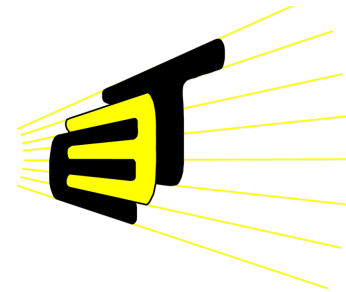


*ANÁLISIS DE PRUEBAS EN AISLADORES TIPO PIN DE  
13,2 kV MEDIANTE ONDA 1,2/50 COMPLETA*

JORGE ENRIQUE OSORIO VARGAS  
JOSÉ FERNANDO CASTAÑO GONZÁLEZ



ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

BUCARAMANGA

2015

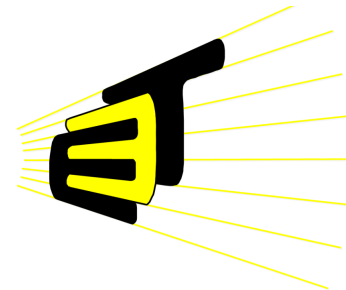
***ANÁLISIS DE PRUEBAS EN AISLADORES TIPO PIN DE  
13,2 kV MEDIANTE ONDA 1,2/50 COMPLETA***

JORGE ENRIQUE OSORIO VARGAS  
JOSÉ FERNANDO CASTAÑO GONZÁLEZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director:  
JULIO CÉSAR CHACÓN VELASCO  
M. Sc. en Ingeniería Eléctrica

Codirector:  
HERMANN RAÚL VARGAS TORRES  
Doctor en Ingeniería Eléctrica



ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
BUCARAMANGA

2015

*A mis padres y a mi hermano.*

***Jorge***

*A mi madre, padre, familia y a Dako.*

***Fernando***

# AGRADECIMIENTOS

---

A Julio César Chacón Velasco, por el excelente acompañamiento durante los ensayos de laboratorio y el desarrollo general del estudio.

A César Antonio Duarte Gualdrón, por el tiempo, orientación y entusiasmo prestados desinteresadamente.

A los profesores de la Universidad Industrial de Santander, que de una u otra forma contribuyeron con nuestra formación personal e intelectual.

A nuestros amigos.

*Los autores*

# Índice general

INTRODUCCIÓN	23
<b>1 GENERALIDADES</b>	<b>24</b>
1.1 EL FENÓMENO DE LA DESCARGA . . . . .	24
1.1.1 Formación de carga en las nubes . . . . .	24
1.1.2 Evolución de la descarga . . . . .	26
1.2 DESCARGA DISRUPTIVA . . . . .	26
1.3 DESCARGAS POR IMPULSOS . . . . .	27
1.3.1 El mecanismo de descarga Townsend . . . . .	27
1.3.2 El mecanismo de descarga por formación de canales . . . . .	29
1.3.3 Ley de Paschen - tensión de chispa . . . . .	31
1.3.4 Campo de ruptura ( $E_b$ ) . . . . .	34
1.3.5 Ruptura en campos no-uniformes . . . . .	34
1.4 IMPULSOS DE TENSIÓN . . . . .	35
1.4.1 Impulso atmosférico . . . . .	36
1.4.1.1 Terminología . . . . .	37
1.4.1.2 Oscilaciones superpuestas . . . . .	39
1.4.1.3 Tolerancias e incertidumbres . . . . .	41
1.5 EL AISLADOR . . . . .	41
1.5.1 Aislador tipo espiga o pin . . . . .	42
1.5.1.1 Objeto de prueba . . . . .	43
1.5.1.2 Disposición de montaje . . . . .	43
1.5.1.3 Montaje en espigo . . . . .	44
1.5.1.4 Electrodo energizado . . . . .	44

1.5.1.5	Proximidad de otros objetos . . . . .	45
<b>2</b>	<b>EQUIPO</b>	<b>46</b>
2.1	GENERADOR DE IMPULSOS MULTI-ETAPA . . . . .	47
2.2	DIVISOR CAPACITIVO . . . . .	49
2.3	RESISTOR SHUNT . . . . .	51
2.4	INSTRUMENTO DE MEDIDA ScopeMeter <i>Series II</i> . . . . .	53
2.4.1	Ajuste de amplitud . . . . .	54
2.4.2	Ajuste de la base de tiempos . . . . .	54
<b>3</b>	<b>PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO</b>	<b>55</b>
3.1	TENSIÓN DE DESCARGA DISRUPTIVA $V_{50}$ . . . . .	55
3.1.1	Método de ensayo <i>UP and DOWN</i> . . . . .	56
3.1.1.1	Tensión inicial $V_0$ . . . . .	56
3.1.1.2	Incremento de tensión $\Delta V$ . . . . .	57
3.1.1.3	Metodología de ensayo . . . . .	57
3.1.2	Tratamiento estadístico de resultados . . . . .	58
3.2	ENSAYO DE TENSIÓN NO DISRUPTIVA DE IMPULSO . . . . .	59
3.3	CURVAS TENSIÓN-TIEMPO . . . . .	59
<b>4</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE CORRECCIÓN DE LA TENSIÓN DE CHIS- PA <math>V_{50}</math> POR CONDICIONES ATMOSFÉRICAS</b>	<b>61</b>
4.1	CONDICIONES ATMOSFÉRICAS ESTÁNDAR . . . . .	61
4.2	FACTORES DE CORRECCIÓN . . . . .	62
4.2.1	Corrección atmosférica por factores $k_d$ y $k_h$ . . . . .	62
4.2.1.1	Factores de corrección por densidad de aire y humedad	63
4.3	MEDICIÓN DE PARÁMETROS ATMOSFÉRICOS . . . . .	66
4.3.1	Humedad . . . . .	66
4.3.2	Temperatura . . . . .	68
4.3.3	Presión absoluta . . . . .	68
<b>5</b>	<b>AJUSTE DE CURVAS</b>	<b>69</b>

5.1	AJUSTE POR MEDIO DE LAS CONSTANTES CARACTERÍSTICAS DEL GENERADOR DE IMPULSOS . . . . .	69
5.2	MÉTODO DE AJUSTE PRONY . . . . .	70
5.3	MÉTODO DE AJUSTE SEGÚN EL <i>IEEE Std. 4-2013</i> . . . . .	74
5.3.1	Procedimiento para ajustar y calcular los parámetros de un impulso atmosférico completo . . . . .	74
5.3.2	Procedimiento para ajustar y calcular los parámetros de un impulso atmosférico recortado en la cola . . . . .	76
5.4	CURVE FITTING TOOLBOX - MATLAB . . . . .	76
<b>6</b>	<b>CLASIFICACIÓN DE DEFECTOS PARA LOS DIFERENTES OBJETOS DE PRUEBA</b>	<b>78</b>
6.1	OBJETOS DE PRUEBA USADOS . . . . .	79
6.1.1	Objeto de prueba 1: sin daño . . . . .	79
6.1.2	Objeto de prueba 2: daño mayor . . . . .	80
6.1.3	Objeto de prueba 3: daño mayor . . . . .	80
6.1.4	Objeto de prueba 4: aislador usado en campo (5 o más años de uso) - daño crítico . . . . .	81
6.1.5	Objeto de prueba 5: aislador usado en campo - daño crítico . . .	81
6.1.6	Objeto de prueba 6: sin daño . . . . .	82
6.1.7	Objeto de prueba 7: daño mayor . . . . .	82
<b>7</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>83</b>
7.1	ANÁLISIS PRELIMINAR . . . . .	83
7.2	TIEMPOS DE FRENTE Y CORTE . . . . .	95
7.3	TENSIÓN CRÍTICA DE FLAMEO . . . . .	104
7.4	ENSAYOS DE TENSIÓN NO DISRUPTIVA DE IMPULSO . . . . .	108
7.5	CURVAS TENSIÓN-TIEMPO . . . . .	110
7.6	CORRIENTES . . . . .	113
<b>8</b>	<b>OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES</b>	<b>116</b>
8.1	OBSERVACIONES . . . . .	116

*ÍNDICE GENERAL*

---

8.2 CONCLUSIONES . . . . .	117
8.3 SUGERENCIAS . . . . .	119
<b>REFERENCIAS</b>	<b>120</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>121</b>

# Índice de figuras

Figura 1	Gradiente de campo probable cerca a tierra, correspondiente a la distribución de carga en una nube. . . . .	25
Figura 2	Onda de tensión tipo impulso atmosférico normalizada. . . . .	36
Figura 3	Función de tensión de prueba $k(f)$ . . . . .	38
Figura 4	Curva de tensión de prueba. . . . .	39
Figura 5	Función de tensión de ensayo $k(f)$ , determinada experimentalmente para valores $k$ en diferentes tipos de aislamiento (sólido, líquido y gaseoso). . . . .	40
Figura 6	Aislador tipo pin clase <i>ANSI 55-4</i> . . . . .	42
Figura 7	Aislador tipo pin clase <i>ANSI 55-4</i> - Disposición de montaje. . . .	44
Figura 8	Circuito de ensayo y medida. . . . .	46
Figura 9	Generador de impulsos <i>HAEFELY SGS 800/20</i> . . . . .	48
Figura 10	Circuito equivalente para el generador de impulsos tipo <i>SGS 800/20</i> . . . . .	48
Figura 11	Divisor de tensión capacitivo <i>HAEFELY CS 100</i> . . . . .	50
Figura 12	Circuito de medida - medición de corriente. . . . .	51
Figura 13	Fluke 105 ScopeMeter. . . . .	53
Figura 14	Esquema de procedimiento secuencial para la metodología <i>UP and DOWN</i> . . . . .	57
Figura 15	Ilustración de nueve impulsos aplicados por medio de la metodología secuencial <i>UP and DOWN</i> . . . . .	58
Figura 16	Curva tensión-tiempo. . . . .	60
Figura 17	Ejemplo de curva tensión-tiempo. . . . .	60

Figura 18	Factor de corrección por humedad $k$ , en función de la humedad absoluta. . . . .	64
Figura 19	Exponentes $m$ y $n$ para corrección por densidad de aire, y $w$ para corrección por humedad, en función de la distancia de separación entre electrodos, en metros. . . . .	64
Figura 20	Humedad absoluta del aire en función de lecturas en seco y húmedo de los termómetros del higrómetro (sólo a presión estándar). . . .	66
Figura 21	Objeto de prueba 1: sin daño. . . . .	79
Figura 22	Objeto de prueba 2: daño mayor. . . . .	80
Figura 23	Objeto de prueba 3: daño mayor. . . . .	80
Figura 24	Objeto de prueba 4: aislador usado en campo - Daño crítico. . . .	81
Figura 25	Objeto de prueba 5: aislador usado en campo - Daño crítico. . . .	81
Figura 26	Objeto de prueba 6: sin daño. . . . .	82
Figura 27	Objeto de prueba 7: daño mayor. . . . .	82
Figura 28	Interfaz gráfica - Ingreso de datos. . . . .	83
Figura 29	Interfaz gráfica - Ajuste por medio de las constantes características del Generador de Impulsos. . . . .	84
Figura 30	Tipos de ajuste usados. . . . .	85
Figura 31	Ajustes para un flameo a 27,3 kV/etapa. . . . .	86
Figura 32	Ajuste con oscilaciones para un soporte a 27,3 kV/etapa. . . . .	87
Figura 33	Ajuste con oscilaciones para un flameo a 27,3 kV/etapa. . . . .	87
Figura 34	Ajuste para un soporte a 27,7 kV/etapa, cuya amplitud excede el rango. . . . .	87
Figura 35	Análisis porcentual del total de soportes aptos por ajuste. . . . .	89
Figura 36	Análisis porcentual del total de flameos aptos por ajuste. . . . .	90
Figura 37	Análisis porcentual total por ajuste. . . . .	90
Figura 38	Porcentaje de soportes y flameos efectivos por método y tipo de ajuste. . . . .	91
Figura 39	Porcentaje de ajustes descartados por oscilaciones. . . . .	92

Figura 40	Porcentaje de ajustes descartados por amplitud de sobretensión fuera de rango. . . . .	93
Figura 41	Porcentaje de ajustes descartados por tiempo fuera de rango. . . .	93
Figura 42	Tiempos de frente y corte para el objeto de prueba 2. . . . .	97
Figura 43	Tiempos de frente y corte para el objeto de prueba 3. . . . .	97
Figura 44	Tiempos de frente y corte para el objeto de prueba 4. . . . .	98
Figura 45	Tiempos de frente y corte para el objeto de prueba 5. . . . .	98
Figura 46	Tiempos de frente y corte para el objeto de prueba 6. . . . .	99
Figura 47	Tiempos de frente y corte para el objeto de prueba 7. . . . .	99
Figura 48	Frentes de señal - soportes relativos al objeto de prueba 6 (objeto base). . . . .	102
Figura 49	Frentes de señal representativos por objeto. . . . .	103
Figura 50	Montaje realizado para los ensayos de laboratorio. . . . .	105
Figura 51	Primer impulso de tensión consecutivo - ensayo de tensión no disruptiva de impulso - objeto 5. . . . .	109
Figura 52	Segundo impulso de tensión consecutivo - ensayo de tensión no disruptiva de impulso - objeto 5. . . . .	109
Figura 53	Tercer impulso de tensión consecutivo - ensayo de tensión no disruptiva de impulso - objeto 5. . . . .	110
Figura 54	Característica tensión-tiempo objeto 1. . . . .	111
Figura 55	Característica tensión-tiempo de objetos 1, 3, 5, 6 y 7. . . . .	112
Figura 56	Generador de 4 etapas en serie. . . . .	123
Figura 57	Circuito al momento de descarga. . . . .	124
Figura 58	Circuito equivalente a la ecuación (17) en el dominio de la frecuencia.	126
Figura 59	Circuito equivalente a la ecuación (17) en el dominio del tiempo. .	127
Figura 60	Circuito general para $n$ etapas en serie. . . . .	127
Figura 61	Circuito del Generador de Impulsos según <i>Cavallius</i> [1]. . . . .	128
Figura 62	Circuito de Generador de Impulsos en el dominio de la frecuencia.	128
Figura 63	Característica tensión-tiempo - objeto 1. . . . .	163
Figura 64	Característica tensión-tiempo - objeto 3. . . . .	163

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 65	Característica tensión-tiempo - objeto 5. . . . .	164
Figura 66	Característica tensión-tiempo - objeto 6. . . . .	164
Figura 67	Característica tensión-tiempo - objeto 7. . . . .	165
Figura 68	<i>Current folder</i> y <i>Command window</i> - MATLAB. . . . .	169
Figura 69	Ventana Data de la interfaz IA_Pro. . . . .	170
Figura 70	Cuadro de advertencia de la interfaz IA_Pro. . . . .	170
Figura 71	Diagrama de flujo - Ejecución ventana Data. . . . .	171
Figura 72	Ventana G.I. (Generador de impulsos) de la interfaz IA_Pro. . . . .	174
Figura 73	Diagrama de flujo - Ejecución ventana G. I. . . . .	174
Figura 74	Ventana Prony de la interfaz IA_Pro. . . . .	175
Figura 75	Diagrama de flujo - Ejecución ventana Prony. . . . .	176
Figura 76	Diagrama de flujo - Ejecución ventana C. F. . . . .	177
Figura 77	Ventana Curve fitting - MATLAB de la interfaz IA_Pro. . . . .	178
Figura 78	Diagrama de flujo - Ejecución ventana IEEE Std. 4-2013. . . . .	179
Figura 79	Ventana IEEE Std. 4-2013 de la interfaz IA_Pro. . . . .	180
Figura 80	Ventana Results de la interfaz IA_Pro. . . . .	180
Figura 81	Ventana Plots de la interfaz IA_Pro. . . . .	181
Figura 82	Hoja de cálculo - EXPORT DATA. . . . .	182

# Índice de tablas

Tabla 1	Características eléctricas del aislador tipo pin clase <i>ANSI 55-4</i> , marca <i>GAMMA</i> . . . . .	43
Tabla 2	Características técnicas del generador de impulsos tipo <i>SGS 800/20</i> .	49
Tabla 3	Características técnicas del divisor capacitivo <i>HAEFELY CS 100</i> .	51
Tabla 4	Características técnicas del resistor shunt <i>SH Q 0.47</i> . . . . .	52
Tabla 5	Aplicación de los factores de corrección atmosféricos. . . . .	65
Tabla 6	Contenido de vapor de agua del aire saturado. . . . .	67
Tabla 7	Parámetros característicos extractados de la Figura 31. . . . .	86
Tabla 8	Cuadro representativo de flameos y soportes aptos - objeto de prueba 2. . . . .	88
Tabla 9	Resumen de ajustes efectivos por método y tipo de ajuste. . . . .	91
Tabla 10	Cantidad de ajustes descartados por oscilaciones, amplitudes de sobretensión y tiempos fuera de rango. . . . .	92
Tabla 11	Error de ajuste promedio por método, para el total de eventos analizados. . . . .	94
Tabla 12	Tiempos de frente y corte para los diferentes objetos de prueba, según <i>IEEE-C.F.-P(S)</i> . . . . .	96
Tabla 13	Cortes máximos y mínimos. . . . .	100
Tabla 14	Soportes representativos tomados por objeto. . . . .	103
Tabla 15	Índice de daño, según ensayos llevados a cabo (Propuesto por los autores). . . . .	104
Tabla 16	Protocolo tipo para ensayos <i>Up and DOWN</i> . . . . .	105
Tabla 17	Resumen de ensayo para cálculo tipo. . . . .	107

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 18	Resumen de resultados (tensión de chispa). . . . .	108
Tabla 19	Valores cresta normalizados y tiempos de corte para la determinación de la característica tensión-tiempo del objeto 1. . . . .	112
Tabla 20	Corrientes de los objetos de prueba más representativos. . . . .	114
Tabla 21	Protocolo de ensayo <i>UP and DOWN</i> - objeto de prueba 1. . . . .	133
Tabla 22	Protocolo de ensayo <i>UP and DOWN</i> - objeto de prueba 3. . . . .	134
Tabla 23	Protocolo de ensayo <i>UP and DOWN</i> - objeto de prueba 4. . . . .	134
Tabla 24	Protocolo de ensayo <i>UP and DOWN</i> - objeto de prueba 5. . . . .	135
Tabla 25	Protocolo de ensayo <i>UP and DOWN</i> - objeto de prueba 6. . . . .	135
Tabla 26	Protocolo de ensayo <i>UP and DOWN</i> - objeto de prueba 7. . . . .	136
Tabla 27	Archivos equivalentes para los diferentes eventos llevados a cabo por objeto. . . . .	136
Tabla 28	Cuadro representativo de flameos y soportes aptos - objeto de prueba 2. . . . .	138
Tabla 29	Cuadro representativo de flameos y soportes aptos - objeto de prueba 3. . . . .	139
Tabla 30	Cuadro representativo de flameos y soportes aptos - objeto de prueba 3 - Continuación. . . . .	140
Tabla 31	Cuadro representativo de flameos y soportes aptos - objeto de prueba 4. . . . .	141
Tabla 32	Cuadro representativo de flameos y soportes aptos - objeto de prueba 4 - Continuación. . . . .	142
Tabla 33	Cuadro representativo de flameos y soportes aptos - objeto de prueba 5. . . . .	143
Tabla 34	Cuadro representativo de flameos y soportes aptos - objeto de prueba 5 - Continuación. . . . .	144
Tabla 35	Cuadro representativo de flameos y soportes aptos - objeto de prueba 6. . . . .	145
Tabla 36	Cuadro representativo de flameos y soportes aptos - objeto de prueba 6 - Continuación. . . . .	146

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 37	Cuadro representativo de flameos y soportes aptos - objeto de prueba 7. . . . .	147
Tabla 38	Cuadro representativo de flameos y soportes aptos - objeto de prueba 7 - Continuación. . . . .	148
Tabla 39	Tiempos de frente y corte para el objeto de prueba 2. . . . .	150
Tabla 40	Constantes de ajuste para los tiempos de frente y corte del objeto 2.	151
Tabla 41	Tiempos de frente y corte para el objeto de prueba 3. . . . .	152
Tabla 42	Constantes de ajuste para los tiempos de frente y corte del objeto 3.	153
Tabla 43	Tiempos de frente y corte para el objeto de prueba 4. . . . .	154
Tabla 44	Constantes de ajuste para los tiempos de frente y corte del objeto 4.	155
Tabla 45	Tiempos de frente y corte para el objeto de prueba 5. . . . .	156
Tabla 46	Constantes de ajuste para los tiempos de frente y corte del objeto 5.	157
Tabla 47	Tiempos de frente y corte para el objeto de prueba 6. . . . .	158
Tabla 48	Constantes de ajuste para los tiempos de frente y corte del objeto 6.	159
Tabla 49	Tiempos de frente y corte para el objeto de prueba 7. . . . .	160
Tabla 50	Constantes de ajuste para los tiempos de frente y corte del objeto 7.	161
Tabla 51	Característica tensión-tiempo - Constantes de ajuste para los diferentes objetos. . . . .	162
Tabla 52	Valores cresta normalizados y tiempos de corte para la determinación de la característica tensión-tiempo del objeto 1. . . . .	165
Tabla 53	Valores cresta normalizados y tiempos de corte para la determinación de la característica tensión-tiempo del objeto 3. . . . .	166
Tabla 54	Valores cresta normalizados y tiempos de corte para la determinación de la característica tensión-tiempo del objeto 5. . . . .	166
Tabla 55	Valores cresta normalizados y tiempos de corte para la determinación de la característica tensión-tiempo del objeto 6. . . . .	166
Tabla 56	Valores cresta normalizados y tiempos de corte para la determinación de la característica tensión-tiempo del objeto 7. . . . .	167

# GLOSARIO Y ABREVIATURAS

---

- *I. A.*: impulso atmosférico.
- *Flashover o chopped impulse* : impulso recortado (flameo).
- *Withstand o full impulse*: impulso completo (soporte).
- *C. F.*: curve fitting toolbox (MATLAB).
- *S*: forma estándar (*Standard*).
- *O*: sobretensión en el frente (*Overshoot*).
- *FO*: oscilaciones en el frente (*Front oscillations*).
- *G. I.*: ajuste de un impulso de tensión, por medio de las constantes características del generador de impulsos de la Universidad Industrial de Santander.
- *P(S)*: ajuste de un impulso de tensión estándar, por medio del método de ajuste Prony.
- *P(O)*: ajuste de un impulso de tensión con sobretensión en el frente, por medio del método de ajuste Prony.
- *P(FO)*: ajuste de un impulso de tensión con oscilaciones en el frente, por medio del método de ajuste Prony.
- *C.F.-G.I.*: ajuste de un impulso de tensión, por medio de la Curve fitting toolbox de MATLAB adecuada a la ecuación característica que pretende modelar el proceso de carga y descarga del generador de impulsos de la Universidad Industrial de Santander.
- *C.F.-P(S)*: ajuste de un impulso de tensión, por medio de la Curve fitting toolbox de MATLAB adecuada a la ecuación estándar extractada del método de ajuste Prony.

- *C.F.-P(O)*: ajuste de un impulso de tensión, por medio de la Curve fitting toolbox de MATLAB adecuada a la ecuación de sobretensión del método de ajuste Prony.
- *C.F.-P(FO)*: ajuste de un impulso de tensión, por medio de la Curve fitting toolbox de MATLAB adecuada a la ecuación de oscilaciones en el frente del método de ajuste Prony.
- *IEEE-G.I.*: ajuste de un impulso de tensión, por medio de la ecuación característica del generador de impulsos de la Universidad Industrial de Santander, bajo la metodología consignada en el IEEE Std. 4-2013.
- *IEEE-P(S)*: ajuste de un impulso de tensión estándar, por medio del método de ajuste Prony, bajo la metodología consignada en el IEEE Std. 4-2013.
- *IEEE-P(O)*: ajuste de un impulso de tensión con sobretensión en el frente, por medio del método de ajuste Prony, bajo la metodología consignada en el IEEE Std. 4-2013.
- *IEEE-P(FO)*: ajuste de un impulso de tensión con oscilaciones en el frente, por medio del método de ajuste Prony, bajo la metodología consignada en el IEEE Std. 4-2013.
- *IEEE-C.F.-G.I.*: ajuste de un impulso de tensión, por medio de la Curve fitting toolbox de MATLAB adecuada a la ecuación característica que pretende modelar el proceso de carga y descarga del generador de impulsos de la Universidad Industrial de Santander, bajo la metodología consignada en el IEEE Std. 4-2013.
- *IEEE-C.F.-P(S)*: ajuste de un impulso de tensión, por medio de la Curve fitting toolbox de MATLAB adecuada a la ecuación estándar extractada del método de ajuste Prony, bajo la metodología consignada en el IEEE Std. 4-2013.
- *IEEE-C.F.-P(O)*: ajuste de un impulso de tensión, por medio de la Curve fitting toolbox de MATLAB adecuada a la ecuación de sobretensión del método de ajuste Prony, bajo la metodología consignada en el IEEE Std. 4-2013.
- *IEEE-C.F.-P(FO)*: ajuste de un impulso de tensión, por medio de la Curve fitting toolbox de MATLAB adecuada a la ecuación de oscilaciones en el frente del método de ajuste Prony, bajo la metodología consignada en el IEEE Std. 4-2013.

# RESUMEN

---

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE PRUEBAS EN AISLADORES TIPO PIN DE 13,2 kV MEDIANTE ONDA 1,2/50 COMPLETA.\*

**AUTORES:** JORGE ENRIQUE OSORIO VARGAS\*\*

**PALABRAS CLAVE:** DESCARGA ATMOSFÉRICA, AISLADOR, UP AND DOWN

## DESCRIPCIÓN:

La mayoría de eventos registrados en redes de distribución están asociados a descargas de tipo atmosférico. Así, el estudio de la respuesta a este tipo de fenómenos por parte de elementos usados en sistemas de protección, resulta de vital trascendencia en aplicaciones e investigaciones orientadas a la coordinación de aislamientos.

Este dossier se enfoca entonces, en el contraste y análisis de la respuesta al impulso atmosférico, expuesta por aisladores de porcelana tipo pin de 13,2 kV bajo condiciones de operación extremas. Así, se caracteriza cada objeto de prueba, haciendo uso de ensayos *UP and DOWN*, ensayos de tensión no disruptiva de impulso, características tensión-tiempo y corrientes de impulso medidas a través de resistores shunt. El modelado y análisis de las señales muestreadas, requirió el desarrollo de una herramienta que ajustase cada conjunto de muestras, explorando diferentes métodos y tipos de ajuste, además de la evidente extracción de parámetros necesarios para llevar a buen término dicho análisis. Los resultados extractados de dicha herramienta, así como el análisis de los mismos para la elección del tipo de ajuste a usar en las señales arrojadas por los diferentes objetos de prueba sometidos a estudio, son consignados también.

Dichos ensayos se darán a condiciones ideales (ensayo en seco), excluyendo así, cualquier tipo de impureza o humedad sobre la superficie esmaltada del objeto. Cualquier efecto producto de éstas, será expuesto en estudios futuros.

---

\*Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director M. Sc. Julio César Chacón Velasco

# ABSTRACT

---

---

**TITLE:** ANALYSIS OF EVIDENCE IN PIN INSULATORS OF 13.2 kV BY 1.2 / 50 FULL WAVE.\*

**AUTHORS:** JORGE ENRIQUE OSORIO VARGAS  
JOSÉ FERNANDO CASTAÑO GONZÁLEZ\*\*

**KEY WORDS:** ATMOSPHERIC DISCHARGE, INSULATOR, UP AND DOWN

## DESCRIPTION:

Most recorded events in distribution networks are associated with some kind of atmospheric discharges. Thus, the study of the response to this kind of phenomena by elements used in protective systems is of vital importance in applications and research aim at insulation coordination.

This dossier is then focused on the contrast and analysis of the response to the atmospheric impulse, expressed by pin type porcelain insulators 13.2 kV under extreme operating conditions. Thus, each test object is characterized using *UP and DOWN* tests, impulse withstand voltage tests, voltage-time characteristics and currents measured through shunt resistors. Modeling and analysis of the sampled signals, required the development of a tool that fit each set of samples, exploring different methods and types of adjustments in addition to the obvious removal of parameters necessary for the successful completion of the analysis. The results extracted from the tool, and the analysis of them for the choice of the type of adjust to use on signals thrown by different test objects, are also entered.

Such assays are given at ideal conditions (dry test), excluding any type of impurity or moisture on the enamel surface of the object. Any product of these effects will be exposed in future studies.

---

\*Degree Project

\*\*Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications. Director M. Sc. Julio César Chacón Velasco

# INTRODUCCIÓN

---

La principal función de todo aislador empleado en redes de generación, transmisión y distribución, es separar eléctricamente conductores de estructuras de soporte (herrajes, crucetas, postes, etc). Generalmente, éstos se encuentran sometidos a condiciones de intemperie: acumulación de impurezas y humedad, descargas atmosféricas, etc. Así, las condiciones físicas y exposición a este tipo de fenómenos, pueden modificar de manera significativa las características dieléctricas de aisladores y demás dispositivos de protección, llegando a ocasionar fallas que van desde pequeños flameos, a enormes arcos entre líneas y estructuras de soporte. Resultará entonces de vital trascendencia, cualquier estudio enfocado al desarrollo e investigación del comportamiento dieléctrico en este tipo de elementos.

Este trabajo se enfoca entonces, en el contraste de múltiples impulsos de tipo atmosférico, aplicados a aisladores de distribución (aislador de porcelana tipo pin de 13,2 kV) bajo diferentes condiciones de operación o daño. Así, se caracteriza y analiza cada objeto haciendo uso de las tensiones críticas de flameo al impulso positivo extractadas de los diferentes ensayos *UP and DOWN* llevados a cabo. De igual manera, el análisis y modelado de las señales muestreadas durante los ensayos de laboratorio, requiere el desarrollo de una herramienta que ajuste cada conjunto de muestras, explorando diferentes métodos y tipos de ajuste, además de la evidente extracción de parámetros necesarios para llevar a buen término dicho análisis. Luego de modificados los objetos, se analizan las variaciones expuestas por éstos, en contraste a aquellos tomados como base. Ensayos de tensión no disruptiva de impulso (tensión sostenida) son también consignados y analizados, determinando además, la característica tensión-tiempo extractada de cada objeto. Finalmente, se presentan los valores de corriente obtenidos de los diferentes ensayos llevados a cabo sobre éstos.

Dichos ensayos se darán a condiciones ideales (ensayo en seco), excluyendo así, cualquier tipo de impureza o humedad sobre la superficie esmaltada del objeto. Cualquier efecto producto de éstas, será expuesto en estudios futuros.

---

# 1

---

## GENERALIDADES

---

### SECCIÓN 1.1

#### EL FENÓMENO DE LA DESCARGA

Un impacto atmosférico es una poderosa descarga natural de electricidad estática generada durante una tormenta eléctrica. Ésta, se sucede acompañada de un fuerte haz de luz, creado por el paso de corriente eléctrica a través del aire que ioniza las moléculas del mismo, y desata el sonido desarrollado por la onda de choque generada debido al calentamiento y expansión de éste.

##### 1.1.1 Formación de carga en las nubes

Las descargas atmosféricas se presentan al formarse grandes concentraciones de carga eléctrica en capas de la atmósfera inmediatamente inferiores a la estratosfera (alturas entre 5 y 12 *km*). Las cargas positivas presentes en la nube se acumulan en la capa superior, otorgando a ésta, una distribución de carga esencialmente negativa. Este movimiento de cargas genera campos eléctricos al interior de la nube, permitiendo alcanzar potenciales de hasta 300 *MV* entre nubes y tierra. Usualmente, las descargas nube-tierra son generadas por partículas positivas en tierra y negativas en nubes de desarrollo vertical llamadas *cumulonimbus* (Figura 1).

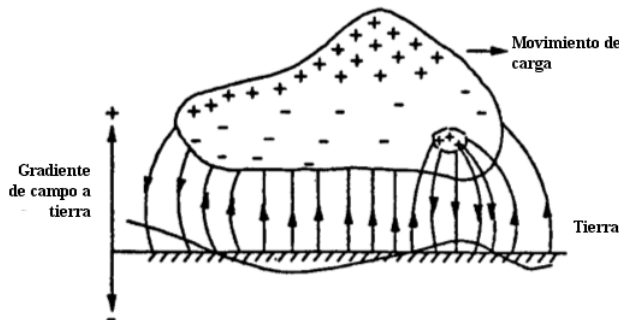
Una *cumulonimbus* se forma debido al calentamiento que ejercen los rayos solares sobre la superficie terrestre y, que ésta transfiere al aire circundante, ocasionando una disminución en su densidad y, creando una columna de aire cálido y húmedo que se eleva a

## 1.1. EL FENÓMENO DE LA DESCARGA

manera de espiral rotatoria. Así, a medida que el aire asciende, su temperatura disminuye, condensado el vapor de agua en forma de gotas y dando origen a la formación de cúmulos. Estas gotas se enfrían en demasía, creando cristales de hielo que al caer generan cargas de electricidad estática. Esto, es lo que generalmente se conoce como nube de convección.

Por otra parte, el proceso de convección se da debido a la transferencia de calor entre moléculas de aire a diferentes temperaturas. Por ello, durante su desarrollo a través de la tropósfera (la capa más baja de la atmósfera), las corrientes térmicas permiten alimentar y llevar la nube a niveles atmosféricos superiores. Sin embargo, al llegar a la tropopausa (entre los 11 y 17  $km$ ), la temperatura del aire cesa su descenso, alcanzando un valor casi constante ( $-56^{\circ}C$ ), e interrumpiendo el crecimiento vertical del nivel superior de la nube, debido a la ausencia de convección por temperatura estable, mientras, para alturas bajo la tropopausa, el aire sigue ascendiendo, llevando la nube a niveles superiores, comprimiendo y dando a ésta, apariencia en forma de disco.

Figura 1: Gradiente de campo probable cerca a tierra, correspondiente a la distribución de carga en una nube.



Fuente: NAIDU, M., and KAMARAJU, V. High voltage engineering. New Delhi: McGraw-Hill, 1996. 500p.

El interior de una *cumulonimbus* es recorrido por rápidas corrientes de aire ascendente y descendente de hasta 300  $km/h$ , que al separarse de aquellas partículas de aire y hielo adyacentes, crean partículas ionizadas que permiten la formación de carga eléctrica (esta carga es, en la mayoría de los casos, predominantemente negativa). A medida que incrementan la carga eléctrica y la tensión en cercanías de una *cumulonimbus*, se rebasa el gradiente crítico (30  $kV$  en aire seco y 10  $kV$  en presencia de gotas de agua), generando así, la ionización del aire, y, por tanto, la formación de caminos para la conducción de carga hacia un punto de potencial nulo. Cuando una *cumulonimbus* alcanza la tropopausa, las cargas positivas de la nube atraen las negativas, desarrollando un movimiento de cargas a través de la atmósfera que permite generar la descarga.

### 1.1.2 Evolución de la descarga

Después de iniciada la descarga, ésta se desarrolla camino a niveles inferiores por medio de un flujo de carga llamado líder (*leader*). El líder es un canal altamente ionizado, precedido y rodeado por un fuerte efecto corona. La punta del líder o *stepped leader* (trazador), se desarrolla en pasos luminosos de 100 m a 200 m en 1  $\mu s$ , antes de detener su trayectoria por cerca de 50  $\mu s$  mientras éste acumula carga. Esta carga es transferida desde la nube y permite formar un camino ionizado que resultará en un nuevo avance del líder. A medida que éste se aproxima a tierra, el campo eléctrico entre éstos incrementa, generando puntos de descarga en objetos cercanos a ésta (edificios, árboles, etc.). Entonces, estas estructuras u objetos emiten cargas que logran atraer y orientar al líder, sellando así su camino hacia la superficie terrestre. El alud ionizado generado por la descarga se desplaza a velocidades vertiginosas, produciendo una descarga de retorno de gran luminosidad. Ésta, es considerada la etapa más energética en una descarga atmosférica, llegando a generar corrientes de hasta 250 kA. Luego, en intervalos de 0,01 a 0,1 segundos, se producen nuevos flujos de electrones que se abren paso por el camino antes ionizado que ha trazado el líder descendente. Estos líderes rápidos, al golpear tierra, producen descargas de retorno menos energéticas que la primera. En una descarga atmosférica, es común que existan tres o cuatro líderes, pudiendo llegar a 20 o 30.

El canal de descarga, cuyo interior es en sí un hilo conductor de plasma, puede alcanzar fácilmente temperaturas de hasta 30 000 °C, presiones de hasta 10,1325 MPa (100 atmósferas) y un diámetro cercano a 10 cm. La descarga de una nube puede generar nuevas distribuciones de carga en la atmósfera, permitiendo descargas horizontales entre nubes de tormenta.

#### SECCIÓN 1.2

### DESCARGA DISRUPTIVA

A condiciones normales de presión y temperatura, los gases son excelentes medios dieléctricos. Múltiples fenómenos ocurren en dieléctricos gaseosos al aplicar tensión a éstos. A bajas tensiones, pequeñas corrientes fluyen entre electrodos y el medio conserva sus propiedades dieléctricas. No obstante, si la tensión aplicada es mucho mayor, la corriente que fluye a través del medio incrementa rápidamente, pudiendo llegar a perforar el aislamiento del mismo. A ésta, se le conoce como tensión disruptiva, y es la tensión necesaria para desgarrar el aire y provocar una descarga.

Una descarga disruptiva o chispa, se define entonces, como una falla de aislamiento en una configuración electródica sometida a un esfuerzo eléctrico. Estas descargas, reducen

la tensión entre electrodos a valores casi nulos e incrementan la corriente sobre los mismos, llegando incluso a dañar de manera permanente conductores, aisladores u objetos de prueba.

El medio dieléctrico puede ser líquido, sólido, gaseoso o una combinación de éstos. Aquellas descargas disruptivas entre electrodos donde la rigidez dieléctrica la proporciona el aire, son denominadas *flashover* (flameo).

Es necesario distinguir aquellas tensiones alternas de crecimiento lento y, baja, media o alta frecuencia, así como las tensiones continuas (descargas estáticas), de aquellas en forma de impulso (descargas de choque). Este trabajo sólo contempla ensayos mediante impulsos.

#### SECCIÓN 1.3

### DESCARGAS POR IMPULSOS

Un impulso es aquella tensión o corriente aperiódica transitoria aplicada intencionalmente, que incrementa de manera rápida a un valor cresta, y se extingue lentamente.

Las descargas de choque o descargas por impulso, requieren cierto tiempo para su desarrollo. Este tiempo, denominado *retraso de descarga* o *tiempo de retardo*, consta de dos periodos: uno de ellos de formación, necesario para el desarrollo de las condiciones apropiadas para ello. El segundo periodo lo integra el *tiempo de dispersión estadístico* o *tiempo probable*; éste varía, aún en igualdad de condiciones y es el tiempo requerido para situar los electrones iniciales en una posición crítica que permita desarrollar la descarga. El intervalo medio de este segundo periodo depende, de la forma del campo en el cátodo (sobre todo, de la forma del cátodo mismo: placa, esfera, punta o configuraciones intermedias); del material que compone a este electrodo, es decir, de la energía precisa para la liberación de sus cargas; del estado de la superficie (capa de óxidos, de grasa, película gaseosa, combustión de las partículas de polvo, efecto Paetow); de la naturaleza e intensidad de las radiaciones de onda corta existente en sus inmediaciones, y, finalmente, de la rapidez de crecimiento de la tensión aplicada y del exceso de ésta sobre la tensión estática.

#### 1.3.1 El mecanismo de descarga Townsend

La presencia de altas corrientes en una descarga disruptiva se da debido al proceso de liberación de iones positivos y electrones de moléculas de gas (ionización). En éste,

un electrón libre colisiona con una molécula de gas neutra, creando nuevos electrones e iones positivos. La ionización del medio tendrá lugar, si entre colisiones, el electrón adquiere suficiente energía para rebasar el potencial de ionización  $V_i$  (energía requerida para desalojar un electrón de su escudo atómico).

La variación de corriente medida en un gas, entre dos electrodos de placas paralelas, fue estudiada por Townsend como función de la tensión aplicada a éstas.

Según Townsend, en su primer incremento la corriente crece de manera proporcional a la tensión aplicada, alcanzando un valor casi constante  $i_0$  (corriente de saturación). Sin embargo, al incrementar la tensión aplicada a valores críticos, ésta sobrepasa el valor  $i_0$ , aumentando su magnitud a una tasa exponencial.

Para explicar este incremento de corriente, Townsend introduce una cantidad  $\alpha$  (primer coeficiente de ionización de Townsend), definida como el número de colisiones promedio realizadas por un electrón por unidad de longitud, viajando en dirección del campo aplicado ( $\alpha$  depende de la presión del gas,  $p$ , así como de la relación  $E/p$ ).

Entonces, si se asume  $n$  como el número de electrones a una distancia  $x$  del cátodo en dirección del campo, el incremento de electrones  $dn$  para una distancia adicional  $dx$ , estará dado por:

$$dn = \alpha n * dx \tag{1.1}$$

Integrando en función de la distancia de cátodo a ánodo ( $d$ ),

$$n = n_0 e^{\alpha d} \tag{1.2}$$

donde  $n_0$  representa el número de electrones primarios generados en el cátodo. En términos de corriente, la ecuación (1.2) se puede expresar como:

$$I = I_0 e^{\alpha d} \tag{1.3}$$

El término  $e^{\alpha d}$  en la ecuación (1.3) representa el número de electrones generados por un solo electrón en su viaje de cátodo a ánodo.

Luego de la primera avalancha de electrones, la probabilidad de engendrar nuevos electrones por medio de diferentes mecanismos incrementa, permitiendo generar un mayor número de avalanchas. Townsend postula entonces un segundo coeficiente  $\gamma$ , que permite explicar cómo se suceden estas avalanchas, y representa el número de electrones secundarios engendrados por incidentes de iones positivos, fotones, partículas excitadas y otros.

En un gas, a medida que la tensión entre electrodos aumenta, la corriente de electrodo en el ánodo incrementa de acuerdo a la ecuación (1.4).

$$I = I_0 * \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (1.4)$$

Este incremento se da hasta establecer una descarga auto-sostenida [2]. Entonces,  $I$  adquiere un valor indeterminado debido a la nulidad alcanzada en el denominador, esto es:

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (1.5)$$

Si se toma en cuenta el acoplamiento entre electrones, se obtiene:

$$\frac{\alpha\gamma}{\alpha - \eta} [e^{(\alpha-\eta)d} - 1] = 1 \quad (1.6)$$

lo cual, es aproximadamente igual a:

$$\gamma e^{(\alpha-\eta)d} = \gamma e^{\bar{\alpha}d} = 1 \quad (1.7)$$

siempre que,

$$e^{\bar{\alpha}d} \gg 1 \text{ y } \alpha \gg \eta$$

$\bar{\alpha} = \alpha - \eta$ , y representa el coeficiente de ionización efectivo [2].

La ecuación (1.7), define entonces las condiciones para el inicio de chispa, y es llamada criterio Townsend para formación de chispa o criterio de ruptura Townsend.

Una expresión alternativa para el criterio Townsend se obtiene al escribir la ecuación (1.7) de la forma:

$$\bar{\alpha}d = \ln \left( \frac{1}{\gamma} + 1 \right) = K \quad (1.8)$$

A menudo,  $K$  es tomado como un valor constante, debido al efecto que causan la presión del gas y la superficie del cátodo, en el proceso de emisión de electrones [2].

### 1.3.2 El mecanismo de descarga por formación de canales

A presión atmosférica, el mecanismo de descarga Townsend presenta algunos inconvenientes al ser usado como criterio de ruptura. Según Townsend, el crecimiento de corriente se da únicamente, como resultado del proceso de ionización del gas empleado

como medio dieléctrico; sin embargo, el crecimiento de ésta, así como las tensiones de ruptura, dependen, tanto de la presión del gas como de la geometría presente en el entre-hierro. Por otra parte, el mecanismo Townsend predice tiempos de retardo del orden de  $10^{-5}$  s, siendo éstos, mucho más pequeños ( $10^{-8}$  s). Además, en éste, la forma de ruptura es bastante difusa en contraste con aquellas algo filamentosas e irregulares halladas en la práctica.

En la década de 1940, Raether, y, Meek y Loeb, proponen independientemente, una teoría de formación de canales, como respuesta a aquellos fenómenos que el mecanismo Townsend no puede sustentar. Esta teoría, explica el proceso de descarga directamente desde una sola avalancha, donde el espacio cargado desarrollado por ésta, permite trocar dicha avalancha en un canal de plasma.

Basado en observaciones experimentales, Raether desarrolla una expresión empírica para el mecanismo de descarga por canales:

$$\alpha x_c = 17,7 + \ln(x_c) + \ln \frac{E_r}{E} \quad (1.9)$$

donde,  $E_r$  representa la fuerza de campo de carga espacial, en dirección radial a la punta de la avalancha, y  $E$ , representa la fuerza de campo externo aplicado.

