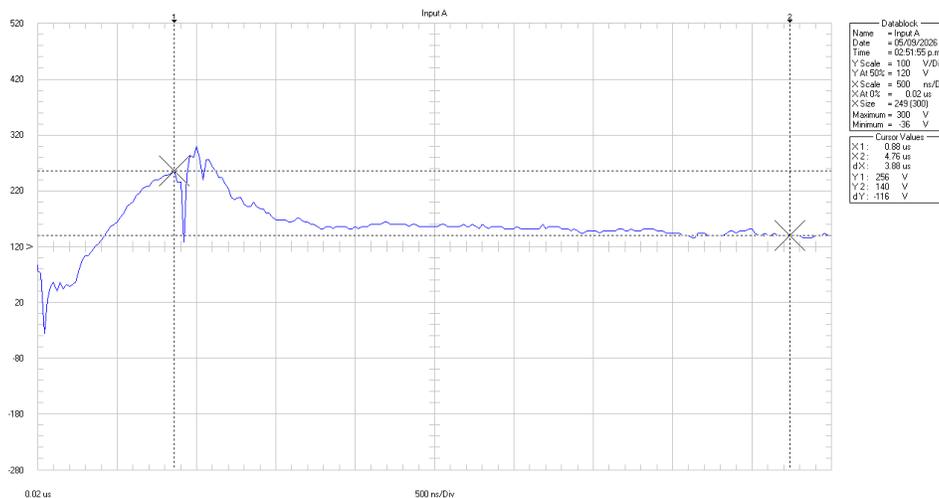
Para una resistencia de 37  $\Omega$  (resistencias de 12 y 25  $\Omega$  en serie), y el mismo voltaje de carga de las pruebas anteriores, a una distancia de 25 mm. se obtuvo la siguiente gráfica:



**Figura E-6:** Prueba de impulso con resistencia serie de 37  $\Omega$ , voltaje de carga 67.8 kV y distancia esferas espinterómetro de 25 mm.

En la gráfica con la resistencia serie de 37  $\Omega$ , se observan menos oscilaciones luego del corte, pero el voltaje no cae completamente luego del flameo, que se da a un valor indicado por el osciloscopio de 252 V que ya normalizados equivalen a 59.4 kV.

Para una resistencia serie de 120  $\Omega$ , con el mismo voltaje de cara y distancia de las esferas del espinterómetro se obtuvo el resultado que se muestra en la figura E-7:



**Figura E-7:** Prueba de impulso con resistencia serie de 120  $\Omega$ , voltaje de carga 67.8 kV y distancia esferas espinterómetro de 25 mm.

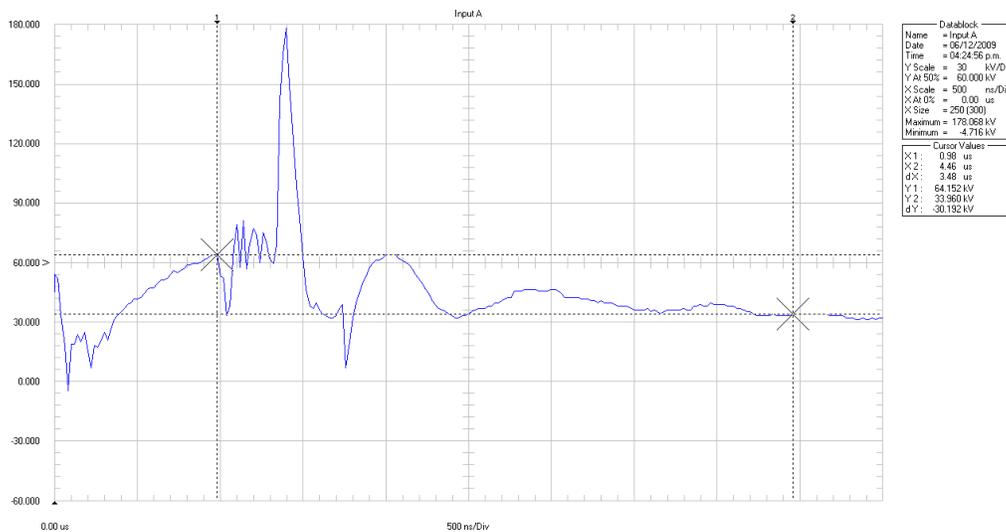
Con la resistencia de 120  $\Omega$ , se observa en el corte al flamear las esferas no se da completamente, las oscilaciones son menores pero la forma de onda no tiene el comportamiento esperado. El voltaje cuando ocurre el flameo medido en el osciloscopio es de 256 V, al normalizarlo equivale a 60.38 kV.

De las pruebas con los 4 valores de resistencia serie, la que mejor resultados proporciona es la resistencia con valor de 25  $\Omega$ .

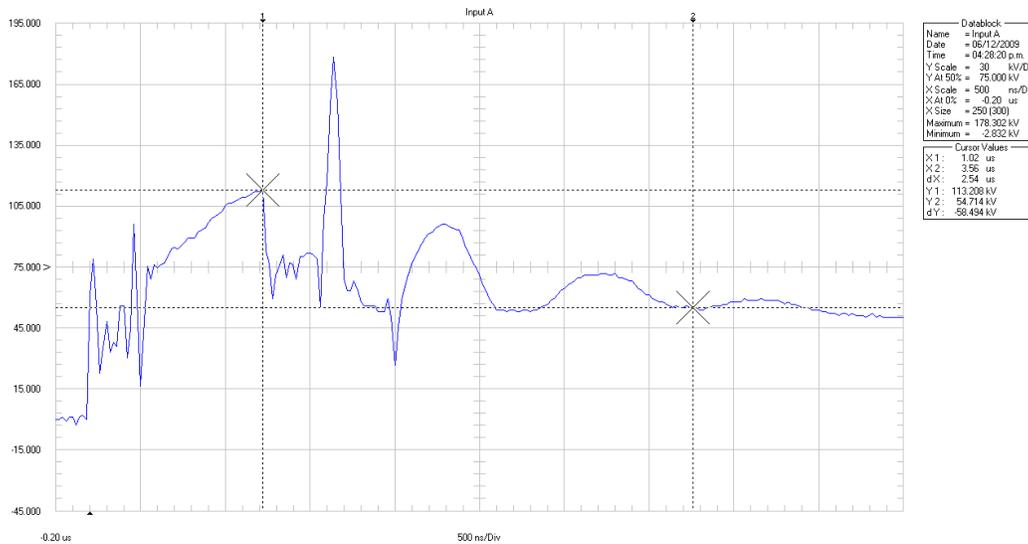
Para poder realizar pruebas con otros valores de resistencia, se procedió a construir prototipos hechos a partir de tubos de PVC llenos de agua con sal, utilizando los parámetros de área transversal del tubo, longitud del tubo, resistividad del agua con sal. Con esto, se construyeron dos resistencias con valores: 8  $\Omega$  y 30  $\Omega$ .

Las condiciones atmosféricas a las que se realizaron las pruebas son las mismas que se presentaron con los valores de resistencia anteriores, por lo que los valores de voltaje pico de flameo para el espinterómetro se muestran en la tabla.

Las pruebas con la resistencia de agua con sal de 30  $\Omega$ , con distancias entre las esferas del espinterómetro de 25 mm. y 50 mm., se muestran en las siguientes gráficas:



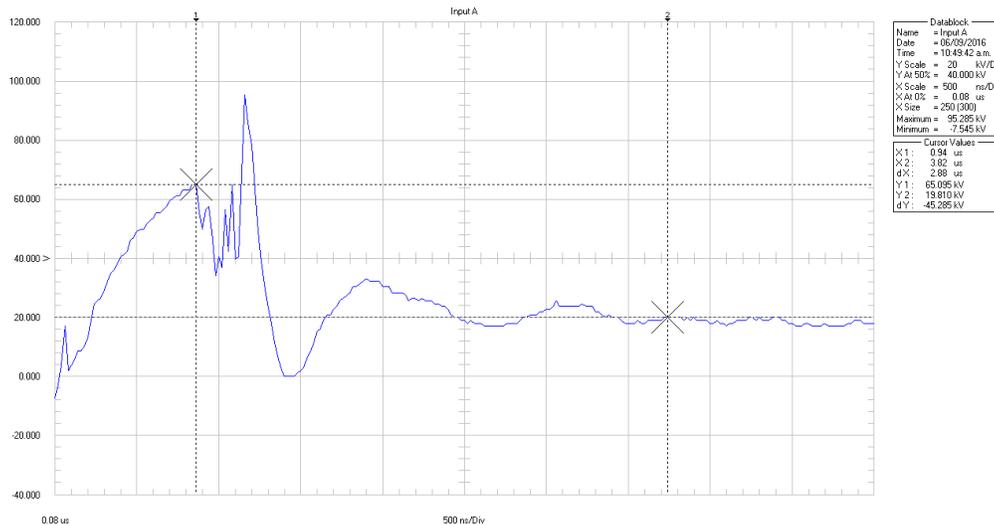
**Figura E-8:** Prueba de impulso con resistencia serie de agua con sal de 30  $\Omega$ , voltaje de carga 67.8 kV y distancia esferas espinterómetro de 25 mm.



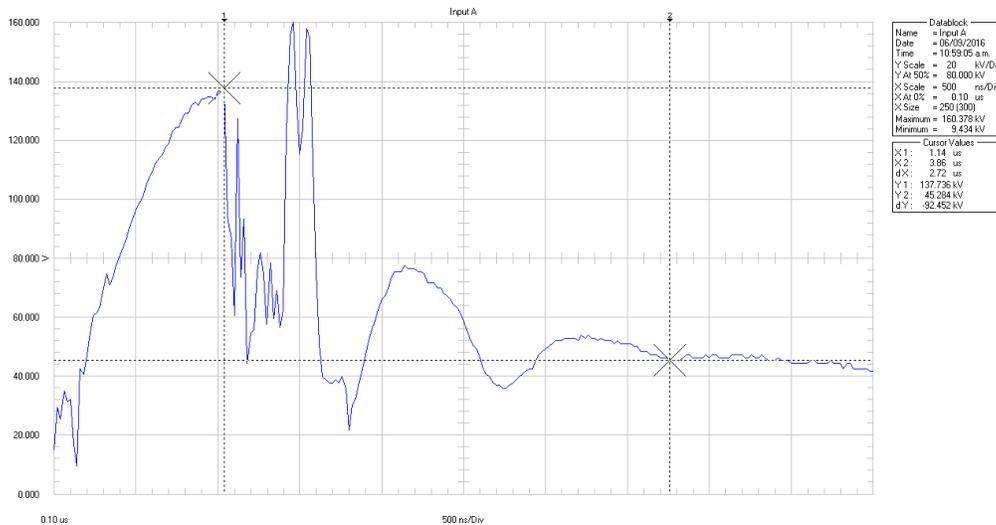
**Figura E-9:** Prueba de impulso con resistencia serie de agua con sal de 30  $\Omega$ , voltaje de carga 128.7 kV y distancia esferas espinterómetro de 50 mm.

En las figuras anteriores se observa que con la resistencia de agua con sal de 30  $\Omega$ , el ruido y la interferencia es mayor, se dan oscilaciones y no se obtiene la forma de onda con voltaje de corte esperada.

Las pruebas con la resistencia de agua con sal de 8  $\Omega$ , con distancias entre las esferas del espinterómetro de 25 mm. y 60 mm., se muestran en las siguientes gráficas



**Figura E-10:** Prueba de impulso con resistencia serie de agua con sal de 8  $\Omega$ , voltaje de carga 67.8 kV y distancia esferas espinterómetro de 25 mm.



**Figura E-11:** Prueba de impulso con resistencia serie de agua con sal de  $8 \Omega$ , voltaje de carga 152 kV y distancia esferas espinterómetro de 60 mm.

Con la resistencia de agua con sal de  $8 \Omega$ , tampoco se obtuvieron las formas de onda recortadas esperadas, con esta resistencia ocurren luego del voltaje de corte, picos de voltaje, que hacen ver la forma de onda muy distorsionada.

De las pruebas realizadas con los distintos tipos y valores de resistencia serie en el circuito de medición, con la que mejores resultados se obtuvieron fue con la de  $25 \Omega$ , por lo que las pruebas de calibración del osciloscopio para encontrar el factor de ajuste del mismo mediante el espinterómetro de esferas es conveniente realizarlo con dicha resistencia.

**ANEXO F.**  
**FACTOR DE AJUSTE DE OSCILOSCOPIO A PARTIR DEL ESPINTEROMETRO**  
**DE MEDICION.**

Para realizar el cálculo del factor de ajuste del osciloscopio para calibrarlo en base a los valores de voltaje pico de flameo se utilizaran los datos que se muestran en la tabla VII-2. Dichos valores son corregidos a las condiciones atmosféricas al momento de las pruebas.

Las condiciones atmosféricas durante las pruebas fueron las siguientes:

- Temperatura: 28 °C
- Presión: 946 HPa.
- Humedad Relativa: 70%.
- Humedad absoluta: 18 gr/m<sup>3</sup>.

De la metodología de cálculo de los factores de corrección atmosférica se obtuvieron los siguientes valores:

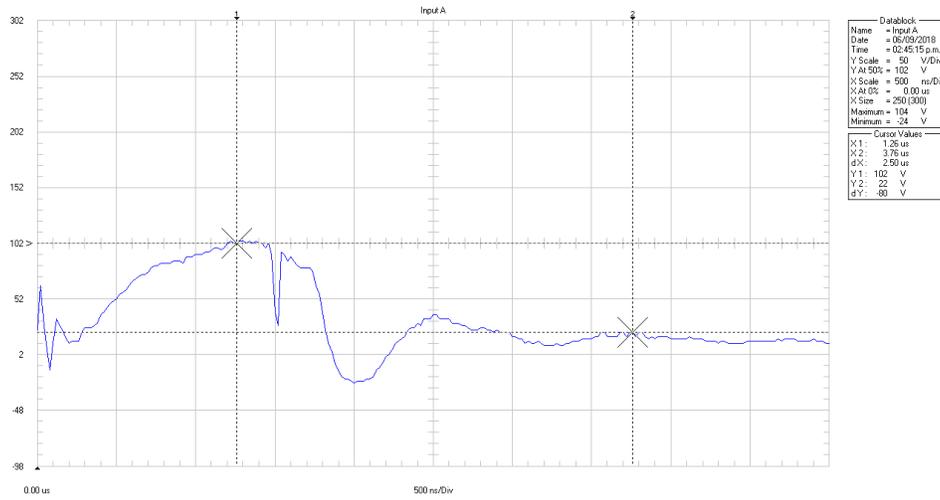
- Factor de corrección de densidad:  $K_d = 0.91$ .
- Factor de corrección de humedad:  $K_h = 0.95$ .
- Factor de corrección atmosférico:  $K_t = 0.96$ .