La condición de transición de avalancha a canal asume que el campo de carga espacial  $E_r$ , se aproxima al campo externo aplicado ( $E_r \approx E$ ). Por tanto,

$$\alpha x_c = 17,7 + \ln(x_c) \quad (1.10)$$

El valor mínimo de ruptura para un entre-hierro con campo uniforme, debido al mecanismo de ruptura por canales, supone la transición de avalancha a canal, justo en el instante en que ésta recién cruza el entre-hierro ( $d$ ). Entonces, la expresión empírica de Raether para esta condición toma la siguiente forma:

$$\alpha x_c = 17,7 + \ln(d) \quad (1.11)$$

El mecanismo de ruptura por canales será provocado sólo cuando la longitud crítica supere la del entre-hierro ( $x_c \geq d$ ). La condición  $x_c = d$ , da el menor valor de  $\alpha$  para generar chispa.

Un criterio similar para la transición de avalancha a canal ha sido desarrollado por Meek. Al igual que en el caso Raether, la transición toma lugar cuando el campo radial alrededor del espacio cargado positivamente en una avalancha de electrones, asume un valor del orden del campo externo aplicado.

Meek demostró que el campo radial producido por aquellos iones positivos inmediatamente tras la punta de la avalancha puede ser calculado por medio de la siguiente expresión:

$$E_r = 5,27 * 10^{-7} * \frac{\alpha e^{\alpha x}}{(x/p)^{1/2}} \text{ V/cm} \quad (1.12)$$

donde,

$\alpha$  es el primer coeficiente de ionización de Townsend.

$p$  es la presión del gas en *Torr*.

$x$  es la distancia por la cual el canal se extiende en el entre-hierro.

Al igual que en el modelo Raether, el valor mínimo de tensión de ruptura se obtiene cuando  $E_r = E$  y  $x = d$ . Entonces, reescribiendo la ecuación (1.12) se obtiene:

$$\alpha d + \ln\left(\frac{\alpha}{p}\right) = 14,5 + \ln\left(\frac{E}{p}\right) + \frac{1}{2}\ln\left(\frac{d}{p}\right) \quad (1.13)$$

Esta ecuación se resuelve, usando relaciones experimentales determinadas entre  $\alpha/p$  y  $E/p$ . Valores de  $\alpha/p$  correspondientes a  $E/p$  a presión dada, son seleccionados hasta satisfacer dicha ecuación.

Este criterio establece un acuerdo entre las tensiones de ruptura calculadas y aquellas medidas. Así mismo, esta teoría encaja perfectamente en las formas filamentosas ya mencionadas y clarifica algunas ambigüedades presentes en el mecanismo Townsend cuando éste es aplicado a rupturas a altas presiones, a través de un entre-hierro extenso.

Sin embargo, el mecanismo por formación de canales sigue siendo bastante polémico al tratar de explicar su operación a condiciones de campo uniforme, bajo un rango de valores  $pd$ . Por ello, se asume efectivo, para valores  $pd$  bajo los 1000 *Torr - cm* y presiones de gas desde 0,01 a 300 *Torr*, el mecanismo descrito por Townsend; mientras a presiones mucho mayores, el mecanismo por formación de canales es usado para dar explicación al fenómeno de ruptura.

### 1.3.3 Ley de Paschen - tensión de chispa

El criterio Townsend permite determinar la tensión de ruptura en un entre-hierro, mediante el uso de valores apropiados para  $\bar{\alpha}/p$  y  $\gamma$ , correspondientes a valores  $E/p$ , sin elevar las corrientes del mismo (valores menores a  $10^{-7}$  A). Así, las distorsiones del espacio cargado son llevadas a un mínimo, permitiendo evitar daños en el sistema de electrodos.

### 1.3. DESCARGAS POR IMPULSOS

---

Una expresión analítica para tensiones de ruptura en entre-hierros con campos uniformes, en función de la longitud del mismo y la presión del gas, puede ser derivada de la ecuación (1.7), expresando el coeficiente de ionización  $\bar{\alpha}/p$  en función de la fuerza de campo y la presión del gas. Si en dicha ecuación  $\bar{\alpha}/p = f(E/p)$ , se obtiene:

$$e^{f(E/p)} = \frac{1}{\gamma} + 1 \quad (1.14)$$

o,

$$f(E/p)pd = \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) = K \quad (1.15)$$

Para campos uniformes,  $V_b = Ed$ , donde,  $V_b$  es la tensión de ruptura,

$$e^{f(V_b/pd)pd} = K' = e^K \quad (1.16)$$

o,

$$V_b = F(pd) \quad (1.17)$$

Esto indica que la tensión de ruptura para un entre-hierro de campo uniforme será únicamente función del producto de la presión y la separación entre electrodos, para un gas particular y material de electrodo. La ecuación (1.16) (Ley de Paschen) no implica un incremento lineal de la tensión de chispa con el producto  $pd$ ; sin embargo, en la práctica ésta ha mostrado ser casi lineal sobre ciertas regiones.

Al reescribir el criterio Townsend (ecuación (1.8)), y recordando que en presencia de campos uniformes,  $V = Ed$ , donde  $V$  es la tensión aplicada, se obtiene:

$$\frac{\bar{\alpha}}{p} = \frac{K E}{V p} \quad (1.18)$$

y,

$$\tan\theta = \frac{\bar{\alpha}/p}{E/p} = \frac{K}{V} \quad (1.19)$$

La existencia de un valor mínimo en la relación *tensión de ruptura - distancia de entre-hierro*, puede ser explicada cualitativamente, considerando la eficiencia en el proceso de ionización a través del entre-hierro, para diferentes energías de electrón. Despreciando el segundo coeficiente de Townsend,  $\gamma$ , para valores  $pd > (pd)_{mín}$ , los electrones realizarán colisiones más frecuentemente con moléculas de gas que a  $(pd)_{mín}$ , pero la energía ganada entre colisiones será menor que a  $(pd)_{mín}$ . Aquí, la probabilidad de ionización será menor, a menos que la tensión incremente. Para  $pd < (pd)_{mín}$ , los electrones cruzarán el entre-hierro colisionando poco entre ellos. El punto  $(pd)_{mín}$  corresponderá entonces,

a la más alta eficiencia.

Una expresión analítica para los valores mínimos de  $V_{b_{min}}$  y  $(pd)_{min}$ , se muestra a continuación:

$$\bar{\alpha} = A.p * \exp\left(-\frac{B.p}{E}\right) = \left[A.p * \exp\left(-\frac{B.pd}{V}\right)\right] \quad (1.20)$$

Asumiendo que el coeficiente  $\gamma$  permanece constante,

$$d = \frac{e^{(B.pd/V_b)}}{A.p} \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (1.21)$$

Reordenando,

$$V_b = \frac{B.pd}{\ln\frac{A.pd}{\ln(1 + 1/\gamma)}} \quad (1.22)$$

Diferenciando respecto a  $(pd)$  e igualando a cero,

$$\frac{dV_p}{d(pd)} = \frac{B}{\ln\frac{A.pd}{\ln(1 + 1/\gamma)}} - \frac{B}{\left[\ln\frac{A.pd}{\ln(1 + 1/\gamma)}\right]^2} = 0 \quad (1.23)$$

Por tanto,

$$\ln\frac{A.pd}{\ln(1 + 1/\gamma)} = 1 \quad (1.24)$$

y,

$$(pd)_{min} = \frac{e^1}{A} \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (1.25)$$

Finalmente, sustituyendo en la ecuación (1.22), se obtiene:

$$V_{b_{min}} = 2,718 * \frac{B}{A} * \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (1.26)$$

Esta ecuación puede ser usada para el cálculo de las constantes mínimas de chispa ( $V_{b_{min}}$ ,  $(pd)_{min}$ ), si valores adecuados de  $A$  y  $B$  son usados para simular la dependencia real de  $\bar{\alpha}/p = f(E/p)$  en la vecindad de:

$$\frac{d^2(\alpha/p)}{d(E/p)^2} = 0 \quad (1.27)$$

### 1.3.4 Campo de ruptura ( $E_b$ )

Para entre-hierros de campo uniforme, el campo de ruptura en un gas puede obtenerse de la ecuación (1.22), dividiendo las dos partes de ésta en  $pd$ . Entonces,

$$\frac{V_b}{pd} = \frac{E_b}{p} = \frac{B}{\ln \frac{A \cdot pd}{\ln(1 + 1/\gamma)}} \quad (1.28)$$

Cabe notar que a presión constante  $p$ , el campo de ruptura  $E_b$  decrece constantemente para una longitud de entre-hierro  $d$ . Además, el campo a una relación de presión  $E_b/p$ , es dependiente sólo sobre el producto  $pd$ . La ecuación (1.28) también muestra que el campo de ruptura  $E_b$ , para una longitud de entre-hierro constante, incrementa con las presiones del mismo, pero a un ritmo ligeramente menor que uno directamente proporcional.

Aplicando el criterio Townsend a diferentes valores de  $pd$ , se obtiene:

$$\frac{\bar{\alpha}}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right) \quad (1.29)$$

### 1.3.5 Ruptura en campos no-uniformes

En campos no-uniformes (entre-hierros punta-placa, esfera-placa o cilindros coaxiales), la fuerza de campo y por tanto, el coeficiente efectivo de ionización  $\bar{\alpha}$ , varían a través de todo el entre-hierro. Así, el incremento de electrones es gobernado por la integral de  $\bar{\alpha}$  ( $\int \bar{\alpha} \cdot dx$ ).

A bajas presiones, el criterio de chispa Townsend toma la forma:

$$\gamma \left[ \exp \left( \int_0^d \bar{\alpha} \cdot dx \right) - 1 \right] = 1 \quad (1.30)$$

donde  $d$  es la longitud del entre-hierro. Esta integral debe darse a lo largo del intervalo de la línea de mayor campo. La expresión (1.30) también es válida a altas presiones, si el campo es ligeramente no-uniforme. Para campos altamente divergentes, existirá inicialmente, una región de altos valores  $E/p$ , sobre los cuales  $\alpha/p > 0$ . Cuando el campo cae bajo una fuerza dada  $E_c$ , la existencia de la integral  $\int \bar{\alpha} \cdot dx$  cesa. Entonces, si el criterio está basado únicamente en el efecto causado por el coeficiente  $\gamma$ , el mecanismo Townsend pierde validez, lo cual se da, especialmente cuando la fuerza de campo en el cátodo es pequeña.

En rupturas reales (o al iniciar la descarga), lo mencionado anteriormente es posible, si

se toma en cuenta el proceso de fotoionización.

De manera general, la condición para criterio de chispa (o inicio de descarga) puede ser representada, considerando una distribución no-uniforme de  $\bar{\alpha}$ , modificando la expresión (1.10). Así,

$$\exp \int_0^{x_c < d} \bar{\alpha} . dx = N_{cr} \quad (1.31)$$

donde  $N_{cr}$  es la concentración crítica de electrones en una avalancha (aproximadamente  $10^8$ ),  $x_c$  es el camino que recorre ésta para alcanzar este tamaño, y  $d$ , la longitud del entre-hierro. La ecuación (1.31) puede ser escrita como:

$$\int_0^{x_c < d} \bar{\alpha} . dx = \ln(N_{cr}) \approx 18 - 20 \quad (1.32)$$

La ecuación (1.32) puede ser aplicada al cálculo de tensión de chispa o inicio de descarga, dependiendo si ocurre ruptura directa o sólo corona.

**SECCIÓN 1.4**

**IMPULSOS DE TENSIÓN**

Un impulso es una sobretensión unidireccional generada súbitamente por la liberación de energía eléctrica en una red de impedancia [3].

Los disturbios que se presentan regularmente en los sistemas eléctricos de potencia, de transmisión y distribución, son frecuentemente producidos por dos tipos de sobretensiones transitorias que pueden exceder ampliamente los valores pico de las tensiones normales de operación en A.C. de estos sistemas. Las descargas atmosféricas hacen referencia a uno de estos tipos de sobretensión, y pueden afectar líneas de transmisión, subestaciones y demás elementos presentes en una red eléctrica. El otro tipo de sobretensiones transitorias es generado por maniobras efectuadas en los sistemas de distribución: apertura o cierre de líneas, energización de equipos, etc. Este proyecto no abarca pruebas que simulen sobretensiones por maniobra, sino, sólo algunas por descarga.

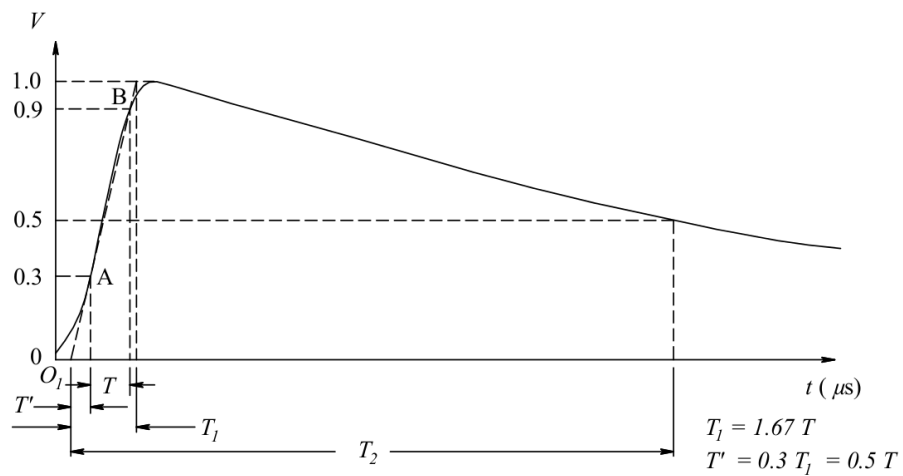
Puesto que las subestaciones, líneas de transmisión y distribución, aisladores y demás elementos expuestos a descargas atmosféricas deben soportar estos tipos de sobretensión sin colapsar debido a ello, se hace necesario realizar estudios que permitan definir valores de ruptura de aislamiento críticos para cada elemento que esté en riesgo y pueda ser impactado. Para ello, se debe estar en condición de generar ondas de prueba que

## 1.4. IMPULSOS DE TENSIÓN

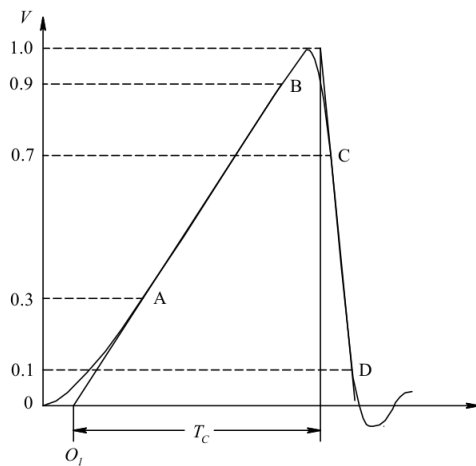
permitan simular este tipo de fenómenos. Estas pruebas no pretenden reproducir fielmente las condiciones de operación a las que realmente serían expuestos estos equipos u elementos bajo sucesos atmosféricos o maniobras, sino, brindar criterios basados en la experiencia que permitan esperar un servicio satisfactorio de explotación de los mismos.

### 1.4.1 Impulso atmosférico

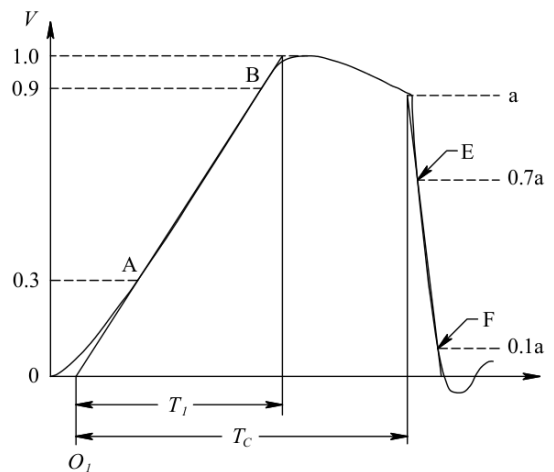
Figura 2: Onda de tensión tipo impulso atmosférico normalizada.



(a) Impulso atmosférico de tensión completo.



(b) Impulso atmosférico de tensión recortado en el frente.



(c) Impulso atmosférico de tensión recortado en la cola.

Fuente: IEEE. Standard for High-Voltage Testing Techniques. Std. 4. Redline, 2013.

Un impulso atmosférico es un impulso de tensión con tiempos de frente que varían desde un microsegundo hasta algunas décimas de microsegundos [4]. La Figura 2, representa la forma de onda para un impulso atmosférico, así como el mismo impulso recortado en frente (2b) y cola (2c).

Los siguientes parámetros permiten caracterizar este tipo de impulsos:

- *tiempo de frente*  $T_1$  y *tiempo de cola*  $T_2$ , para impulsos atmosféricos completos.
- *tiempo de frente*  $T_1$  y *tiempo de corte*  $T_c$ , para impulsos atmosféricos recortados estándar ( $2 \mu s \leq T_c \leq 5 \mu s$ ).
- *tiempo de corte*  $T_c$ , para impulsos atmosféricos recortados en el frente ( $T_c \leq 2 \mu s$ ).

### 1.4.1.1. Terminología

- *Impulso atmosférico estándar*: impulso pleno con un tiempo de frente  $T_1$ , de  $1,2 \mu s$ , y un tiempo de cola  $T_2$  (amplitud al 50 % de su valor cresta), de  $50 \mu s$ .
- *Impulso atmosférico completo*: impulso atmosférico nunca interrumpido por una descarga disruptiva (Figura 2a).
- *Impulso atmosférico recortado*: impulso atmosférico repentinamente sesgado por una descarga disruptiva que ocasiona en éste, un colapso instantáneo de tensión (Figuras 2b y 2c).
- *Origen real*,  $O$ : instante en que la curva inicia un incremento monótono.
- *Origen virtual*,  $O_1$ : intersección con el eje del tiempo de la línea recta dibujada a lo largo de los puntos de referencia  $A$  y  $B$  en el frente de la onda.
- *Tiempo de frente*,  $T_1$ : parámetro virtual definido como 1,67 veces el intervalo  $T$  entre los instantes donde el impulso alcanza 30 % y 90 % de su valor cresta.
- *Tiempo de cola*,  $T_2$ : parámetro virtual definido como el intervalo de tiempo entre el origen virtual,  $O_1$ , y el instante en que el impulso de prueba decrece la mitad de su valor cresta.
- *Tiempo de corte*,  $T_c$ : parámetro virtual definido como el intervalo de tiempo entre el origen virtual,  $O_1$ , y el instante de corte.
- *Sobretensión*: incremento en amplitud de un impulso atmosférico, debido a una oscilación en la cresta de éste.
- *Valor de tensión de ensayo*,  $V_t$ : valor cresta de la curva de tensión.

- *Curva registrada*: representación gráfica o digital de los datos sometidos a estudio en un impulso de tensión.
- *Curva base*: estimación de un impulso de tensión sin oscilaciones.
- *Curva residual*: diferencia entre la curva registrada y la curva base.
- *Función de tensión de ensayo*: función de amplitud-frecuencia que define la respuesta del aislamiento a impulsos con sobretensión. Está dado por:

$$k(f) = \frac{1}{1 + 2,2f^2} \quad (1.33)$$

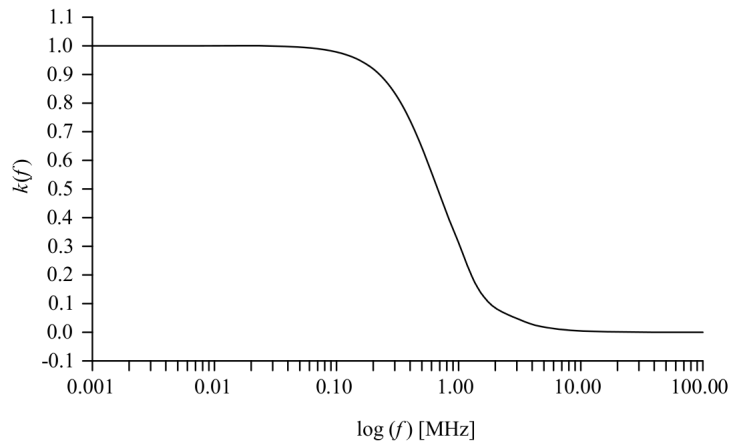
donde,  $f$  es la frecuencia en megahertz. Esta función se muestra en la Figura 3.

- *Curva de tensión de ensayo*: superposición de la curva base y la curva residual, después de filtrada esta última, mediante un filtro cuya respuesta en frecuencia está definida por la *función de tensión de ensayo*.

Si la curva no presenta algún tipo de sobretensión ( $\beta' < 1\%$ ), la curva registrada será la curva de tensión de ensayo.

- *Magnitud de sobretensión*,  $\beta$ : la diferencia en valores cresta entre la curva registrada y la curva base.
- *Magnitud relativa de sobretensión*,  $\beta'$ : proporción entre la magnitud de sobretensión y el valor extremo de un impulso, usualmente expresada en porcentaje.
- *Valor extremo de un impulso*,  $V_e$ : valor máximo de la curva registrada.

Figura 3: Función de tensión de prueba  $k(f)$ .

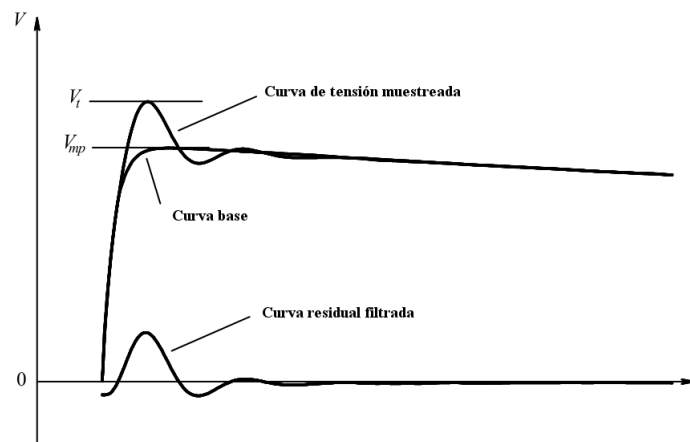


Fuente: IEEE. Standard for High-Voltage Testing Techniques. Std. 4. Redline, 2013.

## 1.4.1.2. Oscilaciones superpuestas

Las tensiones de prueba que se obtienen en ensayos reales pueden albergar oscilaciones en su cresta, así como en el frente de la onda. Este tipo de disturbios se da, debido a la presencia de inductores y capacitores en los generadores de impulsos de tensión. A fin de capturar este tipo de oscilaciones correctamente, el sistema de medida debe poseer un ancho de banda suficientemente alto (al menos 10 MHz para oscilaciones en el frente, y 5 MHz para oscilaciones en la cresta). De igual manera, las oscilaciones presentes en el circuito de ensayo, deben distinguirse claramente de aquellas que podrían producirse a causa de fenómenos intrínsecos de resonancia en el divisor de tensión (esto último, debido a problemas de construcción). Las oscilaciones en la cresta de un impulso atmosférico requieren procesos de evaluación especiales para determinar el valor de tensión de ensayo. El esfuerzo causado al aislamiento del objeto de prueba, depende de la frecuencia de oscilación superpuesta en la cresta de la señal. De acuerdo a esto, un impulso de tensión con oscilaciones de alta frecuencia no someterá el aislamiento a igual esfuerzo que uno a baja frecuencia. El valor máximo de un impulso atmosférico de tensión con oscilaciones superpuestas en su cresta, a frecuencia  $f < 500 \text{ kHz}$ , se determina como el valor de tensión de ensayo  $V_t$ , mientras para  $f \geq 500 \text{ kHz}$ , éste se determina como el valor cresta  $V_{mp}$ , de la curva base, a través de la curva registrada (Figura 4).

Figura 4: Curva de tensión de prueba.



Fuente: IEEE. Standard for High-Voltage Testing Techniques. Std. 4. Redline, 2013.

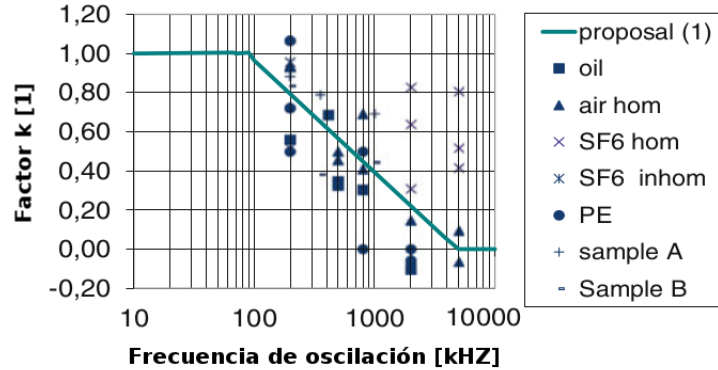
Puesto que la frecuencia de oscilación en la cresta de la señal no puede ser determinada de manera exacta en el rango crítico de los  $500 \text{ kHz}$ , se hace imposible establecer un método de evaluación que permita hallar éste valor.

## 1.4. IMPULSOS DE TENSIÓN

En una serie exhaustiva de experimentos con diferentes modelos de prueba [5], valores de ruptura en impulsos de tensión con, y sin oscilaciones en la cresta, son medidos. La Figura 4, muestra las formas de onda de tensión, justo antes de ocurrida la ruptura. La amplitud, frecuencia y fase de desplazamiento de la oscilación superpuesta, fueron sometidas a múltiples variaciones durante dichas investigaciones.

Los resultados de las pruebas de ruptura en todos los materiales aislantes sometidos a estudio, así como modelos y parámetros de ensayo, se resumen en un diagrama que muestra los valores determinados experimentalmente del factor  $k$ , en función de la frecuencia de oscilación en la cresta  $f$ . A pesar de la dispersión de valores para los diversos tipos de material aislante, es bastante claro que el factor  $k$ , y con ello, el efecto de la cresta en la oscilación durante una ruptura, disminuye continuamente sobre los  $100 \text{ kHz}$ , y desaparece totalmente para  $f \geq 5 \text{ MHz}$  (Figura 5). La línea recta a través de los valores obtenidos empíricamente, caracteriza el comportamiento de la frecuencia básica del factor  $k$ . En lugar del cambio abrupto aceptado anteriormente para este factor, a  $500 \text{ kHz}$ , una transición gradual en el rango de frecuencia de  $100 \text{ kHz}$  a  $5 \text{ MHz}$ , resulta igualmente correcta.

Figura 5: Función de tensión de ensayo  $k(f)$ , determinada experimentalmente para valores  $k$  en diferentes tipos de aislamiento (sólido, líquido y gaseoso).



Fuente: SCHON, K. High impulse voltage and current measurement techniques fundamentals - measuring instruments - measuring methods. New York: Springer, 2013. 264p.

Una buena aproximación a la forma básica de los valores determinados experimentalmente para el factor  $k$ , en función de la frecuencia de oscilación  $f$ , está dada por la *función de tensión de ensayo* (ecuación (1.33)).

La *función de tensión de ensayo*  $k(f)$ , será entonces, la base del método de filtrado estandarizado que permite caracterizar el esfuerzo efectivo en objetos sometidos a im-

pulsos atmosféricos de tensión con oscilaciones en la cresta, así como aquellos sometidos a cualquier tipo de ruptura dieléctrica.

Este método será descrito en breve (Capítulo 5).

### 1.4.1.3. Tolerancias e incertidumbres

Especificaciones consignadas en el *IEEE Std. 4-2013*, permiten los siguientes porcentajes de tolerancia en impulsos de tipo atmosférico:

- a) Valor cresta  $\pm 3\%$
- b) Tiempo de frente  $\pm 30\%$
- c) Tiempo de cola  $\pm 20\%$

#### SECCIÓN 1.5

### EL AISLADOR

Un aislador es un dispositivo cuya función es aislar eléctricamente conductores o equipos respecto a tierra o a otros conductores o equipos, además de proveer un soporte rígido o flexible a equipos o conductores [3].

Los aisladores usados durante el desarrollo del presente trabajo, están hechos a base de porcelana: el producto cerámico más noble y blanco de todos. La porcelana consiste en un agregado de caolín (silicato de aluminio puro,  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ), cuarzo (anhídrico silícico,  $SiO_2$ ) y feldespato (silicato alúmino-potásico,  $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ ). La sustancia arcillosa (caolín) mejora las cualidades térmicas; el cuarzo, las mecánicas y el feldespato las eléctricas. La porcelana utilizada en aisladores eléctricos está hecha a base de arcilla. Esta sustancia sustituye al caolín y al feldespato al proporcionar mayor compacidad que el primero y menor conductividad eléctrica que el segundo. La extraordinaria importancia que este material suministra en la fabricación de aisladores utilizados en líneas de transmisión y distribución, se da debido a la resistencia del mismo a los agentes atmosféricos, químicos y físicos de todo género; por ser un material absolutamente antihigroscópico e incombustible; por su precio moderado, así como la posibilidad que posee de adaptarse a casi todas las formas constructivas sin necesidad de juntas. No obstante, y quizá su mayor inconveniente, radica en su fragilidad, así como en su aumento de conductividad a mayor temperatura.

Si surge una *descarga por arco* de elevada potencia y ésta persiste por más que fracciones de segundo en las proximidades del aislador, éste queda destruido por fusión y resquebrajamiento de algunos fragmentos. Los arcos de pequeña intensidad, aún siendo

de larga duración (fracciones de minuto), no producen daño alguno en la porcelana al aire. Por el contrario, hallándose sumergida en aceite, la porcelana ofrece una gran sensibilidad a los arcos, los cuales originan en ella visibles surcos y grietas hasta de algunos milímetros de profundidad.

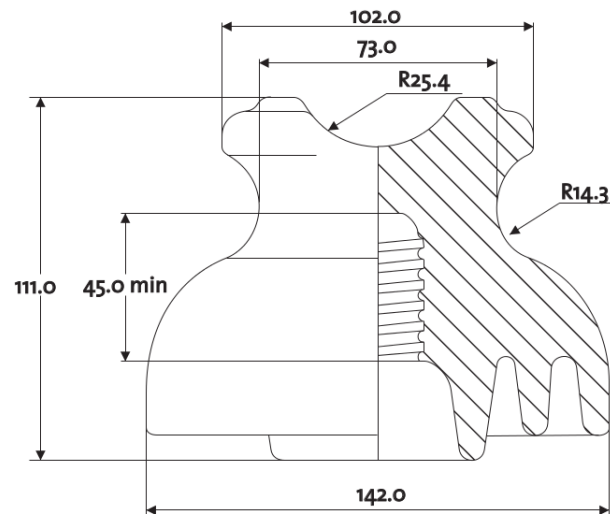
Las *tensiones de choque* son especialmente adecuadas para ensayar y hallar zonas débiles en aisladores de porcelana expuestos a tensiones de perforación.

Respecto a la rigidez dieléctrica de los materiales cerámicos, y de su recubrimiento vitrificado, las exigencias actuales son menos severas que antaño. La tensión de perforación debe ser naturalmente superior a la tensión de descarga superficial. Hay que asegurarse, no obstante, que el fuerte calentamiento producido por la radiación solar ( $60^{\circ}\text{C}$  a  $70^{\circ}\text{C}$ ) o por las corrientes superficiales no disminuyan peligrosamente la tensión disruptiva o conduzcan a una descarga térmica [6].

### 1.5.1 Aislador tipo espiga o pin

Es aquel que consta de uno o más cuerpos de aisladores, permanentemente conectados entre sí, los cuales requieren de una espiga incrustada para su instalación rígida, en una estructura soporte [3].

Figura 6: Aislador tipo pin clase *ANSI 55-4*.



Fuente: *GAMMA* - Catálogo de aisladores.

La *NTC 1285* define la distancia de fuga de un aislador, como la suma de las distancias más cortas, medidas a lo largo de la superficie aislante entre las partes conductoras,

cuando se realiza un ensayo de flameo en seco. Las superficies recubiertas con esmaltes semiconductores se consideran como superficies de fuga efectivas y las distancias de fuga sobre tales superficies, se incluyen en la distancia de fuga total. Así mismo, se define la distancia de arco en seco como la distancia más corta entre dos electrodos terminales a través del medio que rodea al aislador, o, como la suma de distancias entre electrodos intermedios, cuando el aislador está dispuesto para el ensayo de flameo en seco.

#### 1.5.1.1. Objeto de prueba

Como objeto de prueba, se tienen aisladores tipo pin clase *ANSI 55-4* de 13,2 kV marca *GAMMA*. Las características eléctricas de éstos se listan en la Tabla 1.

Tabla 1: Características eléctricas del aislador tipo pin clase *ANSI 55-4*, marca *GAMMA*.

<b>Distancias críticas [mm]</b>	<b>8195/8196</b>
Distancia de arco	127
Distancia de fuga	129
Altura mínima del espigo	127
<b>Valores eléctricos [kV]</b>	<b>8195/8196</b>
Tensión típica de aplicación	13,2
Flameo de baja frecuencia en seco	70/65
Flameo de baja frecuencia en húmedo	40/35
Flameo crítico al impulso positivo	110/105
Flameo crítico al impulso negativo	140/130
Tensión de perforación a baja frecuencia	95

Fuente: *GAMMA* - Catálogo de aisladores.

#### 1.5.1.2. Disposición de montaje

Según la *NTC 1285, Electrotecnia - Método de ensayo para aisladores de potencia eléctrica*, la disposición de montaje requerida para este tipo de ensayos será la descrita a continuación:

## 1.5. EL AISLADOR

---

A menos que se especifique de otra manera, la cruceta de soporte debe ser un tubo o miembro estructural metálico en posición horizontal, recto, liso y puesto a tierra, con un ancho horizontal no menor a 76 mm, ni mayor a 152 mm, y con una longitud de manera que el flameo no se inicie en sus extremos.

### 1.5.1.3. Montaje en espigo

Cuando se necesite un espigo independiente, el objeto de prueba se montará verticalmente sobre un espigo metálico de 25 mm de diámetro, con una longitud que garantice, que la menor distancia de arco en seco entre el electrodo superior y las partes metálicas conectadas a la cruceta de soporte, sea un 25 % mayor que la misma distancia al espigo. El espigo debe ser coaxial con el aislador. Los aisladores que tengan elementos de ensamble integrados para montaje en cruceta se deben montar de forma vertical y directamente en la cruceta de ensayo.

Figura 7: Aislador tipo pin clase *ANSI 55-4* - Disposición de montaje.



### 1.5.1.4. Electrodo energizado

El electrodo superior energizado o conductor debe ser una varilla redonda o tubo, colocado de manera tal, que éste forme ángulo recto en relación con la cruceta de soporte. La varilla debe tener un diámetro no menor a 13 mm y una longitud que garantice que el flameo no se inicie en sus extremos. El conductor se debe colocar en la ranura superior del objeto de prueba. Cuando esta ranura no exista, éste se colocará mediante otros mecanismos provistos para el soporte.

Si se va a usar un amarre, el conductor se asegurará por lo menos, con dos vueltas de alambre, cuyo diámetro no sea menor que el de un conductor calibre 8 AWG, con los extremos rígidamente atados alrededor del conductor a cada lado del aislador.

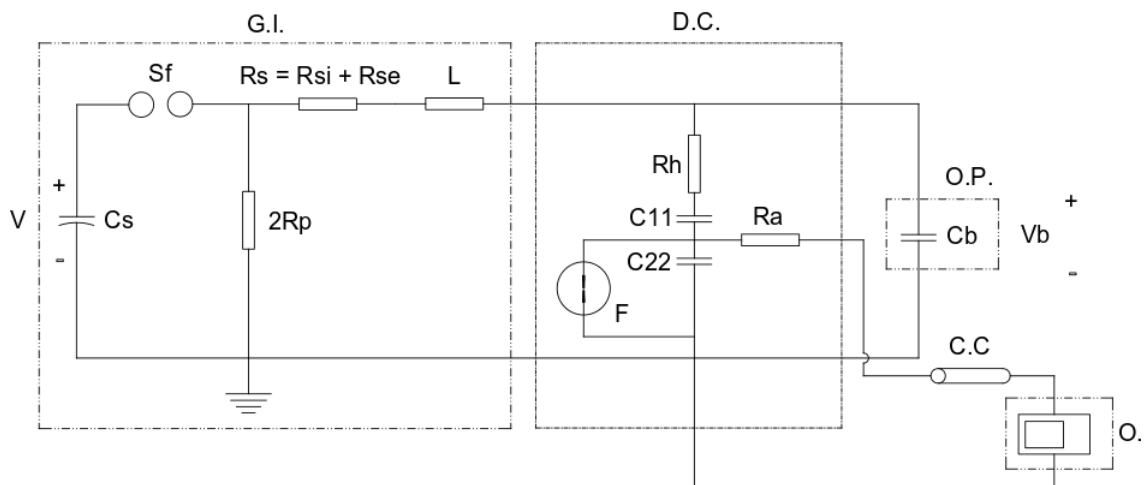
**1.5.1.5. Proximidad de otros objetos**

Ningún objeto diferente de aquellos que formen parte del montaje para el ensayo, puede estar a una distancia inferior a 1,5 veces la distancia de arco en seco, del objeto de prueba o del electrodo energizado. La distancia mínima permitida será de 914 mm.

## EQUIPO

El circuito de ensayo que permite recrear las condiciones de sobretensión a que serán expuestos los diferentes objetos de prueba, se halla esquematizado en la Figura 8.

Figura 8: Circuito de ensayo y medida.



Fuente: CASTELLANOS, H. D. Tensión de chispa para distancias de aislamiento hasta de un metro con impulsos de polaridad positiva, utilizando electrodos punta-punta y punta-placa. Tesis Magister en Potencia Eléctrica. Bucaramanga: UIS. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones., 2002. 165p.

donde:

- $G.I.$ : Generador de impulsos.
- $D.C.$ : Divisor capacitivo.
- $O.P.$ : Objeto de prueba.
- $C.C.$ : Cable coaxial.
- $O$ : Osciloscopio digital.
- $C_s$ : Grupo de capacitores del generador de impulsos de voltaje.
- $SF$ : Electrodo o gaps.
- $R_P$ : Resistencia paralelo de la cola.
- $R_S$ : Resistencia serie del frente.
- $R_{si}$ : Resistencia interna en serie.
- $R_{se}$ : Resistencia externa en serie (esterilla).
- $L$ : Inductancia serie del generador de impulsos.
- $R_h$ : Resistencia de amortiguamiento.
- $C_{11}$ : Capacitancia de alto voltaje.
- $C_{22}$ : Capacitancia de bajo voltaje.
- $R_a$ : Resistencia del terminal de acople.
- $C_b$ : Objeto de prueba (sistema de electrodos o aislador).

Dicho circuito comprende dos grandes elementos, además del sistema de electrodos y objeto de prueba.

### SECCIÓN 2.1

## GENERADOR DE IMPULSOS MULTI-ETAPA

El generador de impulsos, es un dispositivo que genera intencionalmente transitorios de alta tensión, permitiendo simular impulsos de tipo atmosférico y maniobra. Entre sus muchas aplicaciones, destacan aquellas pruebas de aislamiento para equipos de estación (seccionadores, transformadores, DPS, etc.), entre otras. La descarga ocurre, al liberarse de manera secuencial la energía acumulada previamente por múltiples capacitores en paralelo.

El generador usado para tal fin, es un generador *HAEFELY SGS 800/20* (Figura 9). Éste, permite obtener ondas de impulso de amplitudes entre los 10 kV y 800 kV. El equipo puede disgregarse en 8 etapas similares. Cada etapa dispone de dos resistores (serie y paralelo), un par de electrodos esféricos y un dual de condensadores, pudiendo generar hasta 100 kV. La Figura 10, muestra el circuito equivalente del generador de impulsos para una onda de tipo atmosférico.

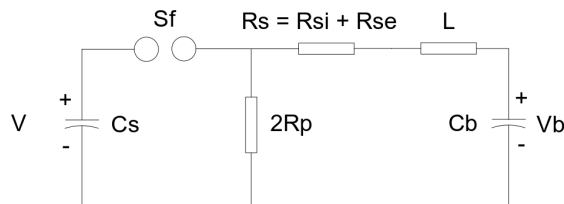
## 2.1. GENERADOR DE IMPULSOS MULTI-ETAPA

La consola de mando permite controlar manual o automáticamente el proceso de carga, descarga, disparo y captura de la onda de impulso generada.

Figura 9: Generador de impulsos *HAEFELY SGS 800/20*.



Figura 10: Circuito equivalente para el generador de impulsos tipo *SGS 800/20*.



Fuente: CASTELLANOS, H. D. Tensión de chispa para distancias de aislamiento hasta de un metro con impulsos de polaridad positiva, utilizando electrodos punta-punta y punta-placa. Tesis Magister en Potencia Eléctrica. Bucaramanga: UIS. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones., 2002. 165p.

Por otra parte, la unidad de carga está diseñada para operar de forma coordinada con el generador y su unidad de control. Ésta, da paso a la energía proveniente del circuito de potencia, haciendo uso de un transformador elevador de alta tensión (220 V/50 kV 3 kVA), un condensador de acople, un sistema de tiristores reguladores de carga (SCR's), un circuito D.C. rectificador y multiplicador de tensión, y una resistencia de

## 2.2. DIVISOR CAPACITIVO

amortiguamiento. La unidad es móvil no encapsulada para operación en interiores.

La Tabla 2, lista las principales características del Generador de impulsos.

Tabla 2: Características técnicas del generador de impulsos tipo *SGS 800/20*.

Máxima energía por etapa [ $kJ$ ]		2, 5
Capacitancia por etapa [ $nF$ ]		$500 \pm 5\%$
Rata máxima de repetición del impulso por minuto		2
Inductancia por etapa [ $\mu H$ ]		$\approx 2, 5$
Tensión máxima por etapa [ $kV$ ] ( $0 \leq h \leq 1000m$ )		100
Eficiencia para $C_S/C_b > 10$	I. A.	86 – 94 %
	I. M.	83 – 90 %
Resistencias $R_P[\Omega]$	I. A.	138
	I. M.	9, 6k
Resistencias $R_S[\Omega]$	I. A.	20
	I. M.	20
Resistencias $R_{se}[\Omega]$	I. A.	610
	I. M.	75k
Entrehierro [ $mm$ ]		41
Impulso del trigger para la unidad de carga [ $V$ ]		+200
Altura [ $m$ ]		3, 27

Fuente: RUGELES, J., and CHACÓN, J. Laboratorio de alta tensión - manual de prácticas. Bucaramanga: UIS, 2013. 89p.

### SECCIÓN 2.2

## DIVISOR CAPACITIVO

El divisor de tensión capacitivo  $CS$ , reduce la magnitud de tensión liberada por el generador, evitando distorsionar en demasía la forma de onda capturada por el instrumento

## 2.2. DIVISOR CAPACITIVO

---

de medida y, posibilitando a su vez, dicha captura. Así mismo, éste permite observar y medir a escala, la señal resultante del impulso aplicado, garantizando una relación bastante precisa y una mínima deformación y retardo de la onda.

Eléctricamente, éste dispone de un circuito  $RC$ , y una base o soporte, sobre el cual se hallan sustentados una columna de tres condensadores en paralelo ( $2000\text{ pF}$ ), y una resistencia de amortiguamiento de  $100\ \Omega$ . La sección de Baja Tensión, posee una salida, conectada a un cable coaxial que transmite la señal captada por el instrumento de medida. Sobre la cubierta metálica de esta sección se halla el tornillo de puesta a tierra del divisor. El divisor, es un divisor *HAEFELY*, constructivamente compensado a la entrada con unidades de resistencias conectadas en serie al conjunto de capacitancias, esto último, para evitar oscilaciones en el frente de la señal. La Tabla 3, lista las principales características del divisor.

Figura 11: Divisor de tensión capacitivo *HAEFELY CS 100*.



### 2.3. RESISTOR SHUNT

Tabla 3: Características técnicas del divisor capacitivo *HAEFELY CS 100*.

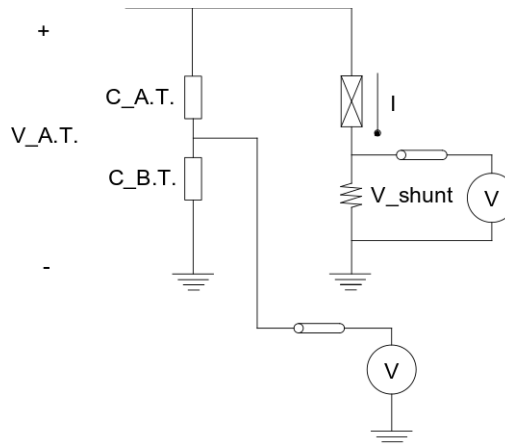
Tensión máxima de medida [ $kV$ ]	I. A. +	1000
	I. M. +	900
Relación	720,5 : 1	
Capacitancia unidad A. T. [ $pF$ ]	652,3	
Capacitancia unidad B. T. [ $nF$ ]	468,0	
Terminal de acople [ $\Omega$ ]	75	
Resistencia de amortiguamiento [ $\Omega$ ]	$100 \pm 10\%$	
Tiempo de respuesta [ $ns$ ]	< 100	
Altura [ $m$ ]	3,5	

Fuente: RUGELES, J., and CHACÓN, J. Laboratorio de alta tensión - manual de prácticas. Bucaramanga: UIS, 2013. 89p.

#### SECCIÓN 2.3

### RESISTOR SHUNT

Figura 12: Circuito de medida - medición de corriente.



### 2.3. RESISTOR SHUNT

Para su registro, las corrientes de impulso generadas en laboratorios de ensayo, requieren el uso de resistores shunt. Éstos, constituidos por diferentes cargas resistivas a través de las cuales se ha de derivar la corriente, son en verdad, cilindros metálicos con bridas de acoplamiento y conectores coaxiales de medición. Generalmente, el resistor shunt, conocido previamente, es usado para determinar la intensidad de corriente eléctrica que ha de fluir a través de la carga, por medio de la diferencia de potencial que surge en ésta.

Entonces, la intensidad de corriente estará dada por el cociente tensión - resistor (Figura 12 - ecuación (2.1)).

$$I = \frac{V_{shunt}}{R_{shunt}} \quad (2.1)$$

Tabla 4: Características técnicas del resistor shunt *SH Q 0.47*.

<i>Cage shunt SH Q</i>	
<i>Tipo</i>	<i>SH Q 0.47</i>
Caída de tensión nominal $U_m$	500 V
Caída de tensión Máx. $U_{m\acute{a}x}$	1600 V
Corriente pico nominal $I_n$	1060 A
Corriente pico Máx. $I_{m\acute{a}x}$	3400 A
Resistencia $R$	0,47 $\Omega$
Precisión de la resistencia	$\pm 5\%$
Tiempo de respuesta parcial $T_\alpha$	$< 15\ ns$
Frecuencia de repetición a $U_{m\acute{a}x}/I_n$	1,5 s
Frecuencia de repetición a $U_{m\acute{a}x}/I_{m\acute{a}x}$	16 s
Peso/shunt	1,3 kg
Dimensiones	H 155 mm, $\phi$ 64 or $\phi$ 100 mm

Fuente: RUGELES, J., and CHACÓN, J. Laboratorio de alta tensión - manual de prácticas. Bucaramanga: UIS, 2013. 89p.

SECCIÓN 2.4

INSTRUMENTO DE MEDIDA ScopeMeter *Series II*

El instrumento de medida ScopeMeter combina las posibilidades de un osciloscopio digital de fácil empleo con la versatilidad de un multímetro digital. Cuando se selecciona una función de medida, el instrumento escoge automáticamente la mejor configuración para analizar y comparar formas de onda complejas o, simplemente, para leer niveles de tensión.

Figura 13: Fluke 105 ScopeMeter.



Entre las características del instrumento de medida ScopeMeter se incluyen:

- Osciloscopio digital.
- Multímetro digital (DMM) de 5 MHz, con lectura de  $3\frac{2}{3}$  dígitos.
- Menú de medición para una configuración rápida.
- Función Auto Set<sup>TM</sup> continuo para medir señales mediante sonda con manos libres.
- Gran capacidad de memoria para configuraciones del panel frontal, formas de onda y pantallas.

- Función TrendPlot<sup>TM</sup> Min Max con lectura de tiempo para registro de larga duración.
- Puerto de interfaz óptica RS-232, aislamiento 600 V.
- Tecla de información instantánea.

### 2.4.1 Ajuste de amplitud

A fin de ajustar la atenuación de la forma de onda de entrada, se dispondrá de 16 diferentes rangos. Una sonda 1:1 podrá ajustar desde 1 mV a un máximo de 100 V por división. Una sonda 10:1 podrá ajustar desde 10 mV a un máximo de 1 kV por división. La amplitud podrá variar en incrementos de 1, 2 y 5 (por ejemplo, 100 mV, 200 mV y 500 mV). La línea superior de la cabecera de la pantalla muestra el rango y tipo de sonda para cada entrada.

Cuando se utiliza una sonda 10:1 con el rango de 10 mV o 20 mV, el promediado se activará automáticamente (la pantalla muestra **AVG 4**).

### 2.4.2 Ajuste de la base de tiempos

Los ajustes disponibles dependen del modo de adquisición, y son los siguientes:

Recurrent (Recurrente)	5 ns (10 ns)/DIV - 1 s/DIV*
Single (Única)	100 ns/DIV - 1 s/DIV
Roll (Desplazamiento)	2 s/DIV - 60 s/DIV
*Fluke 91, 92, 96 y 99:	10 ns/DIV
*Fluke 105:	5 ns/DIV

La base de tiempos se puede variar en incrementos de 1, 2 y 5 (por ejemplo, 10 ns, 20 ns y 50 ns).

---

# 3

---

## PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO

---

A continuación, se describen los procedimientos de ensayo llevados a cabo durante el desarrollo del presente estudio.

### SECCIÓN 3.1

#### TENSIÓN DE DESCARGA DISRUPTIVA $V_{50}$

El *IEEE Std. 4-2013*, define la tensión de chispa  $V_{50}$  como la tensión de descarga disruptiva que presenta una probabilidad del 50 % de ocasionar flameo en un aislamiento, esto es: la mitad de las tensiones aplicadas provocarán ruptura en dicho aislamiento. Ésta, también es conocida como tensión crítica de flameo (*CFO*) y es de suma importancia en procesos de coordinación de aislamiento.

Particularmente, y para los niveles de aislamiento *BIL* y *SIL*, en función de la tensión de chispa  $V_{50}$ , se tiene:

$$BIL = 0,96 * V_{50} \quad (3.1)$$

$$SIL = 0,936 * V_{50} \quad (3.2)$$

Existen diferentes procedimientos experimentales que permiten determinar la tensión de chispa de un objeto de prueba:

1. Ensayos multi-nivel.

2. Ensayos UP and DOWN.
3. Ensayos UP and DOWN extendidos.

No obstante, este informe sólo contemplará la metodología propuesta por el método de ensayo *UP and DOWN*.

### **3.1.1** Método de ensayo *UP and DOWN*

El método de ensayo *UP and DOWN* (clase 2) [7], comúnmente usado en pruebas realizadas mediante impulsos de tipo atmosférico y maniobra, permite estimaciones bastante confiables para valores de tensión de chispa, cuando la población muestreada presenta un comportamiento normalmente distribuido.

La prueba requiere dos parámetros iniciales:

1. Tensión inicial  $V_0$ .
2. Incremento de tensión  $\Delta V$ .

Puesto que es un método totalmente aleatorio y variable, y la literatura disponible relacionada a este tipo de ensayo no establece un procedimiento a seguir para el cálculo de dichos valores. Éstos deben ser estimados, con base en experiencias previas desarrolladas para configuraciones electródicas similares.

#### **3.1.1.1. Tensión inicial $V_0$**

El valor de tensión inicial  $V_0$ , afecta en demasía el desarrollo del método de ensayo. Así, para valores mucho menores al valor de tensión correspondiente al primer impulso efectivo (primer impulso cuyo valor de tensión resulta en una descarga disruptiva), han de sucederse varias descargas, antes de obtener un flameo. De igual manera, si este valor es extremadamente alto o preciso, se pierde confianza en los resultados. Por ello, es recomendable la existencia de cuatro o más pasos de tensión antes de éste.

Se propone entonces, una ecuación netamente empírica para el cálculo de dicho valor, basada en las múltiples pruebas realizadas en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander:

$$V_0 = V_{50}^* - [(1,5 \text{ a } 3) * (\sigma_{IA}) * V_{50}^*] \quad (3.3)$$

donde,

$V_{50}^*$  es la tensión de chispa esperada para la configuración electródica en estudio.  
 $\sigma_{IA}$  es la desviación estándar para un impulso atmosférico (3 %).

### 3.1.1.2. Incremento de tensión $\Delta V$

El *IEEE Std. 4-2013* recomienda, para impulsos de tipo atmosférico, incrementos de tensión de 1,5% a 3% el valor de tensión de chispa inicial.

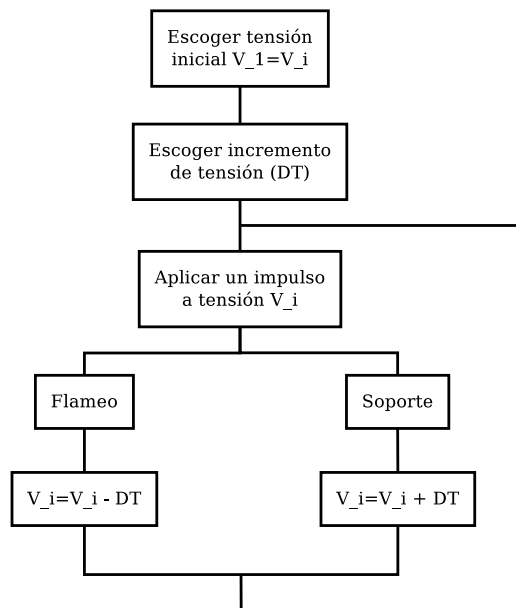
$$\Delta V = 0,015(V_{50}^*) \text{ a } 0,03(V_{50}^*) \quad (3.4)$$

### 3.1.1.3. Metodología de ensayo

Una vez determinadas las condiciones iniciales de la prueba, se da inicio a ésta, aplicando un primer impulso de magnitud  $V_0$ . Si éste no ocasiona falla alguna en el aislamiento del objeto de prueba, se aplica un segundo impulso de mayor magnitud ( $V_0 + \Delta V$ ); si por el contrario, el aislamiento presenta falla, se debe disminuir el valor de éste ( $V_0 - \Delta V$ ). Así, partiendo del primer impulso efectivo, y hasta completar el número de impulsos requeridos (no menor a 20), se lleva a cabo la prueba. El tiempo entre los diferentes niveles de tensión, debe ser tal, que garantice un mínimo de condiciones equivalentes para cada uno de ellos (generalmente 1 minuto).

Este ensayo, requiere un registro detallado de los valores medidos durante la prueba: condiciones atmosféricas, tensión aplicada por etapa, etc.

Figura 14: Esquema de procedimiento secuencial para la metodología *UP and DOWN*.



Fuente: KUFFEL, E., ZAENGL, W., and KUFFEL, J. High voltage engineering - fundamentals. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. 552p.

El procedimiento secuencial de dicha prueba se ilustra en la Figura 14.

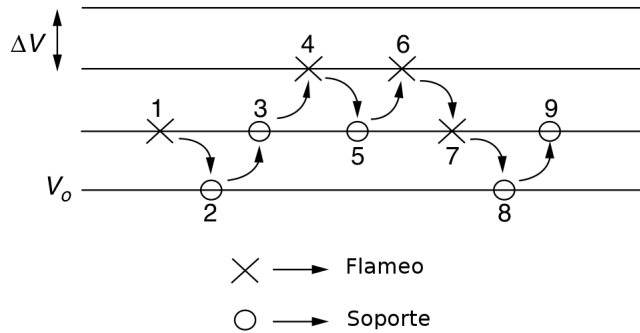
La Figura 15, muestra dicha secuencia para 9 impulsos de tensión aplicados a el objeto bajo prueba.

Según el *IEEE Std. 4-2013*, se requiere un mínimo de 20 impulsos ( $n = 20$ ) para establecer la tensión de chispa de un objeto de prueba particular.

En la práctica, los puntos que expresan la probabilidad de soporte, son graficados a escala probabilística. Las tensiones de descarga de 50 % y 10 %, se obtienen directamente de esta gráfica. Este método requiere pocos impulsos y por tanto, es usado comúnmente en la industria. No obstante, es poco preciso al determinar la desviación  $\sigma$ . Alternativamente, la tensión  $V_{10}$  puede ser obtenida de la  $V_{50}$ , mediante la siguiente ecuación:

$$V_{10} = V_{50} * (1 - 1,3z) = 0,96 * V_{50} \quad (3.5)$$

Figura 15: Ilustración de nueve impulsos aplicados por medio de la metodología secuencial *UP and DOWN*.



Fuente: KUFFEL, E., ZAENGL, W., and KUFFEL, J. High voltage engineering - fundamentals. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. 552p.

### 3.1.2 Tratamiento estadístico de resultados

Existen diversos métodos que permiten realizar el estudio estadístico necesario para determinar la tensión de ruptura de un objeto de prueba. Sin embargo, en este trabajo sólo se hará uso del consignado en el *IEEE Std. 4-2013*.

Según éste, la tensión de ruptura está dada por:

$$V_{50}^* = \frac{\sum (k_i V_i)}{n} \quad (3.6)$$

donde,

$k_i$  : número de impulsos aplicados a un mismo nivel de tensión (flameos y soportes).

$V_i$  : tensión medida para cada nivel, vista desde A. T. [kV].

$n$  : número total de impulsos aplicados, a partir del primer impulso efectivo.

#### SECCIÓN 3.2

### ENSAYO DE TENSIÓN NO DISRUPTIVA DE IMPULSO

El ensayo de tensión no disruptiva de impulso se realiza para determinar la tensión específica que puede soportar el objeto de prueba.

Este ensayo se lleva a cabo, aplicando tres impulsos consecutivos al objeto de prueba. La tensión cresta de cada impulso, no debe ser menor al valor cresta del impulso de tensión no disruptiva especificado. La polaridad de cada impulso será aquella que genere menor tensión de flameo sobre el objeto de prueba [3]. De no presentar falla alguna, el objeto dará sustento a los requerimientos del ensayo [7].

#### SECCIÓN 3.3

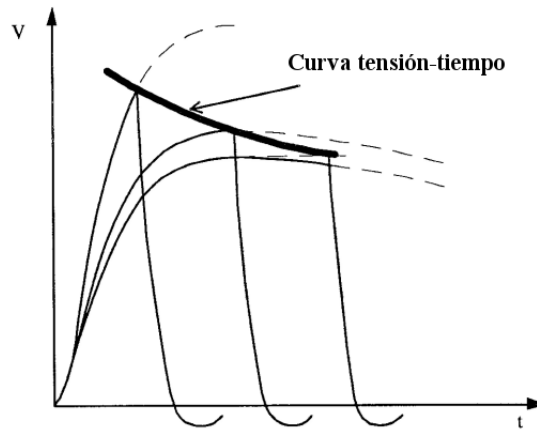
### CURVAS TENSIÓN-TIEMPO

El comportamiento lineal del factor de tensión de ensayo,  $k(f)$ , puede explicarse en virtud de la forma que presentan las curvas tensión-tiempo, comúnmente usadas en estudios de coordinación de aislamiento.

Las curvas tensión-tiempo (Figura 16), se obtienen aplicando múltiples impulsos de tipo atmosférico, a niveles de tensión crecientes, bajo la misma forma de onda. El procedimiento es bastante simple: se aplican magnitudes de tensión cada vez mayores y se registra el tiempo de ruptura. Luego, se unen los puntos determinados por el valor cresta y tiempo de corte de cada impulso. El valor asintótico de la curva, será igual al valor  $CFO$  (tensión crítica de flameo). Para aislamientos donde la rigidez dieléctrica da el aire, el  $CFO$  tendrá lugar en tiempos cercanos a  $16 \mu s$ . Algunos tiempos de ruptura pueden llegar a exceder este valor, sin llegar a modificar en demasía el valor cresta de la tensión crítica de flameo. La Figura 17 muestra un ejemplo práctico de una de estas curvas.

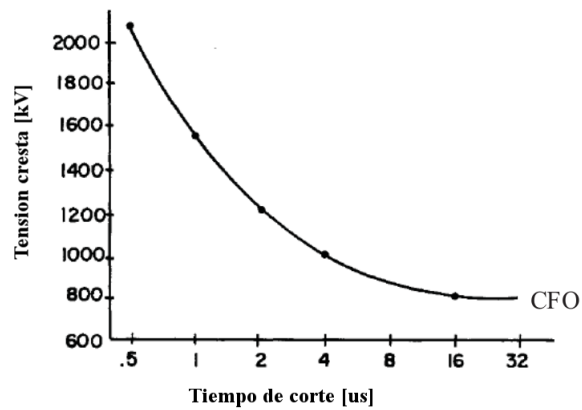
### 3.3. CURVAS TENSIÓN-TIEMPO

Figura 16: Curva tensión-tiempo.



Fuente: IEEE. Standard for High-Voltage Testing Techniques. Std. 4. Redline, 2013.

Figura 17: Ejemplo de curva tensión-tiempo.



Fuente: FILIPOVIĆ-GR CIĆ, D., FILIPOVIĆ-GR CIĆ, B., and UGLE SIĆ, I. Lightning critical flashover voltage of high voltage insulators: Laboratory measurements and calculations. International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E), 2012, Vol. 7, N.2.

---

# 4

## PROCEDIMIENTO DE CORRECCIÓN DE LA TENSIÓN DE CHISPA $V_{50}$ POR CONDICIONES ATMOSFÉRICAS

---

Según Paschen, para campos uniformes y con pequeñas separaciones entre electrodos, la tensión de descarga se da en función de la presión y la distancia de separación entre los mismos. Los resultados obtenidos durante ensayos de laboratorio difieren en cada caso, dependiendo de las diferentes condiciones atmosféricas presentes durante éstos. Por ello, cada prueba debe corregirse a condiciones atmosféricas estandarizadas.

### SECCIÓN 4.1

#### CONDICIONES ATMOSFÉRICAS ESTÁNDAR

Las condiciones atmosféricas estandarizadas para llevar a cabo el procedimiento de corrección de la tensión de chispa, son [7]:

- a) Temperatura  $t_0 = 20^\circ\text{C}$
- b) Presión  $b_0 = 101,3 \text{ kPa (760 mm Hg)}$
- c) Humedad absoluta  $h_0 = 11 \text{ g/m}^3$

SECCIÓN 4.2

**FACTORES DE CORRECCIÓN**

Las condiciones atmosféricas afectan en demasía las descargas disruptivas en un aislamiento externo. Usualmente, la tensión de descarga disruptiva para un determinado camino a través del aire, aumenta al acentuarse la densidad del aire y/o la humedad. Sin embargo, cuando la humedad relativa excede el 80 %, la tensión de descarga disruptiva se hace un tanto irregular, especialmente cuando dicha descarga ocurre sobre una superficie aislante.

Aplicando factores de corrección, las medidas de tensión de descargas disruptivas bajo condiciones reales (temperatura  $t$ , presión  $b$ , humedad  $h$ ) pueden ser trocadas en valores obtenidos bajo condiciones atmosféricas estándar ( $t_0$ ,  $b_0$ ,  $h_0$ ). Contrariamente, una prueba a tensión específica bajo determinadas condiciones de referencia, puede ser trocada en un valor equivalente a condiciones de prueba reales.

Según la distancia de separación entre electrodos, dos métodos han sido desarrollados para corregir este tipo de pruebas debido a condiciones atmosféricas:

1. Corrección atmosférica mediante el factor  $K$  (método recomendado para equipos relativamente nuevos).
2. Corrección atmosférica mediante los factores  $k_d$  y  $k_h$  (método alternativo para separaciones hasta de un metro entre electrodos).

Debido a que la separación entre electrodos para los montajes requeridos no excede un metro de distancia, sólo se hará uso del método 2.

**4.2.1 Corrección atmosférica por factores  $k_d$  y  $k_h$**

Existen dos factores a tener en cuenta:

1. El factor de corrección por densidad de aire  $k_d$ .
2. El factor de corrección por humedad  $k_h$ .

La tensión de chispa será proporcional a  $k_d/k_h$ .

De no especificarse lo contrario, la tensión a ser aplicada durante la prueba de resistencia en un aislamiento externo se determina multiplicando la tensión especificada del

## 4.2. FACTORES DE CORRECCIÓN

---

elemento por el factor  $k_d/k_h$ , es decir,

$$V_{50}^* = \frac{k_d}{k_h} * V_{50} \quad (4.1)$$

donde,

$V_{50}$  es la tensión de chispa corregida bajo condiciones atmosféricas estándar.

$V_{50}^*$  es la tensión de chispa estándar del elemento de prueba.

De manera similar, las tensiones de descargas disruptivas medidas se corrigen a valores usados en referencias atmosféricas estándar, dividiendo por  $k_d/k_h$ .

Según la ecuación (4.1), la humedad incrementará la tensión de chispa. Sin embargo, si la humedad es muy alta, la tensión de flameo en aisladores (por ejemplo) se reduce debido a la creación de caminos conductores por la deposición de partículas de agua sobre el aislador. Este fenómeno se presenta sobre todo, en presencia de neblina. El efecto causado por la humedad será otro, si el aislador se encuentra contaminado.

El informe del ensayo siempre debe contener las condiciones atmosféricas presentes durante éste y, debe indicarse si se han aplicado o no, correcciones a dicho ensayo.

### 4.2.1.1. Factores de corrección por densidad de aire y humedad

El factor de corrección por densidad de aire  $k_d$ , está dado por:

$$k_d = \left(\frac{p}{p_0}\right)^m * \left(\frac{273 + t_0}{273 + t}\right)^n \quad (4.2)$$

donde,

$p$  es la presión atmosférica.

$t$  es la temperatura en °C bajo condiciones de prueba.

$p_0$  es la presión atmosférica a condiciones normalizadas (760 mm Hg).

$t_0$  es la temperatura en °C a condiciones normalizadas (20°C).

De manera similar, el factor de corrección por humedad está dado por:

$$k_h = k^w \quad (4.3)$$

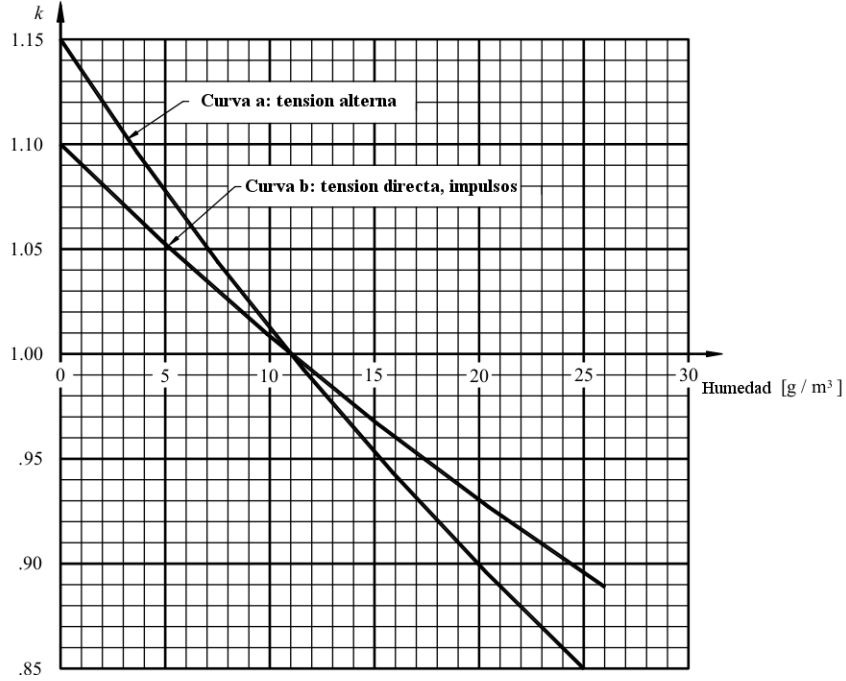
En la Figura 18, la constante  $k$ , se presenta en función de la humedad absoluta. En ésta, las curvas  $a$  y  $b$ , se aplican de acuerdo al tipo de tensión requerida. Los exponentes  $m$ ,  $n$  y  $w$ , dependen del tipo y polaridad de la tensión, así como de la distancia  $d$  de separación entre electrodos (Tabla 5 y Figura 19). A falta de información más concreta,  $m$  y  $n$  se asumen iguales.

## 4.2. FACTORES DE CORRECCIÓN

Figura 18: Factor de corrección por humedad  $k$ , en función de la humedad absoluta.

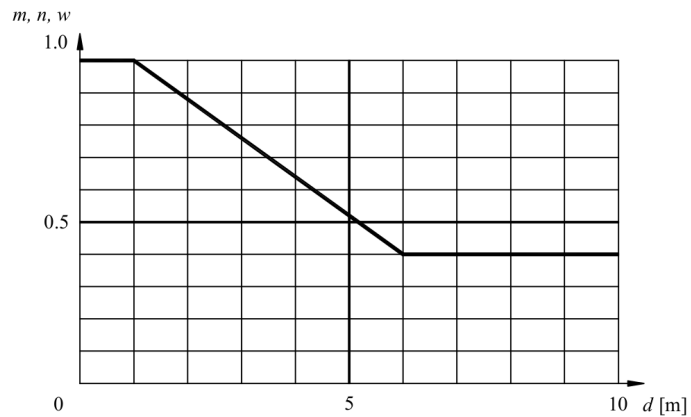
Curva a: Tensiones alternas.

Curva b: Tensiones continuas e impulsos.



Fuente: IEEE. Standard for High-Voltage Testing Techniques. Std. 4. Redline, 2013.

Figura 19: Exponentes  $m$  y  $n$  para corrección por densidad de aire, y  $w$  para corrección por humedad, en función de la distancia de separación entre electrodos, en metros.



Fuente: IEEE. Standard for High-Voltage Testing Techniques. Std. 4. Redline, 2013.

## 4.2. FACTORES DE CORRECCIÓN

Las configuraciones de electrodos de la Tabla 5 presentan las siguientes características:

- esfera-esfera: la distribución del campo es esencialmente uniforme.
- punta-punta: la distribución del campo es no-uniforme, pero, esencialmente, presenta una distribución de tensión simétrica.
- punta-placa: los electrodos punta-placa, así como objetos de prueba con características similares a estos (aisladores de soporte), presentan un campo no-uniforme con distribuciones asimétricas de tensión.

Tabla 5: Aplicación de los factores de corrección atmosféricos.

T. Prueba	Configuración	Polaridad	Exponentes $m$ y $n$	Corrección por humedad	
				Factor $k$	Exponente $w$
D. C.	Esfera-esfera	+	1,0	Ver Figura 18 (Curva b)	0
		-			0
	Punta-punta	+			1,0
		-			1,0
	Punta-placa	+			1,0
		-			0
A. C.	Esfera-esfera	~	1,0	Ver Figura 18 (Curva a)	0
	Punta-punta	~	Ver Figura 19		Ver Figura 19
	Punta-placa	~	Ver Figura 19		Ver Figura 19
I. A.	Esfera-esfera	+	1,0	Ver Figura 18 (Curva b)	0
		-			0
	Punta-punta	+			1,0
		-			0,8
	Punta-placa	+			1,0
		-			0
I. M.	Esfera-esfera	+	1,0	Ver Figura 18 (Curva b)	0
		-	1,0		0
	Punta-punta	+	Ver Figura 19		Ver Figura 19
		-	0 (Ver Nota 1)		0 (Ver Nota 1)
	Punta-placa	+	Ver Figura 19		Ver Figura 19
		-	0 (Ver Nota 1)		0 (Ver Nota 1)

Fuente: IEEE. Standard for High-Voltage Testing Techniques. Std. 4. Redline, 2013.

Para cualquier configuración de electrodos no consignada o mencionada anteriormente, sólo el factor de corrección por densidad de aire, utilizando los exponentes  $m = n = 1$ , sin aplicar el factor de corrección por humedad, deberá ser aplicado.

### 4.3. MEDICIÓN DE PARÁMETROS ATMOSFÉRICOS

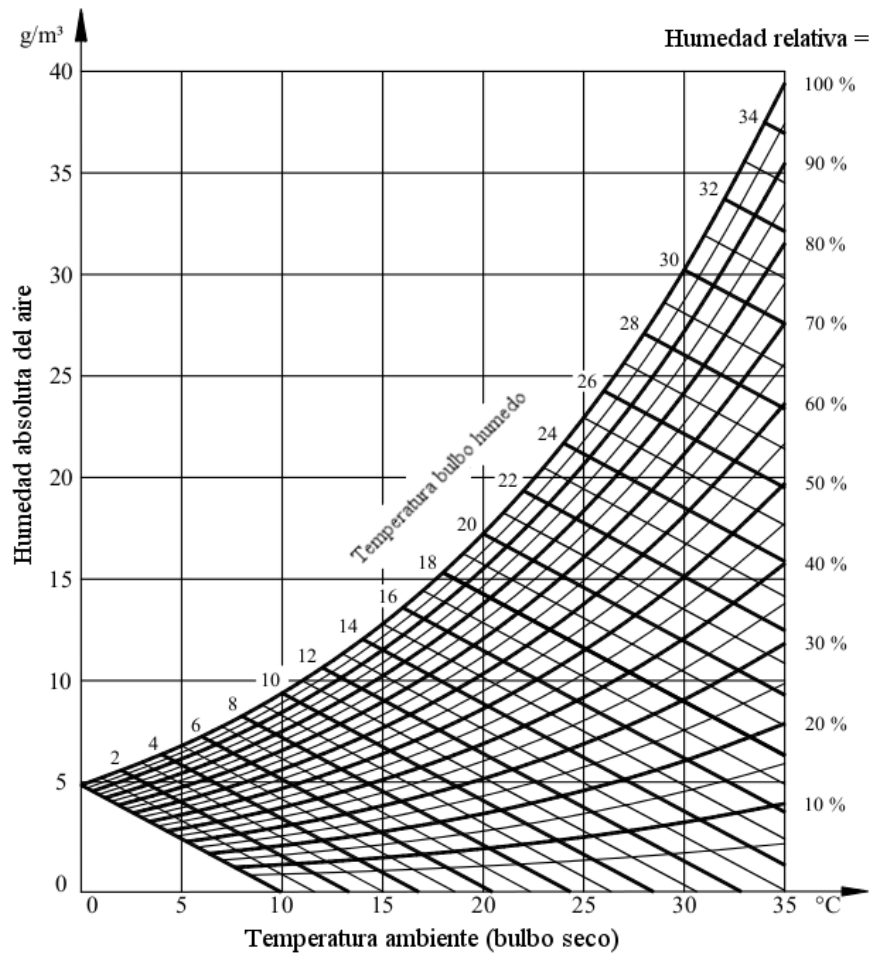
Para pruebas en húmedo, deberá ser aplicado el factor de corrección por densidad de aire, mas no el factor de corrección por humedad. Para pruebas por contaminación artificial, ningún factor deberá aplicarse.

#### SECCIÓN 4.3

### MEDICIÓN DE PARÁMETROS ATMOSFÉRICOS

#### 4.3.1 Humedad

Figura 20: Humedad absoluta del aire en función de lecturas en seco y húmedo de los termómetros del higrómetro (sólo a presión estándar).



Fuente: IEEE. Standard for High-Voltage Testing Techniques. Std. 4. Redline, 2013.

### 4.3. MEDICIÓN DE PARÁMETROS ATMOSFÉRICOS

---

La humedad, preferiblemente, debe ser determinada por medio de un medidor que muestre directamente la humedad absoluta, con un error no mayor a  $1 \text{ g/m}^3$ . Mediciones de humedad relativa y temperatura ambiente pueden ser usadas para determinar la humedad absoluta, bajo condiciones de exactitud tales, que el valor determinado para la humedad absoluta a partir de éstas, esté dentro del rango mencionado anteriormente.

La medición de la humedad absoluta también puede llevarse a cabo por medio de un higrómetro constituido por dos termómetros de precisión ventilados: uno seco y otro húmedo. La humedad absoluta en función de las lecturas de los dos termómetros, se determina por medio de la Figura 20, la cual, además, permitirá determinar la humedad relativa.

Tabla 6: Contenido de vapor de agua del aire saturado.

Temperatura °C	Vapor de agua $\text{g/m}^3$
-10	2,10
0	4,80
10	9,40
20	17,33
21	17,70
22	19,00
23	20,00
24	21,30
25	22,67
26	23,67
27	25,00
28	26,67
29	28,33
30	30,33
31	31,67
32	32,67

Fuente: RUGELES, J. Conceptos básicos en técnicas de la alta tensión. Bucaramanga: UIS, 1984. 90p.

Existen otros métodos para determinar la humedad absoluta y pueden ser utilizados

si se logra demostrar que éstos son suficientemente precisos para ello. Por ejemplo, la Tabla 6, muestra el contenido de vapor de agua del aire saturado, en función de la temperatura. Esta tabla permite hallar la humedad absoluta, mediante medidas de temperatura ambiente y humedad relativa. Para ello, es necesario interpolar un valor de humedad ( $\text{g}/\text{m}^3$ ) para la temperatura ambiente medida y, luego, multiplicar éste valor por el porcentaje de humedad relativa obtenido del medidor.

#### **4.3.2** Temperatura

La temperatura ambiente debe medirse con una incertidumbre expandida de no más de  $1^\circ\text{C}$ .

#### **4.3.3** Presión absoluta

La presión absoluta ambiente debe ser medida con una incertidumbre expandida no mayor a  $0,2 \text{ kPa}$

---

## AJUSTE DE CURVAS

---

El análisis de las diferentes señales obtenidas al aplicar impulsos de tensión de tipo atmosférico, requiere técnicas de ajuste que permitan extraer una señal base de aquella con oscilaciones y sobretensiones.

A continuación, se describe brevemente cada una de las técnicas usadas para tal fin.

### SECCIÓN 5.1

#### AJUSTE POR MEDIO DE LAS CONSTANTES CARACTERÍSTICAS DEL GENERADOR DE IMPULSOS

En un estudio previo sobre el Generador de Impulsos de la Universidad Industrial de Santander [8], el autor realiza el desarrollo matemático y circuital referente a éste, definiendo y caracterizando, los parámetros generales que definen un impulso atmosférico de tensión. Los resultados extractados de este estudio (amplitud, constantes de amortiguamiento, etc.), sólo son válidos para dicho generador, pues su desarrollo implica elementos particulares (resistencias, capacitancias, etc.), que pueden llegar a variar, según el tipo y fabricante.

La ecuación general que caracteriza el comportamiento de un impulso de tensión, aplicado a un objeto por medio del Generador de Impulsos de la Universidad Industrial de Santander, es:

$$V(t) = \frac{V_0 \cdot A}{2K} [e^{-(1-K)\alpha t} - e^{-(1+K)\alpha t}] \quad (5.1)$$

donde,

$V_0$ , es la tensión cresta inicial aplicada al impulso,

$$\frac{A}{2K} = 1,00123796 \quad (5.2)$$

$$K = 0,98717278 \quad (5.3)$$

$$\alpha = 1,12393982 * 10^6 \text{ 1/s} \quad (5.4)$$

Debido a la existencia de un único ejemplar, sólo disponible en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander, se anexa parte de dicho estudio (Apéndice A).

**SECCIÓN 5.2**

**MÉTODO DE AJUSTE PRONY**

Buscando dar explicación al proceso de expansión en algunos gases, en 1795, Gaspard Riche de Prony desarrolla un método que permite extraer información de una señal uniformemente espaciada, ajustando los datos muestreados a una suma de términos exponenciales complejos.

Sea  $y(t)$  un vector de  $N$  muestras igualmente espaciadas, el método ajusta una función  $\hat{y}(t)$ , a la señal  $y(t)$  muestreada, donde,

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^m A_i e^{\alpha_i t} \cos(2\pi f_i t + \phi_i) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5.5)$$

Haciendo uso del teorema de *Euler*,

$$\cos(2\pi f_i t + \phi_i) = \frac{e^{j(2\pi f_i t + \phi_i)} + e^{-j(2\pi f_i t + \phi_i)}}{2} = \frac{e^{j2\pi f_i t} * e^{j\phi_i}}{2} + \frac{e^{-j2\pi f_i t} * e^{-j\phi_i}}{2} \quad (5.6)$$

Reemplazando (5.6) en (5.5),

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} A_i e^{j\phi_i} e^{(\alpha_i + j2\pi f_i)t} \quad (5.7)$$

En términos de las  $N$  muestras, y para  $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ , con  $t = \Delta t * k$ ,

$$y[k] = \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} A_i e^{j\phi_i} e^{(\alpha_i + j2\pi f_i)\Delta t * k} \quad (5.8)$$

o,

$$y[k] = \sum_{i=1}^m C_i \mu_i^k \quad (5.9)$$

donde,

- $A_i$  es la amplitud de la componente  $i$ .
- $\alpha_i$  es el factor de amortiguamiento de la componente  $i$  en  $1/s$ .
- $\phi_i$  es el ángulo de fase de la componente  $i$ .
- $f_i$  es la frecuencia de oscilación de la componente  $i$  en  $Hz$ .
- $m$  es el total de componentes exponenciales amortiguadas (modo).
- $\Delta t$  es el periodo de muestreo en  $\mu Hz$ .

$$C_i = \frac{A_i}{2} e^{j\phi_i} \quad (5.10)$$

$$\mu_i = e^{(\alpha_i + j2\pi f_i)\Delta t} \quad (5.11)$$

Entonces,  $m$  diferentes autovalores  $\mu_i$ , y amplitudes  $C_i$ , pueden estimarse usando la técnica de mínimos cuadrados sobre las  $N$  muestras del vector adquirido inicialmente (ecuación (5.12)).

$$E = \sum_{k=0}^{N-1} (e_k)^2 = \sum_{k=0}^{N-1} (y_k - \hat{y}_k)^2 \quad (5.12)$$

El método de ajuste Prony permite dar solución a estas ecuaciones, en tres sencillos pasos:

1. Construir un modelo de predicción lineal (discretizado) a partir de los datos muestreados y dar solución a éste.
2. Obtener las raíces (autovalores) del polinomio característico generado por el modelo de predicción lineal.
3. Dar solución al conjunto de ecuaciones lineales iniciales.

El modelo de predicción lineal es generado a partir de la ecuación (5.5), como:

$$y[k] = a_1y[k - 1] + a_2y[k - 2] + \dots + a_my[k - m] \quad (5.13)$$

La ecuación (5.13), puede ser escrita como:

$$y[m] = a_1y[m - 1] + a_2y[m - 2] + \dots + a_my[0] \quad (5.14)$$

para,  $k = m, m + 1, m + 2, \dots, N - 1$ .

En forma matricial,

$$\begin{bmatrix} y[m] \\ y[m + 1] \\ y[m + 2] \\ \vdots \\ \vdots \\ y[N - 1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y[m - 1] & y[m - 2] & \dots & y[0] \\ y[m] & y[m - 1] & \dots & y[1] \\ y[m + 1] & y[m] & \dots & y[2] \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ y[N - 2] & y[N - 3] & \dots & y[N - m - 1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

o,

$$\mathbf{d} = \mathbf{D}\mathbf{a} \quad (5.16)$$

Para  $N > 2m$ , los parámetros del modelo de predicción lineal pueden hallarse por medio de la aproximación pseudo-inversa:

$$\mathbf{a} = \mathbf{D} \setminus \mathbf{d} \quad (5.17)$$

Una vez hallados estos parámetros, los autovalores se calculan dando solución a la siguiente ecuación polinómica:

$$\mu^m - a_1\mu^{m-1} - \dots - a_{m-1}\mu - a_m = (\mu - \hat{\mu}_1)(\mu - \hat{\mu}_2)\dots(\mu - \hat{\mu}_m) \quad (5.18)$$

Luego, se estiman las amplitudes y fases de cada modo  $m$ , resolviendo el conjunto de ecuaciones lineales iniciales.

$$\begin{bmatrix} y[0] \\ y[1] \\ y[2] \\ \vdots \\ \vdots \\ y[N - 1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \hat{\mu}_1^1 & \hat{\mu}_2^1 & \dots & \hat{\mu}_m^1 \\ \hat{\mu}_1^2 & \hat{\mu}_2^2 & \dots & \hat{\mu}_m^2 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \hat{\mu}_1^{N-1} & \hat{\mu}_2^{N-1} & \dots & \hat{\mu}_m^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ C_m \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

o,

$$\mathbf{Y} = \mathbf{UC} \quad (5.20)$$

Entonces,

$$\mathbf{C} = \mathbf{U} \backslash \mathbf{Y} \quad (5.21)$$

Finalmente,

$$A_i = 2|C_i| = 2\sqrt{\Re(C_i)^2 + \Im(C_i)^2} \quad (5.22)$$

$$\phi_i = \arctan \left[ \frac{\Im(C_i)}{\Re(C_i)} \right] \quad (5.23)$$

$$\alpha_i = \frac{\ln|\mu_i|}{\Delta t} = \frac{\ln \left( \sqrt{\Re(\mu_i)^2 + \Im(\mu_i)^2} \right)}{\Delta t} \quad 1/s \quad (5.24)$$

$$f_i = \arctan \left[ \frac{\Im(\mu_i)}{\Re(\mu_i)} \right] / (2\pi\Delta t) \quad MHz \quad (5.25)$$

Han de variarse el número de modos y muestras hasta conseguir un ajuste preciso. Puesto que el método permite hallar todas las componentes modales de un impulso atmosférico, la curva base de éste será construida sólo a partir de los dos o tres primeros modos (dependiendo del tipo de ajuste).

En general, se proponen tres diferentes tipos de ajuste [9]:

- *Caso 1*: impulso atmosférico estándar (S)

$$\hat{y}(k) = A (e^{-\alpha k\Delta t} - e^{-\beta k\Delta t}) \quad (5.26)$$

- *Caso 2*: impulso atmosférico con sobretensión en la cresta (O)

$$\hat{y}(k) = A (e^{-\alpha k\Delta t} - e^{-\beta k\Delta t}) + C (e^{-\gamma t\Delta t}) [1 - \cos(\omega k\Delta t)] \quad (5.27)$$

- *Caso 3*: impulso atmosférico con oscilaciones en el frente (FO)

$$\hat{y}(k) = A (e^{-\alpha k\Delta t} - e^{-\beta k\Delta t}) + C (e^{-\gamma t\Delta t}) [\sin(\omega k\Delta t)] \quad (5.28)$$

## SECCIÓN 5.3

MÉTODO DE AJUSTE SEGÚN EL *IEEE Std. 4-2013*

Según el *IEEE Std. 4-2013*, los siguientes pasos permiten calcular los parámetros de un impulso, a partir de los datos muestreados durante la medición.

### 5.3.1 Procedimiento para ajustar y calcular los parámetros de un impulso atmosférico completo

1. Hallar el valor cresta  $V_e$ , de la curva registrada  $V(t)$ .
2. Hallar el nivel base de la curva registrada, calculando el valor medio de tensión a partir de los datos ubicados en la parte plana de la señal al inicio del registro.
3. Hallar la última muestra en el frente con valor de tensión menor a 0,2 veces el valor cresta  $V_e$ , descartando aquellos datos de valor menor o igual a éste; esto, para prevenir cualquier influencia por perturbaciones externas, así como aumentos lentos de tensión al inicio de la señal registrada.
4. Hallar la última muestra en la cola, con valor de tensión mayor a 0,4 veces el valor cresta  $V_e$ , descartando aquellos datos ubicados después de dicho valor.
5. Hallar la curva base  $V_m(t)$ , ajustando los datos restantes a una función de tipo doble exponencial:

$$V_d(t) = A (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (5.29)$$

donde,

$t$  es el tiempo.

$V_d(t)$  es la función de tensión doble exponencial.

$A$ ,  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros a ser hallados por medio del ajuste.

6. Construir la curva base  $V_m(t)$ , haciendo uso del nivel base (2). Hallar el valor cresta  $V_{mp}$  de la curva base  $V_m(t)$ .
7. Extraer la curva base  $V_m(t)$ , de la curva registrada inicialmente  $V(t)$ , y obtener la curva residual:

$$R(t) = V(t) - V_m(t) \quad (5.30)$$

8. Construir un filtro digital, cuya función de transferencia  $H(f)$ , sea igual a aquella definida por la *función de tensión de ensayo* (ecuación (1.33)).
9. Aplicar el filtro digital (8) a la curva residual  $R(t)$ , y obtener la curva residual  $R_f(t)$ .

Existen dos algoritmos que pueden ser útiles para llevar a cabo este paso.

En el dominio de la frecuencia, se llevará a cabo la transformada de Fourier para  $R(t)$ , obteniendo  $R_i(f)$ , para luego, aplicar el siguiente filtro:

$$R_0(f) = R_i(f) * H(f) \quad (5.31)$$

donde,

- $R_0(f)$  es el vector de tensión resultante.
- $R_i(f)$  es el vector de tensión de entrada.
- $H(f)$  es la función de transferencia del filtro.

Finalmente, se transforma  $R_0(f)$  de vuelta al dominio del tiempo, para obtener la forma de onda residual filtrada  $R_f(t)$ .

En el dominio del tiempo,

$$R_f(t) = \int_0^{\infty} R(t) * H(t - f).df \quad (5.32)$$

donde,

- $R_f(t)$  es la curva residual filtrada (tensión de salida del filtro).
- $R(t)$  es la curva residual (tensión de entrada del filtro).
- $H(t)$  es la contra-parte de  $H(f)$  en el dominio del tiempo.