Los valores pico de flameo corregidos del espinterómetro en función de la distancia de las esferas, tanto a condiciones de atmosfera estándar como las ya corregidas a la atmosfera al momento de las pruebas se muestran en la siguiente tabla:

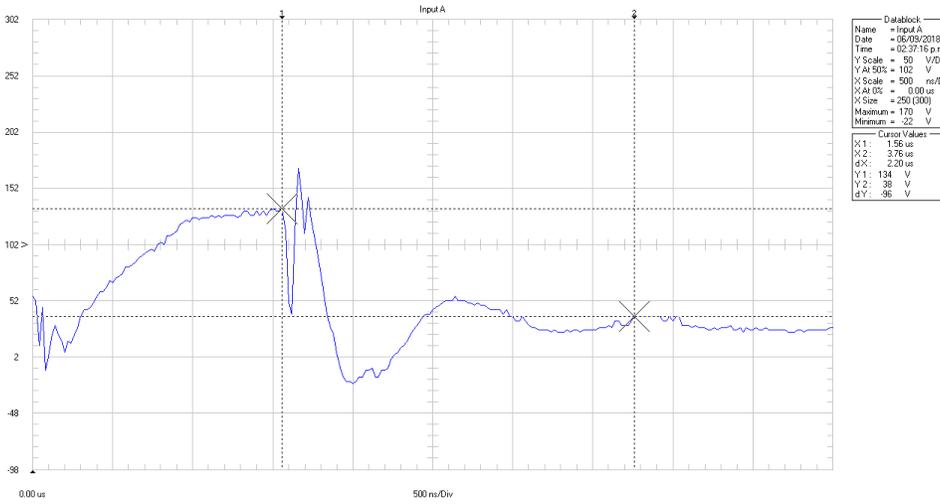
ESPACIO ESFERAS (mm.)	Voltaje (kV pico) polaridad positiva	Voltaje (kV pico) polaridad positiva corregido
20	59	56.8
25	72.7	69.9
30	86	82.7
40	112	107.7
50	138	132.7
60	163	156.8
70	187	179.9
75	199	191.4
80	211	203
90	233	224.1

**Tabla F-1:** Valores de voltaje corregido para pruebas para determinar factor de ajuste del osciloscopio.

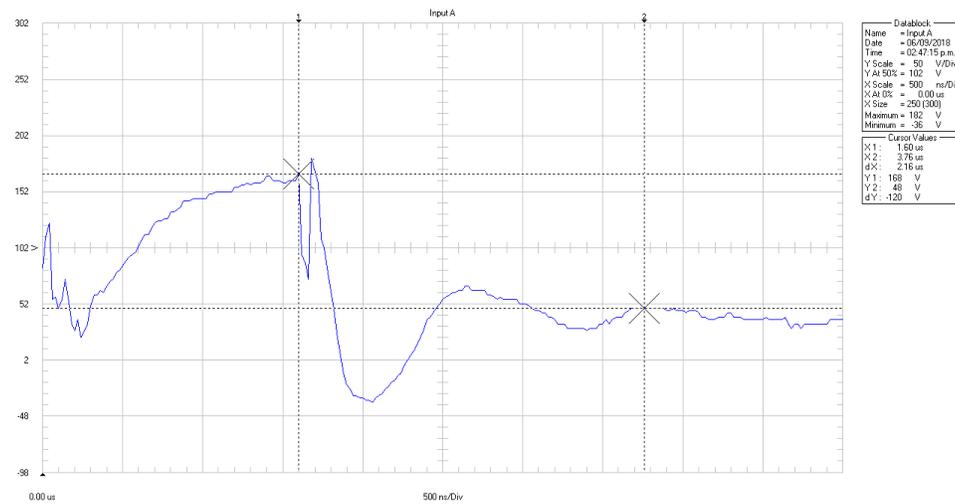
Las graficas registradas en el osciloscopio para las pruebas con los valores detallados en la tabla anterior, se muestran en las siguientes figuras:



**Figura F-1:** Prueba de impulso con voltaje de carga 56.8 kV y distancia esferas espinterómetro de 20 mm.



**Figura F-2:** Prueba de impulso con voltaje de carga 69.9 kV y distancia esferas espinterómetro de 25 mm.



**Figura F-3:** Prueba de impulso con voltaje de carga 82.7 kV y distancia esferas espinterómetro de 30 mm.

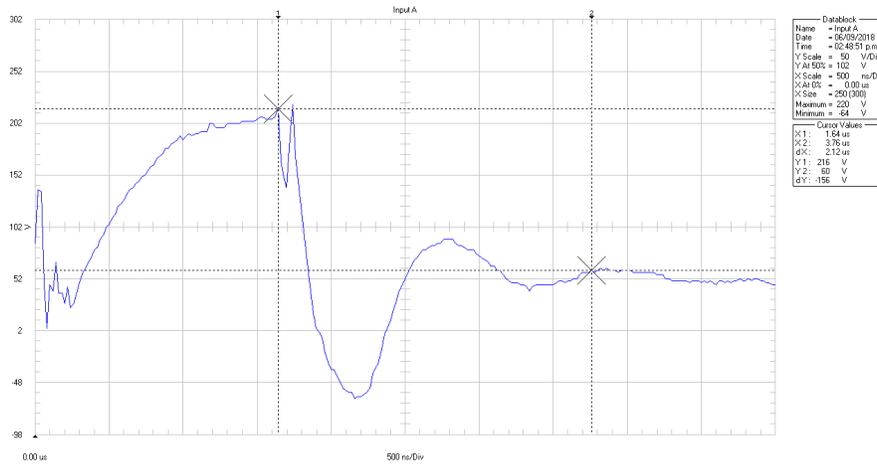


Figura F-4: Prueba de impulso con voltaje de carga 107.7 kV y distancia esferas espinterómetro de 40 mm.

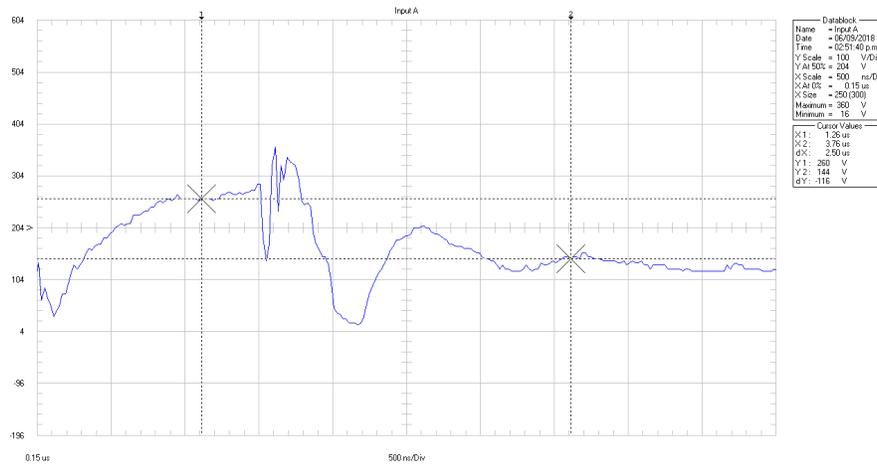


Figura F-5: Prueba de impulso con voltaje de carga 132.7 kV y distancia esferas espinterómetro de 50 mm.

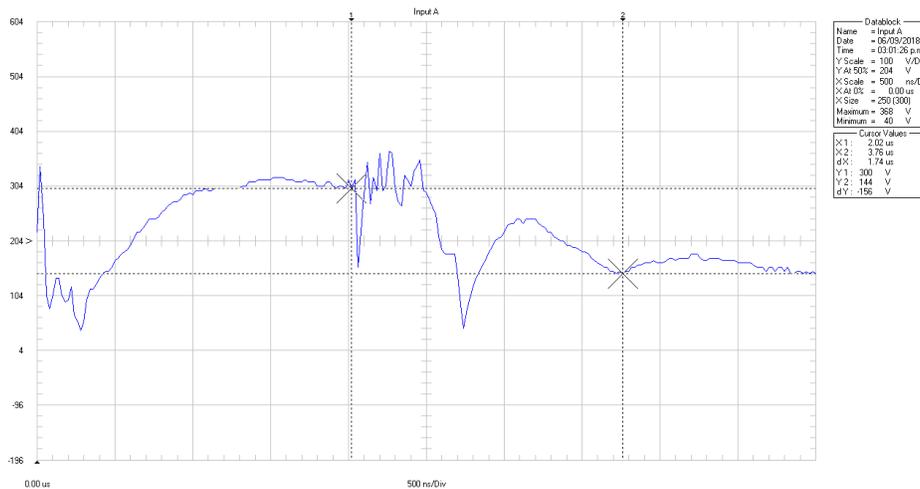
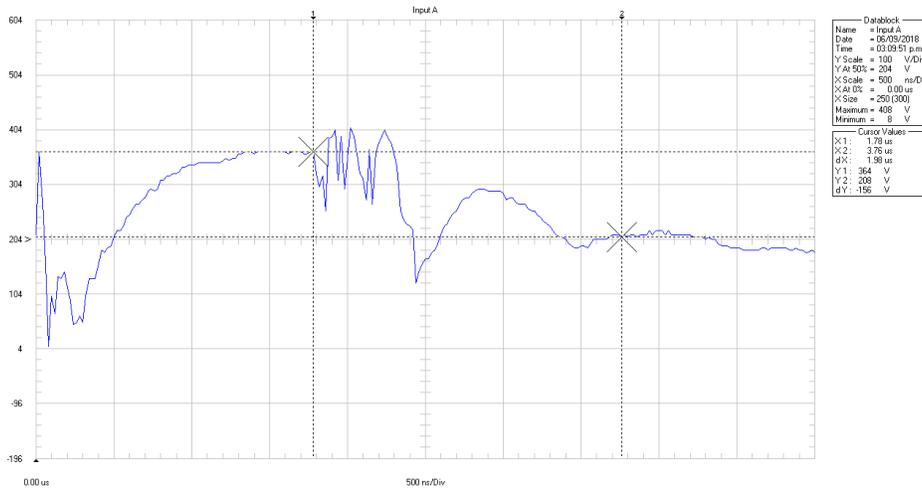


Figura F-6: Prueba de impulso con voltaje de carga 156.8 kV y distancia esferas espinterómetro de 60 mm.



**Figura F-7:** Prueba de impulso con voltaje de carga 179.9 kV y distancia esferas espinterómetro de 70 mm.

De las graficas anteriores se obtuvieron los resultados que se presentan en la siguiente tabla:

ESPACIO ESFERAS (mm.)	Voltaje (kV pico) polaridad positiva	Voltaje (kV pico) polaridad positiva corregido	Voltaje (V) medido osciloscopio	Voltaje (kV pico) normalizado	FACTOR DE AJUSTE	% Error
20	59	56.8	104	49.1	1.15581	13.48%
25	72.7	69.9	133	62.9	1.11205	10.08%
30	86	82.7	167	78.9	1.04873	4.65%
40	112	107.7	215	101.7	1.05885	5.56%
50	138	132.7	272	128.6	1.03211	3.11%
60	163	156.8	315	148.6	1.05538	5.25%
70	187	179.9	363	171.4	1.04942	4.71%
75	199	191.4	383	180.6	1.05997	5.66%
80	211	203	402	189.7	1.07003	6.54%
90	233	224.1	452	213.1	1.05141	4.89%

**Tabla F-2:** Factores de ajuste de osciloscopio en base a voltajes pico de flameo del espinterómetro de esferas de la EIE-UES.

El valor promedio del factor de ajuste es:

$$FC_{\text{promedio}} = 1.0694$$

El error promedio entre el valor medido en el osciloscopio y el valor de voltaje de flameo de las esferas del espinterómetro indicado en tablas con corrección atmosféricas es:

$$\%ERROR_{\text{promedio}} = 6.39\%$$

La desviación estándar de los factores de ajuste obtenidos para cada prueba realizada es:

$$S_v = 3.69\%$$

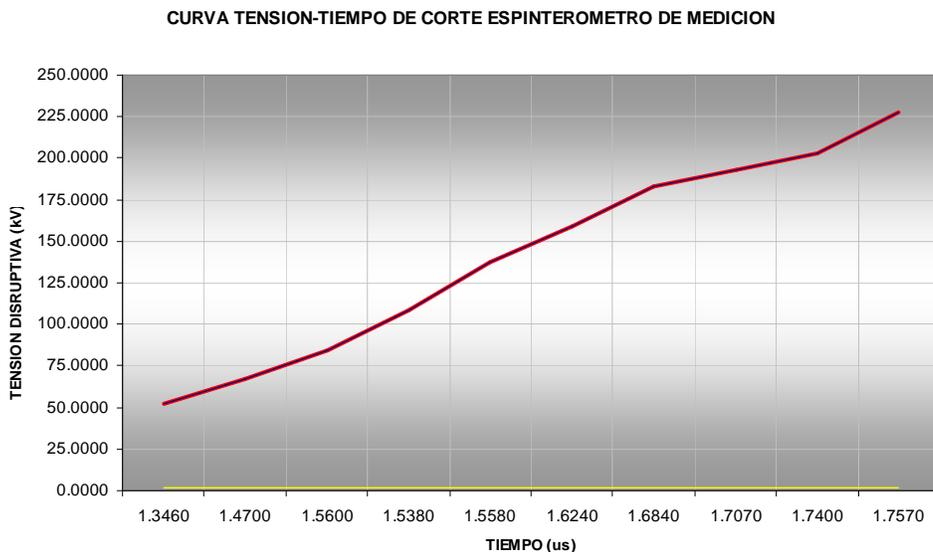
El valor de  $FC_{\text{promedio}} = 1.0694$ , es el factor que multiplicará cualquier valor de voltaje obtenido a partir del osciloscopio.

Con los valores obtenidos en las pruebas de calibración del osciloscopio utilizando el espinterómetro, se puede obtener la curva que relaciona la tensión de descarga disruptiva del mismo con la duración hasta el corte, que puede para nuestro caso el recorte se produjo en la cola. La curva se obtiene utilizando impulsos de forma constante pero con valores de cresta esperados diferentes, así como los que se realizaron. A continuación se muestra la tabla con los valores de voltaje de descarga disruptiva ya corregidos con el factor de ajuste y el tiempo de corte correspondiente:

VOLTAJE DE DESCARGA DISRUPTIVA (kV)	T <sub>90</sub> (us)	T <sub>30</sub> (us)	T <sub>1</sub> (us)	O <sub>1</sub> (us)	Tc´(us)	TIEMPO DE CORTE (us)
52.5522	1.0600	0.3800	1.1356	0.1140	1.4600	1.3460
67.2179	0.9200	0.3000	1.0354	0.0900	1.5600	1.4700
84.3279	1.0400	0.3000	1.2358	0.0900	1.6500	1.5600
108.7708	0.9800	0.3400	1.0688	0.1020	1.6400	1.5380
137.4912	0.9200	0.3400	0.9686	0.1020	1.6600	1.5580
158.8787	1.0000	0.3200	1.1356	0.0960	1.7200	1.6240
183.3216	0.9200	0.3200	1.0020	0.0960	1.7800	1.6840
193.0987	0.9300	0.3100	1.0354	0.0930	1.8000	1.7070
202.8759	0.9700	0.3000	1.1189	0.0900	1.8300	1.7400
227.9298	0.9400	0.3100	1.0521	0.0930	1.8500	1.7570

**Tabla F-3:** Valores de voltaje de descarga disruptiva de las esferas del espinterómetro y el tiempo de corte.

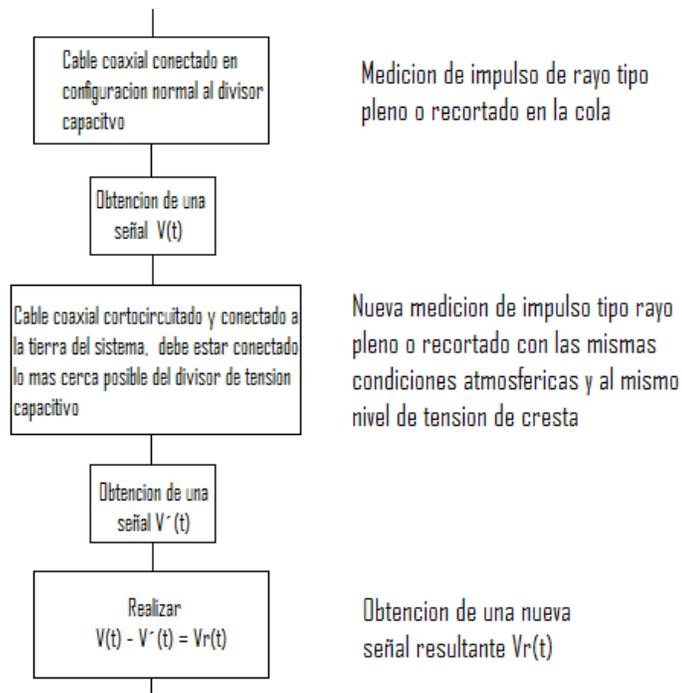
La curva tensión-tiempo de corte de los datos de la tabla anterior se muestra en la siguiente figura:



**Figura F-8:** Curva tensión – tiempo para el espinterómetro de medición de la EIE-UES.

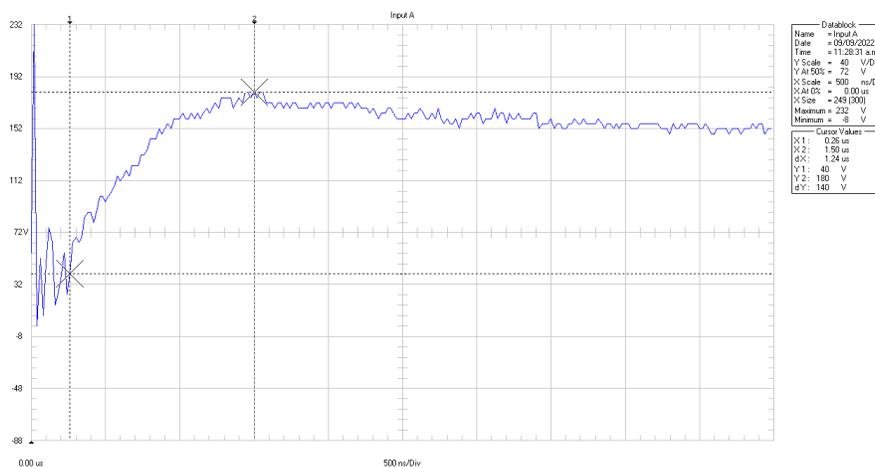
## ANEXO G. PRUEBAS DE INTERFERENCIA EN EL CIRCUITO DE MEDICION DEL GENERADOR DE IMPULSOS TIPO RAYO DE LA EIE-UES.

Para la realización de las pruebas de interferencia (Art. 55) en el circuito de medición se siguió el procedimiento descrito a continuación:



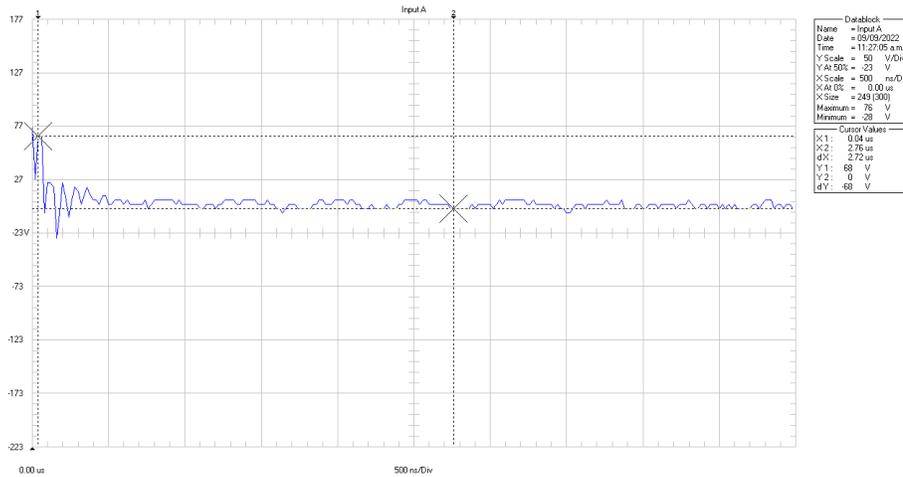
**Figura G-1:** Esquema de procedimiento para pruebas de interferencia en generador de impulsos de EIE-UES.

Al realizar la prueba con un impulso de tensión tipo rayo de 86 kV, con el cable coaxial conectado normalmente al divisor capacitivo de tensión se obtuvo la siguiente gráfica:



**Figura G-2:** Forma de onda de impulso tipo rayo de 86 kV, con cable coaxial conectado normalmente a divisor capacitivo de tensión.

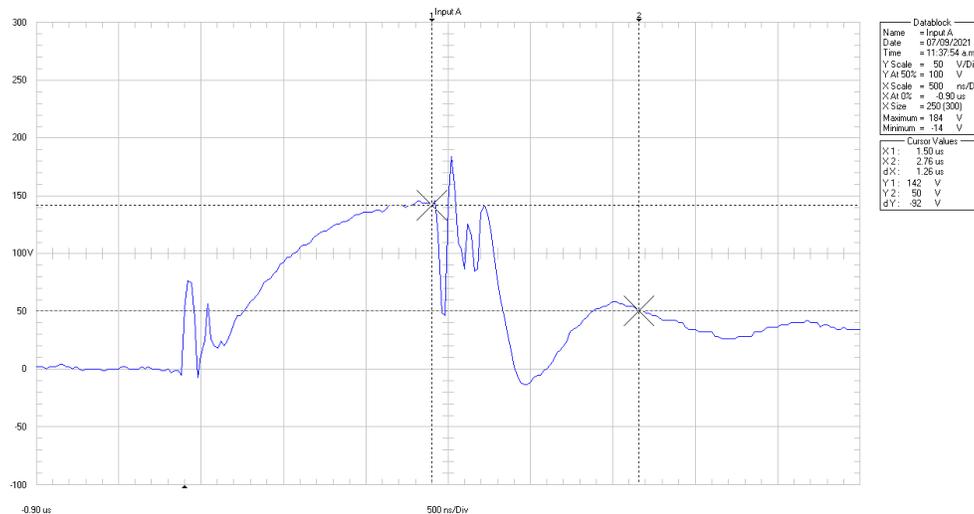
Al desconectar el cable coaxial y cortocircuitar sus terminales de entrada y realizar el mismo impulso tipo rayo a 86 kV se obtuvo la siguiente gráfica:



**Figura G-3:** Forma de onda de impulso tipo rayo de 86 kV, con cable coaxial desconectado del divisor capacitivo de tensión.

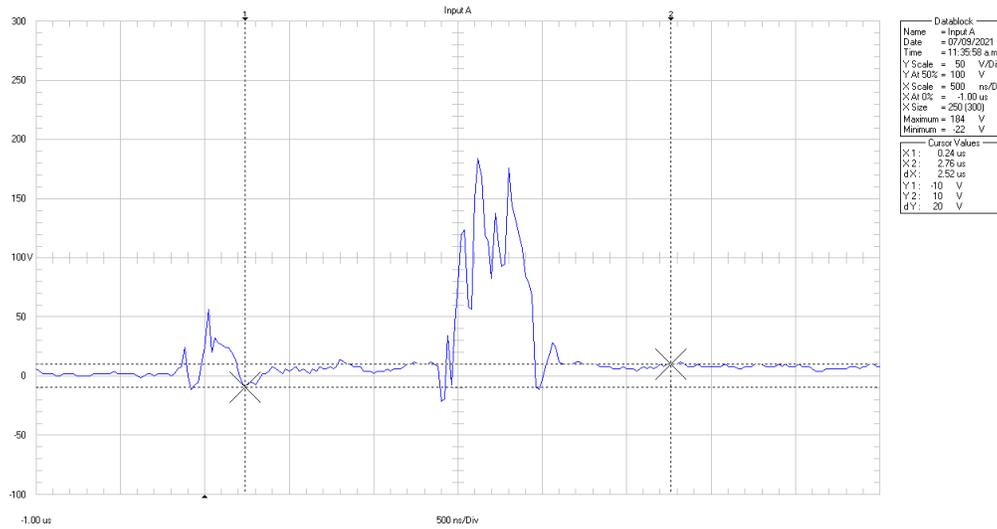
En la figura G-3 se observa que la interferencia para un impulso tipo rayo que no presenta descarga disruptiva puede considerarse despreciable.

Para un impulso tipo rayo de 67.5 kV, que presenta descarga disruptiva ocasionando un recorte en la cola, se obtuvo la siguiente forma de onda con el coaxial conectado normalmente al divisor capacitivo de tensión:



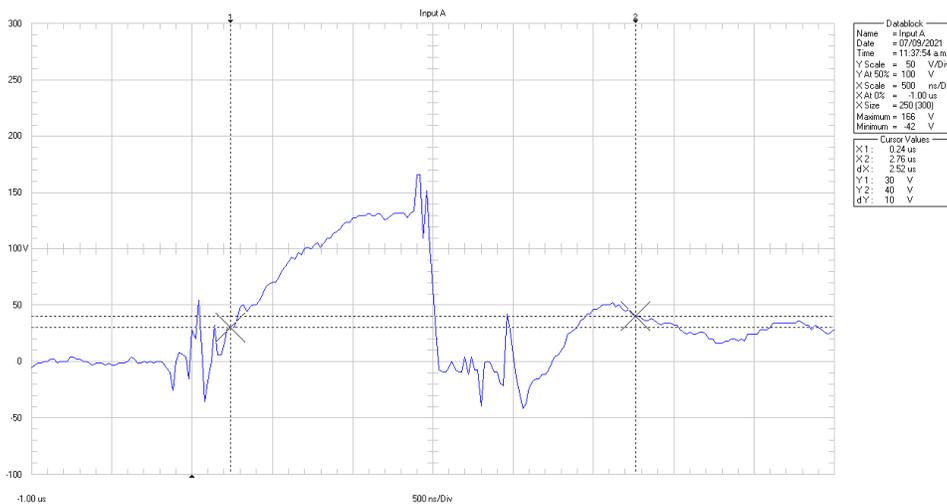
**Figura G-4:** Forma de onda de impulso tipo rayo de 67.5 kV con descarga disruptiva, con cable coaxial conectado normalmente a divisor capacitivo de tensión.

Al desconectar el cable coaxial del divisor capacitivo de tensión y cortocircuitar sus terminales de entrada, se obtuvo la siguiente forma de onda a la misma tensión de 67.5 kV:



**Figura G-5:** Forma de onda de impulso tipo rayo de 67.5 kV, con cable coaxial desconectado del divisor capacitivo de tensión.

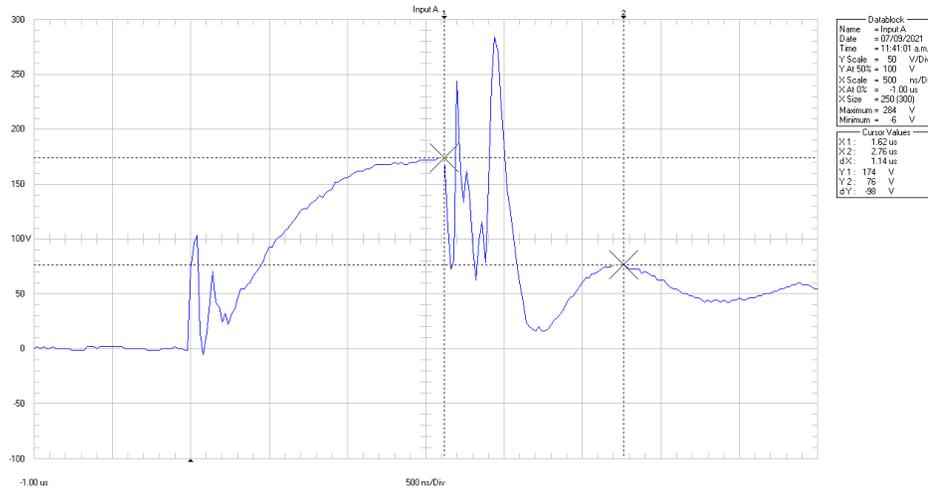
En la gráfica de la figura G-5 se observa valores de tensión considerables que constituyen la interferencia de la forma de onda, al realizar la resta de las señales de las gráficas G-4 y G-5 se obtuvo el siguiente resultado:



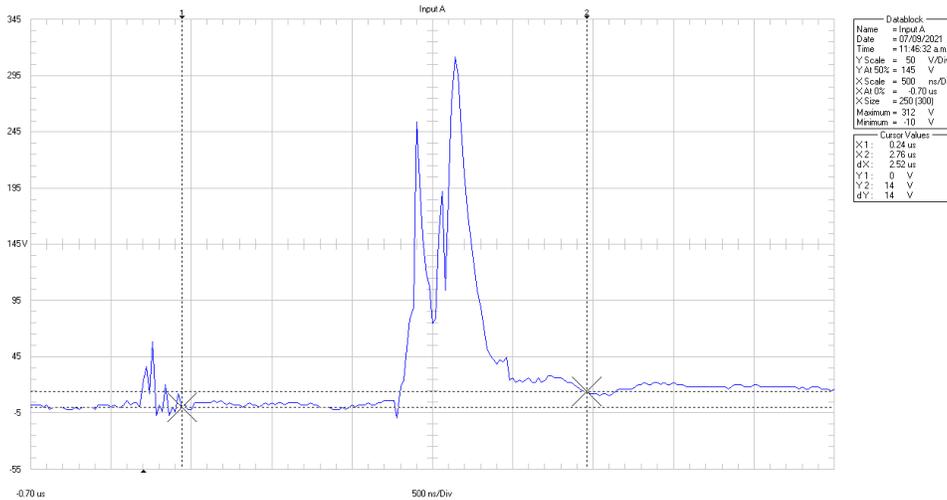
**Figura G-6:** Forma de onda de impulso tipo rayo de 67.5 kV con descarga disruptiva restando la interferencia existente.

Como se observa en la figura G-6, en momento del corte en la cola del impulso tipo rayo, al restar a la forma de onda con interferencia, la interferencia presente, se ve como esta desaparece y la caída de tensión se observa de una forma más clara, los picos que se observan antes del corte son efecto del desplazamiento en tiempo de ambas señales que se restan.

Al realizar el mismo procedimiento para un ensayo de descarga disruptiva a una tensión de prueba de 82.6 kV, se obtuvo el siguiente resultado:

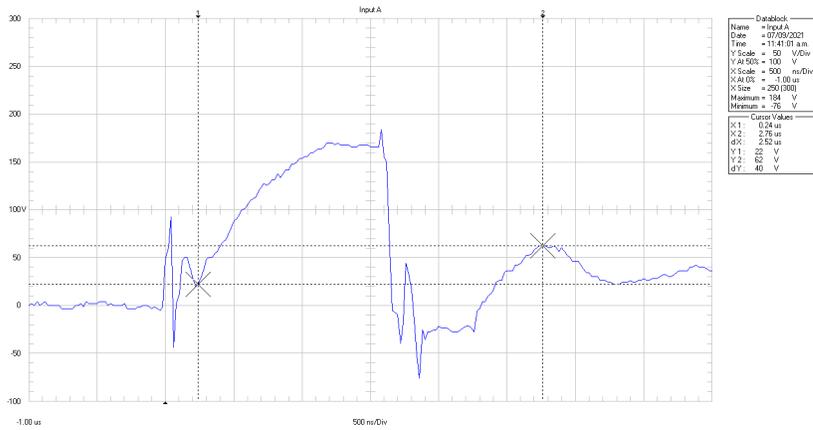


**Figura G-7:** Forma de onda de impulso tipo rayo de 82.6 kV con descarga disruptiva, con cable coaxial conectado normalmente a divisor capacitivo de tensión.



**Figura G-8:** Forma de onda de impulso tipo rayo de 82.6 kV, con cable coaxial desconectado del divisor capacitivo de tensión.

Al restar la interferencia medida que se muestra en la figura G-8 a la forma de onda que se muestra en la figura G-6, se obtiene la siguiente gráfica:



**Figura G-9:** Forma de onda de impulso tipo rayo de 82.6 kV con descarga disruptiva restando la interferencia existente.

En la figura G-9, se observa nuevamente que al aplicar impulsos tipo rayo con descarga disruptiva, al momento del corte en la cola, ocurre interferencia en la señal, la cual al restarse de la forma de onda de impulso original se obtiene la forma de onda de la señal sin interferencia, apreciándose de mejor forma la caída de tensión durante el corte.

Para impulsos tipo rayo sin descarga disruptiva, la interferencia en la señal puede considerarse despreciable.

Para las gráficas de las figuras G-6 y G-9, se realizó el análisis de los parámetros de tiempo corte y la caída de tensión durante el mismo.

Los tiempos de corte para ambas gráficas se muestran en la siguiente tabla:

VOLTAJE DE CORTE (kV)	T <sub>90</sub> (us)	T <sub>30</sub> (us)	T <sub>1</sub> (us)	O <sub>1</sub> (us)	Tc'(us)	TIEMPO DE CORTE (us)
67.5	0.9400	0.2800	1.1022	0.0840	1.4600	1.3760
82.6	0.9200	0.3000	1.0354	0.0900	1.5800	1.4900

**Tabla G-1:** Tiempos de corte para gráficas sin interferencia.

Se observa que los tiempos de corte obtenidos son menores que el valor mínimo establecido de 1.5 us.