10. La curva residual  $R_f(t)$ , será entonces superpuesta a la curva base  $V_m(t)$ , para obtener la curva de tensión de ensayo  $V_t(t)$ , y calcular los parámetros del impulso atmosférico de tensión:

$$V_t(t) = V_m(t) + R_f(t) \quad (5.33)$$

11. Calcular la amplitud relativa de sobretensión, definida como:

$$\beta'(\%) = 100 * \frac{V_e - V_{mp}}{V_e} \quad (5.34)$$

12. Exponer la curva registrada  $V(t)$ , y la curva de tensión de ensayo  $V_t(t)$ .
13. Reportar los valores de tensión de ensayo  $V_t$ , tiempo de frente  $T_1$ , tiempo de cola  $T_2$  y amplitud relativa de sobretensión  $\beta'(\%)$ .

### 5.3.2 Procedimiento para ajustar y calcular los parámetros de un impulso atmosférico recortado en la cola

Para hallar los parámetros característicos de un impulso recortado, se hará uso de un soporte (impulso completo), generado por el mismo circuito de prueba y bajo el mismo nivel de tensión. A continuación, se listan los pasos a seguir para el cálculo de dichos parámetros:

1. Recuperar los resultados del último impulso atmosférico completo aplicado a igual nivel de tensión.
2. Hallar la relación de tensión  $R_v = V_t/V_e$ , haciendo uso de los valores  $V_t$  y  $V_e$  extractados del impulso completo.
3. Hallar el valor cresta  $V_e$  del impulso recortado.
4. Hallar la tensión de ensayo del impulso recortado, multiplicando su valor cresta  $V_e$ , por  $R_v$ .

$$V_t(\text{impulso recortado}) = V_e(\text{impulso recortado}) * R_v \quad (5.35)$$

5. Usar el valor  $T_1$ , estimado de la curva de tensión de ensayo del impulso completo, como tiempo de frente para el impulso recortado.
6. Hallar el origen virtual  $O_1$ , como:

$$O_1 = t(30) - 0,3T_1 \quad (5.36)$$

donde,

$t(30)$  es el tiempo en que el impulso recortado alcanza 30 % de su valor  $V_t$ .  
 $T_1$  es el tiempo de frente.

luego, usar  $O_1$  para calcular el tiempo de corte  $T_c$ .

7. Reportar los valores de tensión de ensayo  $V_t$ , tiempo de frente  $T_1$ , tiempo de corte  $T_c$  y amplitud relativa de sobretensión  $\beta'$  (%).

---

**SECCIÓN 5.4****CURVE FITTING TOOLBOX - MATLAB**

La Curve fitting toolbox de MATLAB ofrece, por defecto, múltiples métodos y formas para llevar a cabo el ajuste de cualquier conjunto de datos muestreados. Además, permite realizar análisis exploratorios, pre-procesos y post-procesos, comparar modelos,

#### 5.4. CURVE FITTING TOOLBOX - MATLAB

---

remover datos, conducir análisis de regresión por medio de modelos ya propuestos o específicos, provistos por el usuario. El uso de ésta, adecuada al análisis de impulsos tipo rayo, permitirá llevar a cabo el ajuste de cualquier impulso atmosférico de tensión, por medio de parámetros de optimización propios de la herramienta.

---

# 6

## CLASIFICACIÓN DE DEFECTOS PARA LOS DIFERENTES OBJETOS DE PRUEBA

---

Previo al análisis y cálculo de las tensiones de chispa, es necesario describir los tipos de defectos que puede llegar a presentar un objeto de prueba.

La norma técnica *CODENSA ET-257*, “Especificación técnica aisladores de porcelana tipo estación”, describe los defectos y clasificación de los mismos, para aisladores de porcelana tipo estación.

Según ésta, dichos defectos se clasifican en:

### Críticos

- Características eléctricas o mecánicas fuera de especificación.
- Grietas, porosidad o discontinuidad en el cuerpo de porcelana, puntos salientes o puntos en voladizo, materia extraña u otros defectos en la porcelana o vidrio.

### Mayores

- Alabeos o asperezas en la porcelana o vidrio.

## 6.1. OBJETOS DE PRUEBA USADOS

---

- Los bordes de las salientes de la porcelana o vidrio del aislador son agudos y no uniformes.
- Las partes salientes de la porcelana o vidrio están rotas o desportilladas.

### Menores

- La superficie expuesta del aislador no está uniformemente esmaltada o presenta puntos sin esmaltar.
- El color de la porcelana o vidrio no corresponde al especificado.
- El material aislante no corresponde a lo especificado.
- Falta marca del fabricante, o el número de orden de compra.
- Error en cualquier dato suministrado en la marca del fabricante.

#### SECCIÓN 6.1

### OBJETOS DE PRUEBA USADOS

#### 6.1.1 Objeto de prueba 1: sin daño

El objeto de prueba no presenta daño alguno.

Figura 21: Objeto de prueba 1: sin daño.



## 6.1. OBJETOS DE PRUEBA USADOS

---

### 6.1.2 Objeto de prueba 2: daño mayor

El objeto de prueba presenta daño en la parte inferior.

Figura 22: Objeto de prueba 2: daño mayor.



### 6.1.3 Objeto de prueba 3: daño mayor

El objeto de prueba presenta daño en la parte inferior y asperezas en la superficie expuesta.

Figura 23: Objeto de prueba 3: daño mayor.



## 6.1. OBJETOS DE PRUEBA USADOS

### 6.1.4 Objeto de prueba 4: aislador usado en campo (5 o más años de uso) - daño crítico

El objeto de prueba presenta alabeos en la parte interior y partículas de materia extraña.

Figura 24: Objeto de prueba 4: aislador usado en campo - Daño crítico.



### 6.1.5 Objeto de prueba 5: aislador usado en campo - daño crítico

El objeto de prueba presenta alabeos en la parte interior, averías en la parte superior externa y partículas de materia extraña.

Figura 25: Objeto de prueba 5: aislador usado en campo - Daño crítico.



## 6.1. OBJETOS DE PRUEBA USADOS

### 6.1.6 Objeto de prueba 6: sin daño

El objeto de prueba no presenta daño alguno.

Figura 26: Objeto de prueba 6: sin daño.



### 6.1.7 Objeto de prueba 7: daño mayor

El objeto de prueba presenta bordes agudos y rotura del material.

Figura 27: Objeto de prueba 7: daño mayor.

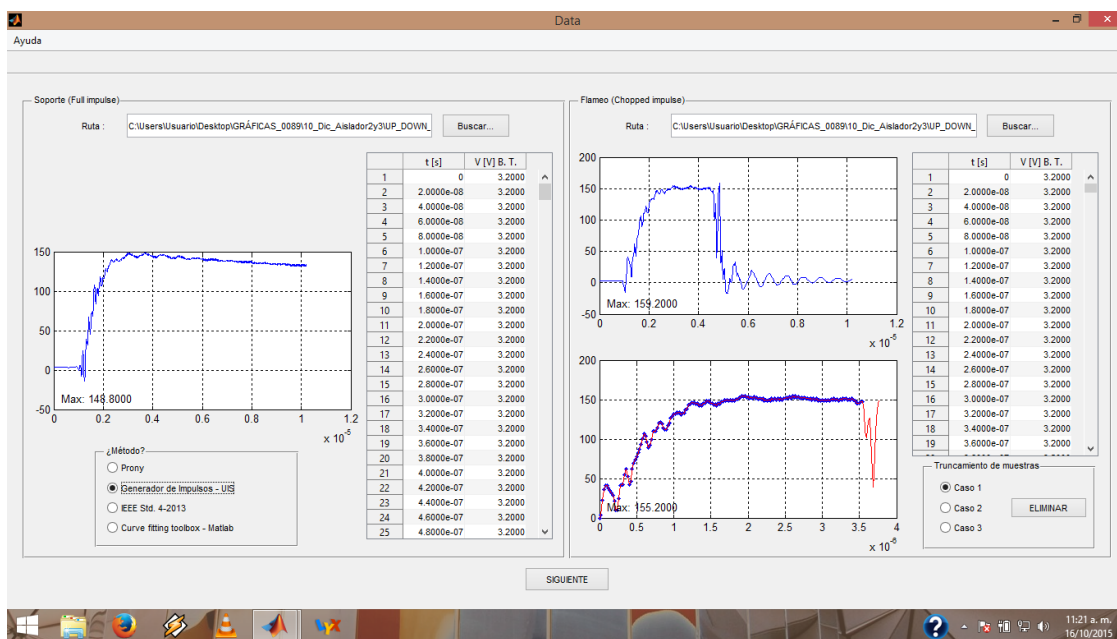


# ANÁLISIS DE RESULTADOS

## SECCIÓN 7.1

### ANÁLISIS PRELIMINAR

Figura 28: Interfaz gráfica - Ingreso de datos.



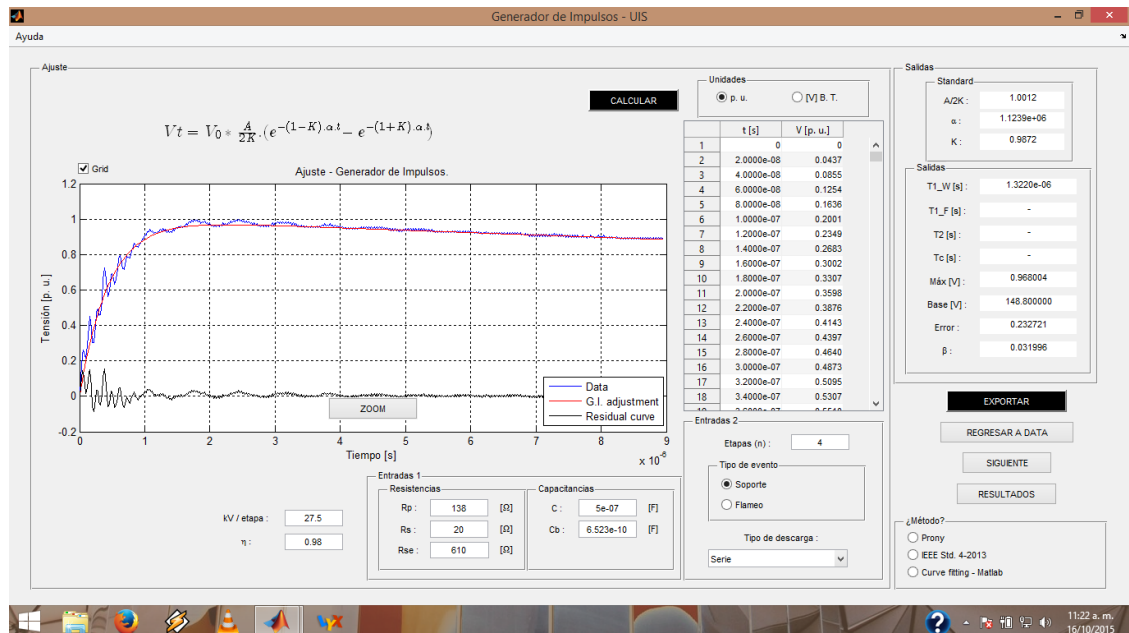
## 7.1. ANÁLISIS PRELIMINAR

El análisis de las señales obtenidas durante los ensayos de laboratorio, requirió el desarrollo de una herramienta que simulase y ajustase cada conjunto de muestras a una función de tipo doble exponencial.

Las Figuras 28 y 29, muestran parte de la interfaz gráfica implementada para dicha herramienta. Para una descripción más detallada acerca de ésta, ver Apéndice F.

Esta herramienta permite ajustar las señales obtenidas, y extraer la información necesaria para llevar a cabo el análisis de un impulso de tensión, haciendo uso de los diferentes métodos y funciones de onda expuestas en el Capítulo 5. La Figura 30, lista los 16 tipos de ajuste que pueden obtenerse de ella.

Figura 29: Interfaz gráfica - Ajuste por medio de las constantes características del Generador de Impulsos.



Debido a la cantidad de ajustes que puede extraerse de cada señal, y al gran número de señales sometidas a estudio, se hace necesario realizar un sondeo preliminar, que permita determinar qué métodos de ajuste son los que mejor se adaptan a éstas. Para ello, se usaron aquellos impulsos de tensión obtenidos de los ensayos *UP and DOWN* hechos a cada objeto de prueba, cercanos al valor de tensión de ruptura  $V_{50}$ . Se tiene entonces, un total de 77 impulsos (40 flameos y 37 soportes), de los cuales se extraen 1232 diferentes tipos de ajuste (16 por impulso (Figura 30)).

## 7.1. ANÁLISIS PRELIMINAR

El análisis toma en cuenta tres aspectos base que permiten avalar el ajuste realizado por la herramienta. Éstos son:

1. Inspección visual del ajuste.
2. Tiempo de frente de la señal ( $1, 2 \pm 30\% \mu s$ ).
3. Amplitud relativa de sobretensión  $\beta'(\%)$  ( $\pm 3\%$ ).

Figura 30: Tipos de ajuste usados.

<i>Método</i>	<i>Ajuste</i>	<i>Forma de onda</i>	<i>Siglas</i>
Generador de impulsos <sup>1</sup>	{	<i>G.I.</i>	{
			{
Prony <sup>2</sup>	{	<i>P</i>	{
			{
			{
Curve fitting toolbox <sup>3</sup>	{	<i>G.I.</i>	{
			{
			{
IEEE Std. 4 – 2013 <sup>4</sup>	{	<i>G.I.</i>	{
			{
			{
	{	<i>P</i>	{
			{
			{
{	<i>C.F. – G.I.</i>	{	
		{	
		{	
{	<i>C.F. – P</i>	{	
		{	
		{	

<sup>1</sup>Ajuste por medio de las constantes características del Generador de impulsos.

<sup>2</sup>Método de ajuste Prony.

<sup>3</sup>Curve fitting toolbox - Matlab.

<sup>4</sup>Método de ajuste propuesto por el *IEEE Std. 4-2013*.

De éstos, la inspección visual es quizá el aspecto más relevante, pues permite descartar ajustes, aún bajo parámetros de tiempo y amplitud según lo sugerido por el *IEEE Std. 4-2013*. La Figura 31, ilustra dos tipos de ajuste aplicados al mismo ensayo e impulso. En ésta, es posible distinguir claramente un ajuste óptimo, de aquel no apto para este tipo de análisis, siendo menor, el error ( $E\%$ ) relativo a este último (Tabla 7). Casos como éste son comunes, especialmente en ajustes cuya ecuación característica

## 7.1. ANÁLISIS PRELIMINAR

contempla componentes oscilatorias (sobretensión en la cresta ( $O$ ) y oscilaciones en el frente ( $FO$ )). En consecuencia, el ajuste será mejor en términos de error, siendo, no obstante, poco fiable para el tipo de análisis requerido. Por otra parte, múltiples tiempos para una misma amplitud o valor de tensión pueden presentarse debido a este tipo de distorsiones, afectando de manera implícita, los valores que logra extraer la herramienta para determinar los tiempos de frente de cada impulso.

Figura 31: Ajustes para un flameo a 27,3 kV/etapa.

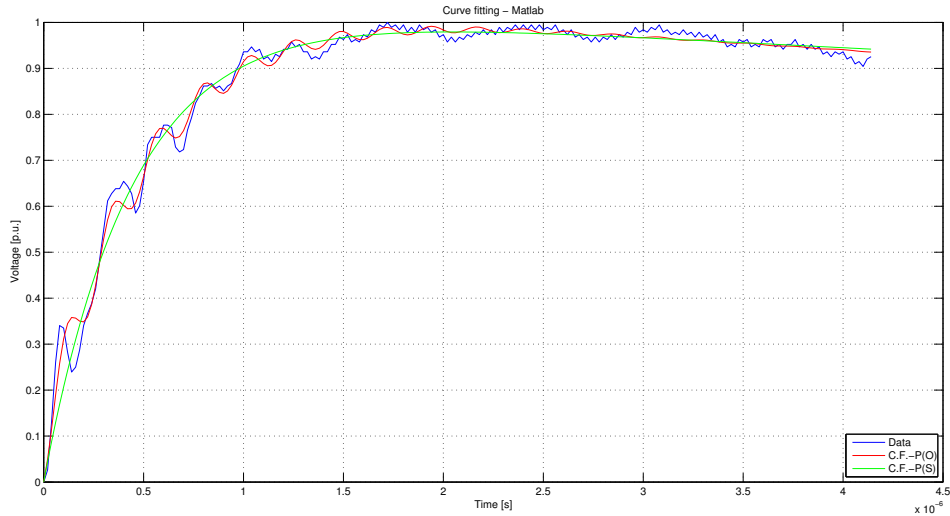


Tabla 7: Parámetros característicos extraídos de la Figura 31.

<i>Ajuste</i>	<i>C.F.-P(S)</i>	<i>C.F.-P(O)</i>
<i>Evaluación visual</i>	✓	–
$T1$ [ $\mu s$ ]	1,3275	1,5282
$E$ [%]	17,5520	9,1182
$\beta$ [%]	2,0997	0,8475

Este tipo de situaciones tergiversan los valores arrojados por la interfaz. Por ello, sólo se tomarán como válidos, aquellos ajustes cuya forma no presente oscilación alguna. Las Figuras 32 y 33, presentan un par de ejemplos claros de ajustes descartados debido a oscilaciones en el frente de la señal; la Figura 34, un ajuste cuya amplitud relativa de sobretensión excede el valor admisible para un impulso de tensión.

## 7.1. ANÁLISIS PRELIMINAR

Figura 32: Ajuste con oscilaciones para un soporte a 27,3 kV/etapa.

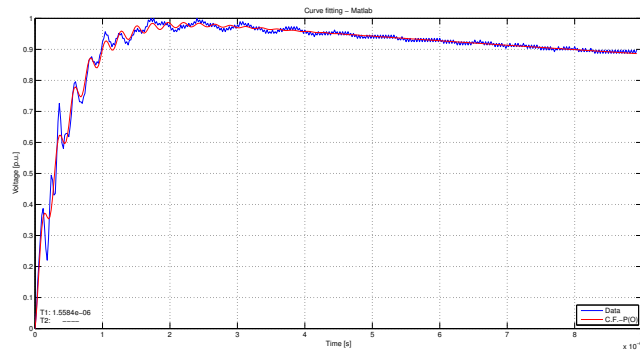


Figura 33: Ajuste con oscilaciones para un flameo a 27,3 kV/etapa.

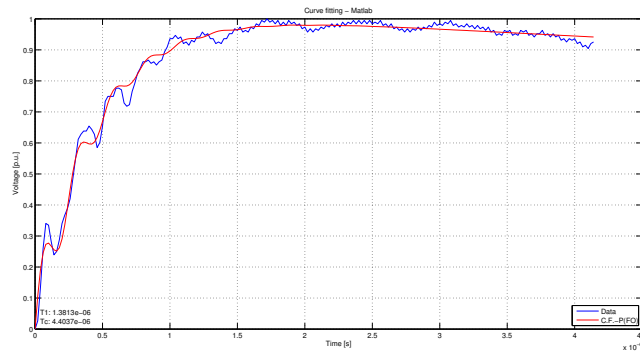
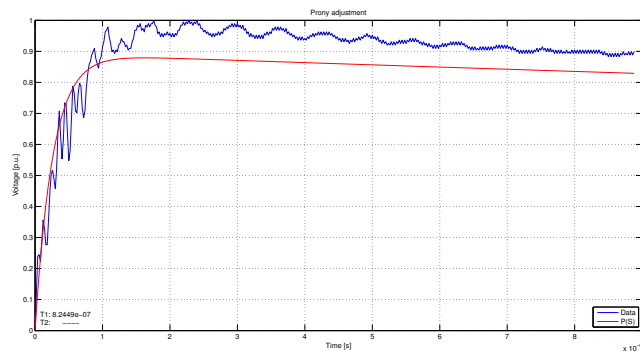


Figura 34: Ajuste para un soporte a 27,7 kV/etapa, cuya amplitud excede el rango.



## 7.1. ANÁLISIS PRELIMINAR

Se descartan entonces, aquellos ajustes visualmente no aptos, y cuyos tiempos de frente o amplitudes relativas de sobretensión no estén dentro de los rangos establecidos por el *IEEE Std. 4-2013*.

Tabla 8: Cuadro representativo de flameos y soportes aptos - objeto de prueba 2.

Objeto 2		26,9 kV/etapa						27,3 kV/etapa			
Ajuste		O <sub>19</sub>	O <sub>1</sub>	O <sub>7</sub>	O <sub>9</sub>	X <sub>15</sub>	X <sub>17</sub>	O <sub>2</sub>	X <sub>20</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>8</sub>
G.I.	V	☒ ✓	☒ ✓	☒ ✓	☒ ✓			☒ ✓			
	T <sub>1</sub>	☒	☒	☒	☒	☒ ✓	☒ ✓	☒	☒ ✓	☒ ✓	☒ ✓
P(S)	V	☒ ✓	- x	☒ ✓	☒ ✓			- x			
	T <sub>1</sub>	☒	☒	☒	☒	☒ ✓	- x	☒	☒ ✓	☒ ✓	☒ ✓
P(O)	V	☒ ✓	☒ ✓	• x	• x			• x			
	T <sub>1</sub>	☒	☒	1,562	☒	☒ ✓	- x	1,677	• x	☒ ✓	• x
P(FO)	V	☒ ✓	- x	☒ ✓	• x			- x			
	T <sub>1</sub>	☒	☒	☒	☒	☒ ✓	- x	☒	• x	☒ ✓	• x
C.F.-G.I.	V	☒ ✓	☒ ✓	☒ ✓	☒ ✓			☒ ✓			
	T <sub>1</sub>	☒	☒	☒	☒	x x	☒ ✓	☒	☒ ✓	☒ ✓	☒ ✓
C.F.-P(S)	V	☒ ✓	☒ ✓	☒ ✓	☒ ✓			☒ ✓			
	T <sub>1</sub>	☒	☒	☒	☒	☒ ✓	☒ ✓	☒	☒ ✓	☒ ✓	☒ ✓
C.F.-P(O)	V	• x	• x	☒ ✓	• x			• x			
	T <sub>1</sub>	☒	☒	☒	☒	☒ ✓	• x	☒	• x	• x	• x
C.F.-P(FO)	V	• x	☒ ✓	- x	• x			• x			
	T <sub>1</sub>	☒	☒	☒	☒	• x	• x	☒	• x	☒ ✓	• x
IEEE-G.I.	V	☒ ✓	☒ ✓	☒ ✓	☒ ✓			☒ ✓			
	T <sub>1</sub>	☒	☒	☒	☒	☒ ✓	☒ ✓	☒	☒ ✓	☒ ✓	☒ ✓
IEEE-P(S)	V	☒ x	- x	☒ ✓	☒ ✓			☒ ✓			
	T <sub>1</sub>	1,642	☒	☒	☒	☒ ✓	- x	☒	☒ ✓	☒ ✓	☒ ✓
IEEE-P(O)	V	☒ x	- x	• x	• x			• x			
	T <sub>1</sub>	1,642	☒	☒	☒	☒ ✓	- x	☒	• x	☒ ✓	• x
IEEE-P(FO)	V	☒ x	- x	• x	• x			• x			
	T <sub>1</sub>	1,642	☒	☒	☒	☒ ✓	- x	☒	• x	☒ ✓	• x
IEEE-C.F.-G.I.	V	☒ ✓	☒ ✓	☒ ✓	☒ ✓			☒ ✓			
	T <sub>1</sub>	☒	☒	☒	☒	x x	☒ ✓	☒	☒ ✓	☒ ✓	☒ ✓
IEEE-C.F.-P(S)	V	☒ ✓	☒ ✓	☒ ✓	☒ ✓			☒ ✓			
	T <sub>1</sub>	☒	☒	☒	☒	☒ ✓	☒ ✓	☒	☒ ✓	☒ ✓	☒ ✓
IEEE-C.F.-P(O)	V	☒ ✓	• x	☒ ✓	• x			• x			
	T <sub>1</sub>	☒	☒	☒	1,595	☒ ✓	• x	☒	• x	• x	• x
IEEE-C.F.-P(FO)	V	☒ ✓	☒ ✓	☒ ✓	• x			• x			
	T <sub>1</sub>	☒	☒	☒	☒	• x	• x	☒	• x	☒ ✓	• x

\*T<sub>1</sub> en  $\mu$ s.

## 7.1. ANÁLISIS PRELIMINAR

Debido al gran número de muestras, y por ello, lo tedioso que sería presentar todos los gráficos y resultados obtenidos de cada ensayo e impulso, se resume el análisis en tres sencillos diagramas porcentuales que permiten ver qué tan eficaz resulta cada tipo de ajuste. La Tabla 8, muestra uno de los cuadros usados para tal fin (Apéndice C). En ésta, y para cada soporte ( $O$ ), se engloban tres diferentes recuadros por ajuste: los dos primeros (superior izquierdo e inferior), relativos al chequeo visual ( $V$ ) y tiempo de frente ( $T_1$ ); el último (recuadro en gris), da ( $\checkmark$ ), o no ( $\times$ ), el aval a cada ajuste. Por el contrario, los flameos ( $X$ ) sólo hacen uso de dos: el primero de ellos (izquierdo), corresponde al chequeo visual del ajuste, restando sólo, aquel que permite concluir qué ajustes son aptos. Las diferentes viñetas usadas denotan lo siguiente:

- ✠ : óptimo ajuste visual o tiempos de frente acorde al *IEEE Std. 4-2013*.
- : presencia de oscilaciones en el ajuste.
- : amplitud relativa de sobretensión fuera de rango.
- ✓ : óptimo ajuste en términos globales.
- × : se descarta el ajuste, pues uno o más parámetros fallan la inspección.

Cabe recordar que los ensayos *UP and DOWN*, son ensayos estadísticos netamente aleatorios, y que las tensiones aplicadas al objeto de prueba, varían según la metodología de éstos (Sección 3.1.1). Así, niveles de tensión, flameos ( $X_{15}$ ,  $X_{17}$ ,  $X_{20}$ ,  $X_6$  y  $X_8$ ) y soportes ( $O_{19}$ ,  $O_1$ ,  $O_7$ ,  $O_9$  y  $O_2$ ) consignados en dicho cuadro, corresponden a aquellos cercanos al valor de tensión de ruptura  $V_{50}$ , obtenido de cada ensayo.

De los diagramas porcentuales (Figuras 35, 36 y 37), se observa qué tipos de ajuste se adaptan mejor a estas señales (formas estándar). Así, casi cualquier forma estándar resultará en extremo conveniente en estudios de este tipo.

Figura 35: Análisis porcentual del total de soportes aptos por ajuste.

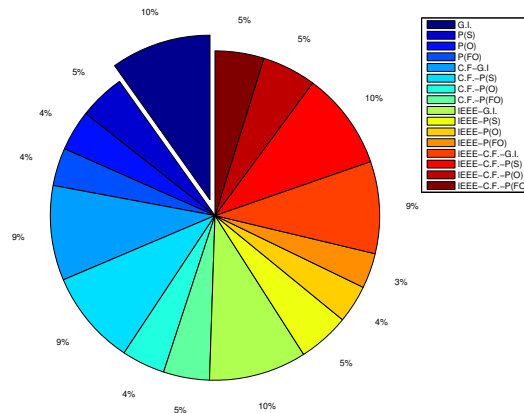


Figura 36: Análisis porcentual del total de flameos aptos por ajuste.

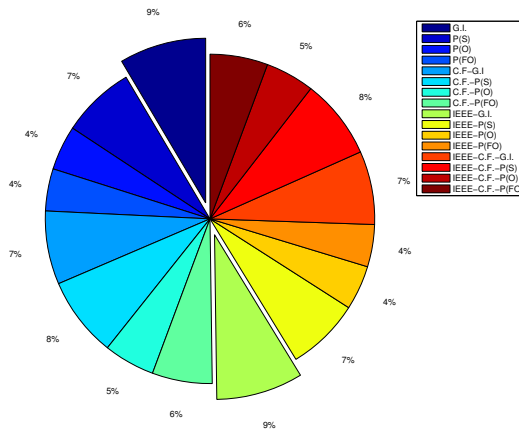
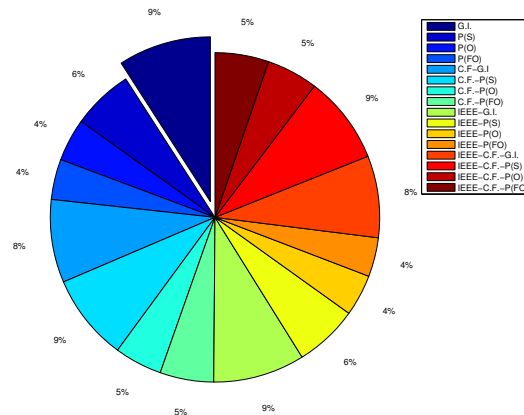


Figura 37: Análisis porcentual total por ajuste.



La Tabla 9, lista el total de ajustes efectivos por método y tipo de ajuste. El diagrama de barras de la Figura 38, presenta de manera gráfica lo consignado en ésta. Así, se atribuye un óptimo comportamiento sólo a ajustes cuya ecuación característica ignore u omita, cualquier componente oscilatoria, esto, debido a las perturbaciones que éstas puedan llegar a generar. Prony se muestra como la opción menos viable, debido al bajo porcentaje de ajustes efectivos por impulso, además de la gran desventaja que supone en él, la alta sensibilidad al número de muestras. Por el contrario, la Curve fitting toolbox de MATLAB destaca al aumentar notablemente el número de ajustes efectivos, arrojados por la ecuación estándar usada en Prony.

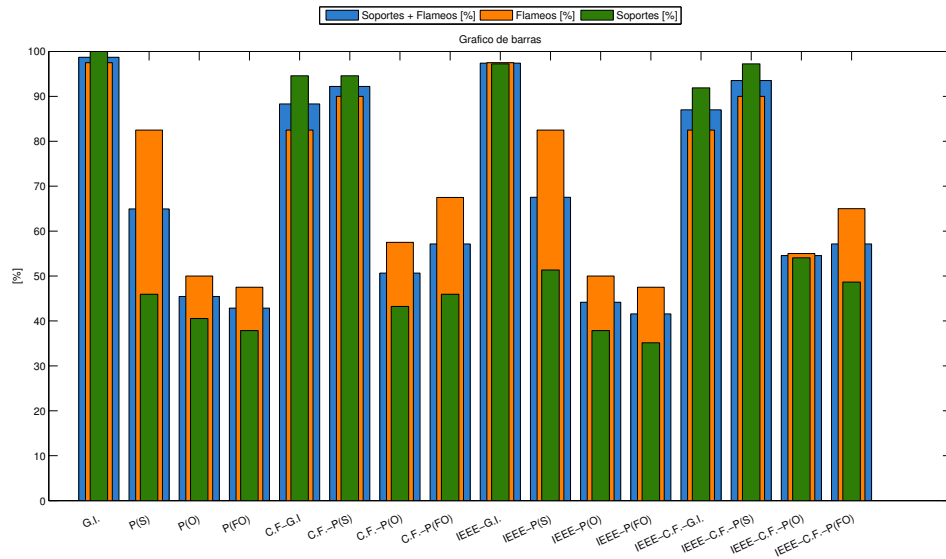
El comportamiento del método sugerido por el *IEEE Std. 4-2013*, dependerá netamente, de la herramienta y ecuación de ajuste usadas.

## 7.1. ANÁLISIS PRELIMINAR

Tabla 9: Resumen de ajustes efectivos por método y tipo de ajuste.

<i>Total</i>	<b>37</b>		<b>40</b>		<b>77</b>	
<i>Ajuste</i>	<i>Soportes</i>	%	<i>Flameos</i>	%	<i>S+F</i>	%
<i>G.I.</i>	37	100	39	97,50	76	98,70
<i>P(S)</i>	17	45,95	33	82,50	50	64,94
<i>P(O)</i>	15	40,54	20	50	35	45,45
<i>P(FO)</i>	14	37,84	19	47,50	33	42,86
<i>C.F.-G.I.</i>	35	94,59	33	82,50	68	88,31
<i>C.F.-P(S)</i>	35	94,59	36	90	71	92,21
<i>C.F.-P(O)</i>	16	43,24	23	57,50	39	50,65
<i>C.F.-P(FO)</i>	17	45,95	27	67,50	44	57,14
<i>IEEE-G.I.</i>	36	97,23	39	97,50	75	97,40
<i>IEEE-P(S)</i>	19	51,35	33	82,50	52	67,53
<i>IEEE-P(O)</i>	14	37,84	20	50	34	44,16
<i>IEEE-P(FO)</i>	13	35,14	19	47,50	32	41,56
<i>IEEE-C.F.-G.I.</i>	34	91,89	33	82,50	67	87,01
<i>IEEE-C.F.-P(S)</i>	36	97,23	36	90	72	93,51
<i>IEEE-C.F.-P(O)</i>	20	54,05	22	55	42	54,55
<i>IEEE-C.F.-P(FO)</i>	18	48,65	26	65	44	57,14

Figura 38: Porcentaje de soportes y flameos efectivos por método y tipo de ajuste.

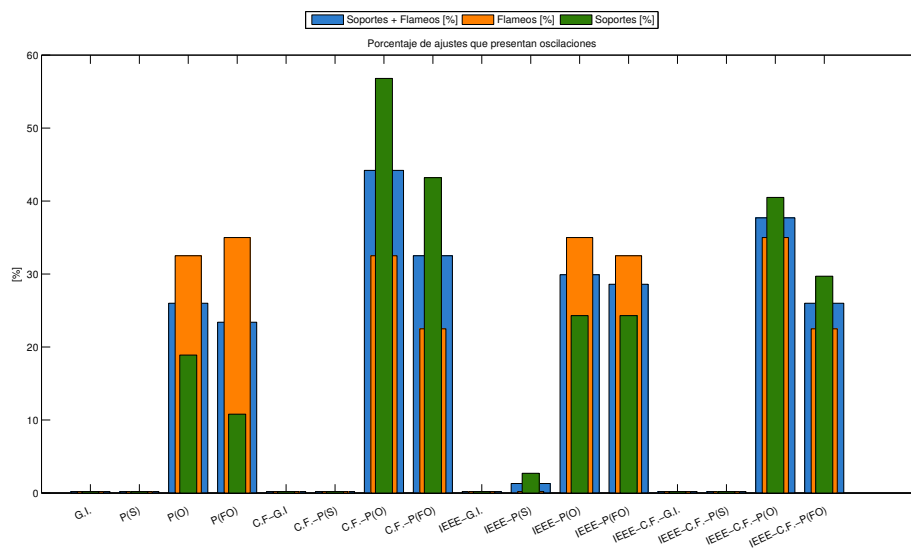


## 7.1. ANÁLISIS PRELIMINAR

Tabla 10: Cantidad de ajustes descartados por oscilaciones, amplitudes de sobretensión y tiempos fuera de rango.

Ajuste	•						-						T <sub>1</sub>	%
	S	%	F	%	S+F	%	S	%	F	%	S+F	%		
G.I.	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2,5	1	1,3	0	0
P(S)	0	0	0	0	0	0	16	43,2	7	17,5	23	29,9	8	21,6
P(O)	7	18,9	13	32,5	20	26	11	29,7	6	15	17	22,1	11	29,7
P(FO)	4	10,8	14	35	18	23,4	15	40,5	7	17,5	22	28,6	8	21,6
C.F.-G.I.	0	0	0	0	0	0	0	0	4	10	4	5,2	1	2,7
C.F.-P(S)	0	0	0	0	0	0	0	0	4	10	4	5,2	2	5,4
C.F.-P(O)	21	56,8	13	32,5	34	44,2	0	0	4	10	4	5,2	4	10,8
C.F.-P(FO)	16	43,2	9	22,5	25	32,5	3	8,1	4	10	7	9,1	3	8,1
IEEE-G.I.	0	0	0	0	0	0	1	2,7	1	2,5	2	2,6	0	0
IEEE-P(S)	1	2,7	0	0	1	1,3	9	24,3	7	17,5	16	20,8	10	27
IEEE-P(O)	9	24,3	14	35	23	29,9	7	18,9	6	15	13	16,9	12	32,4
IEEE-P(FO)	9	24,3	13	32,5	22	28,6	7	18,9	7	17,5	14	18,2	10	27
IEEE-C.F.-G.I.	0	0	0	0	0	0	0	0	4	10	4	5,2	1	2,7
IEEE-C.F.-P(S)	0	0	0	0	0	0	0	0	4	10	4	5,2	1	2,7
IEEE-C.F.-P(O)	15	40,5	14	35	29	37,7	1	2,7	4	10	5	6,5	4	10,8
IEEE-C.F.-P(FO)	11	29,7	9	22,5	20	26	3	8,1	4	10	7	9,1	8	21,6

Figura 39: Porcentaje de ajustes descartados por oscilaciones.



## 7.1. ANÁLISIS PRELIMINAR

Figura 40: Porcentaje de ajustes descartados por amplitud de sobretensión fuera de rango.

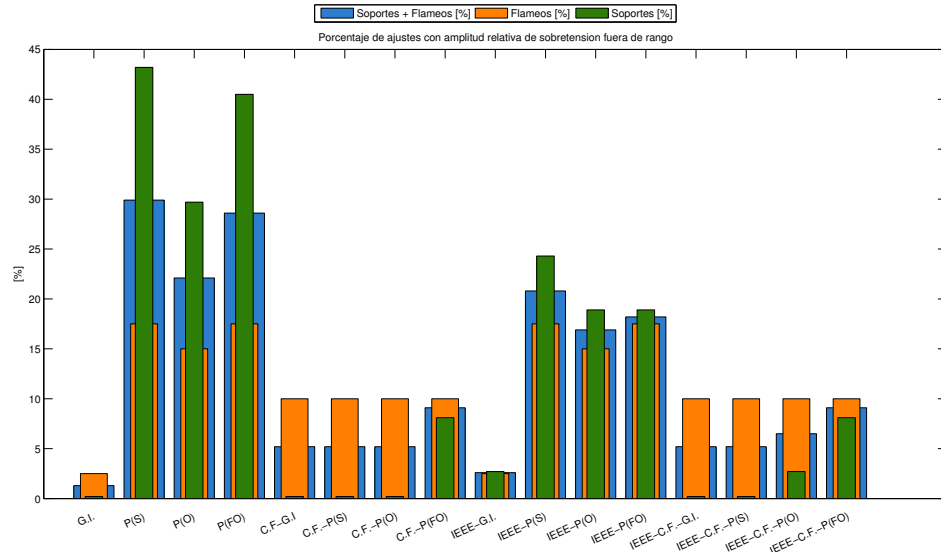
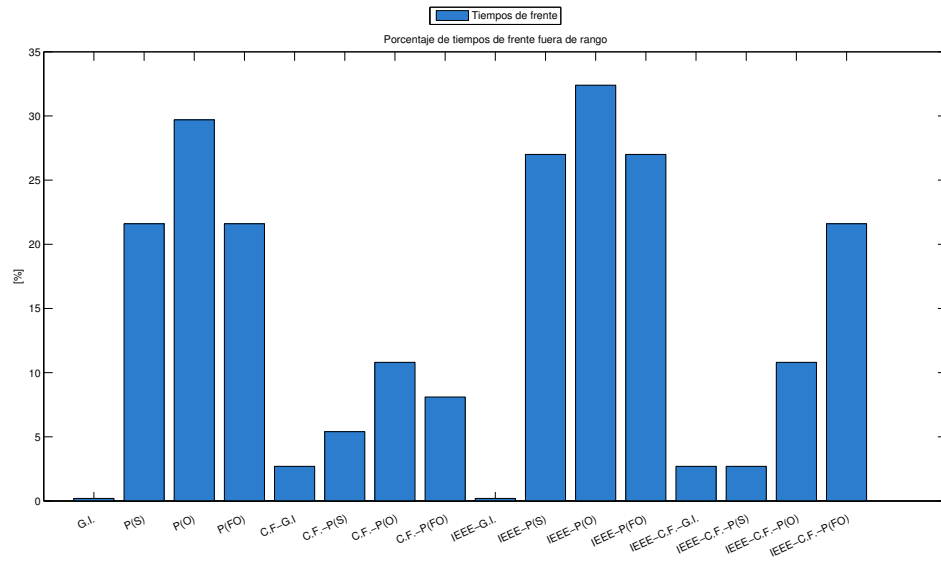


Figura 41: Porcentaje de ajustes descartados por tiempo fuera de rango.



La Tabla 10, y Figuras 39, 40 y 41, disgregan el comportamiento de los diferentes ajustes, permitiendo observar qué parámetros fallan en el proceso.

La primera figura (39), permite ver la cantidad de ajustes descartados por método, producto de oscilaciones o cualquier tipo de perturbación. Resulta apenas lógico esperar altos porcentajes en ajustes cuya ecuación contemple componentes sinusoidales (sobretensión ( $O$ ) y oscilaciones en el frente ( $FO$ )), pues éstas pretenden, recrear parte del ruido que pueda llegar a presentar un impulso de tensión. De igual manera, el gráfico de la Figura 40, da los porcentajes relativos a amplitudes de sobretensión fuera de rango. De éste, y de los diferentes métodos, Prony resulta el menos efectivo, independientemente de la ecuación de ajuste usada. Algo interesante surge, al observar en qué medida mejora dicho método, usado bajo el marco sugerido por el *IEEE Std. 4-2013*, llegando a reducir, un 40 % o más, el número total de ajustes antes descartados.

El gráfico de la Figura 41, presenta los porcentajes de incidencia por ajuste, en tiempos de frente fuera de límite. Al igual que en casos anteriores, Prony se verá igualmente afectado, producto del pésimo desempeño antes expuesto. Para éste, la metodología propuesta por el *IEEE Std. 4-2013*, aumentará el número de ajustes descartados debido a tan excesivos tiempos.

Tabla 11: Error de ajuste promedio por método, para el total de eventos analizados.

<i>Ajuste</i>	<i>Soportes</i>	<i>Flameos</i>	<i>Soportes + Flameos</i>
	<i>Error [%]</i>	<i>Error [%]</i>	<i>Error [%]</i>
<i>G.I.</i>	42,924	33,907	39,433
<i>P(S)</i>	110,395	43,727	84,588
<i>P(O)</i>	107,108	40,567	81,351
<i>P(FO)</i>	110,135	43,590	84,406
<i>C.F.-G.I.</i>	31,669	31,000	31,691
<i>C.F.-P(S)</i>	32,139	30,699	31,862
<i>C.F.-P(O)</i>	36,654	27,986	33,405
<i>C.F.-P(FO)</i>	32,137	28,296	30,757
<i>IEEE-G.I.</i>	42,930	32,791	39,245
<i>IEEE-P(S)</i>	110,395	41,198	83,756
<i>IEEE-P(O)</i>	107,108	40,682	81,485
<i>IEEE-P(FO)</i>	110,135	42,169	83,931
<i>IEEE-C.F.-G.I.</i>	31,669	28,954	30,897
<i>IEEE-C.F.-P(S)</i>	32,139	28,954	31,185
<i>IEEE-C.F.-P(O)</i>	36,654	27,575	33,170
<i>IEEE-C.F.-P(FO)</i>	32,137	29,978	31,319

Finalmente, la Tabla 11 presenta los diferentes promedios de error, extractados de los múltiples eventos disponibles (soportes y flameos). A simple vista, las formas de onda relativas a ecuaciones estándar y demás (sobretensión ( $O$ ) y oscilaciones en el frente

( $FO$ )), exceptuando aquellas relacionadas al método de ajuste Prony, presentan similares errores de ajuste. Sin embargo, y debido al inconveniente que supone cualquier tipo de perturbación, sólo se hará uso de aquellos ajustes cuya ecuación represente la forma estándar.

El análisis llevado a cabo, y los diferentes parámetros propuestos para ello, se dan, producto de la necesidad particular del presente proyecto. Los diferentes gráficos y tablas, presentan de manera grupal e individual, el comportamiento de los parámetros considerados en este estudio. Por tanto, no se pretende exponer una herramienta o método definitivos, sino, dar a conocer el comportamiento que supone cada uno, según éstos.

De los diferentes diagramas, gráficos y tablas, se concluye lo siguiente:

- La inspección visual resulta un parámetro altamente subjetivo.
- La mayor cantidad de ajustes efectivos se da bajo las formas de onda estándar, exceptuando las relativas al método de ajuste Prony ( $P(S)$  e  $IEEE-P(S)$ ) (Figura 38).
- La alta sensibilidad al número de muestras, hacen de Prony una opción poco viable.
- La Curve fitting toolbox de MATLAB, mejora notablemente el número de ajustes avalados por la ecuación estándar usada en Prony. Sin embargo, ésta resultará altamente afectada bajo funciones cuya ecuación presente cualquier tipo de componente oscilatoria.
- En general, el método propuesto por el *IEEE Std. 4-2013*, resulta efectivo, tanto mejor sea el tipo de ajuste usado.

### SECCIÓN 7.2

## TIEMPOS DE FRENTE Y CORTE

En la Sección 7.1, se realizó un breve estudio que permitiese determinar qué métodos y ecuaciones conviene usar, al llevar a cabo el análisis de un impulso de tensión. Así, se observó que las formas de onda estándar resultaban sumamente efectivas, aún sobre aquellas con presencia de componentes oscilatorias. Las Tablas 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49 y 50, presentan los diferentes tiempos y parámetros, arrojados por este tipo de ajustes. En éstas, se registran los valores extractados de la herramienta, para cada nivel de tensión, según los protocolos de prueba consignados en el Apéndice B. El Apéndice D, contendrá entonces el total de parámetros arrojados por dichos ajustes, para cada objeto y nivel de tensión.