Los parámetros de la caída de tensión durante el corte se muestran a continuación:

Voltaje de corte Vc (kV)	Vc a 70% (kV)	Vc a 10% (kV)	Intervalo de tiempo (us)	Duración de caída de tensión (us)	Pendiente de caída de tensión (kV/us)
67.50	93.61	13.37	0.040	0.067	1010.479
82.60	114.55	16.36	0.035	0.058	1413.174

**Tabla G-2:** Parámetros de caída de tensión para gráficas sin interferencia.

## ANEXO H. PRUEBAS DIELECTRICAS EN AIRE CON ELECTRODOS PUNTA/PUNTA Y PUNTA/PLANO.

### H-1. Construcción de prototipo de espinterómetro punta-punta.

Para realizar las pruebas de tensión de descarga disruptiva a diferentes distancias de separación de los electrodos punta-punta se construyo el prototipo que se muestra en la siguiente figura:



**Figura H-1:** Prototipo de espinterómetro punta-punta construido.

Las características del prototipo de espinterómetro punta-punta son las siguientes:

- Varillas de hierro de 1.27 cm. de sección cuadrada (½ pulgada).
- Longitud del electrodo de alta tensión variable de 40 cm. a 85 cm. dependiendo de la distancia de separación de los electrodos.
- Longitud del electrodo de aterrizaje con respecto al plano de tierra de 35 cm,
- Distancia máxima de separación de los electrodos de 45 cm.
- Altura del punto de entrada de alta tensión con respecto al plano de tierra igual a 1.20 m.
- Voltaje máximo de prueba de aproximadamente 250 kV, es decir pruebas a distancia entre los electrodos menores a 35 cm.

## H-2. Pruebas de tensión de impulso tipo rayo de descarga disruptiva para prototipo de espinterómetro punta-punta.

Para realizar estas pruebas, cuyo objetivo es comprobar los valores de la tabla para los voltajes de tensión de descarga disruptiva a diferentes distancias de separación entre los electrodos punta-punta, y determinar un factor gap para el prototipo.

El valor de descarga disruptiva, tanto para configuraciones de electrodos en aire, como para aislamientos autorecuperables se determina en los laboratorios de alta tensión por métodos experimentales. El procedimiento a seguir es muy usado y conocido como de "Arriba-Abajo" (Up & Down) descrito en el artículo 56 de la normativa desarrollada.

Los valores de tensión de descarga disruptiva inicial y las distancias establecidas entre los electrodos del espinterómetro punta-punta para condiciones de atmosfera estándar se muestran en la siguiente tabla:

DISTANCIA (cm.)	U <sub>0</sub> (kV)
2	40
4	55
6	70
8	85
10	100
15	137.5
20	175
25	212.5
30	250

**Tabla H-2:** Valores iniciales para las tensiones de descargas disruptivas a diferentes distancias de los electrodos punta-punta del prototipo.

Las condiciones ambientales al momento de realizar las pruebas son las siguientes:

Temperatura = 28 °C.

Presión = 946 HPa.

Humedad relativa = 62%.

Humedad absoluta = 16 gr/m<sup>3</sup>.

De los datos de las condiciones atmosféricas se obtienen los siguientes factores de corrección:

Factor de corrección de densidad  $K_d = 0.91$

Factor de corrección de humedad  $K_h = 0.96$

Factor de corrección atmosférico  $K_t = 0.95$

Los valores corregidos por las condiciones atmosféricas y los valores de desviación estándar (considerando 0.05) correspondientes para las distancias de prueba entre los electrodos punta-punta se muestran a continuación:

DISTANCIA (cm.)	Uo (kV)	Uo corregidos (kV)	Desviación (kV)
2	40	37.88	1.89
4	55	52.08	2.60
6	70	66.28	3.31
8	85	80.49	4.02
10	100	94.69	4.73
15	137.5	130.20	6.51
20	175	165.71	8.29
25	212.5	201.22	10.06
30	250	236.73	11.84

**Tabla H-3:** Valores iniciales estimados para la tensión de descarga disruptiva corregidos por factor atmosférico y la desviación estándar a utilizar en método up-down.

En las tablas siguientes se muestran los resultados de la realización de las pruebas con el espinterómetro punta-punta mediante el procedimiento up-down:

Distancia (cm)	2				4				6			
	Uo (kV)				Uo corregidos (kV)				Desviación (kV)			
Datos prueba	Uv (kV)	1/0	Uv osc (V)	Uv final (kV)	Uv (kV)	1/0	Uv osc (V)	Uv final (kV)	Uv (kV)	1/0	Uv osc (V)	Uv final (kV)
1	37.88	1	76	38.14	52.08	1	104	52.44	66.28	1	132	66.74
2	35.98	1	72	36.23	49.48	0	99	49.82	62.97	1	126	63.41
3	34.09	1	68	34.33	52.08	1	104	52.44	59.66	1	119	60.07
4	32.20	1	64	32.42	49.48	0	99	49.82	56.34	0	112	56.73
5	30.30	1	60	30.51	52.08	1	104	52.44	59.66	1	119	60.07
6	28.41	0	57	28.60	49.48	1	99	49.82	56.34	0	112	56.73
7	30.30	1	60	30.51	46.87	0	94	47.20	59.66	1	119	60.07
8	28.41	0	57	28.60	49.48	1	99	49.82	56.34	0	112	56.73
9	30.30	0	60	30.51	46.87	0	94	47.20	59.66	1	119	60.07
10	32.20	1	64	32.42	49.48	0	99	49.82	56.34	1	112	56.73
11	30.30	0	60	30.51	52.08	1	104	52.44	53.03	0	106	53.40
12	32.20	0	64	32.42	49.48	0	99	49.82	56.34	1	112	56.73
13	34.09	1	68	34.33	52.08	1	104	52.44	53.03	0	106	53.40
14	32.20	1	64	32.42	49.48	1	99	49.82	56.34	0	112	56.73
15	30.30	0	60	30.51	46.87	0	94	47.20	59.66	0	119	60.07
16	32.20	1	64	32.42	49.48	0	99	49.82	62.97	1	126	63.41
17	30.30	0	60	30.51	52.08	1	104	52.44	59.66	1	119	60.07
18	32.20	1	64	32.42	49.48	0	99	49.82	56.34	0	112	56.73
19	30.30	0	60	30.51	52.08	1	104	52.44	59.66	1	119	60.07
20	32.20	1	64	32.42	49.48	0	99	49.82	56.34	0	112	56.73

**Tabla H-4:** Resultados procedimiento arriba-abajo para distancias de separación entre electrodos de 2,4, y 6cm para espinterómetro punta-punta.

Distancia (cm)	8				10				15			
Uo (kV)	85.00				100.00				137.50			
Uo corregidos (kV)	80.49				94.69				130.20			
Desviación (kV)	4.02				4.73				6.51			
Datos prueba	Uv (kV)	1/0	Uv osc (V)	Uv final (kV)	Uv (kV)	1/0	Uv osc (V)	Uv final (kV)	Uv (kV)	1/0	Uv osc (V)	Uv final (kV)
1	80.49	1	161	81.05	94.69	1	189	95.35	130.20	1	260	131.10
2	76.46	1	153	76.99	89.96	0	179	90.58	123.69	1	247	124.55
3	72.44	1	145	72.94	94.69	1	189	95.35	117.18	0	234	117.99
4	68.41	0	136	68.89	89.96	1	179	90.58	123.69	1	247	124.55
5	72.44	1	145	72.94	85.22	0	170	85.81	117.18	0	234	117.99
6	68.41	1	136	68.89	89.96	1	179	90.58	123.69	1	247	124.55
7	64.39	0	128	64.84	85.22	0	170	85.81	117.18	0	234	117.99
8	68.41	0	136	68.89	89.96	0	179	90.58	123.69	1	247	124.55
9	72.44	1	145	72.94	94.69	1	189	95.35	117.18	1	234	117.99
10	68.41	0	136	68.89	89.96	0	179	90.58	110.67	0	221	111.44
11	72.44	1	145	72.94	94.69	1	189	95.35	117.18	0	234	117.99
12	68.41	0	136	68.89	89.96	0	179	90.58	123.69	1	247	124.55
13	72.44	1	145	72.94	94.69	1	189	95.35	117.18	1	234	117.99
14	68.41	0	136	68.89	89.96	0	179	90.58	110.67	0	221	111.44
15	64.39	1	128	64.84	94.69	1	189	95.35	117.18	1	234	117.99
16	68.41	1	136	68.89	89.96	1	179	90.58	110.67	0	221	111.44
17	64.39	0	128	64.84	85.22	0	170	85.81	117.18	0	234	117.99
18	68.41	0	136	68.89	89.96	0	179	90.58	123.69	1	247	124.55
19	72.44	1	145	72.94	94.69	1	189	95.35	117.18	0	234	117.99
20	68.41	0	136	68.89	89.96	0	179	90.58	123.69	1	247	124.55

Tabla H-5: Resultados procedimiento arriba-abajo para distancias de separación entre electrodos de 8,10, y 15cm para espinterómetro punta-punta.

Distancia (cm)	20				25				30			
Uo (kV)	175.00				212.50				250.00			
Uo corregidos (kV)	165.71				201.22				236.73			
Desviación (kV)	8.29				10.06				11.84			
Datos prueba	Uv (kV)	1/0	Uv osc (V)	Uv final (kV)	Uv (kV)	1/0	Uv osc (V)	Uv final (kV)	Uv (kV)	1/0	Uv osc (V)	Uv final (kV)
1	165.71	1	331	166.86	201.22	1	401	202.62	236.73	1	472	238.37
2	157.42	1	314	158.52	191.16	0	381	192.49	224.89	1	449	226.45
3	149.14	1	298	150.17	201.22	1	401	202.62	213.06	1	425	214.53
4	140.85	0	281	141.83	191.16	1	381	192.49	201.22	0	401	202.62
5	149.14	1	298	150.17	181.10	0	361	182.35	213.06	1	425	214.53
6	140.85	0	281	141.83	191.16	0	381	192.49	201.22	0	401	202.62
7	149.14	1	298	150.17	201.22	1	401	202.62	213.06	1	425	214.53
8	140.85	0	281	141.83	191.16	0	381	192.49	201.22	0	401	202.62
9	149.14	1	298	150.17	201.22	1	401	202.62	213.06	1	425	214.53
10	140.85	0	281	141.83	191.16	0	381	192.49	201.22	0	401	202.62
11	149.14	1	298	150.17	201.22	1	401	202.62	213.06	1	425	214.53
12	140.85	1	281	141.83	191.16	1	381	192.49	201.22	1	401	202.62
13	132.57	0	264	133.49	181.10	0	361	182.35	189.38	0	378	190.70
14	140.85	0	281	141.83	191.16	0	381	192.49	201.22	0	401	202.62
15	149.14	1	298	150.17	201.22	1	401	202.62	213.06	1	425	214.53
16	140.85	0	281	141.83	191.16	0	381	192.49	201.22	0	401	202.62
17	149.14	1	298	150.17	201.22	1	401	202.62	213.06	1	425	214.53
18	140.85	0	281	141.83	191.16	0	381	192.49	201.22	0	401	202.62
19	149.14	1	298	150.17	201.22	1	401	202.62	213.06	1	425	214.53
20	140.85	0	281	141.83	191.16	0	381	192.49	201.22	0	401	202.62

Tabla H-6: Resultados procedimiento arriba-abajo para distancias de separación entre electrodos de 20, 25, y 30 cm para espinterómetro punta-punta.

Donde en las tablas anteriores:

$U_v$  = Valor del nivel de tensión.

$1/0 = 1$  si hay flameo, 0 si no hay flameo.

$U_{v,osc}$  = valor máximo medido en el osciloscopio.

$U_v$  final = Valor de nivel de tensión a partir de medición en el osciloscopio, ya normalizado sin atenuación y considerando factor de escala del osciloscopio para corregir los valores medidos.

Los valores correspondientes a  $U_v$  final, serán los que se utilizarán en el cálculo de la tensión de descarga disruptiva  $U_{50}$ .

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los valores obtenidos para el cálculo de  $U_{50}$  para cada una de las distancias de separación del espinterómetro punta-punta especificadas.

2 cm.		4 cm.		6 cm.		8 cm.		10 cm.		15 cm.		20 cm.		25 cm.		30 cm.	
$U_v$ final (kV)	Nv																
28.60	2	47.20	3	53.40	2	64.84	3	85.81	3	111.44	3	133.49	1	182.35	2	190.70	1
30.51	7	49.82	10	56.73	8	68.89	9	90.58	10	117.99	9	141.83	9	192.49	10	202.62	9
32.42	7	52.44	7	60.07	7	72.94	6	95.35	7	124.55	7	150.17	8	202.62	8	214.53	8
34.33	2			63.41	2	76.99	1			131.10	1	158.52	1			226.45	1
36.23	1			66.74	1	81.05	1					166.86	1			238.37	1
38.14	1																

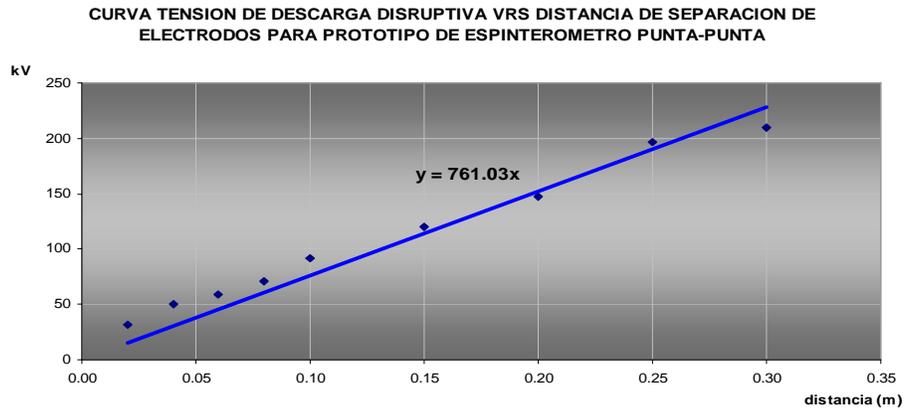
**TABLA H-7:** Valores obtenidos para procedimiento arriba-abajo con el espinterómetro punta-punta.

De los datos de la tabla anterior y utilizando la fórmula se obtienen los siguientes valores para  $U_{50}$  a las distintas distancias de separación de los electrodos del espinterómetro punta-punta.

DISTANCIA (cm.)	$U_{50}$ (kV)
2	32
4	50.3
6	58.7
8	70.5
10	91.5
15	120
20	147
25	196
30	210

**TABLA H-8:** Valores de tensión de descarga disruptiva para diferentes distancias de separación de los electrodos punta-punta.

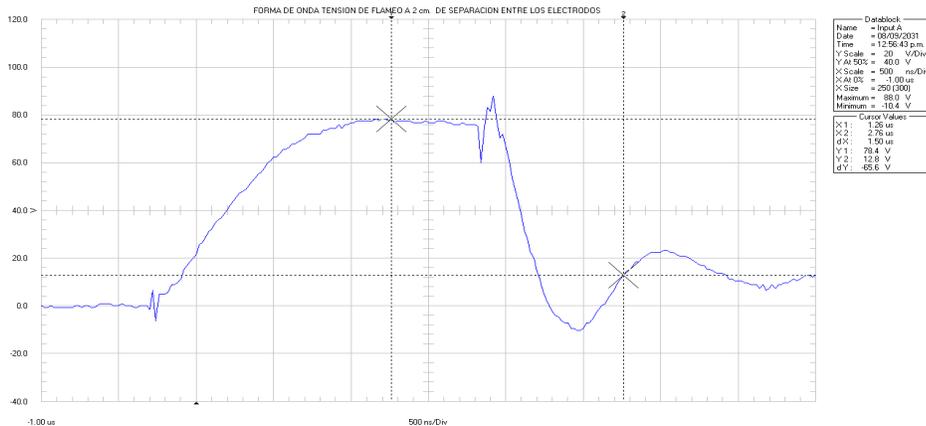
De la tabla anterior se obtiene la siguiente gráfica característica, para la tensión de descarga disruptiva  $U_{50}$  con respecto a la distancia de separación de los electrodos del espinterómetro punta-punta:



**Figura H-2:** Curva de tensión de descarga disruptiva en función de la distancia de separación de los electrodos punta-punta.

De la gráfica anterior se puede observar que la pendiente de la gráfica de tendencia es igual a 761.03 kV/m, que equivale al factor gap del prototipo de espinterómetro punta-punta a las condiciones atmosféricas antes indicadas. Al convertir el factor gap a las condiciones atmosféricas estándar utilizando el factor de corrección atmosférico este es igual a 801.08 kV/m.

Las gráficas obtenidas durante los ensayos de la tensión de descarga disruptiva para el espinterómetro punta-punta se muestran a continuación:



**Figura H-3:** Gráfica de tensión de descarga disruptiva de 32 kV y distancia de separación entre electrodos de 2 cm.

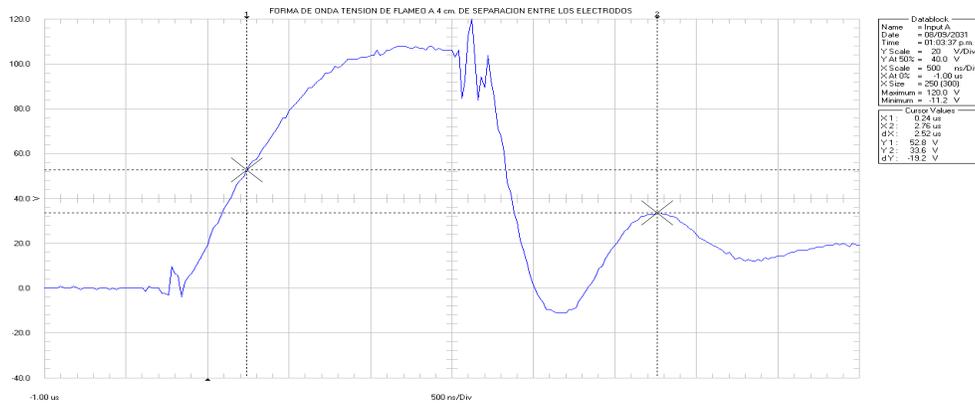


Figura H-4: Gráfica de tensión de descarga disruptiva de 50.3 kV y distancia de separación entre electrodos de 4 cm.

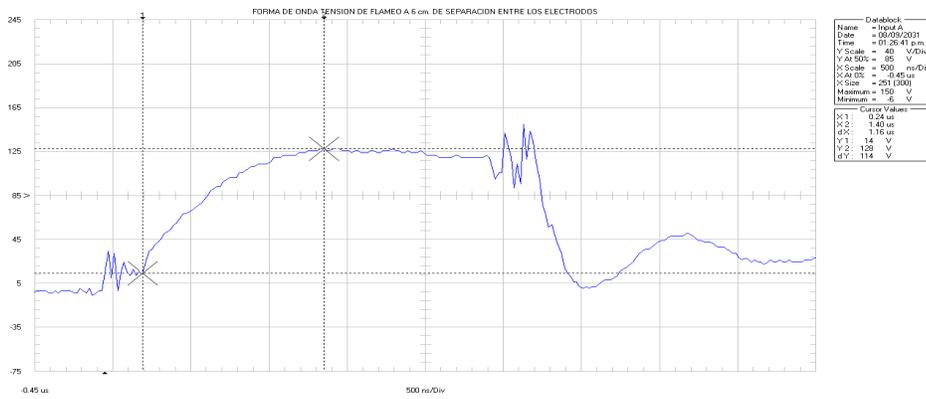


Figura H-5: Gráfica de tensión de descarga disruptiva de 58.7 kV y distancia de separación entre electrodos de 6 cm.

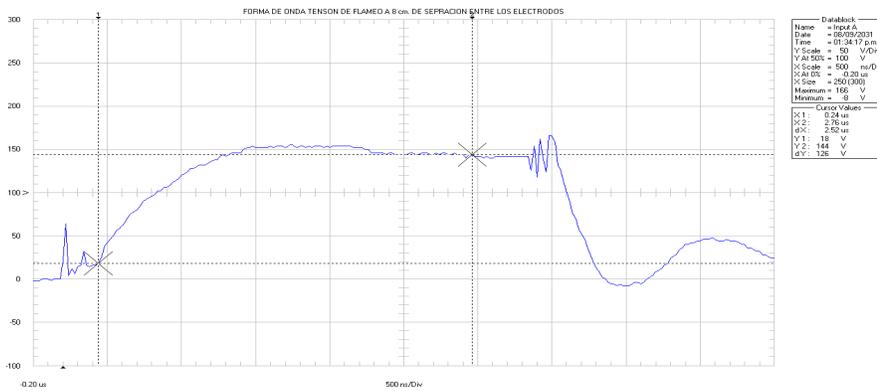


Figura H-6: Gráfica de tensión de descarga disruptiva de 70.5 kV y distancia de separación entre electrodos de 8 cm.

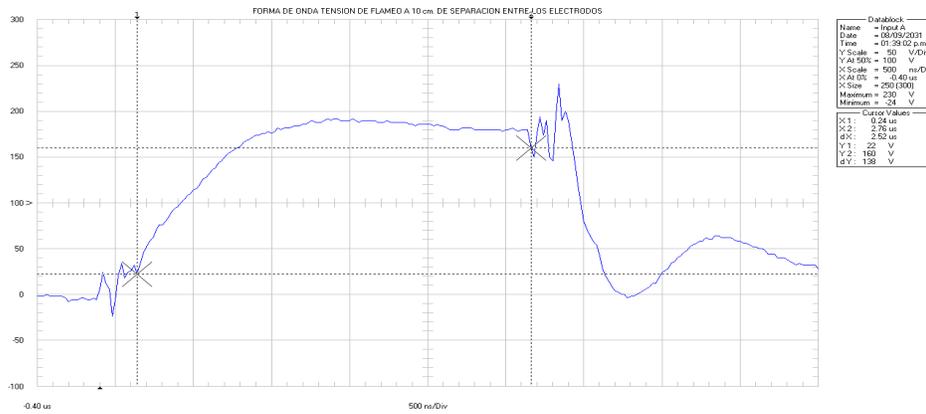


Figura H-7: Gráfica de tensión de descarga disruptiva de 91.7 kV y distancia de separación entre electrodos de 10 cm.

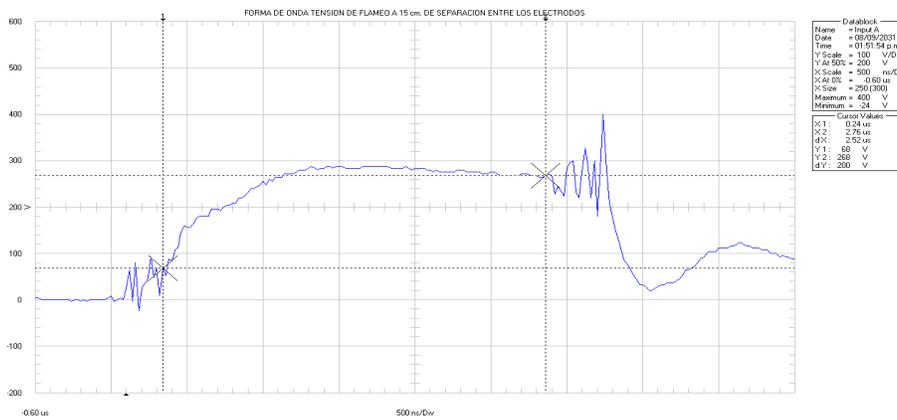


Figura H-8: Gráfica de tensión de descarga disruptiva de 120 kV y distancia de separación entre electrodos de 15 cm.

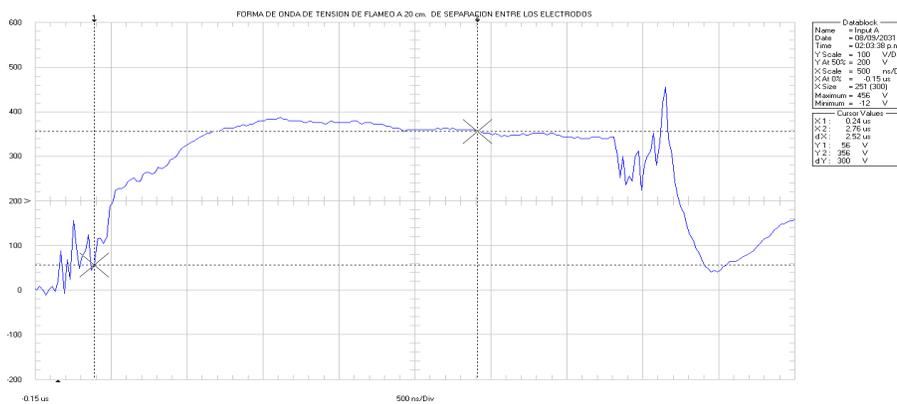


Figura H-9: Gráfica de tensión de descarga disruptiva de 147 kV y distancia de separación entre electrodos de 20 cm.

De las gráficas anteriores se puede obtener una curva característica voltaje de tensión de descarga disruptiva en el corte en función del tiempo de corte, los datos de la siguiente tabla están basados en pruebas a distintas tensiones de flameo.

VOLTAJE DE CORTE (kV)	T <sub>90</sub> (us)	T <sub>30</sub> (us)	T <sub>1</sub> (us)	O <sub>1</sub> (us)	Tc´(us)	TIEMPO DE CORTE (us)
38.36	0.9400	0.3000	1.0688	0.0900	2.1200	2.0300
53.71	0.9000	0.2800	1.0354	0.0840	2.2000	2.1160
61.58	0.9200	0.3000	1.0354	0.0900	2.4600	2.3700
71.68	0.8800	0.3000	0.9686	0.0900	2.6800	2.5900
90.86	0.9000	0.3000	1.0020	0.0900	2.7400	2.6500
135.27	0.8400	0.3000	0.9018	0.0900	2.7800	2.6900
169.09	0.7900	0.2700	0.8684	0.0810	2.9600	2.8790

Tabla H-9: Datos de tiempo de tensión de descarga disruptiva al momento del corte.

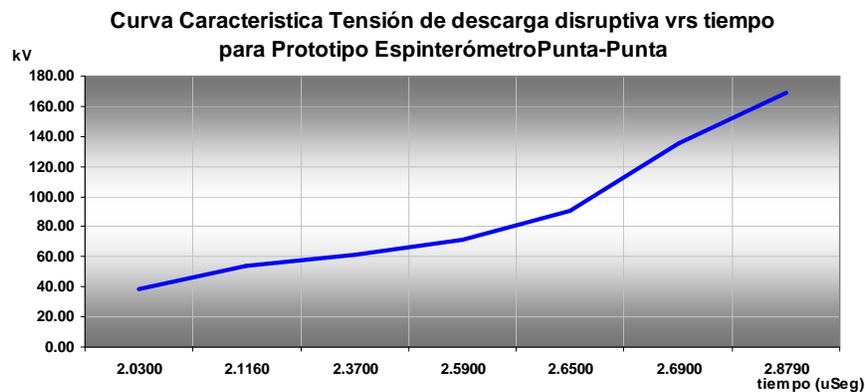


Figura H-10: Curva de tensión de descarga disruptiva vrs tiempo de corte para espinterómetro punta-punta.

Las características de la forma de onda recortada en la cola por medio del espinterómetro punta-punta se describen en la siguiente tabla.

Voltaje de Corte Vc (kV)	Vc a 70% (kV)	Vc a 10% (kV)	Intervalo de tiempo (µSeg)	Duración de caída de Tensión (µSeg)	Pendiente de Caída de tensión (kV/µSeg)
38.36	26.85	3.84	0.20	0.33	107.33
53.71	37.59	5.37	0.18	0.30	161.94
61.58	43.11	6.16	0.20	0.33	169.47
71.68	50.17	7.17	0.20	0.33	200.54
90.86	63.60	9.09	0.20	0.33	254.21
135.27	94.69	13.53	0.22	0.37	344.08
169.09	118.37	16.91	0.24	0.40	404.85

Tabla H-10: Características de la forma de onda recortada con el espinterómetro punta-punta.

### H-3. Construcción de prototipo de espinterómetro punta-plano.

Para poder realizar las pruebas de tensión de descarga disruptiva a diferentes distancias de separación de los electrodos punta-plano se construyó el prototipo que se muestra en la siguiente figura, utilizando la misma estructura del prototipo punta-punta, solamente sustituyendo el electrodo punta inferior por el electrodo plano:



Figura H-11: Prototipo de espinterómetro punta-plano.

Las características del prototipo de espinterómetro punta-plano son las siguientes:

- El Electrodo punta es una varilla de hierro de 1.27 cm. de sección cuadrada ( $\frac{1}{2}$  pulgada).
- Longitud del electrodo de alta tensión variable de 40 cm. a 85 cm. dependiendo de la distancia de separación de los electrodos.
- Longitud del electrodo plano de aterrizaje con respecto al plano de tierra de 35 cm.
- Electrodo plano construido de lámina de aluminio con sección cuadrada con longitudes de 50 cm. x 50 cm.
- Distancia máxima de separación de los electrodos de 45 cm.
- Altura del punto de entrada de alta tensión con respecto al plano de tierra igual a 1.20 m.
- Voltaje máximo de prueba de aproximadamente 250 kV, es decir pruebas a distancia entre los electrodos menores a 35 cm.

#### H-4. Pruebas de tensión de impulso tipo rayo de descarga disruptiva para prototipo de espinterómetro punta-plano.

El objetivo de estas pruebas es el determinar el factor gap para el prototipo de espinterómetro punta-plano, así como establecer una tabla de valores de tensión de descarga disruptiva a diferentes distancias de separación entre los electrodos. Para realizar lo anterior se utilizó el procedimiento arriba-abajo.

Los valores de tensión de descarga disruptiva y las distancias establecidas entre los electrodos del espinterómetro punta-plano para condiciones de atmosfera estándar se muestran en la siguiente tabla:

DISTANCIA (cm)	U <sub>0</sub> (kV)
2	45
4	60
6	75
8	90
10	105
15	142.5
20	180
25	217.5
30	255

**Tabla H-11:** Valores iniciales para las tensiones de descargas disruptivas a diferentes distancias de los electrodos punta-plano del prototipo.

Las condiciones ambientales al momento de realizar las pruebas son las siguientes:

Temperatura = 28 °C.

Presión = 946 HPa.

Humedad relativa = 62%.

Humedad absoluta = 16 gr/m<sup>3</sup>.

De los datos de las condiciones atmosféricas se obtienen los siguientes factores de corrección:

Factor de corrección de densidad  $K_d = 0.91$

Factor de corrección de humedad  $K_h = 0.96$

Factor de corrección atmosférico  $K_t = 0.95$

Los valores corregidos por las condiciones atmosféricas y los valores de desviación estándar (considerando 0.05) correspondientes para las distancias de prueba entre los electrodos punta-plano se muestran a continuación:

DISTANCIA (cm)	Uo (kV)	Uo corregidos(kV)	Desviación (kV)
2	45	42.61	2.13
4	60	56.81	2.84
6	75	71.02	3.55
8	90	85.22	4.26
10	105	99.43	4.97
15	142.5	134.94	6.75
20	180	170.44	8.52
25	217.5	205.95	10.30
30	255	241.46	12.07

**Tabla H-12:** Valores iniciales estimados para la tensión de descarga disruptiva corregidos por factor atmosférico y la desviación estándar a utilizar en método arriba-abajo.

En las tablas siguientes se muestran los resultados de la realización de las pruebas con el espinterómetro punta-plano mediante el procedimiento arriba-abajo:

Distancia (cm)	2				4				6			
Uo (kV)	45.00				60.00				75.00			
Uo corregidos (kV)	42.61				56.81				71.02			
Desviación (kV)	2.13				2.84				3.55			
Datos prueba	Uv (kV)	1/0	Uv osc (V)	Uv final (kV)	Uv (kV)	1/0	Uv osc (V)	Uv final (kV)	Uv (kV)	1/0	Uv osc (V)	Uv final (kV)
1	42.61	1	85	42.91	56.81	1	113	57.21	71.02	1	142	71.51
2	40.48	1	81	40.76	53.97	1	108	54.35	67.47	1	135	67.94
3	38.35	1	77	38.62	51.13	1	102	51.49	63.92	1	128	64.36
4	36.22	1	72	36.47	48.29	1	96	48.63	60.37	1	120	60.78
5	34.09	1	68	34.33	45.45	1	91	45.77	56.81	1	113	57.21
6	31.96	1	64	32.18	42.61	1	85	42.91	53.26	1	106	53.63
7	29.83	1	60	30.03	39.77	1	79	40.05	49.71	1	99	50.06
8	27.70	1	55	27.89	36.93	0	74	37.19	46.16	0	92	46.48
9	25.57	1	51	25.74	39.77	1	79	40.05	49.71	1	99	50.06
10	23.44	0	47	23.60	36.93	0	74	37.19	46.16	0	92	46.48
11	25.57	1	51	25.74	39.77	1	79	40.05	49.71	1	99	50.06
12	23.44	0	47	23.60	36.93	0	74	37.19	46.16	0	92	46.48
13	25.57	0	51	25.74	39.77	1	79	40.05	49.71	1	99	50.06
14	27.70	1	55	27.89	36.93	0	74	37.19	46.16	0	92	46.48
15	25.57	1	51	25.74	39.77	0	79	40.05	49.71	0	99	50.06
16	23.44	0	47	23.60	42.61	1	85	42.91	53.26	1	106	53.63
17	25.57	1	51	25.74	39.77	1	79	40.05	49.71	1	99	50.06
18	23.44	0	47	23.60	36.93	0	74	37.19	46.16	0	92	46.48
19	25.57	1	51	25.74	39.77	0	79	40.05	49.71	1	99	50.06
20	23.44	0	47	23.60	42.61	1	85	42.91	46.16	0	92	46.48

**Tabla H-13:** Resultados procedimiento arriba-abajo para distancias de separación entre electrodos de 2,4, y 6cm para espinterómetro punta-plano.