7.2. TIEMPOS DE FRENTE Y CORTE

Tabla 12: Tiempos de frente y corte para los diferentes objetos de prueba, según *IEEE-C.F.-P(S)*.

Objeto 2	26,9 kV/etapa					27,3 kV/etapa					27,7 kV/etapa					28,1 kV/etapa				
	O7	X3	X5	O10	X8	X14	X16	O11	X1	X13	O19	X12	X20							
<i>T<sub>1w</sub></i> [ $\mu$ s]	1,437	1,437	1,437	1,389	1,389	1,389	1,389	1,294	1,294	1,291	1,291	1,291	1,291							
<i>T<sub>1f</sub></i> [ $\mu$ s]	-	1,363	1,445	-	1,263	1,255	1,250	-	1,426	1,254	-	1,284	1,772							
<i>T<sub>c</sub></i> [ $\mu$ s]	-	3,787	4,194	-	4,407	3,416	5,811	-	3,573	3,564	-	2,859	3,676							
<b>Objeto 3</b>	<b>26,5 kV/etapa</b>													<b>27,3 kV/etapa</b>						
<b>Eventos</b>	O3	X1	O5	X7	O10	X4	X6	O13	X15	X17	X19	O13	X14							
<i>T<sub>1w</sub></i> [ $\mu$ s]	1,285	1,285	1,328	1,328	1,308	1,308	1,308	1,348	1,348	1,348	1,348	1,348	1,348							
<i>T<sub>1f</sub></i> [ $\mu$ s]	-	1,267	-	1,293	-	1,265	1,266	-	1,316	1,364	1,273	-	1,233							
<i>T<sub>c</sub></i> [ $\mu$ s]	-	5,137	-	5,286	-	8,885	8,705	-	5,449	2,987	4,396	-	3,860							
<b>Objeto 4</b>	<b>28,1 kV/etapa</b>													<b>28,5 kV/etapa</b>						
<b>Eventos</b>	O9	X5	X7	O16	X4	X10	X12	X14	O18	X20	O18	X3	X19							
<i>T<sub>1w</sub></i> [ $\mu$ s]	1,316	1,316	1,316	1,402	1,402	1,402	1,402	1,402	1,356	1,356	1,356	1,356	1,356							
<i>T<sub>1f</sub></i> [ $\mu$ s]	-	1,324	1,357	-	1,273	1,174	1,639	1,306	-	1,287	-	1,282	1,348							
<i>T<sub>c</sub></i> [ $\mu$ s]	-	3,404	3,672	-	3,036	3,868	3,197	3,228	-	3,717	-	3,596	3,350							
<b>Objeto 5</b>	<b>27,3 kV/etapa</b>													<b>28,1 kV/etapa</b>						
<b>Eventos</b>	O4	X8	O12	X16	X18	O13	X1	X3	X7	X11	X15	O13	X14							
<i>T<sub>1w</sub></i> [ $\mu$ s]	1,547	1,547	1,536	1,536	1,536	1,536	1,536	1,536	1,536	1,536	1,536	1,536	1,536							
<i>T<sub>1f</sub></i> [ $\mu$ s]	-	1,365	-	1,315	1,351	-	1,384	1,209	1,397	1,344	1,363	-	1,072							
<i>T<sub>c</sub></i> [ $\mu$ s]	-	3,667	-	3,826	5,702	-	4,017	3,535	4,376	4,103	3,978	-	3,834							
<b>Objeto 6</b>	<b>27,2 kV/etapa</b>													<b>28,2 kV/etapa</b>						
<b>Eventos</b>	O3	X1	O15	X19	O16	X4	X6	X8	X10	X14	X18	O16	X17							
<i>T<sub>1w</sub></i> [ $\mu$ s]	0,943	0,943	1,412	1,411	1,507	1,507	1,507	1,507	1,507	1,507	1,507	1,507	1,507							
<i>T<sub>1f</sub></i> [ $\mu$ s]	-	0,847	-	0,805	-	2,307	1,342	1,341	0,955	1,342	1,342	-	1,342							
<i>T<sub>c</sub></i> [ $\mu$ s]	-	3,788	-	4,706	-	3,596	3,536	4,616	4,059	3,856	3,776	-	3,856							
<b>Objeto 7</b>	<b>26,7 kV/etapa</b>													<b>27,7 kV/etapa</b>						
<b>Eventos</b>	O4	X6	O9	X1	X3	X5	X11	O13	X15	X17	X19	O13	X10							
<i>T<sub>1w</sub></i> [ $\mu$ s]	1,356	1,356	1,356	1,356	1,356	1,356	1,356	1,571	1,571	1,571	1,571	1,571	1,571							
<i>T<sub>1f</sub></i> [ $\mu$ s]	-	1,388	-	1,255	1,330	1,357	1,305	-	1,369	1,369	1,369	-	1,295							
<i>T<sub>c</sub></i> [ $\mu$ s]	-	4,682	-	4,143	3,484	4,164	3,850	-	4,352	3,552	3,512	-	3,878							

\*IEEE-C.F.-P(S)

## 7.2. TIEMPOS DE FRENTE Y CORTE

Figura 42: Tiempos de frente y corte para el objeto de prueba 2.

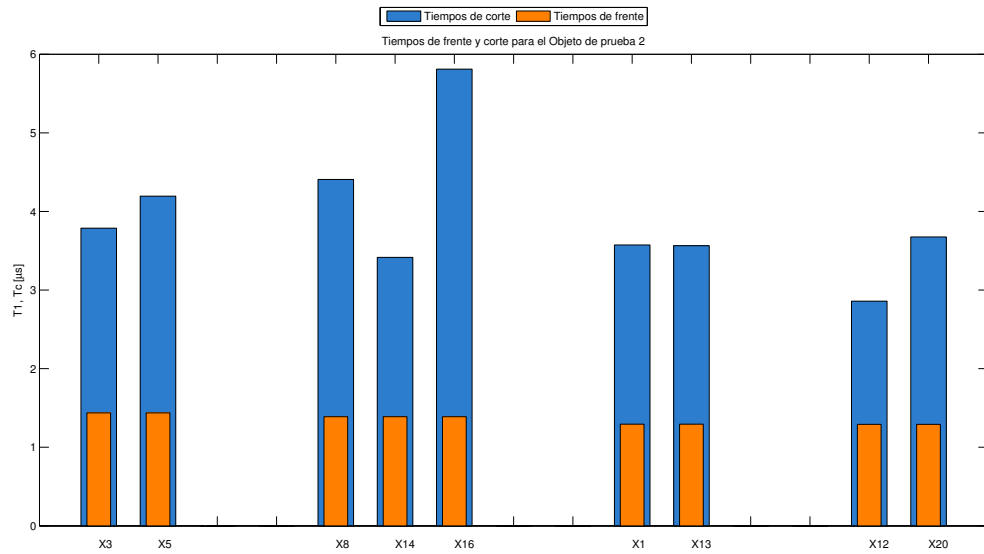
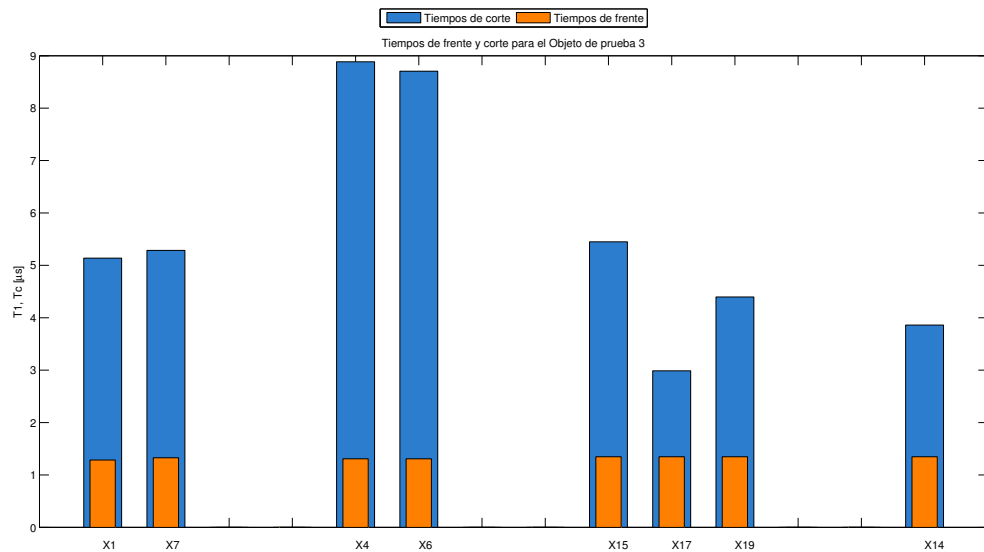


Figura 43: Tiempos de frente y corte para el objeto de prueba 3.



## 7.2. TIEMPOS DE FRENTE Y CORTE

Figura 44: Tiempos de frente y corte para el objeto de prueba 4.

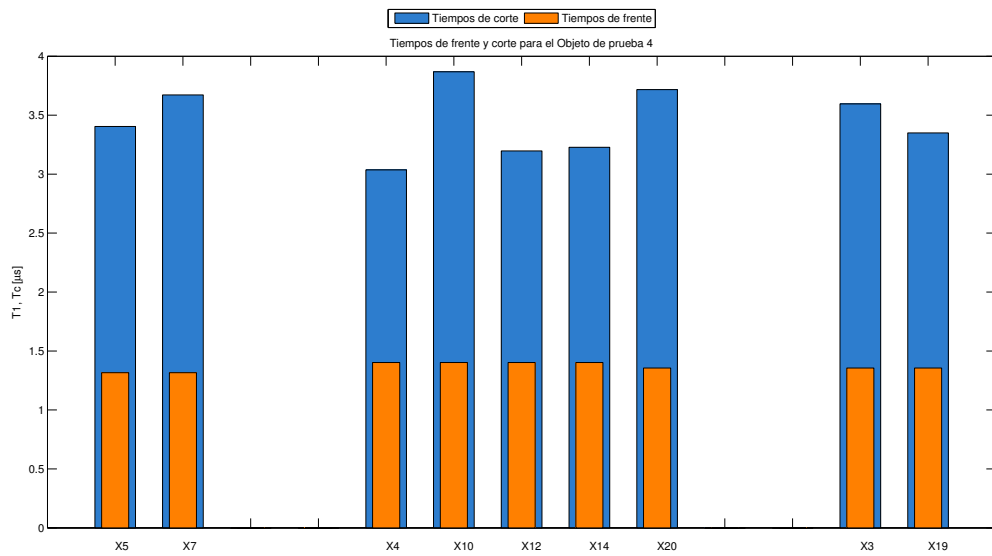
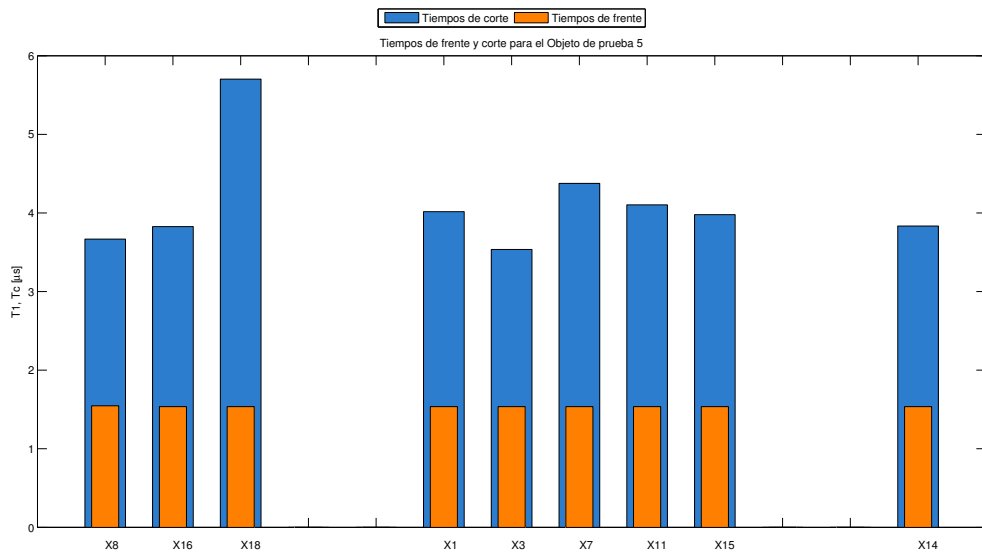


Figura 45: Tiempos de frente y corte para el objeto de prueba 5.



## 7.2. TIEMPOS DE FRENTE Y CORTE

Figura 46: Tiempos de frente y corte para el objeto de prueba 6.

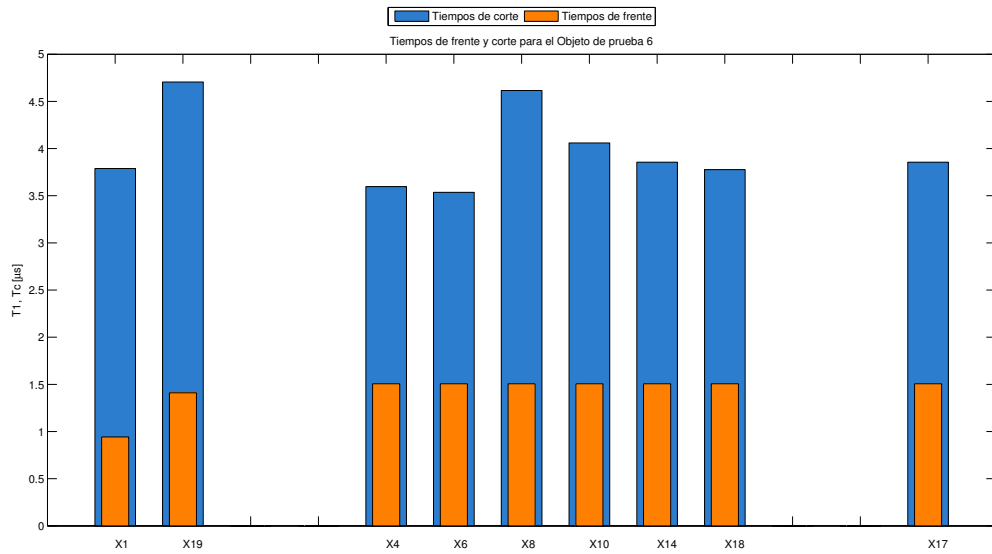
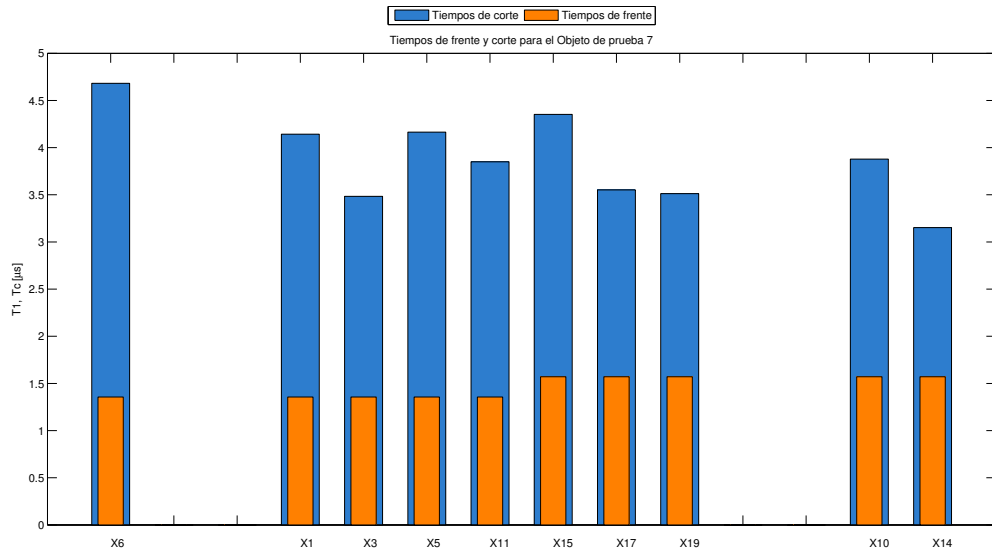


Figura 47: Tiempos de frente y corte para el objeto de prueba 7.



Los ajustes relativos a la ecuación característica del generador, bajo la Curve fitting toolbox de MATLAB (*C.F.-G.I.* e *IEEE-C.F.-G.I.*), presentan inconveniente, al ejecu-

tar la herramienta de cálculo sobre un par de flameos. Por ello, y descartando éstos, se exponen sólo cinco tipos de ajuste bajo formas de onda estándar ( $G.I.$ ,  $P(S)$ ,  $C.F.-P(S)$ ,  $IEEE-G.I.$  e  $IEEE-C.F.-P(S)$ ) (Apéndice D). Por otra parte, la eficiencia de la máquina supone un inconveniente en sí, pues, resulta imposible establecer un valor global, es decir, ésta ha de variar, incluso para eventos del mismo ensayo. Se debe, entonces, elegir con cautela, un valor de eficiencia para cada evento, pues, éste afectará enormemente el desempeño de aquellos ajustes, propios de las constantes características del generador ( $G.I.$  e  $IEEE-G.I.$ ).

Las diferentes formas de onda estándar arrojan similares tiempos de frente y corte para un mismo evento. La Tabla 12 y gráficos de barras de las Figuras 42, 43, 44, 45, 46 y 47, sintetizan los diferentes tiempos para cada nivel de tensión y objeto, según los ensayos *UP and DOWN* realizados, arrojados por la Curve fitting toolbox de MATLAB, bajo el marco sugerido por el *IEEE Std. 4-2013 (IEEE-C.F.-P(S))*, esto, debido al mínimo error de ajuste que este método sustenta, respecto a los cuatro restantes (Tabla 11). Así, el análisis estará basado únicamente en los datos suministrados por éste.

Tabla 13: Cortes máximos y mínimos.

<i>Objeto</i>	<i>Máximo</i> [ $\mu s$ ]	<i>Mínimo</i> [ $\mu s$ ]	$\Delta t$ [ $\mu s$ ]
<i>2</i>	5,811	2,859	2,952
<i>3</i>	8,885	2,987	5,898
<i>4</i>	3,868	3,036	0,832
<i>5</i>	5,702	3,535	2,167
<i>6</i>	4,706	3,536	1,170
<i>7</i>	4,682	3,152	1,530

Los tiempos de frente relativos a cada evento y objeto, presentan valores según los ya sugeridos (Sección 1.4.1.3), es decir, ningún daño afecta de manera notable, el tiempo que toma a la señal, alcanzar su valor cresta.

Los tiempos de corte han de fluctuar, indiferentes al nivel de tensión u objeto. Así, resulta difícil establecer una conclusión realmente clara. En principio, se especuló bastante acerca de los posibles valores y tendencias que podría arrojar cada ensayo. Por una parte, se esperaban pequeñas variaciones a un mismo nivel de tensión, así como menores tiempos (en promedio), a medida que aumentasen éstos. Debido al daño, se pensó también en distancias de fuga y arco que acarreasen quizá, serios efectos en dichos tiempos (disminución y fluctuación a un mismo nivel de tensión): distancias de fuga reducidas, acortarían los tiempos; arcos abriéndose paso a través de múltiples distancias, acarrearían cortes a disímiles tiempos. Sin embargo, los valores extractados de cada ensayo resultaron bastante dispersos (tiempos de corte similares, o no, a diferentes

niveles de tensión), contrariando parte de este supuesto.

No obstante, sí existe un comportamiento digno de mención, respecto a los cortes máximos y mínimos que presenta cada objeto. La Tabla 13, resume estos valores, permitiendo concluir, qué daño físico afecta en mayor medida, el desempeño, en tiempos, de cada aislador.

De los valores consignados en la Tabla 13, se tiene:

- Los daños inducidos a los objetos 2, 3 y 5, se muestran sumamente nocivos, pues la diferencia entre sus cortes máximos y mínimos resulta alarmante. Casualmente, éstos presentan daño en la superficie externa del objeto. Así, un daño en la parte inferior externa, modificará en demasía, el comportamiento global de dichos tiempos (objetos 2 y 3, Figuras 22 y 23). Por otra parte, cualquier rastro de porosidad o aspereza en la superficie esmaltada del objeto, aumentará de manera notable, el tiempo que toma a un impulso desgarrar el aire (objeto 3, Figura 23).
- El objeto usado en campo, libre de modificación o daño físico alguno (objeto 4, Figura 24), resultó en extremo, robusto: indiferente al nivel de tensión, sus cortes presentan tiempos similares (diferencia entre cortes máximo y mínimo no mayor a  $0,9 \mu s$ ).
- Poco puede decirse del objeto 6 (aislador nuevo, libre de modificación o daño alguno): tomado como base debido a su condición, éste supone el tipo de comportamiento esperado a condiciones de uso normales; sus tiempos fluctúan a un mismo, y a diferentes niveles de tensión, no superando, sin embargo, las diferencias entre cortes máximos y mínimos expuestas por los objetos 2, 3 y 5. Esto muestra una mínima fluctuación en tiempos, respecto a otros objetos.
- El objeto de prueba 7 sustenta el mayor daño físico, en términos de materia extirpada. Sin embargo, éste semeja parte del comportamiento expuesto por el objeto base, presentando tiempos similares a este último. Así, las mínimas fluctuaciones respecto a objetos de menor daño señalan lo siguiente: más que el daño, la ubicación del mismo alterará en mayor medida, las fluctuaciones, en tiempos, que pueda llegar a presentar el objeto.

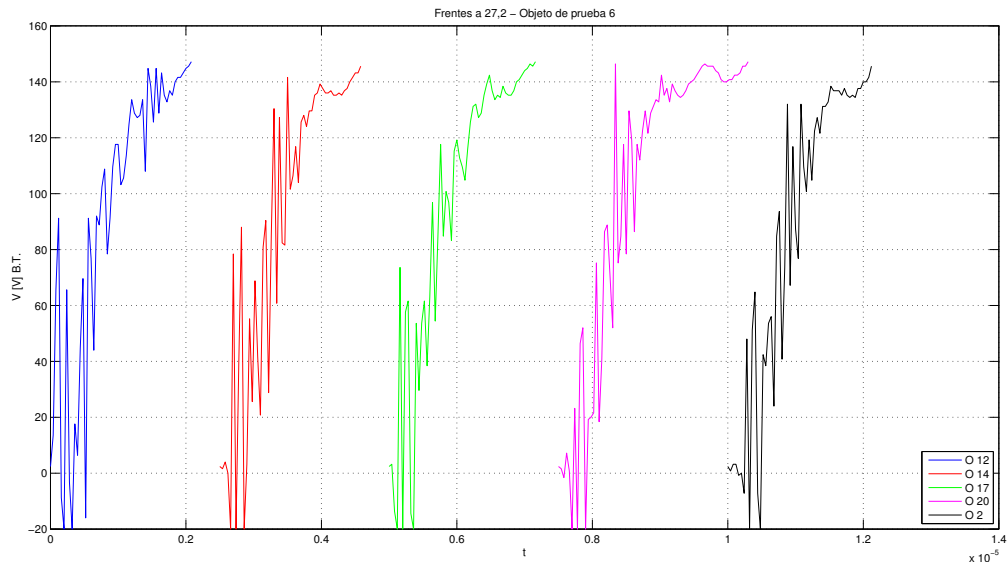
El análisis llevado a cabo expuso tendencias contrarias a las supuestas: los tiempos respectivos al objeto con mayor deterioro, resultaron similares a los arrojados por el objeto base; por otra parte, y contrario a lo esperado, el daño aumentó dichos tiempos, resultando aún más nociva la ubicación, que la magnitud del mismo. El objeto usado en campo presentó un mejor desempeño, siendo imposible determinar un motivo claro que explicase este tipo comportamiento.

## 7.2. TIEMPOS DE FRENTE Y CORTE

Todo esto, claro está, ha sido llevado a cabo bajo condiciones de uso ideales, es decir, se han despreciado variables que pueden llegar a afectar de igual manera, el comportamiento de los cortes en cada objeto. Así, se prescinde de algunos aspectos inherentes a la puesta en marcha y funcionamiento de cualquier equipo que contemple el uso de estos elementos (contaminación, polución, humedad, etc.), esto, a fin de establecer un estudio previo que permita sentar ciertas bases para el desarrollo de futuros proyectos.

Otro aspecto interesante del estudio, recae, evidentemente, en las señales muestreadas. Muestras representativas, permiten observar y comparar, las diversas distorsiones arrojadas por los diferentes objetos. La Figura 48, expone los frentes de señal de aquellos soportes relativos al objeto de prueba 6 (objeto base - aislador nuevo), a un mismo nivel de tensión (27,2 kV). Las diferentes señales allí consignadas, arrojan formas símiles: las distorsiones presentes en cada soporte han de fluctuar (picos atenuados en un par de soportes), conservando no obstante, su forma base. Dichas distorsiones, serán entonces inherentes al equipo y montaje usados durante los diversos ensayos.

Figura 48: Frentes de señal - soportes relativos al objeto de prueba 6 (objeto base).



Tomando una señal representativa por objeto, a niveles de tensión casi idénticos, se expone un gráfico comparativo que permite contrastar las distorsiones arrojadas por cada uno de ellos (Figura 49). De igual manera, la Tabla 14, señala las muestras tomadas por objeto, según los protocolos de ensayo ya mencionados.

Figura 49: Frentes de señal representativos por objeto.

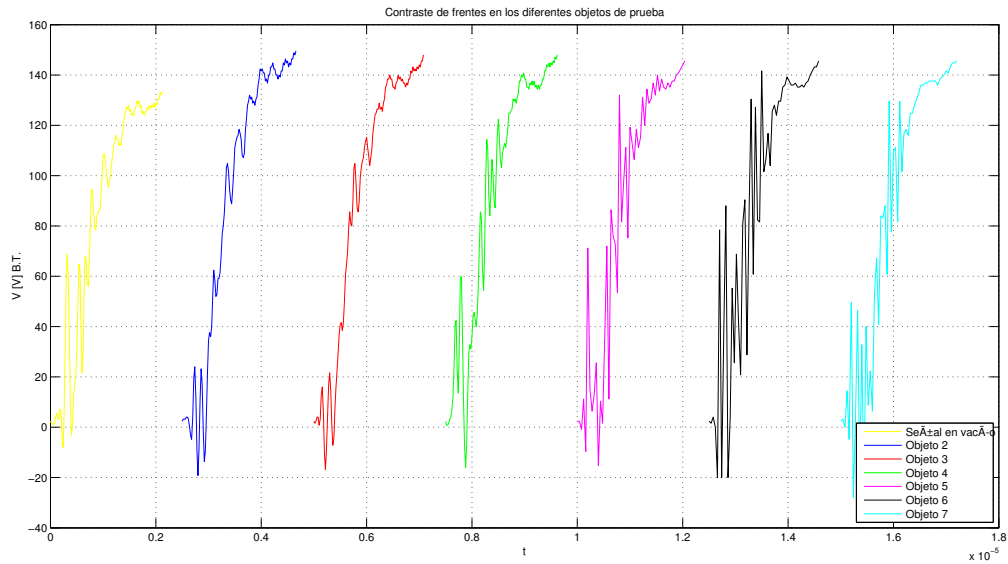


Tabla 14: Soportes representativos tomados por objeto.

<i>Objeto</i>	<i>Nivel de tensión</i>	<i>Soporte representativo</i>
<i>2</i>	<i>27,3</i>	<i>O<sub>10</sub></i>
<i>3</i>	<i>26,9</i>	<i>O<sub>13</sub></i>
<i>4</i>	<i>27,3</i>	<i>O<sub>17</sub></i>
<i>5</i>	<i>27,3</i>	<i>O<sub>4</sub></i>
<i>6</i>	<i>27,2</i>	<i>O<sub>5</sub></i>
<i>7</i>	<i>27,2</i>	<i>O<sub>13</sub></i>

Los frentes de la Figura 49, muestran las diferentes perturbaciones arrojadas por cada objeto. Así, resulta posible deducir de qué manera, el daño inducido a éstos, distorsiona la señal. En los objetos 6 y 7, los frentes de señal presentan símiles distorsiones, evocando el comportamiento mostrado anteriormente por los tiempos de corte en éstos. Entonces, y partiendo del ruido característico de la señal base (objeto 6), las muestras restantes se presentan atenuadas, indicando una clara disminución del ruido, en objetos físicamente alterados. Por otra parte, los objetos que más atenuación sustentan, son precisamente aquellos que mayor fluctuación en sus cortes arrojan. De nuevo, más que el daño, la ubicación del mismo afectará en mayor medida, las distorsiones que pueda llegar a presentar la muestra. Se tiene entonces:

### 7.3. TENSION CRÍTICA DE FLAMEO

---

- Los objetos 6 y 7 (negro y cyan), presentan distorsiones similares, quizá algo atenuadas en este último, teniendo presente, claro está, la magnitud del daño inducido a éste.
- De igual manera, los objetos 4 y 5 (verde y magenta) presentan distorsiones en sus frentes, siendo éstas, sin embargo, no tan elevadas en contraste con el objeto base (objeto 6).
- Finalmente, los daños inducidos a los objetos 2 y 3, atenúan notablemente las distorsiones arrojadas por el objeto base.

Lo anterior, indica en qué medida el daño y su ubicación pueden llegar a atenuar las distorsiones características en este tipo de señales. Se propone entonces, un tipo de clasificación más acorde con el daño expuesto por objeto. La Tabla 15, clasifica los diferentes daños, según el efecto producto de los mismos, en contraste con el comportamiento esperado bajo condiciones de uso normales (objeto 6), es decir, ésta compara y evalúa en qué medida se ven modificadas las características representativas de cada objeto en contraste con el base.

Tabla 15: Índice de daño, según ensayos llevados a cabo (Propuesto por los autores).

<i>Objeto</i>	<i>Daño (alteración)</i>	
	<i>Corte</i>	<i>Ruido</i>
<i>2</i>	Medio	Alto
<i>3</i>	Alto	Alto
<i>4</i>	Nulo	Bajo
<i>5</i>	Medio	Bajo
<i>6</i>	-	-
<i>7</i>	Bajo	Bajo

Por supuesto, estas afirmaciones son sólo un ápice del estudio que, con recursos y tiempo, podría llevarse a cabo.

#### SECCIÓN 7.3

### TENSION CRÍTICA DE FLAMEO

El procedimiento físico y estadístico para determinar la tensión de chispa de un objeto de prueba, ha sido descrito en el Capítulo 3.

### 7.3. TENSION CRÍTICA DE FLAMEO

Como objeto de prueba, se tienen diferentes aisladores tipo pin de 13,2 kV - 8195 (ver Sección 6.1). La Tabla 1, lista las características eléctricas de éstos. La Figura 50, muestra el montaje realizado para llevar a cabo la caracterización del objeto de prueba, según lo descrito en la Sección 1.5.

Figura 50: Montaje realizado para los ensayos de laboratorio.



La Tabla 16, permite apreciar el protocolo usado para registrar los eventos de cada ensayo *UP and DOWN*.

Tabla 16: Protocolo tipo para ensayos *Up and DOWN*.

<i>Objeto de prueba: 1</i>					<i>Fecha: 05/11/14</i>					
<i>T [°C]: 26,1</i>			<i>h<sub>r</sub>, [%]: 68,4</i>			<i>P [mmHg]: 677,7</i>				
<i>V<sub>0</sub> = 24,5 kV</i>					<i>ΔV = 0,4 kV</i>					
<i>kV/etapa</i>	<i>B.T. [V]</i>	<i>Evento</i>	<i>→</i>	<i>Flameos: X</i>			<i>Soportes: O</i>			
25,3	135	O <sup>2</sup>								
25,7	137	X <sup>1</sup>	O <sup>3</sup>							
26,1	141	O <sup>4</sup>	O <sup>6</sup>	O <sup>8</sup>	O <sup>10</sup>	O <sup>12</sup>	O <sup>14</sup>			X <sup>20</sup>
26,5	144	X <sup>5</sup>	X <sup>7</sup>	X <sup>9</sup>	X <sup>11</sup>	X <sup>13</sup>	O <sup>15</sup>	O <sup>17</sup>		X <sup>19</sup>
26,9	146,5						X <sup>16</sup>	X <sup>18</sup>		

A continuación, se presenta el cálculo tipo necesario para determinar la tensión de chis-

pa, según el protocolo mostrado en la Tabla 16 (objeto de prueba 1).

De la Tabla 1, a condiciones nominales, el valor de tensión de flameo crítico al impulso positivo no supera los 110 kV. A condiciones de laboratorio (Capítulo 4), éste estará dado por:

$$V_{50}^* = \frac{k_d}{k_h} * V_{50}$$

donde,

$$k_d = \left(\frac{p}{p_0}\right)^m * \left(\frac{273 + t_0}{273 + t}\right)^n = \left(\frac{677,7}{760}\right)^1 * \left(\frac{273 + 20}{273 + 26,1}\right)^1 = 0,874$$

La Figura 18, permite hallar el factor de corrección por humedad  $k_h$ , en función de la humedad absoluta. Esto, requiere de una pequeña interpolación lineal (ecuación (7.1)), que permita conocer los gramos por metro cúbico de vapor de agua presentes durante el ensayo (Tabla 6).

$$y = y_a + \left[ (x - x_a) \left( \frac{y_b - y_a}{x_b - x_a} \right) \right] \quad (7.1)$$

Así, para los 26,1 °C del ensayo tipo, se tiene:

$$23,67 + \left[ (26,1 - 26) \left( \frac{25 - 23,67}{27 - 26} \right) \right] = 23,803 \text{ g/m}^3$$

La humedad absoluta  $h_a$ , será entonces:

$$h_a = y * h_r = 23,803 * (0,684) = 16,281 \text{ g/m}^3$$

De la Figura 18, y para una humedad absoluta de 16,28 g/m<sup>3</sup>,  $k \approx 0,959$ .

De igual manera, de la Tabla 5, y para configuraciones de tipo punta-placa, el exponente  $w$  toma un valor igual a la unidad.

Entonces,

$$k_h = k^w = 0,959^1 = 0,959$$

y,

$$V_{50}^* = \frac{0,874}{0,959} * 110 = 100,25 \text{ kV}$$

De la ecuación (3.3), y para una desviación estándar de 3%, se tiene:

### 7.3. TENSION CRÍTICA DE FLAMEO

$$V_0 = V_{50}^* - (2 * \sigma_{IA} * V_{50}^*) = 100,25 - (2 * 0,03 * 100,25) = 94,24 \text{ kV}$$

Este valor, establece la tensión inicial que debe aplicarse al generador para dar inicio al ensayo. No obstante, buscando mitigar el esfuerzo a que se ve sometido el equipo, dicho valor se reparte en 4 etapas, a 96 % de eficiencia cada una. Así, la tensión por etapa (kV/etapa) e incrementos de tensión (ecuación 3.4)), estarán dados por:

$$\frac{94,24}{4 * 0,96} = 24,5 \text{ kV/etapa}$$

$$\Delta V = 24,5 * 0,015 = 0,37 \approx 0,4$$

Tabla 17: Resumen de ensayo para cálculo tipo.

<i>Nivel</i>	<i>kV/etapa</i>	<i>B. T. [V]</i>	<i>A. T. [kV]</i>	<i>S (O)</i>	<i>F (X)</i>	<i>T. Eventos</i>
1	25,3	135	97,3	1	0	1
2	25,7	137	98,7	1	1	2
3	26,1	141	101,6	6	1	7
4	26,5	144	103,8	2	6	8
5	26,9	146,5	105,6	0	2	2

La Tabla 17, extrae la información necesaria del protocolo tipo para llevar a cabo el cálculo de la tensión de chispa. Las columnas 3 y 4, hacen referencia a las tensiones medidas, vistas desde baja y alta tensión respectivamente (relación de transformación del divisor capacitivo: 720,5:1 - Tabla 3). Cabe recordar que los niveles de tensión registrados en el protocolo, sólo se dan a partir del primer impulso efectivo. Entonces, haciendo uso de la ecuación (3.6),

$$V_{50}^* = \frac{\sum (k_i V_i)}{n} = \frac{(1 * 97,3) + (2 * 98,7) + (7 * 101,6) + (8 * 103,8) + (2 * 105,6)}{20}$$

$$V_{50}^* = 102,35 \text{ kV}$$

Finalmente, la tensión de chispa para el objeto de prueba, a condiciones normalizadas será:

$$V_{50} = \frac{k_h}{k_d} * V_{50}^* = \frac{0,959}{0,874} * 102,35 = 112,30 \text{ kV}$$

Las tensiones de chispa para cada objeto de prueba se hallan listadas en la Tabla 18.

Tabla 18: Resumen de resultados (tensión de chispa).

<i>Objeto</i>	$V_{50}^*$ [kV]	$V_{50}$ [kV]	$T$ [°C]	$P$ [mmHg]	$h_r$ [%]	$h_a$ [g/m <sup>3</sup> ]	$k_d$	$k, k_h$	$m, n, w$
1	102,35	112,30	26,1	677,7	68,4	16,281	0,874	0,959	1
2	106,92	116,92	25	677,9	71	16,096	0,877	0,959	1
3	102,60	112,90	24,9	677,7	68	15,322	0,877	0,965	1
4	104,98	117,64	25	679,2	57,5	13,035	0,879	0,985	1
5	104,33	116,51	26	678,1	59,1	13,989	0,874	0,976	1
6	102,02	115,01	26	676,2	55,6	13,161	0,872	0,983	1
7	103,90	115,51	25,6	679,2	60,3	14,032	0,877	0,975	1

Al igual que los supuestos mencionados en la Sección 7.2, se pensó en tensiones de chispa realmente acordes con el daño, es decir, la tensión de flameo crítico nominal del objeto base (110 kV - Tabla 1), se haría notablemente menor cuanto mayor resultase el daño. No obstante, los valores consignados en la Tabla 18 suponen lo contrario: las tensiones de chispa presentan cambios nimios, resultando indiferentes a cualquier tipo de daño.

#### SECCIÓN 7.4

### ENSAYOS DE TENSIÓN NO DISRUPTIVA DE IMPULSO

El ensayo de tensión no disruptiva de impulso requiere de tres impulsos de tensión consecutivos, cuyo valor cresta supere (por poco) el valor de tensión no disruptiva especificado. De soportar dichos impulsos, el objeto dará sustento a los requerimientos del ensayo.

Las Figuras 51, 52 y 53, presentan cada uno de los tres impulsos de tensión consecutivos, obtenidos del ensayo de tensión no disruptiva de impulso llevado a cabo sobre el

#### 7.4. ENSAYOS DE TENSIÓN NO DISRUPTIVA DE IMPULSO

objeto de prueba 5. Impulsos similares, para cada objeto de prueba sometido a estudio, se obtienen de este ensayo.

Figura 51: Primer impulso de tensión consecutivo - ensayo de tensión no disruptiva de impulso - objeto 5.

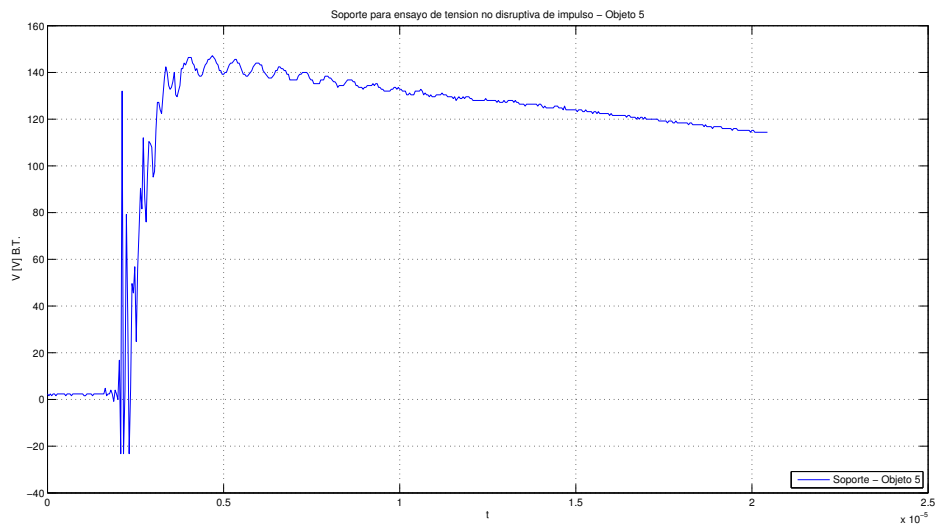
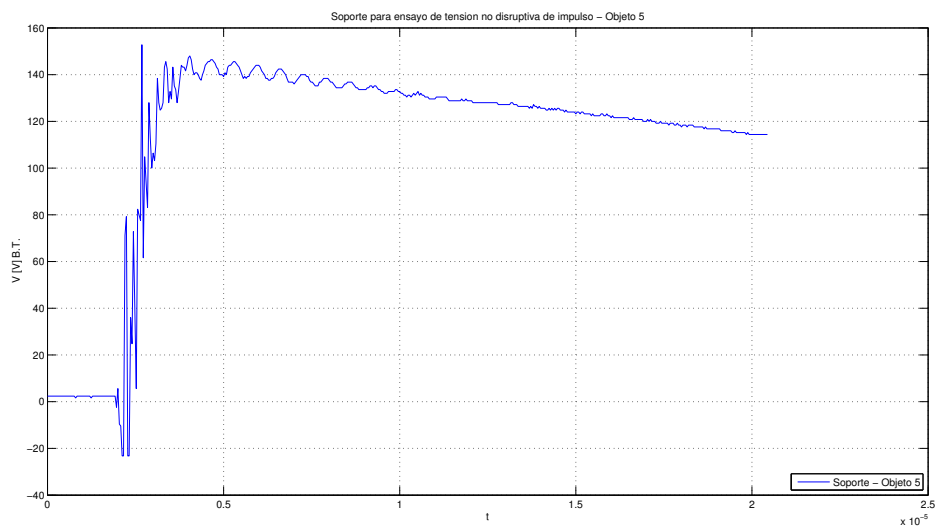
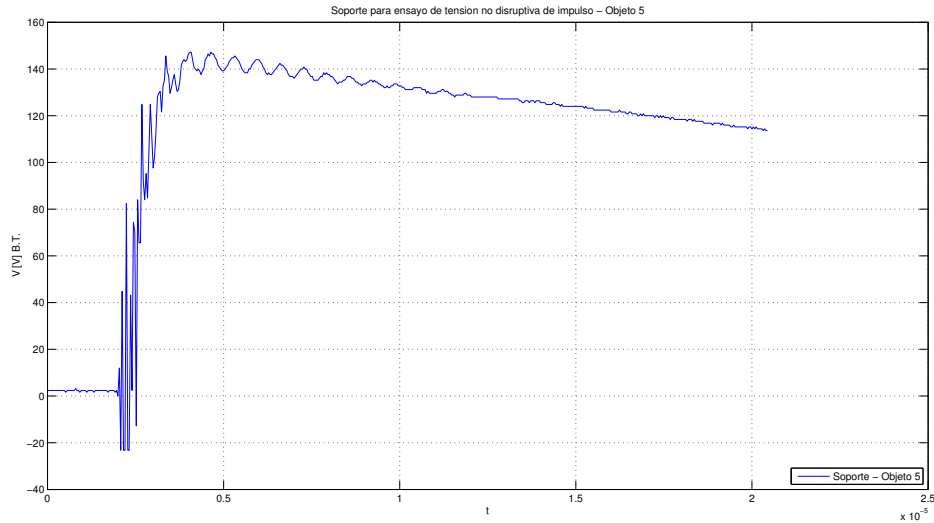


Figura 52: Segundo impulso de tensión consecutivo - ensayo de tensión no disruptiva de impulso - objeto 5.



## 7.5. CURVAS TENSION-TIEMPO

Figura 53: Tercer impulso de tensión consecutivo - ensayo de tensión no disruptiva de impulso - objeto 5.



El total de objetos sometidos a estudio, satisface la exigencia dieléctrica requerida por el ensayo. Así, independiente al daño, cada objeto resistirá los embates provocados por impulsos de tensión de magnitud o valor cresta cercano al valor de tensión no disruptiva, es decir, los valores de tensión que ha de soportar cada objeto previo a la descarga, no se ven alterados, afianzando así, los resultados arrojados por los diferentes ensayos *UP and DOWN* llevados a cabo.

### SECCIÓN 7.5

## CURVAS TENSION-TIEMPO

Las curvas tensión-tiempo, comúnmente usadas en coordinación de aislamiento, se obtienen aplicando múltiples impulsos, a niveles de tensión cada vez crecientes (el valor asintótico de la curva tenderá al valor *CFO* del objeto). Esta característica resulta una propiedad práctica importante para cualquier dispositivo dieléctrico, pues provee bases que permiten establecer qué capacidad de resistencia al impulso presenta cualquiera de ellos, así como las mismas para el diseño de los correctos niveles de protección contra cualquier tipo de sobretensión.