Distancia (cm)	8				10				15			
Uo (kV)	90.00				105.00				142.50			
Uo corregidos (kV)	85.22				99.43				134.94			
Desviación (kV)	4.26				4.97				6.75			
Datos prueba	Uv (kV)	1/0	Uv osc (V)	Uv final (kV)	Uv (kV)	1/0	Uv osc (V)	Uv final (kV)	Uv (kV)	1/0	Uv osc (V)	Uv final (kV)
1	85.22	1	170	85.81	99.43	1	198	100.12	134.94	1	269	135.87
2	80.96	1	162	81.52	94.45	1	188	95.11	128.19	1	256	129.08
3	76.70	1	153	77.23	89.48	1	179	90.10	121.44	1	242	122.28
4	72.44	1	145	72.94	84.51	1	169	85.10	114.70	1	229	115.49
5	68.18	1	136	68.65	79.54	1	159	80.09	107.95	1	215	108.70
6	63.92	1	128	64.36	74.57	1	149	75.09	101.20	1	202	101.90
7	59.66	0	119	60.07	69.60	1	139	70.08	94.45	1	188	95.11
8	63.92	1	128	64.36	64.63	0	129	65.08	87.71	0	175	88.32
9	59.66	0	119	60.07	69.60	1	139	70.08	94.45	1	188	95.11
10	63.92	1	128	64.36	64.63	0	129	65.08	87.71	0	175	88.32
11	59.66	1	119	60.07	69.60	1	139	70.08	94.45	1	188	95.11
12	55.39	0	111	55.78	64.63	0	129	65.08	87.71	1	175	88.32
13	59.66	1	119	60.07	69.60	0	139	70.08	80.96	0	162	81.52
14	55.39	0	111	55.78	74.57	1	149	75.09	87.71	0	175	88.32
15	59.66	0	119	60.07	69.60	1	139	70.08	94.45	1	188	95.11
16	63.92	1	128	64.36	64.63	0	129	65.08	87.71	0	175	88.32
17	59.66	0	119	60.07	69.60	1	139	70.08	94.45	1	188	95.11
18	63.92	1	128	64.36	64.63	0	129	65.08	87.71	0	175	88.32
19	59.66	0	119	60.07	69.60	1	139	70.08	94.45	0	188	95.11
20	63.92	1	128	64.36	64.63	0	129	65.08	101.20	1	202	101.90

Tabla H-14: Resultados procedimiento arriba-abajo para distancias de separación entre electrodos de 8,10, y 15cm para espinterómetro punta-plano.

Distancia (cm)	20				25				30			
Uo (kV)	180.00				217.50				255.00			
Uo corregidos (kV)	170.44				205.95				241.46			
Desviación (kV)	8.52				10.30				12.07			
Datos prueba	Uv (kV)	1/0	Uv osc (V)	Uv final (kV)	Uv (kV)	1/0	Uv osc (V)	Uv final (kV)	Uv (kV)	1/0	Uv osc (V)	Uv final (kV)
1	170.44	1	340	171.63	205.95	1	411	207.38	241.46	1	482	243.14
2	161.92	1	323	163.05	195.66	1	390	197.01	229.39	1	458	230.98
3	153.40	1	306	154.47	185.36	1	370	186.65	217.32	1	434	218.83
4	144.88	1	289	145.88	175.06	1	349	176.28	205.24	1	409	206.67
5	136.36	1	272	137.30	164.76	1	329	165.91	193.17	1	385	194.51
6	127.83	1	255	128.72	154.47	1	308	155.54	181.10	1	361	182.35
7	119.31	0	238	120.14	144.17	0	288	145.17	169.02	1	337	170.20
8	127.83	1	255	128.72	154.47	1	308	155.54	156.95	0	313	158.04
9	119.31	0	238	120.14	144.17	0	288	145.17	169.02	1	337	170.20
10	127.83	1	255	128.72	154.47	1	308	155.54	156.95	0	313	158.04
11	119.31	0	238	120.14	144.17	0	288	145.17	169.02	1	337	170.20
12	127.83	0	255	128.72	154.47	1	308	155.54	156.95	0	313	158.04
13	136.36	1	272	137.30	144.17	0	288	145.17	169.02	1	337	170.20
14	127.83	0	255	128.72	154.47	1	308	155.54	156.95	0	313	158.04
15	136.36	1	272	137.30	144.17	0	288	145.17	169.02	0	337	170.20
16	127.83	1	255	128.72	154.47	0	308	155.54	181.10	1	361	182.35
17	119.31	0	238	120.14	164.76	1	329	165.91	169.02	1	337	170.20
18	127.83	1	255	128.72	154.47	1	308	155.54	156.95	0	313	158.04
19	119.31	0	238	120.14	144.17	0	288	145.17	169.02	1	337	170.20
20	127.83	1	255	128.72	154.47	1	308	155.54	156.95	0	313	158.04

Tabla H-15: Resultados procedimiento arriba-abajo para distancias de separación entre electrodos de 20, 25, y 30 cm para espinterómetro punta-plano.

Donde en las tablas anteriores:

$U_v$  = Valor del nivel de tensión.

1/0 = 1 si hay flameo, 0 si no hay flameo.

$U_{v,osc}$  = valor máximo medido en el osciloscopio.

$U_v$  final = Valor de nivel de tensión a partir de medición en el osciloscopio, ya normalizado sin atenuación y considerando factor de escala del osciloscopio para corregir los valores medidos.

Los valores correspondientes a  $U_v$  final, serán los que se utilizarán en el cálculo de la tensión de descarga disruptiva  $U_{50}$ .

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los valores obtenidos para el cálculo de  $U_{50}$  para cada una de las distancias de separación del espinterómetro punta-plano especificadas.

2 cm.		4 cm.		6 cm.		8 cm.		10 cm.		15 cm.		20 cm.		25 cm.		30 cm.	
$U_v$ final (kV)	Nv																
23.60	5	37.19	5	46.48	6	55.78	2	65.08	6	81.52	1	120.14	5	145.17	6	158.04	6
25.74	6	40.05	7	50.06	7	60.07	7	70.08	7	88.32	6	128.72	8	155.54	8	170.20	7
27.89	2	42.91	3	53.63	2	64.36	6	75.09	2	95.11	6	137.30	3	165.91	2	182.35	2
30.03	1	45.77	1	57.21	1	68.65	1	80.09	1	101.90	2	145.88	1	176.28	1	194.51	1
32.18	1	48.63	1	60.78	1	72.94	1	85.10	1	108.70	1	154.47	1	186.65	1	206.67	1
34.33	1	51.49	1	64.36	1	77.23	1	90.10	1	115.49	1	163.05	1	197.01	1	218.83	1
36.47	1	54.35	1	67.94	1	81.52	1	95.11	1	122.28	1	171.63	1	207.38	1	230.98	1
38.62	1	57.21	1	71.51	1	85.81	1	100.12	1	129.08	1					243.14	1
40.76	1									135.87	1						
42.91	1																

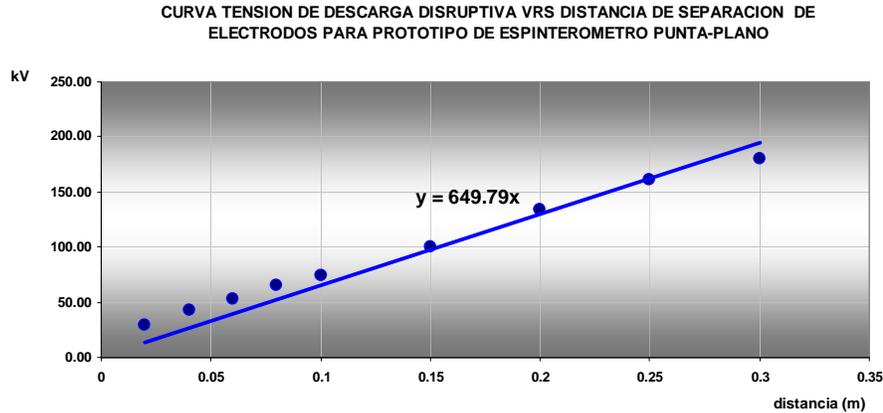
**Tabla H-16:** Valores obtenidos para procedimiento arriba-abajo con el espinterómetro punta-plano.

De los datos de la tabla anterior y utilizando la fórmula se obtienen los siguientes valores para  $U_{50}$  a la distintas distancias de separación de los electrodos del espinterómetro punta-plano.

DISTANCIA (cm.)	$U_{50}$ (Kv)
2	29.18
4	42.62
6	52.92
8	65.22
10	74.09
15	99.87
20	133.87
25	160.72
30	179.92

**Tabla H-17:** Valores de tensión de descarga disruptiva para diferentes distancias de separación de los electrodos punta-plano.

De la tabla anterior se obtiene la siguiente gráfica característica, para la tensión de descarga disruptiva  $U_{50}$  con respecto a la distancia de separación de los electrodos del espinterómetro punta-plano:

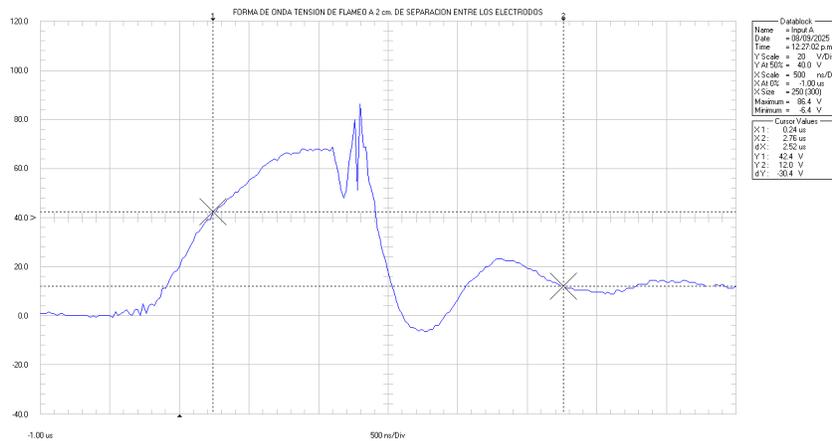


**Figura H-12:** Curva de tensión de descarga disruptiva vrs tiempo de corte para espinterómetro punta-plano.

De la gráfica anterior se puede observar que la pendiente de la gráfica de tendencia es igual a 649.79 kV/m, que equivale al factor gap del prototipo de espinterómetro punta-plano a las condiciones atmosféricas antes indicadas. Al convertir el factor gap a las condiciones atmosféricas estándar utilizando el factor de corrección atmosférico este es igual a 686.26 kV/m.

Al comparar el resultado del factor gap obtenido de las pruebas del espinterómetro punta-punta con el resultado del espinterómetro punta-plano, se puede observar que los resultados del punta-plano son los que se aproximan a los valores esperados.

Las gráficas obtenidas durante los ensayos de la tensión de descarga disruptiva para el espinterómetro punta-plano se muestran a continuación:



**Figura H-13:** Gráfica de tensión de descarga disruptiva de 29.18 kV y distancia de separación entre electrodos de 2 cm.

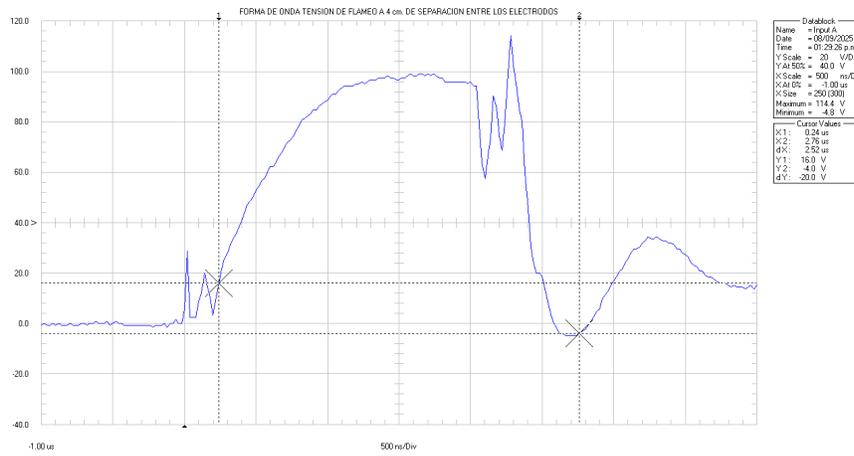


Figura H-14: Gráfica de tensión de descarga disruptiva de 42.62 kV y distancia de separación entre electrodos de 4 cm.

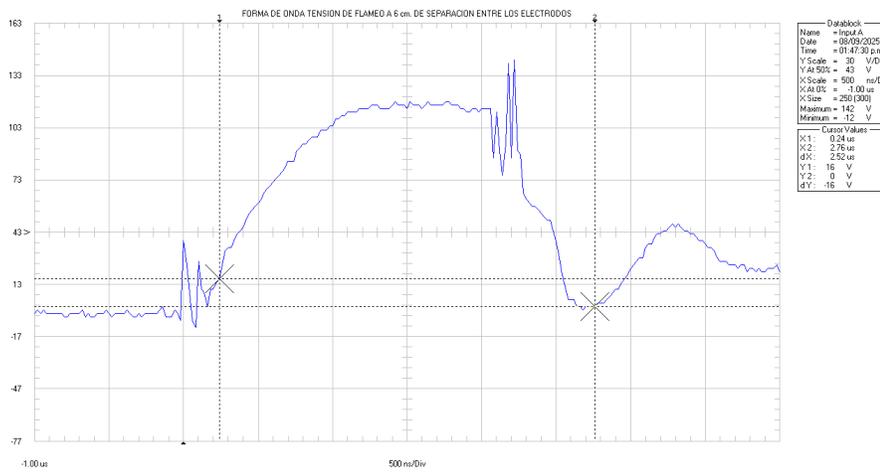


Figura H-15: Gráfica de tensión de descarga disruptiva de 52.92 kV y distancia de separación entre electrodos de 6 cm.

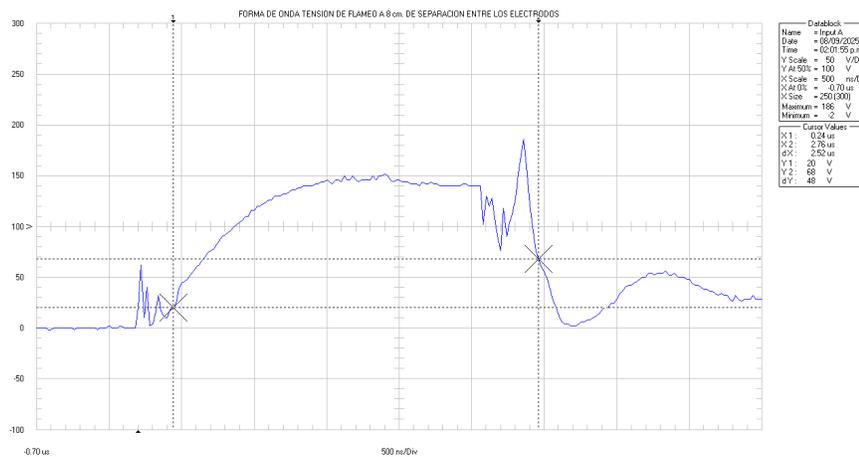


Figura H-16: Gráfica de tensión de descarga disruptiva de 65.22 kV y distancia de separación entre electrodos de 8 cm.