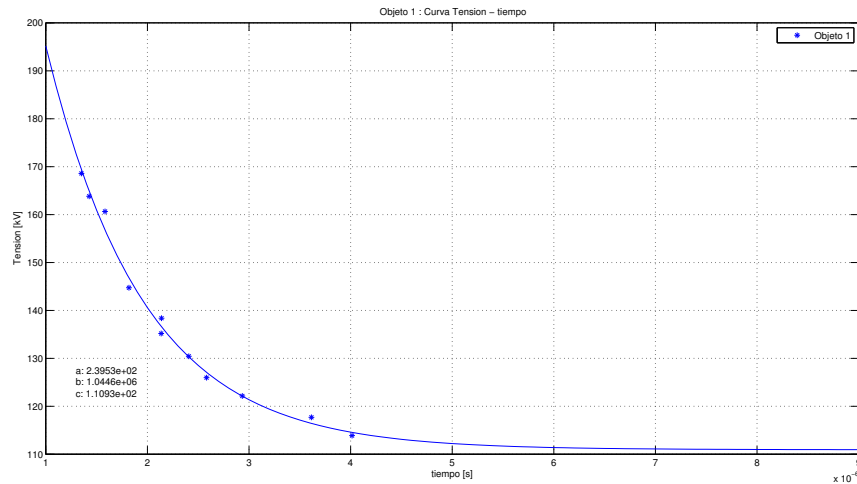
El tiempo requerido para el desarrollo de la descarga, dependerá, igualmente, de la razón de crecimiento de la tensión aplicada, y, de la geometría propia del entre-hierro.

## 7.5. CURVAS TENSION-TIEMPO

En campos uniformes y cuasi-uniformes, la característica tensión-tiempo resulta una curva notablemente definida. En campos no-uniformes, sin embargo, debido a las fluctuaciones arrojadas por el conjunto de datos muestreados, éstos últimos caerán en una banda de dispersión, debido a la menor sensibilidad que presentan los tiempos de corte, a dichos aumentos de tensión.

Además de la naturaleza propia del campo (cuasi-uniforme), pequeñas variaciones en el valor cresta de cada impulso, arrojarán, de presentarse flameo, tiempos de corte similares. Por ello, se recomiendan aumentos de tensión sobre los 5 kV/etapa. La Figura 54, presenta la característica tensión-tiempo del objeto de prueba base (objeto 1). De igual manera, la Tabla 19, lista los valores cresta\* y tiempos de corte extractados de cada impulso, para dicho objeto. De esta manera, el conjunto de datos muestreados para la obtención de la característica tensión-tiempo, se ajusta a una ecuación exponencial decreciente (ecuación (7.2)).

Figura 54: Característica tensión-tiempo objeto 1.



$$y(t) = c + a * e^{-b*t} \quad (7.2)$$

donde, y para éste caso,

$$a = 239,53 \text{ kV}$$

$$b = 1,0446 * 10^6 \text{ 1/s}$$

\*Valores cresta normalizados.

## 7.5. CURVAS TENSION-TIEMPO

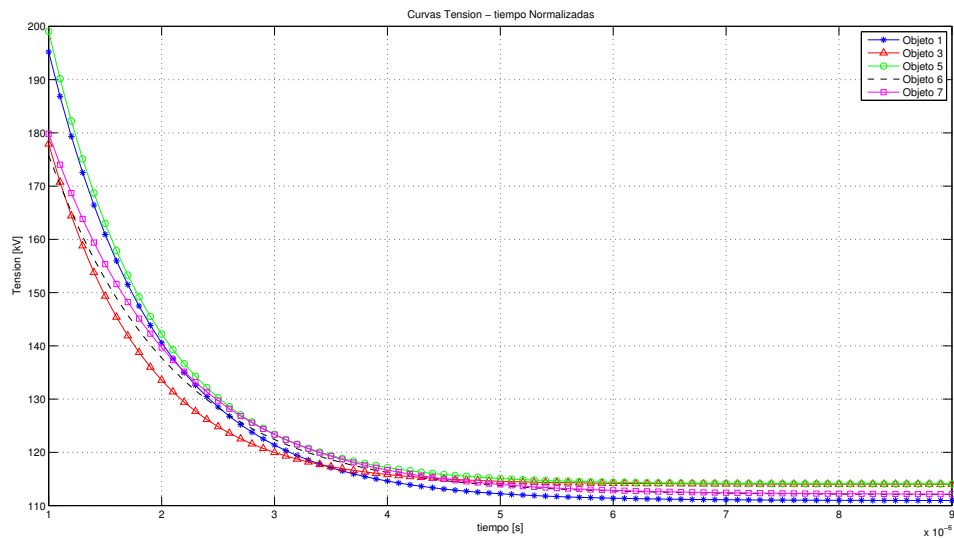
$$c = 110,93 \text{ kV}$$

Tabla 19: Valores cresta normalizados y tiempos de corte para la determinación de la característica tensión-tiempo del objeto 1.

<i>Tiempo de corte [<math>\mu</math>s]</i>	<i>Tensión [kV]</i>
4,0142	113,88
3,6142	117,69
2,9342	122,15
2,5825	125,97
2,4076	130,42
2,1354	135,19
2,1389	138,37
1,8183	144,73
1,5828	160,64
1,4274	163,82
1,3504	168,59

Las curvas tensión-tiempo características de los restantes objetos de prueba, se hallan consignadas en el Apéndice E.

Figura 55: Característica tensión-tiempo de objetos 1, 3, 5, 6 y 7.



La Figura 55, presenta el total de curvas tensión-tiempo. De ésta, se observa:

- Las tensiones de flameo crítico obtenidas de cada ensayo *UP and DOWN*, se sitúan entre los 110 kV y 120 kV, superando, la tensión de flameo crítico al impulso positivo sugerida por el fabricante (110 kV).
- A pesar de arrojar un valor de tensión de flameo crítico mayor en contraste con otros objetos, el objeto 3 presenta una característica tensión-tiempo mucho más definida. Así, sobre los 120 kV, el desarrollo de la descarga en éste, tomará menor tiempo que en otros.
- El objeto usado en campo (verde), modificado físicamente, resulta sumamente robusto: su característica tensión-tiempo supera las expuestas por otros objetos, indicando un mejor comportamiento frente a fenómenos de tipo atmosférico.
- El objeto de mayor superficie extirpada presenta una característica tensión-tiempo similar a la expuesta por el objeto base.

Entonces, los daños situados justo sobre la superficie externa inferior del objeto (objetos 2 y 3 ), afectarán en mayor medida el comportamiento dieléctrico en este tipo de elementos. Por otra parte, daños internos (objeto 7) resultan poco nocivos, modificando nimiamente dicho comportamiento.

### SECCIÓN 7.6

## CORRIENTES

Para su registro, las corrientes de impulso generadas en laboratorios de ensayo, requieren el uso de *resistores shunt*. Éstos, constituidos por diferentes cargas resistivas a través de las cuales se ha de derivar la corriente, son en verdad, cilindros metálicos con bridas de acoplamiento y conectores coaxiales de medición. Generalmente, el *resistor shunt*, conocido previamente, es usado para determinar la intensidad de corriente eléctrica que ha de fluir a través de la carga.

Así, los ensayos llevados a cabo, permitirán captar la intensidad de corriente generada por la descarga, a través de la diferencia de potencial registrada en el *resistor shunt*, (Figura 12, ecuación (2.1)).

Dichos ensayos se darán a niveles de tensión idénticos o similares a los usados en los ensayos *UP and DOWN*. Inicialmente, éstos se llevaron a cabo haciendo uso de un resistor shunt ( $2 \Omega$ ) de capacidades limitadas en contraste con las necesidades requeridas por el estudio (la tensión medida en el resistor excedía el valor máximo sugerido por

## 7.6. CORRIENTES

el fabricante del mismo - 1000 V). La Tabla 20, lista los valores de tensión y corriente extractados únicamente de los ensayos más representativos.

Tabla 20: Corrientes de los objetos de prueba más representativos.

<i>R shunt SH Q0.47: 0,5 <math>\Omega \pm 5\%</math></i>							
<i>Objeto de prueba</i>	<i>R shunt</i>	<i>kV/etapa</i>	<i>T [<math>\mu</math>s]</i>	<i>V<sub>máx</sub> shunt [V]</i>	<i>I [A]</i>		
3	SH Q0.47	26,1	6,52	1030	2060		
			6,52	1010	2020		
		26,5	6,40	880	1760		
			7,16	848	1696		
			6,12	824	1648		
		26,9	6,20	1090	2180		
			5,00	896	1792		
		27,3	5,60	904	1808		
5	SH Q0.47		27,3	8,40	808	1616	
		5,80		984	1968		
		27,7	5,56	888	1776		
			5,52	1024	2048		
		28,1	5,64	1168	2336		
			6	SH Q0.47	26,2	6,64	1040
6,84	1040	2080					
26,7	6,32	1152			2304		
	7,16	1280			2560		
27,2	5,68	1056			2112		
	6,00	1216			2432		
27,7	5,60	904			1808		
7	SH Q0.47	26,7			6,24	1192	2384
		27,2			6,16	1096	2192
		27,7			5,92	1016	2032

De la Tabla 20, se tiene entonces:

- A un mismo nivel de tensión y para un mismo objeto, las diferentes intensidades de corriente registradas fluctúan, es decir, en algunos casos no se ve una tendencia clara o valor estable que permita definir de manera tácita dicha intensidad.
- Al contrastar los valores de corriente de los diferentes objetos, a similares niveles de tensión (27,7 kV/etapa por ejemplo), podría pensarse en un decremento en aquellos objetos modificados externamente (3 y 5). Sin embargo, debido a dichas fluctuaciones resulta imposible establecer una relación clara entre el daño y la magnitud o intensidad de corriente asociada al flameo.

## 7.6. *CORRIENTES*

---

Por tanto, los resultados de este ensayo resultan poco concluyentes.

---

# OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

---

## SECCIÓN 8.1

### OBSERVACIONES

- La cercanía de equipos u objetos externos al ensayo, generará distorsión en las señales muestreadas. Por ello, y buscando mitigar un poco el impacto que las distancias de separación puedan generar, se recomienda el uso de ensayos previos, así como un sondeo general del equipo de ensayo y medida. Esto, quizá permita localizar posibles focos de error, estableciendo así, condiciones propicias para la realización de una práctica acertada. Por otra parte, debido a lo extenso de los ensayos y estudios propios de la Alta Tensión, resulta apenas lógico disgregar éstos en varias sesiones. Sin embargo, ha de evitarse a toda costa, cualquier tipo de alteración que modifique las condiciones iniciales bajo las cuales se ha dado inicio al estudio (distancias de separación, equipos, etc.), a fin de garantizar uniformidad y consistencia en las pruebas.
- La planeación previa acerca del análisis e implementación de ensayos, evitará errores de ejecución durante el desarrollo de éstos, obviando el gasto innecesario de recursos y tiempo.
- Este estudio se presenta como plataforma o base para el desarrollo de futuros proyectos que contemplen variables aquí excluidas (impurezas, humedad, etc). Así, la herramienta por los autores desarrollada, permitirá llevar a buen término, y

especialmente, de manera rápida y eficaz, análisis de ensayos en aisladores tipo pin de 13,2 kV ( o cualquier otro tipo de objeto o dispositivo de protección) mediante ondas 1,2/50 completas, modificadas, o no, sus características físicas, bajo diversas condiciones de intemperie, permitiendo contrastar los diferentes estudios llevados a cabo y, proporcionando valiosa información acerca del comportamiento característico en éstos. De igual manera, esta se prevee la primera fase de un compendio de estudios, encaminado al análisis de las diferentes condiciones de operación que pueden darse en este tipo de dispositivos.

### SECCIÓN 8.2

## CONCLUSIONES

- Para el análisis de un impulso atmosférico de tensión, se desarrolló una herramienta capaz de comparar diferentes métodos y metodologías, permitiendo llevar a cabo ajustes estándar y de tipo oscilatorio. Así, dicha herramienta servirá de apoyo para el desarrollo de futuros proyectos y prácticas de laboratorio.
- Literatura y diversos artículos dedicados al desarrollo e investigación en técnicas de Alta Tensión, proponen diferentes formas de onda para llevar a cabo el ajuste de un impulso atmosférico de tensión. Sin embargo, el desarrollo e implementación de una herramienta capaz de comparar diferentes formas, bajo múltiples métodos, metodologías y demás, permitió exaltar las bondades expuestas por las formas de onda estándar, resultando en extremo efectivas, aún sobre aquellas con presencia de componentes oscilatorias. En algunos casos, estas componentes modelan fielmente el tipo de perturbaciones arrojadas por la señal muestreada, siendo quizá, realmente aptas en estudios de modelado y caracterización de ruido en señales de tipo impulsional.
- Debido al bajo porcentaje de ajustes efectivos por impulso, y, a la alta sensibilidad al número de muestras que sustenta, el método de ajuste Prony, en cualquiera de sus formas, se muestra poco fiable, aplicado a este tipo de señales. Por otra parte, la Curve fitting toolbox de MATLAB, resulta una opción viable y de fácil uso, permitiendo ajustar cualquier tipo de señal a las diferentes formas de onda expuestas. Su efectividad, y quizá única desventaja, radica en la elección previa de aquellos valores necesarios para su ejecución, pues de éstos dependerá la eficacia al momento de llevar a cabo el ajuste.
- Los tiempos de frente relativos a cada evento y objeto, presentan valores según lo sugerido por el *IEEE Std. 4-2013* ( $1,2 \pm 30\%$ ). Así, ningún daño afecta de manera notable, el tiempo que toma a la señal alcanzar su valor cresta.

- A pequeños incrementos de tensión, y opuesto al tipo de comportamiento esperado, los tiempos de corte de cada objeto han de fluctuar independiente al daño o estado físico del objeto. No obstante, considerables incrementos de tensión permiten observar notables decrementos en dichos tiempos, facilitando la obtención de la característica tensión-tiempo. Por otra parte, se esperaban menores tiempos de corte según la magnitud del daño inducido a cada objeto. Sin embargo los ensayos arrojaron tendencias contrarias a este supuesto, aumentando notablemente, el tiempo que toma a un impulso desgarrar el aire.
- Los daños inducidos a cada objeto, no modifican de manera clara el valor de tensión de flameo crítico al impulso positivo sugerido por el fabricante (110 kV). De igual manera, las exigencias requeridas por los ensayos de tensión disruptiva de impulso llevados a cabo, se muestran acorde con lo establecido por el *IEEE Std. 4-2013*.
- Los resultados arrojados por cada uno de los diferentes ensayos, permiten concluir lo siguiente: más que la magnitud del daño, la ubicación del mismo afectará, o, modificará en mayor medida el comportamiento característico del objeto. Así por ejemplo, el objeto que sustenta la mayor cantidad de materia extirpada (objeto 7), presenta características similares a las expuestas por el objeto base (objeto 6): sus tiempos de corte, ruido, y característica tensión-tiempo, se semejan entre sí. El objeto usado en campo, modificado físicamente (objeto 5), en contraste con su objeto base (objeto 4), presenta gran fluctuación en sus cortes a pesar de la nimia fluctuación expuesta por este último. Finalmente, los objetos 2 y 3 (daño situado en la falda externa del objeto), sustentan la mayor diferencia en sus cortes máximo y mínimo. De igual manera, el daño en éstos disminuye considerablemente el ruido que presenta el objeto base, definiendo notablemente su característica tensión-tiempo. Entonces, pese a los similares valores de tensión crítica de flameo al impulso positivo arrojados por los diferentes objetos sometidos a estudio, sobre los 120 kV (Figura 55), el desarrollo de la descarga en objetos cuyo daño implique cualquier tipo de modificación externa, tomará menor tiempo que en otros.
- Resulta imposible establecer una relación clara entre el daño y la magnitud o intensidad de corriente asociada al flameo, haciendo de éste, un estudio poco concluyente.
- En general, un daño interno, similar al expuesto por el objeto 7, no modifica en demasía las características dieléctricas de este tipo de objetos. Contrario a esto, cualquier cambio o modificación de las características físicas externas, especialmente aquellas situadas en la parte inferior del objeto, alterarán de manera notable, los cortes, ruido, característica tensión-tiempo y demás características dieléctricas que pueda presentar el objeto. Además, cualquier rastro de porosidad o aspereza en la superficie esmaltada del objeto, puede modificar de manera notable los cortes y demás propiedades en éstos.

**SECCIÓN 8.3**

**SUGERENCIAS**

Se sugiere a la escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander:

- Realizar un análisis de ensayos en húmedo, en aisladores de porcelana tipo pin de 13,2 kV mediante onda 1,2/50 completa. Además, se sugiere llevar a cabo un análisis similar sobre aisladores bajo diversas condiciones de impureza.

# REFERENCIAS

---

- [1] Nils HYLÉN-CAVALLIUS. High voltage laboratory planning. Basel, CH: Asea-Heafely, 1986. 309p.
- [2] E KUFFEL, W.S. ZAENGL, and J. KUFFEL. High voltage engineering - fundamentals. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. 552p.
- [3] INSTITUTO. COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN - ICONTEC. Electrotecnia. Método de ensayo para aisladores de potencia eléctrica. NTC 1285. Bogotá: ICONTEC, 2002.
- [4] Julio RUGELES and Julio CHACÓN. Laboratorio de alta tensión - manual de prácticas. Bucaramanga: UIS, 2013. 89p.
- [5] Klaus SCHON. High impulse voltage and current measurement techniques fundamentals - measuring instruments - measuring methods. New York: Springer, 2013. 264p.
- [6] Arnold ROTH. Técnica de la alta tensión. Barcelona: Labor, 1966. 887p.
- [7] IEEE. Standard for High-Voltage Testing Techniques. Std. 4. Redline, 2013.
- [8] Raúl Omar VILA. Estudio sobre el generador de impulsos de la universidad industrial de santander. Bucaramanga: UIS, 1991. 28p.
- [9] E. A. FEILAT. Prony analysis technique for estimation of the mean curve of lightning impulses. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, Vol. 21, No. 4.

# BIBLIOGRAFÍA

---

CASTELLANOS, H. D. Tensión de chispa para distancias de aislamiento hasta de un metro con impulsos de polaridad positiva, utilizando electrodos punta-punta y punta-placa. Tesis Magister en Potencia Eléctrica. Bucaramanga: UIS. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones., 2002. 165p.

CODENSA S.A. E.S.P. Especificación técnica aisladores de porcelana tipo estación. ET-257. Bogotá: CODENSA, 2004.

COMÍN, P. S. Investigación de los parámetros característicos del comportamiento de medios dieléctricos frente a sobretensiones tipo rayo no normalizadas en alta tensión. Tesis Doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Ingeniería Eléctrica., 2004. 190p.

FEILAT, E. A. Prony analysis technique for estimation of the mean curve of lightning impulses. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, Vol. 21, No. 4.

FILIPOVIĆ-GR ČIĆ, D., FILIPOVIĆ-GR ČIĆ, B., and UGLE SIĆ, I. Lightning critical flashover voltage of high voltage insulators: Laboratory measurements and calculations. International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E), 2012, Vol. 7, N.2.

HAUSCHILD, W., and MOSCH, W. Statistical techniques for high-voltage engineering. London: Peter Peregrinus, 1992. 310p.

HYLTÉN-CAVALLIUS, N. High voltage laboratory planning. Basel, CH: Asea-Heafely, 1986. 309p.

IEEE. Standard for High-Voltage Testing Techniques. Std. 4. Redline, 2013.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN - ICONTEC. Electrotecnia. Método de ensayo para aisladores de potencia eléctrica. NTC 1285.

## REFERENCIAS

---

Bogotá: ICONTEC, 2002.

KUFFEL, E., ZAENGL, W., and KUFFEL, J. High voltage engineering - fundamentals. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. 552p.

NAIDU, M., and KAMARAJU, V. High voltage engineering. New Delhi: McGraw-Hill, 1996. 500p.

QI, L., QIAN, L., CARTES, D., and WOODRUFF, S. Initial results in prony analysis for harmonic selective active filters. IEEE Transactions on Power Systems, 2006.

ROTH, A. Técnica de la alta tensión. Barcelona: Labor, 1966. 887p.

RUGELES, J. Conceptos básicos en técnicas de la alta tensión. Bucaramanga: UIS, 1984. 90p.

RUGELES, J., and CHACÓN, J. Laboratorio de alta tensión - manual de prácticas. Bucaramanga: UIS, 2013. 89p.

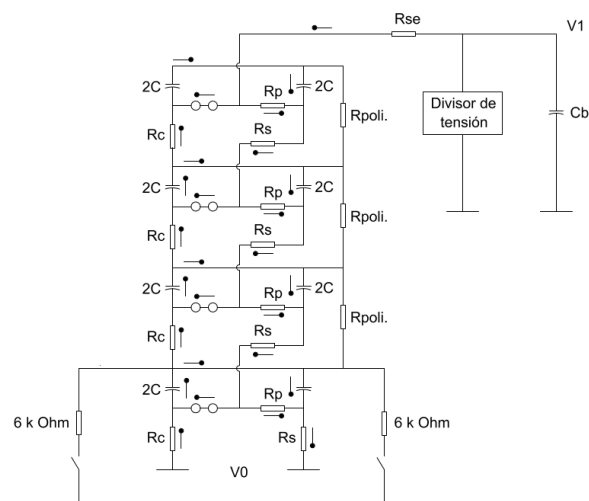
SCHON, K. High impulse voltage and current measurement techniques fundamentals - measuring instruments - measuring methods. New York: Springer, 2013. 264p.

VILA, R. O. Estudio sobre el generador de impulsos de la universidad industrial de santander. Bucaramanga: UIS, 1991. 28p.



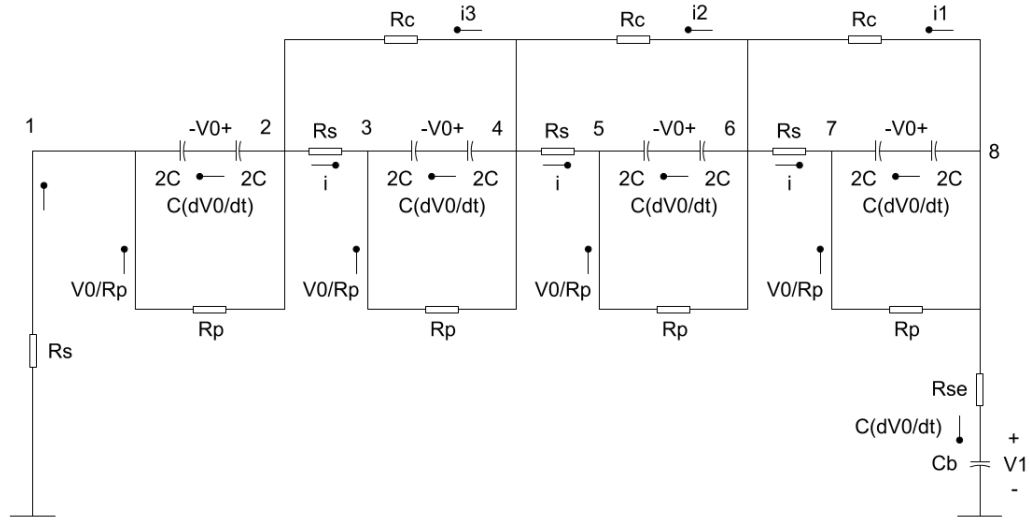
# ESTUDIO SOBRE EL GENERADOR DE IMPULSOS DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

Figura 56: Generador de 4 etapas en serie.



Fuente: VILA, R. O. Estudio sobre el generador de impulsos de la universidad industrial de santander. Bucaramanga: UIS, 1991. 28p.

Figura 57: Circuito al momento de descarga.



Fuente: VILA, R. O. Estudio sobre el generador de impulsos de la universidad industrial de santander. Bucaramanga: UIS, 1991. 28p.

De la Figura 57, y para los nodos 2, 4, 6 y 8 se tiene:

$$\text{Nodo 2 : } \rightarrow C * \frac{dV_0}{dt} + \frac{V_0}{R_p} + i = i_3 \quad (\text{A.1})$$

$$\text{Nodo 4 : } \rightarrow C * \frac{dV_0}{dt} + \frac{V_0}{R_p} + i + i_3 = i_2 \quad (\text{A.2})$$

$$\text{Nodo 6 : } \rightarrow C * \frac{dV_0}{dt} + \frac{V_0}{R_p} + i + i_2 = i_1 \quad (\text{A.3})$$

$$\text{Nodo 8 : } \rightarrow C * \frac{dV_0}{dt} + \frac{V_0}{R_p} + C_b * \frac{dV_1}{dt} + i_1 = 0 \quad (\text{A.4})$$

En los nodos 1, 3, 5 y 7 se tiene:

$$\text{Nodo 1 : } \rightarrow C * \frac{dV_0}{dt} + \frac{V_0}{R_p} + C_b * \frac{dV_1}{dt} = 0 \quad (\text{A.5})$$

$$\text{Nodo 3 : } \rightarrow C * \frac{dV_0}{dt} + \frac{V_0}{R_p} + i = 0 \quad (\text{A.6})$$

$$\text{Nodo 5 : } \rightarrow C * \frac{dV_0}{dt} + \frac{V_0}{R_p} + i = 0 \quad (\text{A.7})$$

---


$$\text{Nodo 7: } \rightarrow C * \frac{dV_0}{dt} + \frac{V_0}{R_p} + i = 0 \quad (\text{A.8})$$

De aquí, las corrientes que entran por los nodos 3, 5 y 7 son iguales, y por tanto, las corrientes  $i_1$ ,  $i_2$  e  $i_3$  que circularán por las resistencias  $R_c$  serán nulas.

Para las tensiones se tiene:

$$-R_{se} * i - V_1 + 4 * V_0 - 4 * R_s * i = 0 \quad (\text{A.9})$$

Entonces, la corriente  $i$  se obtiene al comparar las ecuaciones (A.4) y (A.8). Particularmente para  $i = 0$ ,

$$i = C_b * \frac{dV_1}{dt} \quad (\text{A.10})$$

Reemplazando este valor en las ecuaciones (A.8) y (A.9),

$$C * \frac{dV_0}{dt} + \frac{V_0}{R_p} + C_b * \frac{dV_1}{dt} = 0 \quad (\text{A.11})$$

$$-(4 * R_s + R_{se}) * C_b * \frac{dV_1}{dt} + 4 * V_0 - V_1 = 0 \quad (\text{A.12})$$

Así, en el dominio de Laplace,

$$C * \mathcal{L} \left[ \frac{dV_0}{dt} \right] + \frac{1}{R_p} * \mathcal{L} [V_0] + C_b * \mathcal{L} \left[ \frac{dV_1}{dt} \right] = 0 \quad (\text{A.13})$$

$$C * [s * V_0(s) - v_0(0^+)] + \frac{V_0(s)}{R_p} + C_b * [s * V_1(s) - v_1(0^+)] = 0 \quad (\text{A.14})$$

donde  $v_1(0^+) = 0$ . Entonces,

$$C * s * V_0(s) + \frac{V_0(s)}{R_p} + s * C_b * V_1(s) = C * v_0(0^+) \quad (\text{A.15})$$

$$V_0(s) * \left[ s * C + \frac{1}{R_p} \right] + s * C_b * V_1(s) = C * v_0(0^+) \quad (\text{A.16})$$

$$-(4 * R_s + R_{se}) * C_b * \mathcal{L} \left[ \frac{dV_1}{dt} \right] + 4 * \mathcal{L} [V_0] - \mathcal{L} [V_1] = 0 \quad (\text{A.17})$$

Sí  $R_{eq} = 4 * R_s + R_{se}$ , entonces:

$$- R_{eq} * C_b * [s * V_1(s) - v_1(0^+)] + 4 * V_0(s) - V_1(s) = 0 \quad (\text{A.18})$$

$$V_0(s) = \frac{V_1(s)}{4} * (1 + s * C_b * R_{eq}) \quad (\text{A.19})$$

Reemplazando (A.19) en (A.16), se tiene:

$$\frac{V_1(s)}{4} * (1 + s * C_b * R_{eq}) * \left( s * C + \frac{1}{R_p} \right) + s * C_b * V_1(s) = C * v_0(0^+) \quad (\text{A.20})$$

$$V_1(s) * \left[ \frac{s^2 * C * C_b * R_{eq}}{4} + s * \left( C_b + \frac{C_b * R_{eq}}{4 * R_p} + \frac{C}{4} \right) + \frac{1}{4 * R_p} \right] = C * v_0(0^+) \quad (\text{A.21})$$

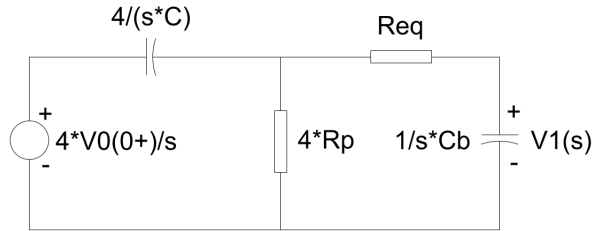
$$V_1(s) * \left[ s^2 + s \left( \frac{4 * R_p * C_b + C_b * R_{eq} + R_p * C}{4 * R_p} \right) * \dots \right] \dots$$

$$\dots \left[ \dots * \left( \frac{4}{C * C_b * R_{eq}} \right) + \frac{1}{4 * R_p} * \left( \frac{4}{C * C_b * R_{eq}} \right) \right] = \frac{4}{C_b * R_{eq}} * v_0(0^+) \quad (\text{A.22})$$

$$V_1(s) * \left[ s^2 + s \left( \frac{R_{eq} * C_b + R_p * C + 4 * R_p * C_b}{C * C_b * R_{eq} * R_p} \right) + \dots \right] \dots$$

$$\dots \left[ \dots + \frac{1}{C * C_b * R_{eq} * R_p} \right] = \frac{4}{C_b * R_{eq}} * v_0(0^+) \quad (\text{A.23})$$

Figura 58: Circuito equivalente a la ecuación (17) en el dominio de la frecuencia.



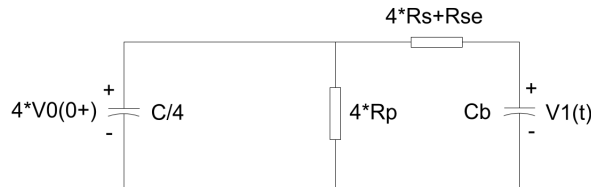
Fuente: VILA, R. O. Estudio sobre el generador de impulsos de la universidad industrial de santander. Bucaramanga: UIS, 1991. 28p.

El circuito mostrado en la Figura 58, corresponde a la representación gráfica en el do-

minio de la frecuencia, de la ecuación (A.23), al reemplazar en ésta, el producto  $R_p * C$  por  $4 * R_p * (C/4)$ .

La Figura 59, presenta el mismo, en el dominio del tiempo.

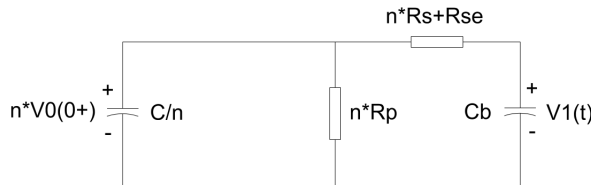
Figura 59: Circuito equivalente a la ecuación (17) en el dominio del tiempo.



Fuente: VILA, R. O. Estudio sobre el generador de impulsos de la universidad industrial de santander. Bucaramanga: UIS, 1991. 28p.

En general, la respuesta del Generador de Impulsos ( $G. I.$ ) para  $n$  etapas en serie ( $1 \leq n \leq 8$ ) en el dominio del tiempo, será la obtenida a partir del circuito mostrado en la Figura 60.

Figura 60: Circuito general para  $n$  etapas en serie.



Fuente: VILA, R. O. Estudio sobre el generador de impulsos de la universidad industrial de santander. Bucaramanga: UIS, 1991. 28p.

**SECCIÓN A.1**

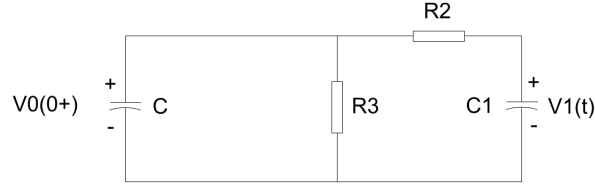
**CAVALLIUS Y EL GENERADOR**

La Figura 61, muestra el  $G. I.$  según *Cavallius* [1], donde,

- $C$  : capacitancia del  $G. I.$
- $C_1$  : capacitancia del objeto de prueba.
- $R_2$  : resistencia de frente.
- $R_3$  : resistencia de cola.

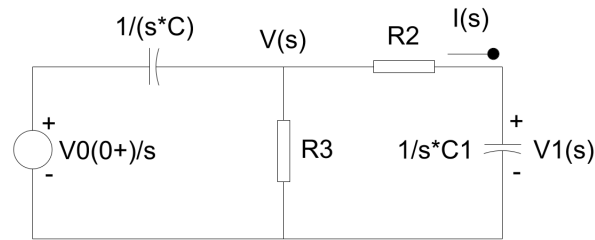
La Figura 62, muestra el circuito que representa el  $G. I.$  en el dominio de la frecuencia compleja, según *Cavallius* [1].

Figura 61: Circuito del Generador de Impulsos según *Cavallius* [1].



Fuente: VILA, R. O. Estudio sobre el generador de impulsos de la universidad industrial de santander. Bucaramanga: UIS, 1991. 28p.

Figura 62: Circuito de Generador de Impulsos en el dominio de la frecuencia.



Fuente: VILA, R. O. Estudio sobre el generador de impulsos de la universidad industrial de santander. Bucaramanga: UIS, 1991. 28p.

Entonces,

$$\frac{V(s) - v_0(0^+)/s}{1/(s * C)} + \frac{V(s)}{R_3} + \frac{V(s)}{R_2 + [1/(s * C_1)]} = 0 \quad (\text{A.24})$$

$$V(s) * \left[ s * C + \frac{1}{R_3} + \frac{s * C_1}{(s * R_2 * C_1) + 1} \right] = C * v_0(0^+) \quad (\text{A.25})$$

$$\begin{aligned} V(s) * \{ [(s * R_3 * C) + 1] * [(s * R_2 * C_1) + 1] + (s * R_3 * C_1) \} &= \dots \\ \dots &= C * v_0(0^+) * R_3 * [(s * R_2 * C_1) + 1] \end{aligned} \quad (\text{A.26})$$

$$V(s) = \frac{R_3 * C * v_0(0^+) * [(s * R_2 * C_1) + 1]}{s^2 * (R_2 * R_3 * C * C_1) + s * [(C * R_3) + (C_1 * R_2) + (C_1 * R_3)] + 1} \quad (\text{A.27})$$

Pero,

$$I(s) = \frac{V(s) * s * C_1}{(s * R_2 * C_1) + 1} \quad (\text{A.28})$$

Entonces,

$$\begin{aligned} V_1(s) &= I(s) * \left( \frac{1}{s * C_1} \right) = \frac{V(s)}{(s * R_2 * C_1) + 1} = \dots \\ \dots &= \frac{R_3 * C * v_0(0^+)}{s^2 * (R_2 * R_3 * C * C_1) + s * [(R_3 * C) + (R_2 * C_1) + (R_3 * C_1)] + 1} \end{aligned} \quad (\text{A.29})$$

$$V_1(s) = \frac{R_3 * C * v_0(0^+)}{R_2 * R_3 * C * C_1 * \left[ s^2 + s * \frac{R_3 * C + R_2 * C_1 + R_3 * C_1}{R_2 * R_3 * C * C_1} + \frac{1}{R_2 * R_3 * C * C_1} \right]}$$

$$V_1(s) * \left[ s^2 + s * \frac{(R_3 * C + R_2 * C_1 + R_3 * C_1)}{R_2 * R_3 * C * C_1} + \frac{1}{R_2 * R_3 * C * C_1} \right] = \frac{v_0(0^+)}{R_2 * C_1} \quad (\text{A.30})$$

Contrastando las expresiones (A.30) y (A.23),

$$\frac{V_1(s)}{v_0(0^+)} = \frac{1}{R_2 * C_1} * \left[ \frac{1}{s^2 + s * \frac{R_3 * C + R_2 * C_1 + R_3 * C_1}{R_2 * R_3 * C * C_1} + \frac{1}{R_2 * R_3 * C * C_1}} \right] \quad (\text{A.31})$$

$$\frac{V_1(s)}{v_0(0^+)} = \frac{1}{R_2 * C_1} * \left[ \frac{1}{(s + \gamma) + (s + \beta)} \right] \quad (\text{A.32})$$

Por Laplace,

$$\mathcal{L}^{-1} \left[ \frac{1}{(s + \gamma) + (s + \beta)} \right] = \frac{e^{-\gamma * t} - e^{-\beta * t}}{\beta - \gamma} \quad (\text{A.33})$$

Luego,

$$\frac{v_1(t)}{v_0(0^+)} = \frac{1}{R_2 * C_1} * \left[ \frac{e^{-\gamma * t} - e^{-\beta * t}}{\beta - \gamma} \right] \quad (\text{A.34})$$

donde,

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{R_3 * C + R_2 * C_1 + R_3 * C_1}{2 * R_2 * R_3 * C * C_1} - \dots \\ \dots - \frac{1}{2} * \sqrt{\left(\frac{R_3 * C + R_2 * C_1 + R_3 * C_1}{R_2 * R_3 * C * C_1}\right)^2 - \frac{4}{R_2 * R_3 * C * C_1}} \end{aligned} \quad (\text{A.35})$$

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{R_3 * C + R_2 * C_1 + R_3 * C_1}{2 * R_2 * R_3 * C * C_1} + \dots \\ \dots + \frac{1}{2} * \sqrt{\left(\frac{R_3 * C + R_2 * C_1 + R_3 * C_1}{R_2 * R_3 * C * C_1}\right)^2 - \frac{4}{R_2 * R_3 * C * C_1}} \end{aligned} \quad (\text{A.36})$$

Restando (A.36) - (A.35), se obtiene:

$$\beta - \gamma = \sqrt{\left(\frac{R_3 * C + R_2 * C_1 + R_3 * C_1}{R_2 * R_3 * C * C_1}\right)^2 - \frac{4}{R_2 * R_3 * C * C_1}} \quad (\text{A.37})$$

Según *Cavallius* [1], apéndice I,

$$\frac{v_1(t)}{v_0(0^+)} = \frac{A_1}{2 * K} * [e^{-(1-K)*\alpha*t} - e^{-(1+K)*\alpha*t}] \quad (\text{A.38})$$

Comparando (A.34) con (A.38),

$$\begin{aligned} \frac{A_1}{2 * K} &= \frac{1}{R_2 * C_1 * (\beta - \gamma)} = \dots \\ \dots &= \frac{1}{R_2 * C_1 * \sqrt{\left(\frac{R_3 * C + R_2 * C_1 + R_3 * C_1}{R_2 * R_3 * C * C_1}\right)^2 - \frac{4}{R_2 * R_3 * C * C_1}}} \end{aligned} \quad (\text{A.39})$$

$$\begin{aligned} \gamma &= (1 - K) * \alpha = \frac{1}{2} * \left[ \frac{R_3 * C + R_2 * C_1 + R_3 * C_1}{R_2 * R_3 * C * C_1} - \dots \right] \dots \\ \dots &\left[ \dots - \sqrt{\left(\frac{R_3 * C + R_2 * C_1 + R_3 * C_1}{R_2 * R_3 * C * C_1}\right)^2 - \frac{4}{R_2 * R_3 * C * C_1}} \right] \end{aligned} \quad (\text{A.40})$$

$$\beta = (1 + K) * \alpha = \frac{1}{2} * \left[ \frac{R_3 * C + R_2 * C_1 + R_3 * C_1}{R_2 * R_3 * C * C_1} + \dots \right] \dots$$

$$\dots \left[ \dots + \sqrt{\left( \frac{R_3 * C + R_2 * C_1 + R_3 * C_1}{R_2 * R_3 * C * C_1} \right)^2 - \frac{4}{R_2 * R_3 * C * C_1}} \right] \quad (\text{A.41})$$

Sumando (A.40) y (A.41),

$$2 * \alpha = \frac{R_3 * C + R_2 * C_1 + R_3 * C_1}{R_2 * R_3 * C * C_1} \quad (\text{A.42})$$

$$\alpha = \frac{1}{2} * \left[ \frac{R_3 * C + R_2 * C_1 + R_3 * C_1}{R_2 * R_3 * C * C_1} \right] \quad (\text{A.43})$$

Restando (A.41) y (A.40)

$$2 * K * \alpha = \sqrt{\left( \frac{R_3 * C + R_2 * C_1 + R_3 * C_1}{R_2 * R_3 * C * C_1} \right)^2 - \frac{4}{R_2 * R_3 * C * C_1}} \quad (\text{A.44})$$

Reemplazando (A.42) en (A.43),

$$K = \sqrt{1 - \frac{4 * R_2 * R_3 * C * C_1}{(R_3 * C + R_2 * C_1 + R_3 * C_1)^2}} \quad (\text{A.45})$$

Finalmente, reemplazando los valores de resistencia y capacitancia, y, para el caso particular del *G. I.* de la Universidad Industrial de Santander,

$$\frac{A_1}{2K} = 1,00123796$$

$$K = 0,98717278$$

$$\alpha = 1,12393982 * 10^6 \text{ 1/s}$$

donde,

$$R_2 = (n * R_s) + R_{se}$$

$$R_3 = n * R_p$$

$$C = C/n$$

$$C_1 = C_b$$

y,

$$R_p(\text{azul}) = 138 \Omega$$

$$R_s(\text{roja}) = 20 \Omega$$

$$R_{se}(\text{esterilla}) = 610 \Omega , \text{ para impulso atmosférico}$$

$$C(G.I.) = 0,5 * 10^{-6} F$$

$$C_b(\text{objeto de prueba}) = 652,3 * 10^{-12} F$$

---

# B

---

## PROTOSCOLOS DE ENSAYO

---

La Tabla 27, presenta los diferentes archivos relativos a cada evento y objeto, según el material digital anexo.

Tabla 21: Protocolo de ensayo *UP and DOWN* - objeto de prueba 1.

<i>Objeto de prueba: 1</i>			<i>Fecha: 05/11/14</i>							
<i>T [°C]: 26,1</i>			<i>h<sub>r</sub>, [%]: 68,4</i>				<i>P [mmHg]: 677,7</i>			
<i>V<sub>0</sub> = 24,5 kV</i>			<i>ΔV = 0,4 kV</i>							
<i>kV/etapa</i>	<i>B.T. [V]</i>	<i>Evento</i>	<i>→</i>	<i>Flameos: X</i>				<i>Soportes: O</i>		
25,3	135	O <sup>2</sup>								
25,7	137	X <sup>1</sup>	O <sup>3</sup>							
26,1	141	O <sup>4</sup>	O <sup>6</sup>	O <sup>8</sup>	O <sup>10</sup>	O <sup>12</sup>	O <sup>14</sup>		X <sup>20</sup>	
26,5	144	X <sup>5</sup>	X <sup>7</sup>	X <sup>9</sup>	X <sup>11</sup>	X <sup>13</sup>	O <sup>15</sup>	O <sup>17</sup>	X <sup>19</sup>	
26,9	146,5						X <sup>16</sup>	X <sup>18</sup>		

Tabla 22: Protocolo de ensayo *UP and DOWN* - objeto de prueba 3.

<i>Objeto de prueba: 3</i>					<i>Fecha: 10/12/14</i>					
<i>T [°C]: 24,9</i>			<i>h<sub>r</sub>, [%]: 68</i>			<i>P [mmHg]: 677,7</i>				
<i>V<sub>0</sub> = 24,5 kV</i>					<i>ΔV = 0,4 kV</i>					
<i>kV/etapa</i>	<i>B.T. [V]</i>	<i>Evento</i>		<i>→</i>	<i>Flameos: X</i>		<i>Soportes: O</i>			
25,7	138	O <sup>2</sup>			O <sup>8</sup>					
26,1	140	X <sup>1</sup>	O <sup>3</sup>	O <sup>5</sup>	X <sup>7</sup>	O <sup>9</sup>				
26,5	143	X <sup>4</sup>	X <sup>6</sup>		O <sup>10</sup>	O <sup>12</sup>	O <sup>16</sup>	O <sup>18</sup>	O <sup>20</sup>	
26,9	145				X <sup>11</sup>	O <sup>13</sup>	X <sup>15</sup>	X <sup>17</sup>	X <sup>19</sup>	
27,3	146					X <sup>14</sup>				

Tabla 23: Protocolo de ensayo *UP and DOWN* - objeto de prueba 4.