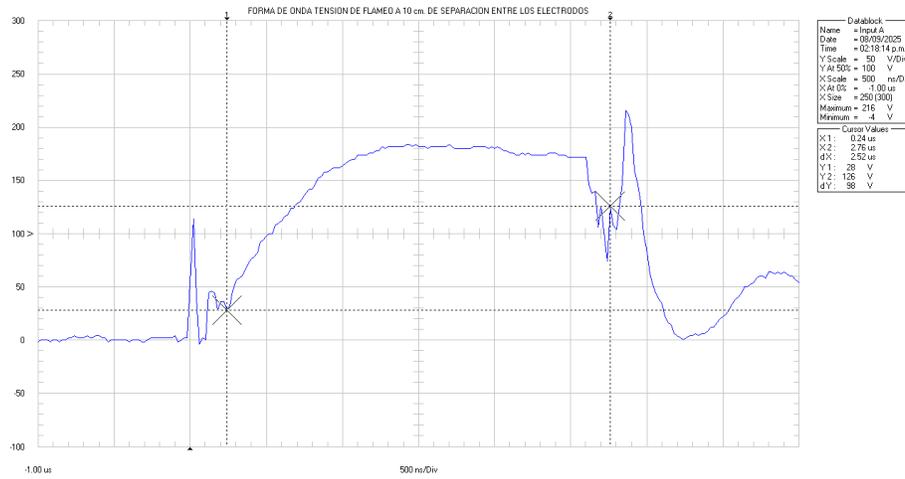


Figura H-17: Gráfica de tensión de descarga disruptiva de 74.09 kV y distancia de separación entre electrodos de 10 cm.

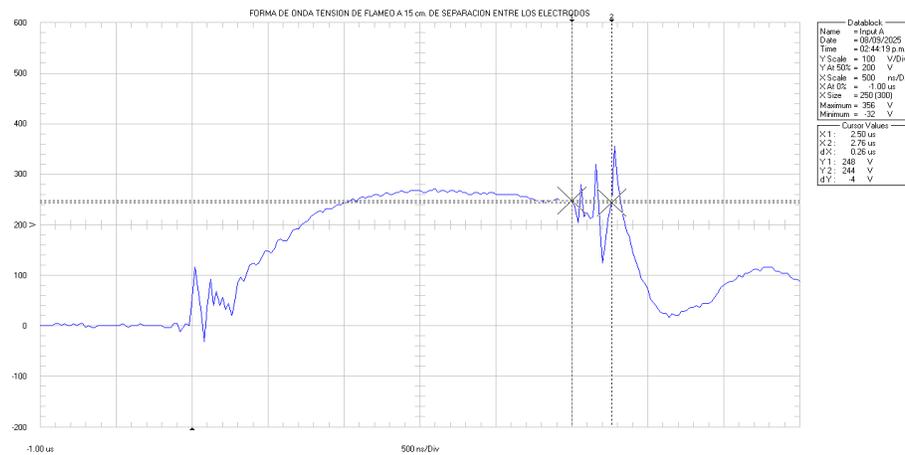


Figura H-18: Gráfica de tensión de descarga disruptiva de 99.87 kV y distancia de separación entre electrodos de 15 cm.

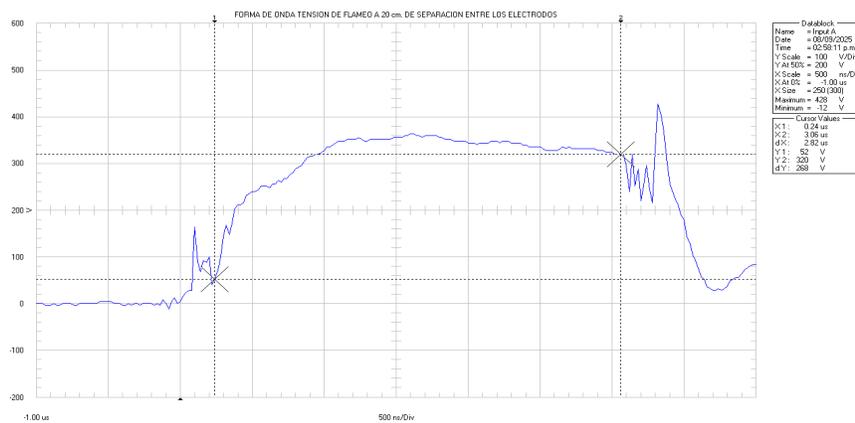


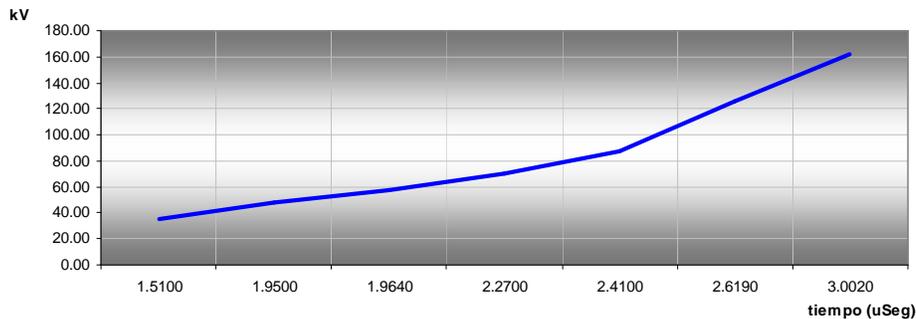
Figura H-19: Gráfica de tensión de descarga disruptiva de 133.87 kV y distancia de separación entre electrodos de 20 cm.

De las gráficas anteriores se puede obtener una curva característica voltaje de tensión de descarga disruptiva en el corte en función del tiempo de corte, la cual está basada en los datos de la que se muestra a continuación obtenidos de pruebas a distintos valores de tensión disruptiva o de flameo:

VOLTAJE DE CORTE (kV)	T <sub>90</sub> (us)	T <sub>30</sub> (us)	T <sub>1</sub> (us)	O <sub>1</sub> (us)	Tc'(us)	TIEMPO DE CORTE (us)
34.73	0.9200	0.3000	1.0354	0.0900	1.6000	1.5100
47.65	0.9000	0.3000	1.0020	0.0900	2.0400	1.9500
57.54	0.9200	0.3200	1.0020	0.0960	2.0600	1.9640
70.67	0.9200	0.3000	1.0354	0.0900	2.3600	2.2700
86.82	0.8600	0.3000	0.9352	0.0900	2.5000	2.4100
125.18	0.8600	0.2700	0.9853	0.0810	2.7000	2.6190
161.52	1.0000	0.2600	1.2358	0.0780	3.0800	3.0020

**Tabla H-18:** Datos de tiempo de tensión de descarga disruptiva al momento del corte.

**Curva Característica Tensión de descarga disruptiva vrs tiempo para Prototipo Espinterómetro Punta-Plano**



**Figura H-20:** Curva de tensión de descarga disruptiva vrs tiempo de corte para espinterómetro punta-plano.

Las características de la forma de onda recortada en la cola por medio del espinterómetro punta-plano se describen en la siguiente tabla:

Voltaje de Corte Vc (kV)	Vc a 70% (kV)	Vc a 10% (kV)	Intervalo de tiempo (μSeg)	Duración de caída de Tensión (μSeg)	Pendiente de Caída de tensión (kV/μSeg)
34.73	24.31	3.47	0.18	0.30	107.96
47.65	33.35	4.76	0.16	0.27	166.65
57.54	40.28	5.75	0.28	0.47	115.00
70.67	49.47	7.07	0.18	0.30	219.69
86.82	60.77	8.68	0.18	0.30	269.90
125.18	87.63	12.52	0.22	0.37	318.40
161.52	113.07	16.15	0.24	0.40	376.61

**Tabla H-19:** Características de la forma de onda recortada con el espinterómetro punta-plano.

## ANEXO I. PRUEBAS DIELECTRICAS DE IMPULSO TIPO RAYO EN AISLADORES.

Los aisladores cumplen la función de sujetar mecánicamente el conductor manteniéndolo aislado de tierra y de otros conductores. Deben soportar la carga mecánica que el conductor transmite a la torre o poste a través de ellos. Los aisladores se fabrican normalmente en porcelana y eventualmente en vidrio. Deben aislar eléctricamente el conductor de la torre o poste, soportando la tensión en condiciones normales y anormales, y sobretensiones hasta las máximas previstas. Los aisladores deben soportar tensión de frecuencia industrial e impulso (de maniobra y/o atmosféricos), tanto en seco como bajo lluvia.

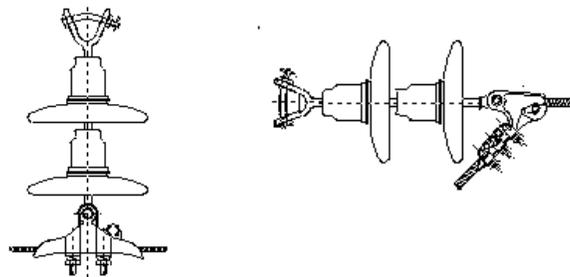
La tensión debe ser soportada tanto por el material aislante propiamente dicho, como por su superficie y el aire que rodea al aislador.

La falla eléctrica del aire se llama contorneo, y el aislador se proyecta para que esta falla sea mucho más probable que la perforación del aislante sólido.

Los aisladores están disponibles con niveles básicos de aislamiento al impulso (tensión de aguante), llamado por sus siglas en inglés BIL ó NBI por sus siglas en español.

### **I-1. Aisladores de Suspensión.**

Los aisladores de suspensión se usan como aislamiento y soporte para los buses o conductores flexibles. Son llamados también aisladores de campana o de disco. Los aisladores de suspensión se encuentran disponibles en varias formas para satisfacer los requerimientos individuales. Los aisladores de remate tipo distribución se pueden usar en los voltajes de distribución para los buses o conductores flexibles, los aisladores de suspensión tipo convencional, se usan normalmente para los buses tipo flexibles y se pueden suministrar para su fijación mecánica con un perno metálico o bola, los más comunes son los denominados tipo estándar de 25.4 cm (10 pulgadas) de diámetro por 14.6 cm. (5 ¾ pulgadas) de altura. Se fabrican de vidrio o porcelana con insertos metálicos que los articulan con un grado de libertad. Su forma se puede observar en la siguiente figura:



**Figura I-1:** Forma de los aisladores de suspensión.

En un aislador de suspensión típico se distinguen los siguientes elementos, los cuales se identifican en la figura:

1. Esmalte.
2. Arena cerámica.
3. Cemento.
4. Ojal o cuenca.
5. Pintura bituminosa.
6. Campana metálica.
7. Cuerpo cerámico.
8. Perno metálico (pasador o bola).

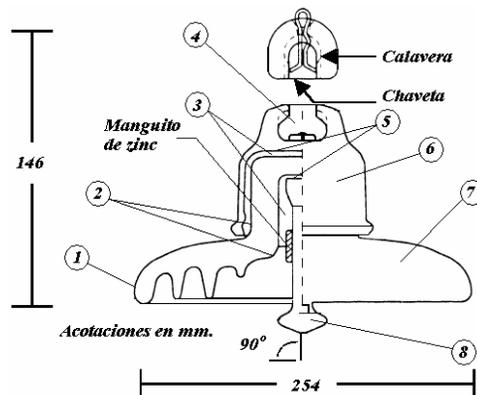


Figura I-2: Elementos de un aislador de suspensión.

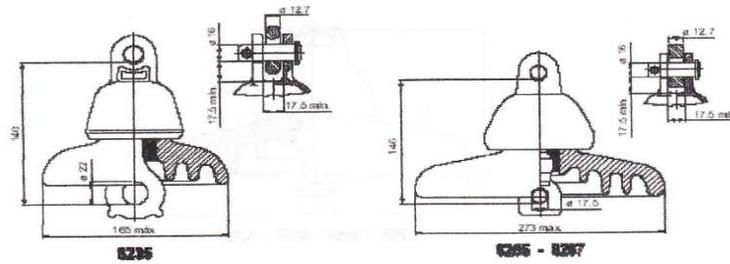
Para satisfacer las características eléctricas necesarias en cada aplicación, los aisladores tipo suspensión se conectan en serie, formando cadenas de aisladores. Es importante coordinar las características de las cadenas de aisladores tipo suspensión con el aislamiento del sistema y las características de los dispositivos de protección (apartarrayos). La cantidad de aisladores tipo suspensión seleccionados para una aplicación en particular, debe ser suficientemente grande como para prevenir flameos innecesarios. Sin embargo, el sobre aislamiento puede conducir a que los flameos ocurran de fase a fase, en lugar de que se presenten de fase a tierra, en consecuencia, la cantidad de aisladores debe ser suficientemente pequeña como para que los flameos ocurran a tierra.

En la siguiente tabla se muestran los niveles básicos de aislamiento al impulso mínimos (tensión de aguante) para distintos voltajes nominales del sistema a condiciones de atmosfera estándar y el número mínimo de aisladores tipo suspensión formando cadenas.

Voltaje Nominal del Sistema de fase a fase	NBI (kV)	Cantidad Mínima de Aisladores Tipo Suspensión
14.4	110	2
23	150	2
34.5	200	3
46	250	4
69	350	5
115	550	8
138	650	9
161	750	10
230	900	12
230	1050	14

Tabla I-1: Nivel básico de aislamiento para diferentes voltajes de sistema y cantidad de aisladores de suspensión formando cadenas

En las siguientes figuras observamos las características de los aisladores de suspensión tipo clevis y tipo cuenca ó estándar:



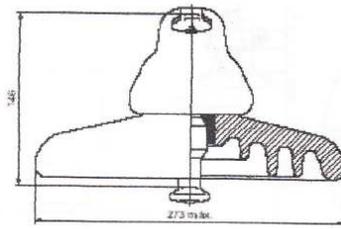
NÚMERO DE CATÁLOGO	8235	8265	8267
CLASE ANSI (C29.2 - 1992)	52 - 1	52 - 4	52 - 4
<b>DISTANCIAS CRÍTICAS, mm</b>			
Distancia de arco	114	197	197
Distancia de fuga	178	292	292
<b>VALORES MECÁNICOS</b>			
Resistencia electromecánica, kN	44	67	89
Resistencia al impacto, Nm	5	6	10
Prueba de carga de rutina, kN	2.2	33.5	44.5
Prueba de carga sostenida, kN	2.7	44	60
<b>VALORES ELÉCTRICOS, kV</b>			
Flameo de baja frecuencia en seco	60	80	80
Flameo de baja frecuencia en húmedo	30	50	50
Flameo crítico al impulso positivo	100	125	125
Flameo crítico al impulso negativo	100	130	130
Voltaje de perforación a baja frecuencia	80	110	110
<b>RADIO INFLUENCIA</b>			
Voltaje de prueba RMS a tierra, kV	7.5	10	10
RIV máximo a 1000 kHz, $\mu$ V	50	50	50
<b>DATOS DE EMPAQUE</b>			
Peso neto por unidad, kg	2.3	5.2	5.4
Peso bruto por caja, kg	2.5	38.2	40
Número de piezas por caja	8	6	6

Nota 1. Esmalte café o esmalte gris ANSI 70

Nota 2. Los aisladores pueden solicitarse con doble capa de galvanizado en campana y perno para zonas contaminadas.

Nota 3. Para las referencias 8265 y 8267, los aisladores pueden solicitarse con manguito de zinc en el perno para zonas contaminadas.

Figura I-3: Características de aisladores de suspensión tipo clevis [7].