<i>Objeto de prueba: 4</i>					<i>Fecha: 17/12/14</i>					
<i>T [°C]: 25</i>			<i>h<sub>r</sub>, [%]: 57,5</i>			<i>P [mmHg]: 679,2</i>				
<i>V<sub>0</sub> = 24,5 kV</i>					<i>ΔV = 0,4 kV</i>					
<i>kV/etapa</i>	<i>B.T. [V]</i>	<i>Evento</i>		<i>→</i>	<i>Flameos: X</i>		<i>Soportes: O</i>			
27,3	141	O <sup>6</sup>	O <sup>8</sup>							
27,7	144	X <sup>5</sup>	X <sup>7</sup>	O <sup>9</sup>	O <sup>11</sup>	O <sup>13</sup>	O <sup>15</sup>			
28,1	146	O <sup>2</sup>	X <sup>4</sup>		X <sup>10</sup>	X <sup>12</sup>	X <sup>14</sup>	O <sup>16</sup>	O <sup>18</sup>	X <sup>20</sup>
28,5	150	X <sup>1</sup>	X <sup>3</sup>				X <sup>17</sup>	X <sup>19</sup>		

Tabla 24: Protocolo de ensayo *UP and DOWN* - objeto de prueba 5.

<i>Objeto de prueba: 5</i>					<i>Fecha: 21/01/15</i>				
<i>T [°C]: 26</i>			<i>h<sub>r</sub>, [%]: 59,1</i>			<i>P [mmHg]: 678,1</i>			
<i>V<sub>0</sub> = 24,5 kV</i>					<i>ΔV = 0,4 kV</i>				
<i>kV/etapa</i>	<i>B.T. [V]</i>	<i>Evento</i>		<i>→</i>	<i>Flameos: X</i>			<i>Soportes: O</i>	
26,9	142				O <sup>9</sup>			O <sup>17</sup>	O <sup>19</sup>
27,3	144	O <sup>2</sup>	O <sup>4</sup>		X <sup>8</sup>	O <sup>10</sup>	O <sup>12</sup>	X <sup>16</sup>	X <sup>18</sup> O <sup>20</sup>
27,7	146	X <sup>1</sup>	X <sup>3</sup>	O <sup>5</sup>	X <sup>7</sup>	X <sup>11</sup>	O <sup>13</sup>	X <sup>15</sup>	
28,1	148			X <sup>6</sup>			X <sup>14</sup>		

Tabla 25: Protocolo de ensayo *UP and DOWN* - objeto de prueba 6.

<i>Objeto de prueba: 6</i>					<i>Fecha: 21/01/15</i>				
<i>T [°C]: 26</i>			<i>h<sub>r</sub>, [%]: 55,6</i>			<i>P [mmHg]: 676,2</i>			
<i>V<sub>0</sub> = 24,7 kV</i>					<i>ΔV = 0,5 kV</i>				
<i>kV/etapa</i>	<i>B.T. [V]</i>	<i>Evento</i>		<i>→</i>	<i>Flameos: X</i>			<i>Soportes: O</i>	
26,7	139	O <sup>2</sup>					O <sup>12</sup>		O <sup>20</sup>
27,2	140	X <sup>1</sup>	O <sup>3</sup>	O <sup>5</sup>	O <sup>7</sup>	O <sup>9</sup>	X <sup>11</sup>	O <sup>13</sup>	O <sup>15</sup> X <sup>19</sup>
27,7	144	X <sup>4</sup>	X <sup>6</sup>	X <sup>8</sup>	X <sup>10</sup>		X <sup>14</sup>	O <sup>16</sup>	X <sup>18</sup>
28,2	146							X <sup>17</sup>	

Tabla 26: Protocolo de ensayo *UP and DOWN* - objeto de prueba 7.

<i>Objeto de prueba: 7</i>					<i>Fecha: 23/01/15</i>				
<i>T [°C]: 25,6</i>			<i>h<sub>r</sub>, [%]: 60,3</i>			<i>P [mm.Hg]: 679,2</i>			
<i>V<sub>0</sub> = 24,7 kV</i>					<i>ΔV = 0,5 kV</i>				
<i>kV/etapa</i>	<i>B.T. [V]</i>	<i>Evento</i>			<i>→</i>	<i>Flameos: X</i>		<i>Soportes: O</i>	
26,2	140				O <sup>7</sup>				
26,7	143	O <sup>2</sup>	O <sup>4</sup>	X <sup>6</sup>	O <sup>8</sup>	O <sup>12</sup>	O <sup>16</sup>	O <sup>18</sup>	O <sup>20</sup>
27,2	145	X <sup>1</sup>	X <sup>3</sup>	X <sup>5</sup>	O <sup>9</sup>	X <sup>11</sup>	O <sup>13</sup>	X <sup>15</sup>	X <sup>17</sup>
27,7	147				X <sup>10</sup>	X <sup>14</sup>			

Tabla 27: Archivos equivalentes para los diferentes eventos llevados a cabo por objeto.

<i>Evento</i>	<i>Archivo .xls</i>					
	<i>Objeto 2</i>	<i>Objeto 3</i>	<i>Objeto 4</i>	<i>Objeto 5</i>	<i>Objeto 6</i>	<i>Objeto 7</i>
1	14.xls	12.xls	-	13.xls	10.xls	8.xls
2	-	13.xls	-	-	11.xls	-
3	15.xls	14.xls	14.xls	14.xls	12.xls	9.xls
4	16.xls	15.xls	15.xls	15.xls	13.xls	10.xls
5	17.xls	16.xls	16.xls	-	14.xls	11.xls
6	18.xls	17.xls	17.xls	-	15.xls	12.xls
7	19.xls	18.xls	18.xls	16.xls	-	13.xls
8	20.xls	19.xls	-	17.xls	16.xls	14.xls
9	1.xls	20.xls	19.xls	18.xls	17.xls	15.xls
10	2.xls	1.xls	20.xls	19.xls	18.xls	16.xls
11	3.xls	-	1.xls	20.xls	-	17.xls
12	4.xls	2.xls	2.xls	1.xls	19.xls	18.xls
13	5.xls	3.xls	3.xls	2.xls	20.xls	19.xls
14	6.xls	4.xls	4.xls	3.xls	1.xls	20.xls
15	7.xls	5.xls	5.xls	4.xls	2.xls	1.xls
16	8.xls	6.xls	6.xls	5.xls	3.xls	2.xls
17	9.xls	7.xls	-	6.xls	4.xls	3.xls
18	-	8.xls	7.xls	7.xls	5.xls	-
19	10.xls	9.xls	8.xls	8.xls	6.xls	4.xls
20	11.xls	10.xls	9.xls	9.xls	7.xls	5.xls

---

C

TABLAS

---

---

Tabla 28: Cuadro representativo de flameos y soportes aptos - objeto de prueba 2.

Objeto 2		26,9 kV/etapa						27,3 kV/etapa					
Ajuste		O <sub>19</sub>	O <sub>1</sub>	O <sub>7</sub>	O <sub>9</sub>	X <sub>15</sub>	X <sub>17</sub>	O <sub>2</sub>	X <sub>20</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>8</sub>		
G.I.	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓		
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘		
P(S)	V	✘ ✓	- ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	- ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓		
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘		
P(O)	V	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	• ✘	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	• ✘	• ✘	• ✘		
	T <sub>1</sub>	✘	✘	1,562	✘	✘	✘	1,677	• ✘	• ✘	• ✘		
P(FO)	V	✘ ✓	- ✘	✘ ✓	• ✘	✘ ✓	✘ ✓	- ✘	• ✘	• ✘	• ✘		
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	• ✘	• ✘	• ✘		
C.F.-G.I.	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓		
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘		
C.F.-P(S)	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓		
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘		
C.F.-P(O)	V	• ✘	• ✘	✘ ✓	• ✘	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	• ✘	• ✘	• ✘		
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	• ✘	• ✘	• ✘		
C.F.-P(FO)	V	• ✘	✘ ✓	- ✘	• ✘	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	• ✘	• ✘	• ✘		
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	• ✘	• ✘	• ✘		
IEEE-G.I.	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓		
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘		
IEEE-P(S)	V	✘ ✘	- ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓		
	T <sub>1</sub>	1,642	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘		
IEEE-P(O)	V	✘ ✘	- ✘	• ✘	• ✘	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	• ✘	• ✘	• ✘		
	T <sub>1</sub>	1,642	✘	✘	✘	✘	✘	✘	• ✘	• ✘	• ✘		
IEEE-P(FO)	V	✘ ✘	- ✘	• ✘	• ✘	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	• ✘	• ✘	• ✘		
	T <sub>1</sub>	1,642	✘	✘	✘	✘	✘	✘	• ✘	• ✘	• ✘		
IEEE-C.F.-G.I.	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓		
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘		
IEEE-C.F.-P(S)	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓		
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘		
IEEE-C.F.-P(O)	V	✘ ✓	• ✘	✘ ✓	• ✘	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	• ✘	• ✘	• ✘		
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	1,595	✘	✘	✘	• ✘	• ✘	• ✘		
IEEE-C.F.-P(FO)	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	• ✘	• ✘	• ✘		
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	• ✘	• ✘	• ✘		

\*T<sub>1</sub> en  $\mu$ s.

Tabla 29: Cuadro representativo de flameos y soportes aptos - objeto de prueba 3.

Objeto 3		26,1 kV/etapa					26,5 kV/etapa				
Ajuste		O <sub>14</sub>	O <sub>16</sub>	O <sub>20</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>18</sub>	O <sub>1</sub>	O <sub>2</sub>	O <sub>6</sub>	O <sub>8</sub>	O <sub>10</sub>
G.I.	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘
P(S)	V	- ✘	✘ ✓	- ✘	✘ ✓	✘ ✓	- ✘	- ✘	✘ ✓	- ✘	✘ ✓
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘
P(O)	V	- ✘	✘ ✓	• ✘	• ✘	• ✘	- ✘	- ✘	✘ ✓	- ✘	• ✘
	T <sub>1</sub>	✘	✘	1,603	• ✘	• ✘	✘	✘	✘	1,612	✘
P(FO)	V	- ✘	✘ ✓	- ✘	✘ ✓	• ✘	- ✘	- ✘	✘ ✓	- ✘	• ✘
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘
C.F.-G.I.	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘
C.F.-P(S)	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘
C.F.-P(O)	V	• ✘	• ✘	• ✘	• ✘	• ✘	• ✘	• ✘	✘ ✓	• ✘	• ✘
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘
C.F.-P(FO)	V	• ✘	✘ ✓	• ✘	✘ ✓	• ✘	• ✘	✘ ✓	• ✘	• ✘	• ✘
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘
IEEE-G.I.	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘
IEEE-P(S)	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✘	- ✘
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	1,652	✘
IEEE-P(O)	V	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	• ✘	• ✘	• ✘	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	• ✘
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	1,684	✘
IEEE-P(FO)	V	• ✘	✘ ✓	• ✘	✘ ✓	• ✘	• ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✘	• ✘
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	1,653	✘
IEEE-C.F.-G.I.	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘
IEEE-C.F.-P(S)	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘
IEEE-C.F.-P(O)	V	✘ ✓	• ✘	• ✘	• ✘	• ✘	• ✘	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	• ✘
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘
IEEE-C.F.-P(FO)	V	• ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	• ✘	• ✘	✘ ✓	✘ ✓
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘

\*T<sub>1</sub> en  $\mu$ s.

Tabla 30: Cuadro representativo de flameos y soportes aptos - objeto de prueba 3 - Continuación.

<i>Objeto 3</i>		<i>26,5 kV/etapa</i>			
<i>Ajuste</i>		<i>X<sub>15</sub></i>		<i>X<sub>17</sub></i>	
<i>G.I.</i>	V	☒	✓	☒	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>				
<i>P(S)</i>	V	☒	✓	-	×
	<i>T<sub>1</sub></i>				
<i>P(O)</i>	V	☒	✓	-	×
	<i>T<sub>1</sub></i>				
<i>P(FO)</i>	V	☒	✓	-	×
	<i>T<sub>1</sub></i>				
<i>C.F.-G.I.</i>	V	☒	✓	☒	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>				
<i>C.F.-P(S)</i>	V	☒	✓	☒	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>				
<i>C.F.-P(O)</i>	V	•	×	•	×
	<i>T<sub>1</sub></i>				
<i>C.F.-P(FO)</i>	V	•	×	☒	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>				
<i>IEEE-G.I</i>	V	☒	✓	☒	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>				
<i>IEEE-P(S)</i>	V	☒	✓	-	×
	<i>T<sub>1</sub></i>				
<i>IEEE-P(O)</i>	V	☒	✓	-	×
	<i>T<sub>1</sub></i>				
<i>IEEE-P(FO)</i>	V	☒	✓	-	×
	<i>T<sub>1</sub></i>				
<i>IEEE-C.F.-G.I.</i>	V	☒	✓	☒	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>				
<i>IEEE-C.F.-P(S)</i>	V	☒	✓	☒	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>				
<i>IEEE-C.F.-P(O)</i>	V	•	×	•	×
	<i>T<sub>1</sub></i>				
<i>IEEE-C.F.-P(FO)</i>	V	•	×	☒	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>				

\**T<sub>1</sub>* en  $\mu s$ .

Tabla 31: Cuadro representativo de flameos y soportes aptos - objeto de prueba 4.

Objeto 4		27,7 kV/etapa						28,1 kV/etapa			
Ajuste		O <sub>19</sub>	O <sub>1</sub>	O <sub>3</sub>	O <sub>5</sub>	X <sub>16</sub>	X <sub>18</sub>	O <sub>6</sub>	O <sub>7</sub>	X <sub>15</sub>	X <sub>20</sub>
G.I.	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘
P(S)	V	- ✘	- ✘	✘ ✘	- ✘	✘ ✓	- ✘	- ✘	✘ ✓	- ✘	- ✘
	T <sub>1</sub>	0,824	1,967	1,656	1,685	✘ ✓	- ✘	✘	✘	- ✘	- ✘
P(O)	V	- ✘	- ✘	✘ ✘	- ✘	✘ ✓	- ✘	- ✘	✘ ✓	- ✘	- ✘
	T <sub>1</sub>	0,826	1,967	1,662	1,685	✘ ✓	- ✘	✘	✘	- ✘	- ✘
P(FO)	V	- ✘	- ✘	✘ ✘	- ✘	✘ ✓	- ✘	- ✘	✘ ✓	- ✘	- ✘
	T <sub>1</sub>	0,825	1,967	1,659	1,685	✘ ✓	- ✘	✘	✘	- ✘	- ✘
C.F.-G.I.	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘
C.F.-P(S)	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘
C.F.-P(O)	V	✘ ✓	• ✘	• ✘	• ✘	✘ ✓	• ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓
	T <sub>1</sub>	✘	✘	1,648	1,685	✘ ✓	• ✘	✘	✘	✘ ✓	✘ ✓
C.F.-P(FO)	V	- ✘	- ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	• ✘
	T <sub>1</sub>	0,825	1,967	✘	✘	✘ ✓	✘ ✓	✘	✘	• ✘	• ✘
IEEE-G.I.	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘
IEEE-P(S)	V	✘ ✘	- ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	- ✘	✘ ✓	- ✘	- ✘	- ✘
	T <sub>1</sub>	1,867	✘	✘	✘	✘ ✓	- ✘	✘	✘	- ✘	- ✘
IEEE-P(O)	V	✘ ✘	- ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	- ✘	✘ ✓	- ✘	- ✘	- ✘
	T <sub>1</sub>	1,868	✘	✘	✘	✘ ✓	- ✘	✘	✘	- ✘	- ✘
IEEE-P(FO)	V	✘ ✘	- ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	- ✘	✘ ✓	- ✘	- ✘	- ✘
	T <sub>1</sub>	1,866	✘	✘	✘	✘ ✓	- ✘	✘	✘	- ✘	- ✘
IEEE-C.F.-G.I.	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘
IEEE-C.F.-P(S)	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘
IEEE-C.F.-P(O)	V	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	• ✘	✘ ✓	• ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓
	T <sub>1</sub>	✘	✘	1,673	✘	✘ ✓	• ✘	✘	✘	✘ ✓	✘ ✓
IEEE-C.F.-P(FO)	V	- ✘	- ✘	✘ ✘	- ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	• ✘
	T <sub>1</sub>	✘	1,862	1,592	1,647	✘ ✓	✘ ✓	✘	✘	• ✘	• ✘

\*T<sub>1</sub> en  $\mu$ s.

Tabla 32: Cuadro representativo de flameos y soportes aptos - objeto de prueba 4 - Continuación.

Objeto 4		28,1 kV/etapa					
Ajuste		X <sub>2</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>9</sub>			
G.I.	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	T <sub>1</sub>	✘	✓	✘	✓	✘	✓
P(S)	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	T <sub>1</sub>	✘	✓	✘	✓	✘	✓
P(O)	V	•	×	✘	✓	✘	✓
	T <sub>1</sub>	•	×	✘	✓	✘	✓
P(FO)	V	•	×	✘	✓	✘	✓
	T <sub>1</sub>	•	×	✘	✓	✘	✓
C.F.-G.I.	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	T <sub>1</sub>	✘	✓	✘	✓	✘	✓
C.F.-P(S)	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	T <sub>1</sub>	✘	✓	✘	✓	✘	✓
C.F.-P(O)	V	•	×	✘	✓	✘	✓
	T <sub>1</sub>	•	×	✘	✓	✘	✓
C.F.-P(FO)	V	•	×	✘	✓	✘	✓
	T <sub>1</sub>	•	×	✘	✓	✘	✓
IEEE-G.I	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	T <sub>1</sub>	✘	✓	✘	✓	✘	✓
IEEE-P(S)	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	T <sub>1</sub>	✘	✓	✘	✓	✘	✓
IEEE-P(O)	V	•	×	✘	✓	✘	✓
	T <sub>1</sub>	•	×	✘	✓	✘	✓
IEEE-P(FO)	V	•	×	✘	✓	✘	✓
	T <sub>1</sub>	•	×	✘	✓	✘	✓
IEEE-C.F.-G.I.	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	T <sub>1</sub>	✘	✓	✘	✓	✘	✓
IEEE-C.F.-P(S)	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	T <sub>1</sub>	✘	✓	✘	✓	✘	✓
IEEE-C.F.-P(O)	V	•	×	✘	✓	✘	✓
	T <sub>1</sub>	•	×	✘	✓	✘	✓
IEEE-C.F.-P(FO)	V	•	×	✘	✓	✘	✓
	T <sub>1</sub>	•	×	✘	✓	✘	✓

\*T<sub>1</sub> en  $\mu s$ .

Tabla 33: Cuadro representativo de flameos y soportes aptos - objeto de prueba 5.

Objeto 5		27,3 kV/etapa										27,7 kV/etapa		
Ajuste		O <sub>15</sub>	O <sub>19</sub>	O <sub>1</sub>	O <sub>9</sub>	X <sub>17</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>7</sub>	O <sub>2</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>14</sub>			
G.I.	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	
P(S)	V	- ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	
P(O)	V	- ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	
P(FO)	V	- ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	• ✘	✘ ✓	• ✘	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	
C.F.-G.I.	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	
C.F.-P(S)	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	
C.F.-P(O)	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	
C.F.-P(FO)	V	• ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	
IEEE-G.I.	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	
IEEE-P(S)	V	✘ ✓	✘ ✓	- ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	- ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	
IEEE-P(O)	V	✘ ✓	✘ ✓	- ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	- ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	✘	✘	1,669	✘	✘	✘	✘	1,669	✘	✘	✘	✘	
IEEE-P(FO)	V	✘ ✓	✘ ✓	- ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	- ✘	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	
IEEE-C.F.-G.I.	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	
IEEE-C.F.-P(S)	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	
IEEE-C.F.-P(O)	V	• ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	
IEEE-C.F.-P(FO)	V	• ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	1,565	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	

\*T<sub>1</sub> en  $\mu$ s.

Tabla 34: Cuadro representativo de flameos y soportes aptos - objeto de prueba 5 - Continuación.

Objeto 5		27,7 kV/etapa					
Ajuste		X <sub>16</sub>		X <sub>20</sub>		X <sub>4</sub>	
G.I.	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	T <sub>1</sub>	✘	✓	✘	✓	✘	✓
P(S)	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	T <sub>1</sub>	✘	✓	✘	✓	✘	✓
P(O)	V	✘	✓	•	×	✘	✓
	T <sub>1</sub>	✘	✓	•	×	✘	✓
P(FO)	V	✘	✓	•	×	✘	✓
	T <sub>1</sub>	✘	✓	•	×	✘	✓
C.F.-G.I.	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	T <sub>1</sub>	✘	✓	✘	✓	✘	✓
C.F.-P(S)	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	T <sub>1</sub>	✘	✓	✘	✓	✘	✓
C.F.-P(O)	V	•	×	•	×	✘	✓
	T <sub>1</sub>	•	×	•	×	✘	✓
C.F.-P(FO)	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	T <sub>1</sub>	✘	✓	✘	✓	✘	✓
IEEE-G.I.	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	T <sub>1</sub>	✘	✓	✘	✓	✘	✓
IEEE-P(S)	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	T <sub>1</sub>	✘	✓	✘	✓	✘	✓
IEEE-P(O)	V	✘	✓	•	×	✘	✓
	T <sub>1</sub>	✘	✓	•	×	✘	✓
IEEE-P(FO)	V	✘	✓	•	×	✘	✓
	T <sub>1</sub>	✘	✓	•	×	✘	✓
IEEE-C.F.-G.I.	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	T <sub>1</sub>	✘	✓	✘	✓	✘	✓
IEEE-C.F.-P(S)	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	T <sub>1</sub>	✘	✓	✘	✓	✘	✓
IEEE-C.F.-P(O)	V	•	×	•	×	✘	✓
	T <sub>1</sub>	•	×	•	×	✘	✓
IEEE-C.F.-P(FO)	V	✘	✓	•	×	✘	✓
	T <sub>1</sub>	✘	✓	•	×	✘	✓

\*T<sub>1</sub> en  $\mu s$ .

Tabla 35: Cuadro representativo de flameos y soportes aptos - objeto de prueba 6.

Objeto 6		27,2 kV/etapa						27,7 kV/etapa					
Ajuste		O <sub>12</sub>	O <sub>14</sub>	O <sub>17</sub>	O <sub>20</sub>	O <sub>2</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>6</sub>	O <sub>3</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>15</sub>		
G.I.	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓		
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘		
P(S)	V	- ✘	✘ ✓	✘ ✘	✘ ✓	✘ ✓	- ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓		
	T <sub>1</sub>	✘	✘	1,753	✘	✘	- ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓		
P(O)	V	- ✘	✘ ✓	✘ ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓		
	T <sub>1</sub>	✘	✘	1,753	✘	✘	✘ ✓	• ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓		
P(FO)	V	- ✘	✘ ✓	✘ ✘	✘ ✓	✘ ✓	- ✘	• ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓		
	T <sub>1</sub>	✘	✘	1,753	✘	✘	- ✘	• ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓		
C.F.-G.I.	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	- ✘	- ✘	✘ ✓	- ✘	✘ ✓		
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	- ✘	- ✘	✘ ✓	- ✘	✘ ✓		
C.F.-P(S)	V	✘ ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	- ✘	- ✘	✘ ✓	- ✘	✘ ✓		
	T <sub>1</sub>	0,835	✘	✘	✘	✘	- ✘	- ✘	✘ ✓	- ✘	✘ ✓		
C.F.-P(O)	V	• ✘	• ✘	• ✘	✘ ✓	✘ ✓	- ✘	- ✘	✘ ✓	- ✘	✘ ✓		
	T <sub>1</sub>	✘	1,702	✘	✘	✘	- ✘	- ✘	✘ ✓	- ✘	✘ ✓		
C.F.-P(FO)	V	• ✘	• ✘	✘ ✓	• ✘	✘ ✓	- ✘	- ✘	✘ ✓	- ✘	✘ ✓		
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	- ✘	- ✘	✘ ✓	- ✘	✘ ✓		
IEEE-G.I.	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	- ✘	✘ ✓		
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	- ✘	✘ ✓		
IEEE-P(S)	V	- ✘	✘ ✘	✘ ✘	✘ ✓	✘ ✓	- ✘	✘ ✓	- ✘	✘ ✓	✘ ✓		
	T <sub>1</sub>	✘	1,561	1,780	✘	✘	- ✘	✘ ✓	- ✘	✘ ✓	✘ ✓		
IEEE-P(O)	V	- ✘	✘ ✘	✘ ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	- ✘	✘ ✓	✘ ✓		
	T <sub>1</sub>	✘	1,561	1,783	✘	✘	✘ ✓	• ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓		
IEEE-P(FO)	V	- ✘	✘ ✘	✘ ✘	✘ ✓	✘ ✓	- ✘	• ✘	- ✘	✘ ✓	✘ ✓		
	T <sub>1</sub>	✘	1,561	1,781	✘	✘	- ✘	• ✘	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓		
IEEE-C.F.-G.I.	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	- ✘	- ✘	✘ ✓	- ✘	✘ ✓		
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	- ✘	- ✘	✘ ✓	- ✘	✘ ✓		
IEEE-C.F.-P(S)	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	- ✘	- ✘	✘ ✓	- ✘	✘ ✓		
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	- ✘	- ✘	✘ ✓	- ✘	✘ ✓		
IEEE-C.F.-P(O)	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	• ✘	✘ ✓	- ✘	- ✘	✘ ✓	- ✘	✘ ✓		
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	- ✘	- ✘	✘ ✓	- ✘	✘ ✓		
IEEE-C.F.-P(FO)	V	✘ ✓	• ✘	✘ ✘	✘ ✓	✘ ✓	- ✘	- ✘	✘ ✓	- ✘	✘ ✓		
	T <sub>1</sub>	✘	✘	1,730	✘	✘	- ✘	- ✘	✘ ✓	- ✘	✘ ✓		

\*T<sub>1</sub> en  $\mu$ s.

Tabla 36: Cuadro representativo de flameos y soportes aptos - objeto de prueba 6 - Continuación.

<i>Objeto 6</i>		<i>27,7 kV/etapa</i>							
<i>Ajuste</i>		<i>X<sub>16</sub></i>		<i>X<sub>18</sub></i>		<i>X<sub>1</sub></i>		<i>X<sub>5</sub></i>	
<i>G.I.</i>	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>								
<i>P(S)</i>	V	✘	✓	-	×	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>								
<i>P(O)</i>	V	✘	✓	-	×	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>								
<i>P(FO)</i>	V	✘	✓	-	×	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>								
<i>C.F.-G.I.</i>	V	✘	✓	-	×	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>								
<i>C.F.-P(S)</i>	V	✘	✓	-	×	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>								
<i>C.F.-P(O)</i>	V	✘	✓	-	×	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>								
<i>C.F.-P(FO)</i>	V	✘	✓	-	×	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>								
<i>IEEE-G.I.</i>	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>								
<i>IEEE-P(S)</i>	V	✘	✓	-	×	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>								
<i>IEEE-P(O)</i>	V	✘	✓	-	×	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>								
<i>IEEE-P(FO)</i>	V	✘	✓	-	×	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>								
<i>IEEE-C.F.-G.I.</i>	V	✘	✓	-	×	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>								
<i>IEEE-C.F.-P(S)</i>	V	✘	✓	-	×	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>								
<i>IEEE-C.F.-P(O)</i>	V	✘	✓	-	×	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>								
<i>IEEE-C.F.-P(FO)</i>	V	✘	✓	-	×	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>								

\**T<sub>1</sub>* en  $\mu s$ .

Tabla 37: Cuadro representativo de flameos y soportes aptos - objeto de prueba 7.

Objeto 7		26,7 kV/etapa						27,2 kV/etapa				
Ajuste		O <sub>10</sub>	O <sub>14</sub>	O <sub>18</sub>	O <sub>2</sub>	O <sub>5</sub>	X <sub>12</sub>	O <sub>15</sub>	O <sub>19</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	
G.I.	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	
P(S)	V	✘ ×	- ×	✘ ×	✘ ✓	- ×	✘ ✓	- ×	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	1,618	1,794	1,774	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	
P(O)	V	✘ ×	- ×	✘ ×	✘ ✓	• ×	• ×	✘ ✓	✘ ✓	• ×	• ×	
	T <sub>1</sub>	1,618	1,796	1,774	✘	✘	•	✘	✘	•	•	
P(FO)	V	✘ ×	- ×	✘ ×	✘ ✓	• ×	• ×	- ×	✘ ✓	• ×	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	1,618	1,795	1,774	✘	✘	•	✘	✘	•	✘	
C.F.-G.I.	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ×	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ×	
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	0,805	✘	✘	✘	✘	✘	
C.F.-P(S)	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ×	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	0,795	✘	✘	✘	✘	✘	
C.F.-P(O)	V	• ×	✘ ✓	✘ ✓	• ×	• ×	• ×	• ×	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	1,619	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	
C.F.-P(FO)	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ×	• ×	• ×	• ×	• ×	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	✘	✘	1,773	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	
IEEE-G.I.	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	- ×	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	
IEEE-P(S)	V	✘ ×	- ×	✘ ×	✘ ✓	• ×	• ×	✘ ×	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	1,603	2,075	1,614	✘	0,836	✘	1,653	✘	✘	✘	
IEEE-P(O)	V	✘ ×	• ×	✘ ×	✘ ✓	• ×	• ×	✘ ×	✘ ✓	• ×	• ×	
	T <sub>1</sub>	1,604	2,075	1,614	✘	0,836	•	1,654	✘	•	•	
IEEE-P(FO)	V	✘ ×	• ×	✘ ×	✘ ✓	• ×	• ×	✘ ×	✘ ✓	• ×	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	1,603	2,075	1,614	✘	0,836	•	1,653	✘	•	✘	
IEEE-C.F.-G.I.	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ×	✘ ✓	✘ ×	
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	1,571	✘	✘	
IEEE-C.F.-P(S)	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ✓	✘ ×	✘ ✓	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	1,571	✘	✘	
IEEE-C.F.-P(O)	V	✘ ✓	✘ ✓	✘ ×	• ×	• ×	• ×	- ×	• ×	✘ ✓	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	✘	✘	1,723	1,593	✘	✘	✘	✘	✘	✘	
IEEE-C.F.-P(FO)	V	✘ ×	✘ ×	✘ ×	✘ ✓	• ×	• ×	• ×	• ×	✘ ✓	✘ ✓	
	T <sub>1</sub>	1,607	1,708	1,764	✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	

\*T<sub>1</sub> en  $\mu$ s.

Tabla 38: Cuadro representativo de flameos y soportes aptos - objeto de prueba 7 - Continuación.

<i>Objeto 7</i>		<i>27,2 kV/etapa</i>									
		<i>X<sub>11</sub></i>		<i>X<sub>17</sub></i>		<i>X<sub>1</sub></i>		<i>X<sub>3</sub></i>		<i>X<sub>4</sub></i>	
<i>Ajuste</i>											
<i>G.I.</i>	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>										
<i>P(S)</i>	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>										
<i>P(O)</i>	V	•	×	✘	✓	✘	✓	✘	✓	•	×
	<i>T<sub>1</sub></i>										
<i>P(FO)</i>	V	•	×	✘	✓	•	×	✘	✓	•	×
	<i>T<sub>1</sub></i>										
<i>C.F.-G.I.</i>	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>										
<i>C.F.-P(S)</i>	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>										
<i>C.F.-P(O)</i>	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>										
<i>C.F.-P(FO)</i>	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>										
<i>IEEE-G.I</i>	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>										
<i>IEEE-P(S)</i>	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>										
<i>IEEE-P(O)</i>	V	•	×	✘	✓	•	×	✘	✓	•	×
	<i>T<sub>1</sub></i>										
<i>IEEE-P(FO)</i>	V	•	×	✘	✓	•	×	✘	✓	•	×
	<i>T<sub>1</sub></i>										
<i>IEEE-C.F.-G.I.</i>	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>										
<i>IEEE-C.F.-P(S)</i>	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>										
<i>IEEE-C.F.-P(O)</i>	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>										
<i>IEEE-C.F.-P(FO)</i>	V	✘	✓	✘	✓	✘	✓	✘	✓	✘	✓
	<i>T<sub>1</sub></i>										

\**T<sub>1</sub>* en  $\mu s$ .

---

D

TIEMPOS DE FRENTE Y CORTE  
PARA LOS DIFERENTES OBJETOS  
DE PRUEBA

---

---

Tabla 39: Tiempos de frente y corte para el objeto de prueba 2.

Objeto 2	26,9 kV/etapa					27,3 kV/etapa					27,7 kV/etapa					28,1 kV/etapa				
	O <sub>7</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>5</sub>	O <sub>10</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>14</sub>	X <sub>16</sub>	O <sub>11</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>13</sub>	O <sub>19</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>20</sub>							
G.I.	T <sub>1w</sub> [μs]	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322							
	T <sub>1f</sub> [μs]	-	1,322	1,322	-	1,322	1,322	-	1,322	1,322	-	1,322	1,322							
	T <sub>c</sub> [μs]	-	3,763	4,183	-	4,383	3,383	5,783	-	3,603	3,563	-	2,863	3,783						
	E [%]	20,807	15,410	18,416	17,590	20,253	25,106	20,706	28,267	20,990	20,365	28,166	22,101	150,370						
	β [%]	3,379	3,379	3,379	2,986	2,986	2,986	2,986	2,600	2,600	2,600	3,110	1,711	1,711						
P(S)	T <sub>1w</sub> [μs]	1,531	1,531	1,531	1,255	1,255	1,255	1,590	1,590	1,590	1,284	1,284	1,284							
	T <sub>1f</sub> [μs]	-	1,360	1,401	-	1,310	1,499	1,229	-	1,427	1,220	-	1,315	1,867						
	T <sub>c</sub> [μs]	-	3,815	4,225	-	4,361	3,347	5,777	-	3,665	3,644	-	2,837	3,648						
	E [%]	26,006	14,208	13,810	34,477	18,376	33,863	17,423	73,117	16,329	21,808	24,012	28,626	45,533						
	β [%]	2,382	2,428	1,598	4,778	2,173	0,899	2,869	-1,344	1,391	1,238	2,728	1,907	-0,182						
C.F.-P(S)	T <sub>1w</sub> [μs]	1,375	1,375	1,375	1,328	1,328	1,328	1,328	1,236	1,236	1,233	1,233	1,233							
	T <sub>1f</sub> [μs]	-	1,363	1,445	-	1,263	1,255	1,250	-	1,426	1,254	-	1,284	1,772						
	T <sub>c</sub> [μs]	-	3,768	4,175	-	4,388	3,397	5,793	-	3,555	3,547	-	2,841	3,659						
	E [%]	18,053	14,189	12,642	15,149	17,552	16,399	16,171	22,951	16,108	17,452	22,320	20,628	40,846						
	β [%]	2,246	2,529	1,939	1,903	2,080	1,647	2,052	1,775	1,348	2,098	2,272	1,592	0,490						
IEEE-G.I.	T <sub>1w</sub> [μs]	1,341	1,341	1,341	1,364	1,364	1,364	1,387	1,387	1,387	1,357	1,445	1,445							
	T <sub>1f</sub> [μs]	-	1,341	1,341	-	1,364	1,364	1,364	-	1,387	1,387	-	1,445	1,445						
	T <sub>c</sub> [μs]	-	3,768	4,188	-	4,394	3,394	5,794	-	3,620	3,580	-	2,896	3,816						
	E [%]	22,132	15,414	18,416	16,284	20,269	25,139	20,741	21,647	20,990	20,385	20,875	22,102	150,365						
	β [%]	3,387	3,387	3,387	2,992	2,992	2,992	2,992	2,607	2,607	2,607	3,117	1,712	1,712						
IEEE-C.F.-P(S)	T <sub>1w</sub> [μs]	1,437	1,437	1,437	1,389	1,389	1,389	1,294	1,294	1,294	1,291	1,291	1,291							
	T <sub>1f</sub> [μs]	-	1,363	1,445	-	1,263	1,255	1,250	-	1,426	1,254	-	1,284	1,772						
	T <sub>c</sub> [μs]	-	3,787	4,194	-	4,407	3,416	5,811	-	3,573	3,564	-	2,859	3,676						
	E [%]	17,195	14,189	12,642	13,350	17,552	16,399	16,171	19,032	16,108	17,452	17,890	20,628	40,846						
	β [%]	2,063	2,529	1,939	1,754	2,080	1,647	2,052	1,710	1,348	2,098	2,199	1,592	0,490						

\*T<sub>1w</sub>: tiempo de frente de la señal, visto desde el soporte.

\*T<sub>1f</sub>: tiempo de frente de la señal, visto desde el flameo.

Tabla 40: Constantes de ajuste para los tiempos de frente y corte del objeto 2.

Objeto 2		26,9 kV/etapa				27,3 kV/etapa				27,7 kV/etapa				28,1 kV/etapa			
Eventos		$O_7$	$X_3$	$X_5$	$O_{10}$	$X_8$	$X_{14}$	$X_{16}$	$O_{11}$	$X_1$	$X_{13}$	$O_{19}$	$X_{12}$	$X_{20}$			
G.I	$A/2K$	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001			
	$\alpha [1 * 10^6 / s]$	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124			
	$K$	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987			
P(S)	$A$	1,026	1,057	1,106	0,965	1,034	1,010	0,992	1,112	1,061	1,118	1,007	1,152	2,180			
	$\alpha [1 * 10^4 / s]$	1,600	3,057	4,453	0,450	2,136	0,567	0,788	3,081	2,657	5,452	1,302	6,622	20,092			
	$\beta [1 * 10^6 / s]$	1,889	2,011	1,838	2,496	2,181	2,059	2,499	1,682	1,938	2,089	2,321	1,839	0,769			
*	$Modo$	12	58	15	13	15	27	18	15	14	18	17	16	14			
	$A$	1,022	1,052	1,077	1,024	1,039	0,997	1,018	1,020	1,089	1,008	1,014	1,019	1,567			
	$\alpha [1 * 10^4 / s]$	1,610	2,884	3,397	1,583	2,357	0,450	1,500	1,473	3,653	1,081	1,445	1,301	13,482			
**	$\beta [1 * 10^6 / s]$	2,122	2,020	1,850	2,208	2,249	2,496	2,364	2,397	1,859	2,407	2,406	2,321	1,008			
	$A/2K$	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001			
	$\alpha [1 * 10^6 / s]$	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124			
***	$K$	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987			
	$A$	1,030	1,052	1,077	1,030	1,039	0,997	1,018	1,023	1,089	1,008	1,017	1,019	1,567			
	$\alpha [1 * 10^4 / s]$	1,754	2,884	3,397	1,691	2,357	0,450	1,500	1,507	3,653	1,081	1,485	1,301	13,482			
	$\beta [1 * 10^6 / s]$	2,008	2,020	1,850	2,091	2,249	2,496	2,364	2,277	1,859	2,407	2,285	2,321	1,008			

\*C.F.-P(S)

\*\*IEEE-G.I.

\*\*\*IEEE-C.F.-P(S)

Tabla 41: Tiempos de frente y corte para el objeto de prueba 3.

Objeto 3	26,1 kV/etapa					26,5 kV/etapa					26,9 kV/etapa					27,3 kV/etapa			
	O <sub>3</sub>	X <sub>1</sub>	O <sub>5</sub>	X <sub>7</sub>	O <sub>10</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>6</sub>	O <sub>13</sub>	X <sub>15</sub>	X <sub>17</sub>	X <sub>19</sub>	O <sub>13</sub>	X <sub>14</sub>						
G.L	$T1_w$ [ $\mu s$ ]	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322					
	$T1_f$ [ $\mu s$ ]	-	1,322	-	1,322	-	1,322	-	1,322	1,322	1,322	-	1,322	1,322					
	$Tc$ [ $\mu s$ ]	-	5,143	-	5,283	-	8,883	8,703	-	5,443	2,983	-	4,383	3,843					
	$E$ [%]	26,772	25,833	22,657	19,799	23,267	20,921	25,965	13,230	19,061	17,214	20,460	13,230	18,768					
	$\beta$ [%]	3,128	3,128	2,587	2,587	2,724	2,724	2,724	2,857	2,857	2,857	2,857	2,857	1,412					
P(S)	$T1_w$ [ $\mu s$ ]	1,176	1,176	1,442	1,442	1,543	1,543	1,543	1,363	1,363	1,363	1,363	1,363	1,363					
	$T1_f$ [ $\mu s$ ]	-	1,508	-	1,172	-	1,226	1,452	-	1,422	3,509	-	1,502	1,240					
	$Tc$ [ $\mu s$ ]	-	5,067	-	5,344	-	8,963	8,746	-	5,439	3,107	-	4,379	3,860					
	$E$ [%]	37,860	42,764	30,603	27,630	48,340	25,620	49,001	19,445	21,945	930,502	32,476	19,445	16,862					
	$\beta$ [%]	5,583	1,527	2,225	4,046	0,882	4,242	-0,318	3,669	2,134	27,042	2,825	3,669	2,365					
C.F.-P(S)	$T1_w$ [ $\mu s$ ]	1,225	1,225	1,267	1,267	1,247	1,247	1,247	1,283	1,283	1,283	1,283	1,283	1,283					
	$T1_f$ [ $\mu s$ ]	-	1,267	-	1,293	-	1,265	1,266	-	1,316	1,364	-	1,273	1,233					
	$Tc$ [ $\mu s$ ]	-	5,119	-	5,268	-	8,867	8,686	-	5,430	2,968	-	4,377	3,841					
	$E$ [%]	23,698	24,086	21,780	19,071	21,276	19,484	24,222	12,305	18,333	18,041	19,830	12,305	16,093					
	$\beta$ [%]	3,101	2,592	2,701	2,331	2,610	2,578	2,530	2,521	2,249	1,902	3,050	2,521	2,583					
IEEE-G.1	$T1_w$ [ $\mu s$ ]	1,356	1,356	1,389	1,389	1,380	1,380	1,372	1,372	1,372	1,372	1,372	1,372	1,465					
	$T1_f$ [ $\mu s$ ]	-	1,356	-	1,389	-	1,380	1,380	-	1,372	1,372	-	1,372	1,465					
	$Tc$ [ $\mu s$ ]	-	5,152	-	5,301	-	8,898	8,718	-	5,456	2,996	-	4,396	3,881					
	$E$ [%]	20,160	25,851	19,366	19,798	17,373	20,919	25,957	12,268	19,061	17,214	20,459	12,268	18,766					
	$\beta$ [%]	3,136	3,136	2,588	2,588	2,732	2,732	2,732	2,857	2,857	2,857	2,857	2,857	1,413					
IEEE-C.F.-P(S)	$T1_w$ [ $\mu s$ ]	1,285	1,285	1,328	1,328	1,308	1,308	1,348	1,348	1,348	1,348	1,348	1,348	1,348					
	$T1_f$ [ $\mu s$ ]	-	1,267	-	1,293	-	1,265	1,266	-	1,316	1,364	-	1,273	1,233					
	$Tc$ [ $\mu s$ ]	-	5,137	-	5,286	-	8,885	8,705	-	5,449	2,987	-	4,396	3,860					
	$E$ [%]	19,569	24,086	19,348	19,071	17,111	19,484	24,222	11,775	18,333	18,041	19,830	11,775	16,093					
	$\beta$ [%]	2,994	2,592	2,576	2,331	2,437	2,578	2,530	2,328	2,249	1,902	3,050	2,328	2,583					

\* $T1_w$ : tiempo de frente de la señal, visto desde el soporte.

\* $T1_f$ : tiempo de frente de la señal, visto desde el flameo.

Tabla 42: Constantes de ajuste para los tiempos de frente y corte del objeto 3.

Objeto 3	26,1 kV/etapa				26,5 kV/etapa				26,9 kV/etapa				27,3 kV/etapa	
	<i>O</i> <sub>3</sub>	<i>X</i> <sub>1</sub>	<i>O</i> <sub>5</sub>	<i>X</i> <sub>7</sub>	<i>O</i> <sub>10</sub>	<i>X</i> <sub>4</sub>	<i>X</i> <sub>6</sub>	<i>O</i> <sub>13</sub>	<i>X</i> <sub>15</sub>	<i>X</i> <sub>17</sub>	<i>X</i> <sub>19</sub>	<i>O</i> <sub>13</sub>	<i>X</i> <sub>14</sub>	
G.I	<i>A</i> /2 <i>K</i>	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	
	$\alpha$ [ $1 * 10^6/s$ ]	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	
	<i>K</i>	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	
<i>P(S)</i>	<i>A</i>	0,955	1,091	1,027	0,961	1,062	0,980	1,092	1,045	0,779	0,992	0,994	1,052	
	$\alpha$ [ $1 * 10^4/s$ ]	0,394	3,602	1,674	0,049	2,310	0,848	3,054	2,358	9,455	0,611	1,010	3,106	
	$\beta$ [ $1 * 10^6/s$ ]	2,677	1,747	2,008	2,758	1,806	2,496	1,868	2,201	1,973	8,002	2,201	2,227	
*	<i>Modo</i>	16	27	16	14	17	13	17	16	10	16	26	16	
	<i>A</i>	1,003	1,019	1,009	1,026	1,010	1,014	1,016	1,015	1,031	1,008	1,015	1,018	
	$\alpha$ [ $1 * 10^4/s$ ]	1,359	1,771	1,384	1,902	1,407	1,532	1,592	1,537	2,032	1,010	1,481	1,735	
**	$\beta$ [ $1 * 10^6/s$ ]	2,432	2,301	2,344	2,236	2,382	2,331	2,321	2,295	2,181	2,201	2,295	2,373	
	<i>A</i> /2 <i>K</i>	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	
	$\alpha$ [ $1 * 10^6/s$ ]	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	
***	<i>K</i>	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	
	<i>A</i>	1,007	1,019	1,014	1,026	1,016	1,014	1,016	1,022	1,031	1,008	1,022	1,018	
	$\alpha$ [ $1 * 10^4/s$ ]	1,425	1,771	1,463	1,902	1,527	1,532	1,592	1,675	2,032	1,010	1,481	1,735	
***	$\beta$ [ $1 * 10^6/s$ ]	2,305	2,301	2,219	2,236	2,249	2,331	2,321	2,161	2,181	2,201	2,161	2,373	

\*C.F.-*P(S)*

\*\*IEEE-G.I.