8255 - 8256 - 8257 - 8258

NÚMERO DE CATÁLOGO	8255	8256	8257	8258
<b>CLASE ANSI (C29.2 - 1992)</b>	52 - 3	52 - 3	52 - 3	52 - 5
<b>DISTANCIAS CRÍTICAS, mm</b>				
Distancia de arco	197	197	197	197
Distancia de fuga	292	292	292	292
<b>VALORES MECÁNICOS</b>				
Resistencia electromecánica, kN	67	80	89	111
Resistencia al impacto, Nm	6	6	10	10
Prueba de carga de rutina, kN	33.5	40	44.5	55.5
Prueba de carga sostenida, kN	44	53.5	60	67
<b>VALORES ELÉCTRICOS, kV</b>				
Flameo de baja frecuencia en seco	80	80	80	80
Flameo de baja frecuencia en húmedo	50	50	50	50
Flameo crítico al impulso positivo	125	125	125	125
Flameo crítico al impulso negativo	130	130	130	130
Voltaje de perforación a baja frecuencia	110	110	110	110
<b>RADIO INFLUENCIA</b>				
Voltaje de prueba RMS a tierra, kV	10	10	10	10
RIV máximo a 1000 kHz, $\mu$ V	50	50	50	50
<b>DATOS DE EMPAQUE</b>				
Peso neto por unidad, kg	5.3	5.3	5.4	5.4
Peso bruto por caja, kg	38	38	40	40
Número de piezas por caja	6	6	6	6

Nota 1. Esmalte café o esmalte gris ANSI 70

Nota 2. Los aisladores pueden solicitarse con doble capa de galvanizado en campana y perno para zonas contaminadas.

Nota 3. Los aisladores pueden solicitarse con manguto de zinc en el perno para zonas contaminadas.

Figura I-4: Características de aisladores de suspensión tipo estándar [7].

## I-2. Pruebas de impulso tipo rayo en aisladores de suspensión.

Para someter los aisladores de suspensión a ensayos de impulso tipo rayo utilizando el generador de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, se realizó la siguiente conexión:



**Figura I-5:** Conexión de aislador de suspensión para pruebas de impulso tipo rayo en el generador de la EIE-UES.

### I-2.1. Ensayo para NBI de aisladores de suspensión a voltaje nominal de 13.2 kV.

Las condiciones ambientales al momento de la prueba son las siguientes:

Temperatura = 28 °C.

Presión = 946 HPa.

Humedad relativa = 72%.

Humedad absoluta = 19 gr/m<sup>3</sup>.

De los datos de las condiciones atmosféricas se obtienen los siguientes factores de corrección:

Factor de corrección de densidad  $K_d = 0.91$

Factor de corrección de humedad  $K_h = 0.94$

Factor de corrección atmosférico  $K_t = 0.97$

Utilizando la expresión siguiente y sustituyendo los valores de NBI a 13.2 kV igual a 125 kV según figura I-4 y  $K_t = 0.97$  obtenemos el valor de la tensión de descarga disruptiva de forma teórica:

$$U_{50} = \frac{NBI \cdot K_t}{0.961}$$

$$U_{50} = 126.17 \text{ kV.}$$

Utilizando dicho resultado para  $U_{50}$  y el factor gap experimental del espinterómetro punta-plano para condiciones estándar de 686.26 kV/m y corregirlo a las condiciones atmosféricas al momento del ensayo resultando 665.67 kV/m.

$$U_{50} = K_3 \cdot d$$

$$d = 0.1895 \text{ m.}$$

La cantidad de aisladores a utilizar teóricamente, los obtenemos, utilizando la longitud del aislador de suspensión que es igual a 0.146 m, dando como resultado:

$$\text{No de aisladores} = \frac{d}{l}$$

$$\text{No de aisladores} = 1.3 \text{ aisladores.}$$

Del resultado anterior se puede concluir teóricamente que para un nivel de voltaje de 13.2 kV se debe utilizar 1 aislador de suspensión del tipo estándar.

Dichos resultados teóricos se compararan con los resultados obtenidos experimentalmente por medio del procedimiento Arriba-Abajo. Los ensayos de tensión disruptiva al impulso tipo rayo se realizaron a un aislador del tipo estándar, para lo cual se ha utilizado como valor inicial para la tensión crítica de flameo o de descarga disruptiva, el valor que indica la figura J-4, para aisladores tipo estándar igual a 125 kV que al corregirlos por el factor atmosférico es igual a 121.14 kV, considerando una desviación estándar del 3%. Los resultados de las pruebas utilizando el procedimiento UP & DOWN se muestran en la siguiente tabla:

<b>Uo (kV)</b>	<b>125.00</b>			
<b>Uo corregidos (kV)</b>	<b>121.14</b>			
<b>Desviación (kV)</b>	<b>3.63</b>			
<b>Datos prueba</b>	<b>Uv (kV)</b>	<b>1/0</b>	<b>Uv osc (V)</b>	<b>Uv final (kV)</b>
1	121.14	0	241.66	121.98
2	124.77	0	248.91	125.64
3	128.41	0	256.16	129.30
4	132.04	1	263.41	132.96
5	128.41	0	256.16	129.30
6	132.04	0	263.41	132.96
7	135.68	1	270.67	136.62
8	132.04	1	263.41	132.96
9	128.41	0	256.16	129.30
10	132.04	1	263.41	132.96
11	128.41	0	256.16	129.30
12	132.04	1	263.41	132.96
13	128.41	0	256.16	129.30
14	132.04	1	263.41	132.96
15	128.41	0	256.16	129.30
16	132.04	1	263.41	132.96
17	128.41	0	256.16	129.30
18	132.04	0	263.41	132.96
19	135.68	1	270.67	136.62
20	132.04	1	263.41	132.96

**Tabla I-2:** Datos obtenidos en el procedimiento arriba-abajo para las pruebas de impulso tipo rayo en aislador de suspensión.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los valores obtenidos para el cálculo de  $U_{50}$ , para ellos se utilizaran los resultados de  $U_v$  final.

<b><math>U_v</math> final (kV)</b>	<b><math>N_v</math></b>
121.98	1
125.64	1
129.30	7
132.96	9
136.62	2

**Tabla I-3:** Resultados obtenidos en el procedimiento arriba-abajo para las pruebas de impulso tipo rayo en aislador de suspensión.

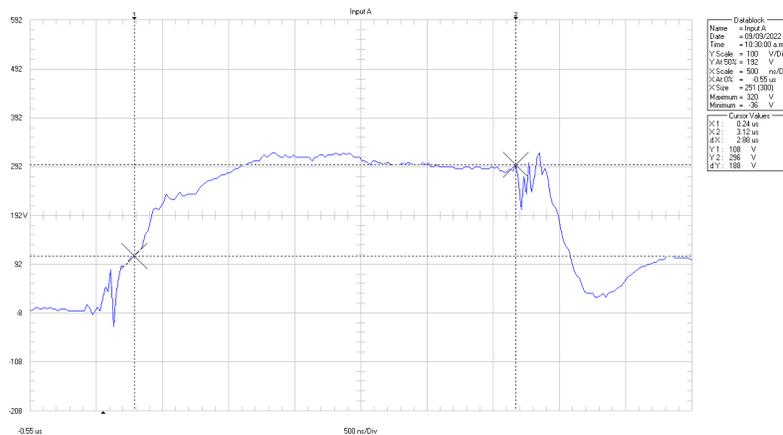
De los datos de la tabla anterior y utilizando la ecuación, se obtiene el valor para la tensión de descarga disruptiva durante el ensayo:

$$U_{50} = 131.13 \text{ kV.}$$

Del valor de  $U_{50}$ , se obtiene el valor experimental para NBI, aplicando el factor de corrección atmosférica se puede tener el valor para atmosfera estándar:

$$\text{NBI} = 129.91 \text{ kV}$$

La prueba del objeto es satisfactoria si el valor de la tensión para NBI es mayor o igual que el valor calculado teóricamente o especificado por el fabricante. En este caso el elemento es aceptado ya que el valor experimental de la tensión de NBI es mayor que los valores especificados por el fabricante. En la siguiente figura se muestra la forma de onda del impulso aplicado al aislador de suspensión:



**Figura I-6:** Forma de onda de tensión de descarga disruptiva a 131 kV, aplicada a aislador de suspensión.

## I-2.2. Ensayo para NBI de aisladores de suspensión a voltaje nominal de 23 kV.

Las condiciones ambientales al momento de la prueba son las siguientes:

Temperatura = 28 °C.

Presión = 946 HPa.

Humedad relativa = 72%.

Humedad absoluta = 19 gr/m<sup>3</sup>.

De los datos de las condiciones atmosféricas se obtienen los siguientes factores de corrección:

Factor de corrección de densidad  $K_d = 0.91$

Factor de corrección de humedad  $K_h = 0.94$

Factor de corrección atmosférico  $K_t = 0.97$

Para realizar el ensayo de tensión de descarga disruptiva al impulso tipo rayo a una cadena de aisladores de suspensión tipo estándar, se determinó el valor de NBI para una cadena de 2 aisladores con la formula siguiente [8]:

$$NBI = 530 * S * (0.74 + 0.26 * K_g)$$

Donde:

S: es la distancia entre el electrodo de alto voltaje y la parte baja del aislador en milímetros, más la distancia que hay entre la parte baja del aislador a su extremo superior.

$K_g$ : factor de separación (conductor-crucero).

Para esta cadena de aisladores los datos anteriores son:  $S = (127 \text{ mm.} + 292 \text{ mm.}) = 419 \text{ mm}$  y  $K_g = 1.35$ , por lo que el valor inicial de NBI es igual a 242.28 kV. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Utilizando sustituyendo los valores de NBI a 23 kV encontrado de 242.28 kV y  $K_t = 0.97$ , obtenemos el valor de la tensión de descarga disruptiva de forma teórica:

$$U_{50} = \frac{NBI \cdot K_t}{0.961}$$

$$U_{50} = 244.55 \text{ kV.}$$

Utilizando dicho resultado para  $U_{50}$  y el factor gap experimental del espinterómetro punta-plano para condiciones estándar de 686.26 kV/m y corregirlo a las condiciones atmosféricas al momento del ensayo resultando 665.67 kV/m.

$$U_{50} = K_3 \cdot d$$

$$d = 0.3674 \text{ m.}$$

La cantidad de aisladores a utilizar teóricamente, los obtenemos, utilizando la longitud del aislador de suspensión estándar que es igual a 0.146 m, dando como resultado:

$$\text{No de aisladores} = \frac{d}{l}$$

$$\text{No de aisladores} = 2.5 \text{ aisladores.}$$

Del resultado anterior se puede concluir teóricamente que para un nivel de voltaje de 23 kV se deben utilizar 2 o 3 aisladores de suspensión del tipo estándar.

Con el número de aisladores definidos, y utilizando uno valor de  $U_{50}$  inicial de 242.28 kV a condiciones atmosféricas estándar y una desviación estándar de 3%, se realizó mediante el procedimiento Arriba-Abajo, el cálculo experimental de la tensión crítica de flameo  $U_{50}$ , para una cadena de dos aisladores de suspensión del tipo estándar.

Uo (kV)	242.28			
Uo corregidos (kV)	234.80			
Desviación (kV)	7.04			
Datos prueba	Uv (kV)	1/0	Uv osc (V)	Uv final (kV)
1	234.80	0	468.40	236.43
2	241.84	1	482.45	243.52
3	234.80	0	468.40	236.43
4	241.84	1	482.45	243.52
5	234.80	1	468.40	236.43
6	227.76	0	454.36	229.34
7	234.80	0	468.40	236.43
8	241.84	1	482.45	243.52
9	234.80	0	468.40	236.43
10	241.84	1	482.45	243.52
11	234.80	1	468.40	236.43
12	227.76	0	454.36	229.34
13	234.80	1	468.40	236.43
14	227.76	0	454.36	229.34
15	234.80	0	468.40	236.43
16	241.84	1	482.45	243.52
17	234.80	0	468.40	236.43
18	241.84	1	482.45	243.52
19	234.80	1	468.40	236.43
20	227.76	0	454.36	229.34

**Tabla I-4:** Datos obtenidos en el procedimiento arriba-abajo para las pruebas de impulso tipo rayo en cadena de 2 aisladores de suspensión.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los valores obtenidos para el cálculo de  $U_{50}$ , para ellos se utilizaran los resultados de  $U_v$  final.

<b>Uv final (kV)</b>	<b>Nv</b>
229.34	4
236.43	10
243.52	6

**Tabla I-5:** Resultados obtenidos en el procedimiento arriba-abajo para las pruebas de impulso tipo rayo en cadena de 2 aisladores de suspensión.

De los datos de la tabla anterior y utilizando la ecuación, se obtiene el valor para la tensión de descarga disruptiva durante el ensayo:

$$U_{50} = 237.14 \text{ kV.}$$

Del valor de  $U_{50}$ , se obtiene el valor experimental para NBI, aplicando el factor de corrección atmosférica se puede tener el valor para atmosfera estándar:

$$\text{NBI} = 234.94 \text{ kV}$$

La prueba de la cadena de aisladores es desfavorable ya que el valor experimental de la tensión de NBI es menor que el valor teórico esperado de 242.28 kV.

**ANEXO J.**  
**FORMATO DE HOJA DE ENSAYOS DE NBI.**

		<b>UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR</b> <b>ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA</b> <b>LABORATORIO DE ALTA TENSION</b> <b>HOJA DE DATOS DE PRUEBA DE NBI CON GENERADOR DE IMPULSO TIPO RAYO</b>					
<b>DATOS GENERALES:</b>							
EXPEDIENTE: _____				FECHA: _____			
EQUIPO: _____				MARCA: _____			
PROPIETARIO: _____				NBI FABRICANTE: _____			
VOLTAJE DE OPERACION: _____				NBI FABRICANTE: _____			
<b>DATOS GENERALES SOBRE LOS ENSAYOS:</b>							
No DE ENSAYOS A REALIZAR: _____				V <sub>50</sub> INICIAL (kV): _____			
DESVIACIÓN ESTANDAR (%): _____				DESVIACION ESTANDAR (kV): _____			
TEMPERATURA (°C): _____				FACTOR DE CORRECCION DENSIDAD (K <sub>d</sub> ): _____			
PRESION (Hpa): _____				FACTOR DE CORRECCION HUMEDAD (K <sub>h</sub> ): _____			
HUMEDAD (gr/m <sup>3</sup> ): _____				FACTOR DE CORRECCION ATMOSFERICO (K <sub>f</sub> ): _____			
V <sub>50</sub> INICIAL CORREGIDO (kV): _____				DESVIACION ESTANDAR CORREGIDO(kV): _____			
<b>DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS:</b>							
No	VOLTAJE PRUEBA (kV)	VOLTAJE MEDIDO V <sub>v</sub> (kV)	FLAMEO/NO FLAMEO (1/0)	No	VOLTAJE PRUEBA (kV)	VOLTAJE MEDIDO V <sub>v</sub> (kV)	FLAMEO/NO FLAMEO (1/0)
1	_____	_____	_____	16	_____	_____	_____
2	_____	_____	_____	17	_____	_____	_____
3	_____	_____	_____	18	_____	_____	_____
4	_____	_____	_____	19	_____	_____	_____
5	_____	_____	_____	20	_____	_____	_____
6	_____	_____	_____	21	_____	_____	_____
7	_____	_____	_____	22	_____	_____	_____
8	_____	_____	_____	23	_____	_____	_____
9	_____	_____	_____	24	_____	_____	_____
10	_____	_____	_____	25	_____	_____	_____
11	_____	_____	_____	26	_____	_____	_____
12	_____	_____	_____	27	_____	_____	_____
13	_____	_____	_____	28	_____	_____	_____
14	_____	_____	_____	29	_____	_____	_____
15	_____	_____	_____	30	_____	_____	_____
<b>TABULACION DE DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS:</b>							
No	NIVEL DE TENSION V <sub>v</sub> (kV)	NUMERO DE ENSAYOS N <sub>v</sub>	V <sub>v</sub> .N <sub>v</sub>	No	NIVEL DE TENSION V <sub>v</sub> (kV)	NUMERO DE ENSAYOS N <sub>v</sub>	V <sub>v</sub> .N <sub>v</sub>
1	_____	_____	_____	6	_____	_____	_____
2	_____	_____	_____	7	_____	_____	_____
3	_____	_____	_____	8	_____	_____	_____
4	_____	_____	_____	9	_____	_____	_____
5	_____	_____	_____	10	_____	_____	_____
<b>RESULTADOS OBTENIDOS:</b>							
V <sub>50</sub> OBTENIDO (kV): _____				V <sub>50</sub> ATMOSFERA ESTANDAR (kV): _____			
NBI OBTENIDO (kV): _____				NBI ATMOSFERA ESTANDAR (kV): _____			
_____ APROBADO / NO APROBADO				_____ FIRMA / SELLO			