\*\*\*IEEE-C.F.-*P(S)*

Tabla 43: Tiempos de frente y corte para el objeto de prueba 4.

Objeto 4	27,7 kV/etapa					28,1 kV/etapa					28,5 kV/etapa				
	O <sub>9</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>7</sub>	O <sub>16</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>14</sub>	O <sub>18</sub>	X <sub>20</sub>	O <sub>18</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>19</sub>		
G.I.	$Tl_w$ [ $\mu s$ ]	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322		
	$Tl_f$ [ $\mu s$ ]	-	1,322	1,322	-	1,322	1,322	1,322	-	1,322	-	1,322	1,322		
	$Tc$ [ $\mu s$ ]	-	3,403	3,683	-	3,003	3,823	3,203	-	3,703	-	3,583	3,343		
$E$ [%]	31,066	20,973	22,523	23,698	21,955	26,414	121,284	39,185	21,786	28,430	21,786	19,332	31,510		
$\beta$ [%]	2,548	2,548	2,548	4,079	2,694	2,694	2,694	2,694	2,182	2,182	2,182	2,794	2,794		
P(S)	$Tl_w$ [ $\mu s$ ]	0,824	0,824	0,824	1,174	1,174	1,174	1,3174	1,381	1,381	1,381	1,381	1,381		
	$Tl_f$ [ $\mu s$ ]	-	1,333	1,083	-	1,563	0,460	1,521	-	1,689	-	1,228	1,732		
	$Tc$ [ $\mu s$ ]	-	3,249	3,564	-	2,888	3,877	3,149	-	3,659	-	3,602	3,292		
$E$ [%]	284,640	21,392	51,087	35,102	98,380	1469,066	54,298	39,927	28,943	82,282	28,943	21,656	86,176		
$\beta$ [%]	12,099	2,809	8,357	5,121	3,707	28,081	-0,334	2,957	3,681	2,669	3,681	2,732	1,558		
C.F.-P(S)	$Tl_w$ [ $\mu s$ ]	1,254	1,254	1,254	1,339	1,339	1,339	1,339	1,295	1,295	1,295	1,295	1,295		
	$Tl_f$ [ $\mu s$ ]	-	1,324	1,357	-	1,273	1,174	1,639	-	1,287	-	1,282	1,348		
	$Tc$ [ $\mu s$ ]	-	3,385	3,653	-	3,017	3,849	3,178	-	3,698	-	3,577	3,332		
$E$ [%]	29,145	20,773	19,279	20,440	20,854	24,781	44,098	38,901	20,467	26,879	20,467	18,959	31,183		
$\beta$ [%]	2,985	2,904	3,310	2,845	2,846	3,367	0,965	3,272	2,410	3,340	2,410	3,046	2,185		
IEEE-G.I.	$Tl_w$ [ $\mu s$ ]	1,391	1,391	1,391	1,303	1,382	1,382	1,382	1,414	1,414	1,414	1,376	1,376		
	$Tl_f$ [ $\mu s$ ]	-	1,391	1,391	-	1,382	1,382	1,382	-	1,414	-	1,376	1,376		
	$Tc$ [ $\mu s$ ]	-	3,421	3,701	-	3,019	3,839	3,279	-	3,728	-	3,597	3,357		
$E$ [%]	26,295	20,973	22,520	24,535	21,955	26,413	121,290	39,185	19,712	28,426	19,712	19,331	31,516		
$\beta$ [%]	2,549	2,549	2,549	4,084	2,694	2,694	2,694	2,694	2,183	2,183	2,183	2,780	2,800		
IEEE-C.F.-P(S)	$Tl_w$ [ $\mu s$ ]	1,316	1,316	1,316	1,402	1,402	1,402	1,402	1,356	1,356	1,356	1,356	1,356		
	$Tl_f$ [ $\mu s$ ]	-	1,324	1,357	-	1,273	1,174	1,639	-	1,287	-	1,282	1,348		
	$Tc$ [ $\mu s$ ]	-	3,404	3,672	-	3,036	3,868	3,197	-	3,717	-	3,596	3,350		
$E$ [%]	25,432	20,773	19,279	20,525	20,854	24,781	44,098	38,901	18,400	26,879	18,400	18,959	31,183		
$\beta$ [%]	2,805	2,904	3,310	2,687	2,846	3,367	0,965	3,272	2,268	3,340	2,268	3,046	2,185		

\* $Tl_w$ : tiempo de frente de la señal, visto desde el soporte.

\* $Tl_f$ : tiempo de frente de la señal, visto desde el flameo.

Tabla 44: Constantes de ajuste para los tiempos de frente y corte del objeto 4.

Objeto 4	27,7 kV/etapa					28,1 kV/etapa						28,5 kV/etapa			
	O <sub>9</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>7</sub>	O <sub>16</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>14</sub>	O <sub>18</sub>	X <sub>20</sub>	O <sub>18</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>19</sub>		
G.I	A1/2K	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001		
	$\alpha$ [1 * 10 <sup>6</sup> /s]	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124		
P(S)	K	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987		
	A	0,893	1,031	0,935	0,966	1,598	0,777	2,230	1,051	0,993	1,133	0,993	1,164		
	$\alpha$ [1 * 10 <sup>4</sup> /s]	0,834	2,232	0,846	0,680	16,831	8,698	25,196	3,086	1,053	4,853	1,053	5,234		
	$\beta$ [1 * 10 <sup>6</sup> /s]	3,775	2,131	2,841	2,638	1,096	5,973	0,933	2,036	2,176	1,450	2,176	1,385		
*	Modo	13	58	11	16	27	11	33	53	16	27	16	27		
	A	1,007	0,994	1,036	1,015	0,992	0,984	2,186	1,009	1,017	1,008	1,017	1,016		
	$\alpha$ [1 * 10 <sup>4</sup> /s]	1,434	0,816	2,624	1,591	0,752	0,680	23,221	1,603	1,544	1,590	1,544	1,377		
	$\beta$ [1 * 10 <sup>6</sup> /s]	2,363	2,307	2,052	2,187	2,414	2,637	0,870	2,244	2,271	2,282	2,271	2,194		
**	A1/2K	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001		
	$\alpha$ [1 * 10 <sup>6</sup> /s]	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124		
***	K	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987		
	A	1,014	0,994	1,036	1,021	0,992	0,984	2,186	1,009	1,023	1,008	1,023	1,016		
	$\alpha$ [1 * 10 <sup>4</sup> /s]	1,562	0,816	2,624	1,707	0,752	0,680	23,221	1,603	1,647	1,590	1,647	1,377		
	$\beta$ [1 * 10 <sup>6</sup> /s]	2,230	2,307	2,052	2,068	2,414	2,637	0,870	2,244	2,150	2,282	2,150	2,194		

\*C.F.-P(S)

\*\*IEEE-G.I.

\*\*\*IEEE-C.F.-P(S)

Tabla 45: Tiempos de frente y corte para el objeto de prueba 5.

Objeto 5	27,3 kV/etapa						27,7 kV/etapa						28,1 kV/etapa		
	$O_4$	$X_8$	$O_{12}$	$X_{16}$	$X_{18}$	$O_{13}$	$X_1$	$X_3$	$X_7$	$X_{11}$	$X_{15}$	$O_{13}$	$X_{14}$		
G.I.	$T1_w$ [ $\mu s$ ]	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322		
	$T1_f$ [ $\mu s$ ]	-	1,322	-	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	-	1,322		
	$Tc$ [ $\mu s$ ]	-	3,603	-	3,763	5,643	3,963	3,443	4,323	4,043	3,923	-	3,723		
	$E$ [%]	34,767	32,215	30,054	15,796	21,568	24,454	35,683	11,586	30,996	17,758	29,826	41,259		
	$\beta$ [%]	2,328	2,328	5,429	3,499	3,499	2,085	2,085	2,085	2,085	2,085	5,022	1,664		
P(S)	$T1_w$ [ $\mu s$ ]	1,365	1,365	1,504	1,504	1,504	1,504	1,504	1,504	1,504	1,504	1,504	1,504		
	$T1_f$ [ $\mu s$ ]	-	1,495	-	1,486	1,562	1,603	1,096	1,495	1,290	1,545	-	0,646		
	$Tc$ [ $\mu s$ ]	-	3,586	-	3,785	5,659	3,977	3,527	4,347	4,095	3,938	-	3,855		
	$E$ [%]	45,801	35,824	29,691	20,507	26,643	36,341	30,682	12,897	31,876	23,516	29,691	232,110		
	$\beta$ [%]	4,716	1,904	4,494	1,408	0,478	1,223	3,280	0,827	1,386	0,738	4,494	17,351		
C.F.-P(S)	$T1_w$ [ $\mu s$ ]	1,432	1,432	1,419	1,419	1,419	1,419	1,419	1,419	1,419	1,419	1,419	1,419		
	$T1_f$ [ $\mu s$ ]	-	1,365	-	1,315	1,351	1,384	1,209	1,397	1,344	1,363	-	1,072		
	$Tc$ [ $\mu s$ ]	-	3,633	-	3,791	5,667	3,982	3,500	4,341	4,068	3,944	-	3,799		
	$E$ [%]	32,703	32,056	28,349	14,219	19,240	23,023	30,223	10,789	30,841	17,330	28,349	23,322		
	$\beta$ [%]	2,091	2,230	5,014	1,981	1,762	1,890	2,175	1,537	1,564	1,351	5,014	1,596		
IEEE-G.I.	$T1_w$ [ $\mu s$ ]	1,405	1,405	1,234	1,335	1,335	1,420	1,420	1,420	1,420	1,420	1,254	1,448		
	$T1_f$ [ $\mu s$ ]	-	1,405	-	1,335	1,335	1,420	1,420	1,420	1,420	1,420	-	1,448		
	$Tc$ [ $\mu s$ ]	-	3,625	-	3,766	5,646	3,989	3,469	4,349	4,069	3,949	-	3,757		
	$E$ [%]	41,360	32,215	36,317	15,803	21,579	24,452	35,685	11,586	30,997	17,759	36,406	41,277		
	$\beta$ [%]	2,328	2,328	5,433	3,502	3,502	2,087	2,087	2,087	2,087	2,087	5,026	1,673		
IEEE-C.F.-P(S)	$T1_w$ [ $\mu s$ ]	1,547	1,547	1,536	1,536	1,536	1,536	1,536	1,536	1,536	1,536	1,536	1,536		
	$T1_f$ [ $\mu s$ ]	-	1,365	-	1,315	1,351	1,384	1,209	1,397	1,344	1,363	-	1,072		
	$Tc$ [ $\mu s$ ]	-	3,667	-	3,826	5,702	4,017	3,535	4,376	4,103	3,978	-	3,834		
	$E$ [%]	33,261	32,056	29,394	14,219	19,240	23,023	30,223	10,789	30,841	17,330	29,394	23,322		
	$\beta$ [%]	2,054	2,230	4,971	1,982	1,762	1,890	2,175	1,537	1,564	1,351	4,971	1,596		

\* $T1_w$ : tiempo de frente de la señal, visto desde el soporte.

\* $T1_f$ : tiempo de frente de la señal, visto desde el flameo.

Tabla 46: Constantes de ajuste para los tiempos de frente y corte del objeto 5.

Objeto 5		27,3 kV/etapa						27,7 kV/etapa						28,1 kV/etapa			
Eventos		O <sub>4</sub>	X <sub>8</sub>	O <sub>12</sub>	X <sub>16</sub>	X <sub>18</sub>	O <sub>13</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>15</sub>	O <sub>13</sub>	X <sub>14</sub>			
G.I	A1/2K	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001			
	$\alpha$ [1 * 10 <sup>6</sup> /s]	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124			
	K	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987			
	A	0,982	1,085	1,002	1,119	1,103	1,002	1,069	0,985	1,101	1,070	1,126	1,002	0,874			
P(S)	$\alpha$ [1 * 10 <sup>4</sup> /s]	1,042	3,552	1,583	4,560	3,487	1,583	2,562	0,749	3,715	3,308	4,381	1,583	4,402			
	$\beta$ [1 * 10 <sup>6</sup> /s]	2,205	1,768	1,928	1,709	1,685	1,928	1,707	2,821	1,755	2,113	1,645	1,928	4,420			
	Modo	8	57	10	9	7	10	18	14	29	8	9	10	8			
*	A	1,022	1,008	0,991	1,029	1,031	0,991	1,037	0,954	1,038	1,030	1,049	0,991	0,948			
	$\alpha$ [1 * 10 <sup>4</sup> /s]	1,465	1,042	1,475	1,826	1,755	1,475	2,003	-0,772	1,910	1,657	2,289	1,475	-1,082			
	$\beta$ [1 * 10 <sup>6</sup> /s]	2,047	2,205	2,065	2,203	2,147	2,065	2,067	2,914	2,055	2,170	2,074	2,065	3,486			
**	A1/2K	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001			
	$\alpha$ [1 * 10 <sup>6</sup> /s]	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124			
	K	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987			
***	A	1,027	1,008	0,996	1,029	1,031	0,996	1,037	0,954	1,038	1,030	1,049	0,996	0,948			
	$\alpha$ [1 * 10 <sup>4</sup> /s]	1,505	1,042	1,517	1,826	1,755	1,517	2,003	-0,772	1,910	1,657	2,289	1,517	-1,082			
	$\beta$ [1 * 10 <sup>6</sup> /s]	1,878	2,205	1,892	2,203	2,147	1,892	2,067	2,914	2,055	2,170	2,074	1,892	3,486			

\* C.F.-P(S)

\*\* IEEE-G.I.

\*\*\* IEEE-C.F.-P(S)

Tabla 47: Tiempos de frente y corte para el objeto de prueba 6.

Objeto 6		27,2 kV/etapa						27,7 kV/etapa						28,2 kV/etapa		
		O <sub>3</sub>	X <sub>1</sub>	O <sub>15</sub>	X <sub>19</sub>	O <sub>16</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>14</sub>	X <sub>18</sub>	O <sub>16</sub>	X <sub>17</sub>		
G.I.	$Tl_w$ [ $\mu s$ ]	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322		
	$Tl_f$ [ $\mu s$ ]	-	1,322	-	1,322	-	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	-	1,322			
	$Tc$ [ $\mu s$ ]	-	3,843	-	4,603	-	3,403	3,483	4,563	3,923	3,803	3,723	-	3,803		
	$E$ [%]	93,540	117,660	49,534	130,465	56,485	199,412	30,238	38,272	140,290	42,448	54,436	56,485	55,638		
	$\beta$ [%]	3,215	2,223	2,686	4,672	3,017	2,027	2,027	3,017	3,017	4,007	3,017	3,017	3,281		
P(S)	$Tl_w$ [ $\mu s$ ]	0,847	0,847	1,352	1,352	1,342	1,342	1,342	1,342	1,342	1,342	1,342	1,342	1,342		
	$Tl_f$ [ $\mu s$ ]	-	0,815	-	1,410	-	0,842	1,376	1,390	1,376	1,408	1,190	-	1,420		
	$Tc$ [ $\mu s$ ]	-	3,760	-	4,596	-	3,469	3,478	4,556	3,918	3,787	3,740	-	3,770		
	$E$ [%]	118,366	134,065	49,495	148,978	55,787	118,820	30,559	38,250	151,901	42,784	57,967	55,787	57,155		
	$\beta$ [%]	8,912	11,202	2,330	5,326	2,392	4,116	2,022	1,756	2,796	4,120	1,863	2,392	0,818		
C.F.-P(S)	$Tl_w$ [ $\mu s$ ]	0,834	0,834	1,352	1,352	1,390	1,390	1,390	1,390	1,390	1,390	1,390	1,390	1,390		
	$Tl_f$ [ $\mu s$ ]	-	0,847	-	0,805	-	2,307	1,342	1,341	0,955	1,342	1,342	-	1,342		
	$Tc$ [ $\mu s$ ]	-	3,755	-	4,688	-	3,561	3,501	4,581	4,023	3,821	3,741	-	3,821		
	$E$ [%]	57,366	77,919	49,485	88,465	55,275	63,319	30,116	37,863	88,613	41,752	54,258	55,275	55,172		
	$\beta$ [%]	3,069	3,592	2,278	5,687	2,604	-1,688	2,211	2,243	1,234	4,787	2,380	2,604	3,539		
IEEE-G.I.	$Tl_w$ [ $\mu s$ ]	1,351	1,411	1,382	1,272	1,363	1,424	1,424	1,363	1,363	1,307	1,363	1,363	1,347		
	$Tl_f$ [ $\mu s$ ]	-	1,411	-	1,272	-	1,424	1,424	1,363	1,363	1,307	1,363	-	1,347		
	$Tc$ [ $\mu s$ ]	-	3,867	-	4,590	-	3,430	3,510	4,574	3,934	3,799	3,734	-	3,809		
	$E$ [%]	65,475	117,671	46,886	130,472	62,576	199,420	30,238	38,277	140,306	42,443	54,438	62,576	55,633		
	$\beta$ [%]	3,223	2,232	2,694	4,677	3,021	2,029	2,029	3,021	3,021	4,011	3,021	3,021	3,291		
IEEE-C.F.-P(S)	$Tl_w$ [ $\mu s$ ]	0,943	0,943	1,412	1,411	1,507	1,507	1,507	1,507	1,507	1,507	1,507	1,507	1,507		
	$Tl_f$ [ $\mu s$ ]	-	0,847	-	0,805	-	2,307	1,342	1,341	0,955	1,342	1,342	-	1,342		
	$Tc$ [ $\mu s$ ]	-	3,788	-	4,706	-	3,596	3,536	4,616	4,059	3,856	3,776	-	3,856		
	$E$ [%]	43,243	77,919	45,467	88,465	56,872	63,319	30,116	37,863	88,613	41,752	54,258	56,872	55,172		
	$\beta$ [%]	3,142	3,592	2,349	5,687	2,591	-1,688	2,211	2,243	1,234	4,787	2,380	2,591	3,539		

\* $Tl_w$ : tiempo de frente de la señal, visto desde el soporte.

\* $Tl_f$ : tiempo de frente de la señal, visto desde el flameo.

Tabla 48: Constantes de ajuste para los tiempos de frente y corte del objeto 6.

Objeto 6	27,2 kV/etapa						27,7 kV/etapa						28,2 kV/etapa			
	$O_3$	$X_1$	$O_{15}$	$X_{19}$	$O_{16}$	$X_4$	$X_6$	$X_8$	$X_{10}$	$X_{14}$	$X_{18}$	$O_{16}$	$X_{17}$			
G.I	$A1/2K$	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001			
	$\alpha [1 * 10^6/s]$	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124			
	$K$	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987			
$P(S)$	$A$	0,920	0,918	1,017	1,015	1,017	1,044	1,054	1,038	1,082	1,051	1,017	1,318			
	$\alpha [1 * 10^4/s]$	0,491	1,914	1,459	2,528	1,474	2,345	2,586	2,427	4,575	2,954	1,474	10,869			
	$\beta [1 * 10^6/s]$	3,728	3,675	2,179	1,977	2,194	3,801	2,047	2,039	1,819	2,345	2,194	1,471			
*	$Modo$	11	8	53	33	49	45	15	28	15	13	49	15			
	$A$	0,993	0,974	1,018	0,903	1,015	0,842	1,018	0,903	0,992	1,017	1,015	1,005			
	$\alpha [1 * 10^4/s]$	1,331	0,491	1,459	-0,985	1,458	-5,979	1,474	-2,437	1,474	1,474	1,458	1,474			
**	$\beta [1 * 10^6/s]$	3,659	3,728	2,179	4,858	2,114	27,350	2,194	5,359	2,194	2,194	2,114	2,194			
	$A1/2K$	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001			
	$\alpha [1 * 10^6/s]$	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124			
***	$K$	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987			
	$A$	0,995	0,974	1,019	0,903	1,019	0,842	1,018	0,903	0,992	1,017	1,019	1,005			
	$\alpha [1 * 10^4/s]$	1,330	0,491	1,470	-0,985	1,491	-5,979	1,474	-2,437	1,474	1,474	1,491	1,474			
***	$\beta [1 * 10^6/s]$	3,216	3,728	2,079	4,858	1,933	27,350	2,194	5,359	2,194	2,194	1,933	2,194			

\*C.F.-P(S)  
 \*\*IEEE-G.I.  
 \*\*\*IEEE-C.F.-P(S)

Tabla 49: Tiempos de frente y corte para el objeto de prueba 7.

Objeto 7	26,7 kV/etapa						27,2 kV/etapa						27,7 kV/etapa					
	O <sub>4</sub>	X <sub>6</sub>	O <sub>9</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>11</sub>	O <sub>13</sub>	X <sub>15</sub>	X <sub>17</sub>	X <sub>19</sub>	O <sub>13</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>14</sub>				
G.I.	T <sub>1w</sub> [μs]	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322	1,322				
	T <sub>1f</sub> [μs]	-	1,322	-	1,322	1,322	1,322	-	1,322	1,322	1,322	-	1,322	1,322				
	T <sub>c</sub> [μs]	-	4,683	-	4,123	3,483	4,163	3,843	-	4,283	3,483	-	3,803	3,083				
P(S)	E / %	21,816	19,497	26,429	39,483	32,183	33,226	24,774	37,236	28,173	32,681	37,236	43,213	36,610				
	β / %	2,340	1,344	2,227	2,227	2,227	2,227	2,227	1,693	1,693	1,693	1,693	1,908	1,908				
	T <sub>1w</sub> [μs]	1,618	1,618	1,118	1,118	1,118	1,118	1,118	1,368	1,368	1,368	1,368	1,368	1,368				
C.F.-P(S)	T <sub>1f</sub> [μs]	-	1,454	-	1,524	1,315	1,266	1,399	-	1,315	1,230	-	1,272	1,321				
	T <sub>c</sub> [μs]	-	4,751	-	4,029	3,390	4,102	3,779	-	4,294	3,474	-	3,821	3,095				
	E / %	41,249	18,763	37,387	50,997	40,149	34,251	25,998	35,529	40,149	23,963	35,529	43,149	36,248				
IEEE-C.F.-P(S)	β / %	2,099	1,454	4,930	1,695	-0,390	0,809	2,307	2,249	1,451	-0,390	2,249	2,074	2,245				
	T <sub>1w</sub> [μs]	1,241	1,241	1,241	1,241	1,241	1,241	1,241	1,452	1,452	1,452	1,452	1,452	1,452				
	T <sub>1f</sub> [μs]	-	1,388	-	1,255	1,330	1,357	1,305	-	1,369	1,369	-	1,295	1,368				
IEEE-G.I.	T <sub>c</sub> [μs]	-	4,647	-	4,108	3,449	4,130	3,816	-	4,317	3,477	-	3,842	3,117				
	E / %	19,898	18,021	25,421	38,714	31,520	32,492	24,517	34,237	28,004	32,032	34,237	43,042	36,267				
	β / %	1,975	1,444	2,434	2,345	2,094	1,017	1,979	1,816	1,806	2,301	1,816	1,805	2,096				
IEEE-G.I.	T <sub>1w</sub> [μs]	1,404	1,470	1,411	1,411	1,411	1,411	1,411	1,446	1,446	1,446	1,446	1,431	1,431				
	T <sub>1f</sub> [μs]	-	1,470	-	1,411	1,411	1,411	1,411	-	1,446	1,446	-	1,431	1,431				
	T <sub>c</sub> [μs]	-	4,723	-	4,147	3,507	4,187	3,867	-	4,316	3,476	-	3,832	3,112				
IEEE-C.F.-P(S)	E / %	17,583	19,494	22,513	39,486	32,181	33,230	24,774	47,293	28,168	32,669	47,293	43,213	36,606				
	β / %	2,347	1,346	2,232	2,232	2,232	2,232	2,232	1,702	1,702	1,702	1,702	1,914	1,914				
	T <sub>1w</sub> [μs]	1,356	1,356	1,356	1,356	1,356	1,356	1,356	1,571	1,571	1,571	1,571	1,571	1,571				
IEEE-C.F.-P(S)	T <sub>1f</sub> [μs]	-	1,388	-	1,255	1,330	1,357	1,305	-	1,369	1,369	-	1,295	1,368				
	T <sub>c</sub> [μs]	-	4,682	-	4,143	3,484	4,164	3,850	-	4,352	3,512	-	3,878	3,152				
	E / %	16,850	18,021	22,260	38,714	31,520	32,492	24,517	36,884	28,004	32,032	36,884	43,042	36,267				
β / %	1,955	1,444	2,367	2,345	2,094	1,017	1,979	1,723	1,806	2,301	1,723	1,805	2,096					

\*T<sub>1w</sub>: tiempo de frente de la señal, visto desde el soporte.

\*T<sub>1f</sub>: tiempo de frente de la señal, visto desde el flameo.

Tabla 50: Constantes de ajuste para los tiempos de frente y corte del objeto 7.

<b>Objeto 7</b>		<b>26, 7 kV/etapa</b>					<b>27, 2 kV/etapa</b>							<b>27, 7 kV/etapa</b>			
<b>Eventos</b>		$O_4$	$X_6$	$O_9$	$X_1$	$X_3$	$X_5$	$X_{11}$	$O_{13}$	$X_{15}$	$X_{17}$	$X_{19}$	$O_{13}$	$X_{10}$	$X_{14}$		
G.I.	$A1/2K$	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001		
	$\alpha [1 * 10^6 / s]$	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124		
	$K$	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987		
$P(S)$	$A$	1,028	1,054	0,974	1,074	1,521	1,079	0,986	1,016	1,048	1,521	0,964	1,016	1,028	1,030		
	$\alpha [1 * 10^4 / s]$	1,505	2,380	0,998	3,042	16,761	3,477	0,263	1,352	2,384	16,761	0,187	1,352	1,894	1,973		
	$\beta [1 * 10^6 / s]$	1,789	1,923	2,728	1,769	1,403	2,145	2,263	2,162	2,149	1,403	2,595	2,162	2,278	2,178		
*	$Modo$	14	8	8	9	10	8	12	14	28	10	8	14	11	10		
	$A$	1,017	1,048	1,011	1,005	1,076	1,059	1,049	1,025	1,020	1,015	1,016	1,025	1,041	1,017		
	$\alpha [1 * 10^4 / s]$	1,412	2,236	1,397	1,078	3,729	2,569	2,677	1,443	1,352	1,352	1,352	1,443	2,286	1,352		
**	$\beta [1 * 10^6 / s]$	2,394	2,037	2,394	2,406	2,008	2,058	2,139	2,019	2,162	2,162	2,162	2,019	2,193	2,162		
	$A1/2K$	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001		
	$\alpha [1 * 10^6 / s]$	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124	1,124		
***	$K$	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987		
	$A$	1,021	1,048	1,016	1,005	1,076	1,059	1,049	1,031	1,020	1,015	1,016	1,031	1,041	1,017		
	$\alpha [1 * 10^4 / s]$	1,443	2,236	1,443	1,078	3,729	2,569	2,677	1,501	1,352	1,352	1,352	1,501	2,286	1,352		
***	$\beta [1 * 10^6 / s]$	2,173	2,037	2,173	2,406	2,008	2,058	2,139	1,847	2,162	2,162	2,162	1,847	2,193	2,162		

\*C.F.-P(S)  
 \*\*IEEE-G.I.  
 \*\*\*IEEE-C.F.-P(S)

---

## CURVAS TENSION-TIEMPO

---

Las Tablas 52, 53, 54, 55 y 56, consignan los valores cresta (normalizados) y tiempos de corte usados para la determinación de la característica tensión-tiempo de los diferentes objetos de prueba sometidos a estudio.

Tabla 51: Característica tensión-tiempo - Constantes de ajuste para los diferentes objetos.

<i>Objeto</i>	<i>a [kV]</i>	<i>b [1/s]</i>	<i>c [kV]</i>
<i>1</i>	239,53	$1,0446 * 10^6$	110,93
<i>3</i>	208,92	$1,1846 * 10^6$	114,00
<i>5</i>	256,58	$1,1045 * 10^6$	114,05
<i>6</i>	157,97	$0,9082 * 10^6$	112,04
<i>7</i>	166,29	$0,8981 * 10^6$	112,10

Figura 63: Característica tensión-tiempo - objeto 1.

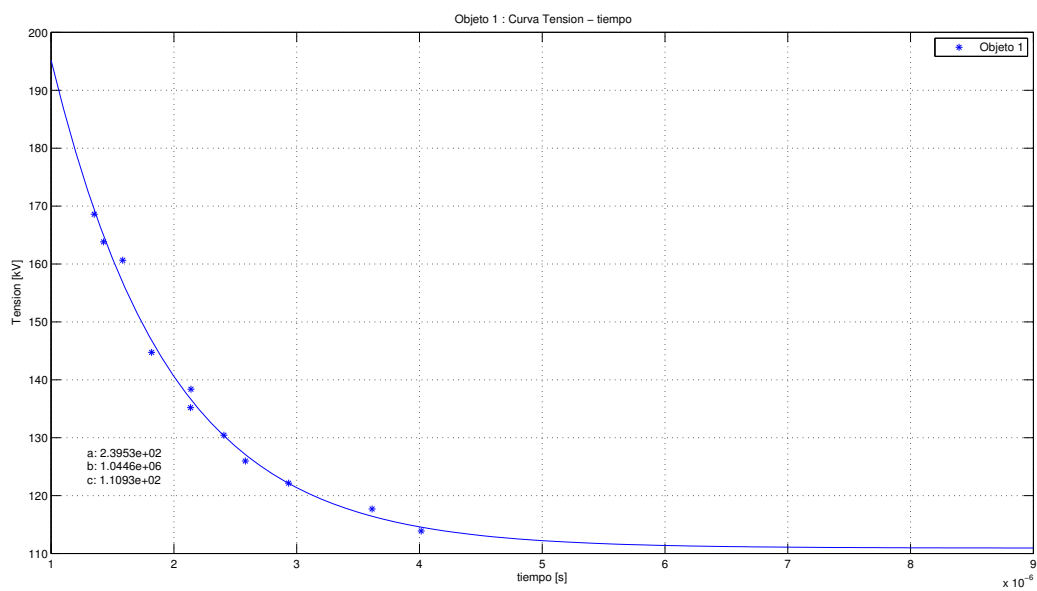


Figura 64: Característica tensión-tiempo - objeto 3.

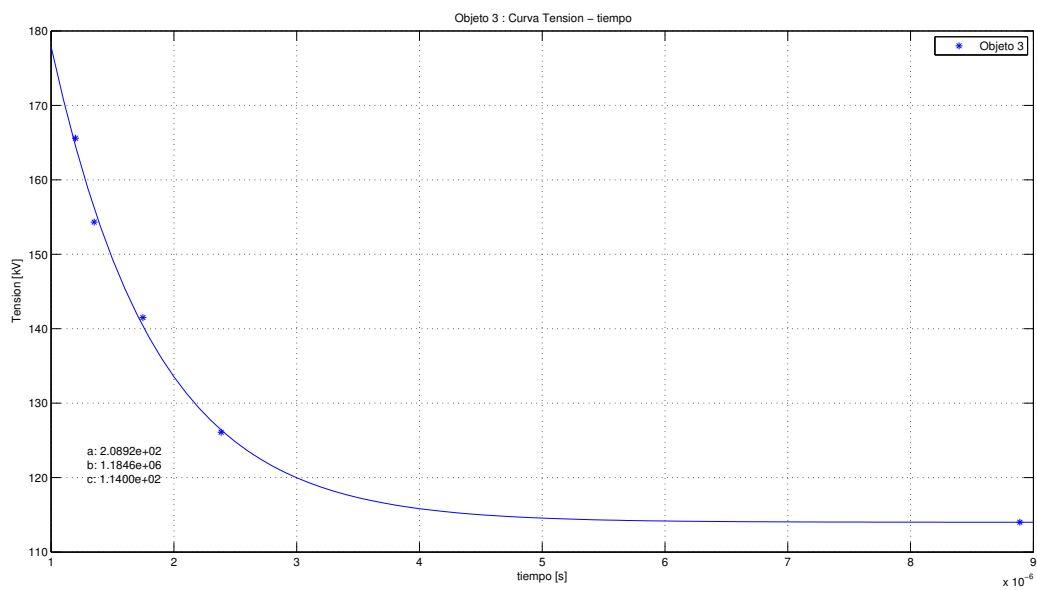


Figura 65: Característica tensión-tiempo - objeto 5.

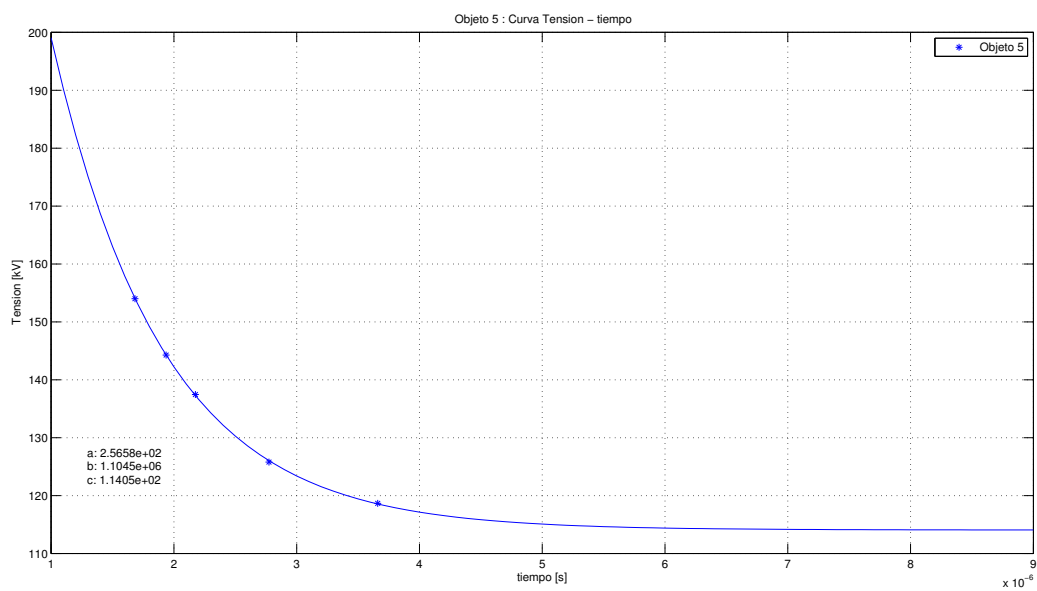


Figura 66: Característica tensión-tiempo - objeto 6.

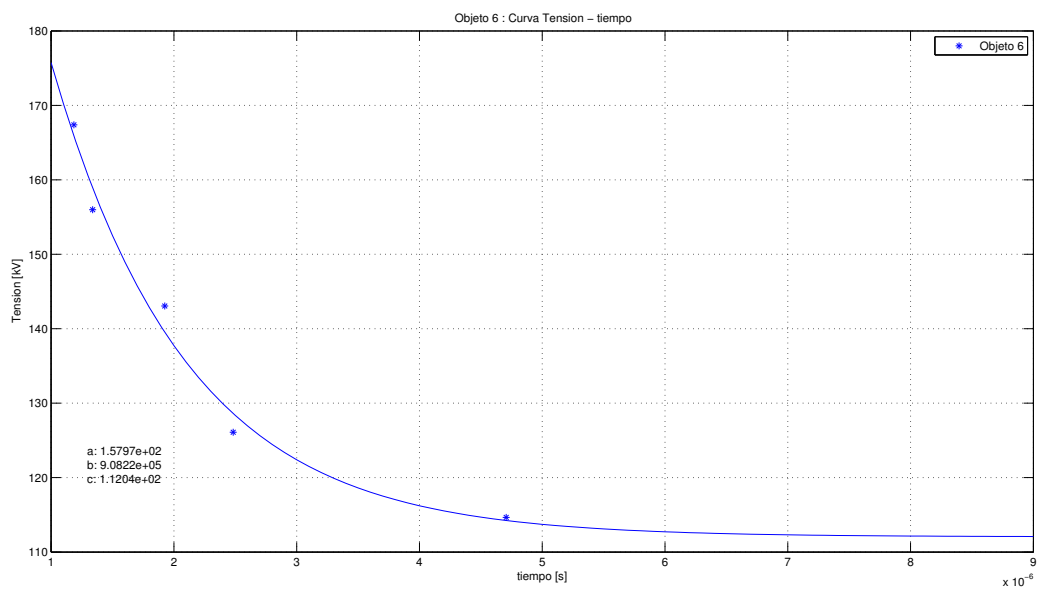


Figura 67: Característica tensión-tiempo - objeto 7.

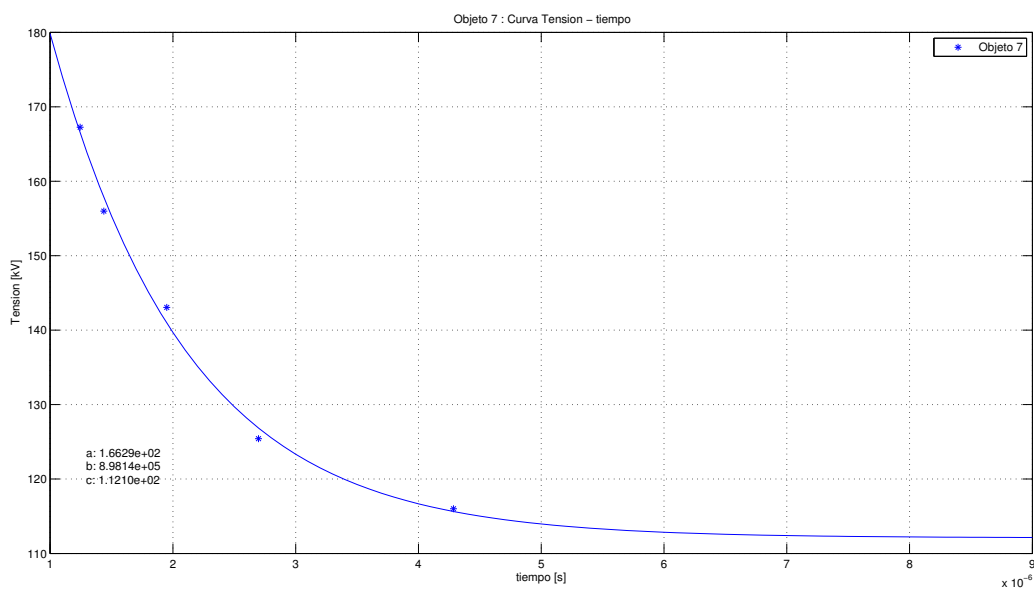


Tabla 52: Valores cresta normalizados y tiempos de corte para la determinación de la característica tensión-tiempo del objeto 1.

<i>Condiciones del ensayo</i>	<i>P: 676,0 mmHg</i>	<i>T: 25,7°C</i>	<i>hr: 67,1 %</i>
<i>V [V] B. T.</i>	<i>V<sub>50</sub>* [kV]</i>	<i>V<sub>50</sub> [kV]</i>	<i>T<sub>c</sub> [μs]</i>
143,2	103,1756	113,88	4,0142
148,0	106,6340	117,69	3,6142
153,6	110,6688	122,15	2,9342
158,4	114,1272	125,97	2,5825
164,0	118,162	130,42	2,4076
170,0	122,485	135,19	2,1354
174,0	125,3670	138,37	2,1389
182,0	131,1130	144,73	1,8183
202,0	145,5410	160,64	1,5828
206,0	148,4230	163,82	1,4274
212,0	152,746	168,59	1,3504

\*Factores de corrección por densidad de aire y humedad  $k_d$  : 0,8725 y  $k_h$  : 0,9630.

Tabla 53: Valores cresta normalizados y tiempos de corte para la determinación de la característica tensión-tiempo del objeto 3.

<i>Condiciones del ensayo</i>	<i>P: 677,6 mmHg</i>	<i>T: 27,5°C</i>	<i>hr: 57,1 %</i>
<i>V [V] B. T.</i>	<i>V<sub>50</sub>* [kV]</i>	<i>V<sub>50</sub> [kV]</i>	<i>T<sub>c</sub> [μs]</i>
141,8	102,1669	114,00	8,8898
156,8	112,9744	126,09	2,3845
176,0	126,8080	141,49	1,7479
192,0	138,3360	154,32	1,3505
206,0	148,4230	165,59	1,1979

\*Factores de corrección por densidad de aire y humedad  $k_d$  : 0,8693 y  $k_h$  : 0,9700.

Tabla 54: Valores cresta normalizados y tiempos de corte para la determinación de la característica tensión-tiempo del objeto 5.

<i>Condiciones del ensayo</i>	<i>P: 676,8 mmHg</i>	<i>T: 26,5°C</i>	<i>hr: 55,3 %</i>
<i>V [V] B. T.</i>	<i>V<sub>50</sub>* [kV]</i>	<i>V<sub>50</sub> [kV]</i>	<i>T<sub>c</sub> [μs]</i>
146,4	105,4812	118,65	3,6599
155,2	111,8216	125,79	2,7742
169,6	122,1968	137,46	2,1752
178,0	128,2490	144,27	1,9369
190,0	136,8950	153,99	1,6827

\*Factores de corrección por densidad de aire y humedad  $k_d$  : 0,8712 y  $k_h$  : 0,9800.

Tabla 55: Valores cresta normalizados y tiempos de corte para la determinación de la característica tensión-tiempo del objeto 6.

<i>Condiciones del ensayo</i>	<i>P: 677,6 mmHg</i>	<i>T: 27,5°C</i>	<i>hr: 57,1 %</i>
<i>V [V] B. T.</i>	<i>V<sub>50</sub>* [kV]</i>	<i>V<sub>50</sub> [kV]</i>	<i>T<sub>c</sub> [μs]</i>
142,6	102,7433	114,65	4,7061
156,8	112,9744	126,09	2,4833
178,0	128,2490	143,05	1,9256
194,0	139,7770	155,99	1,3378
208,0	149,8640	167,38	1,1852

\*Factores de corrección por densidad de aire y humedad  $k_d$  : 0,8693 y  $k_h$  : 0,9700.

Tabla 56: Valores cresta normalizados y tiempos de corte para la determinación de la característica tensión-tiempo del objeto 7.

<i>Condiciones del ensayo</i>	<i>P: 677,6 mmHg</i>	<i>T: 27,5°C</i>	<i>hr: 57,1 %</i>
<i>V [V] B. T.</i>	<i>V<sub>50</sub>* [kV]</i>	<i>V<sub>50</sub> [kV]</i>	<i>T<sub>c</sub> [μs]</i>
144,3	103,9682	116,01	4,2850
156,0	112,3980	125,42	2,6970
178,0	128,2490	143,05	1,9503
194,0	139,7770	155,99	1,4374
208,0	149,8640	167,26	1,2447

\*Factores de corrección por densidad de aire y humedad  $k_d$  : 0,8693 y  $k_h$  : 0,9700.

---

# F

## MANUAL DE USUARIO PARA LA INTERFAZ IA-Pro

---

---

Este apéndice explica el funcionamiento y correcto uso de la interfaz desarrollada para llevar a cabo el análisis de un impulso de tensión, haciendo uso de las bondades ligadas a la bien conocida herramienta de laboratorio matemático, MATLAB R2013a (se recomienda el uso de la misma, o versiones posteriores a ésta). Como bien se mencionó en capítulos anteriores, dicha interfaz arroja un análisis completo y detallado de cualquier señal de tipo impulsional (atmosférica), permitiendo contrastar los diferentes métodos ya mencionados.

### SECCIÓN F.1

#### EJECUCIÓN DE LA INTERFAZ

La carpeta anexa (*IA\_Pro*), contiene los archivos necesarios que permiten dar inicio a la interfaz (no modificar). En la Figura 68, dos recuadros indican la ubicación de la *Current Folder* y la *Command Window*: la primera, establece la ruta que contiene dichos archivos, restando sólo, aquella que permite ejecutar las instrucciones necesarias que darán inicio a ésta. A continuación, se listan uno a uno, los diferentes pasos para ello:

1. Establecer la *Current Folder*:

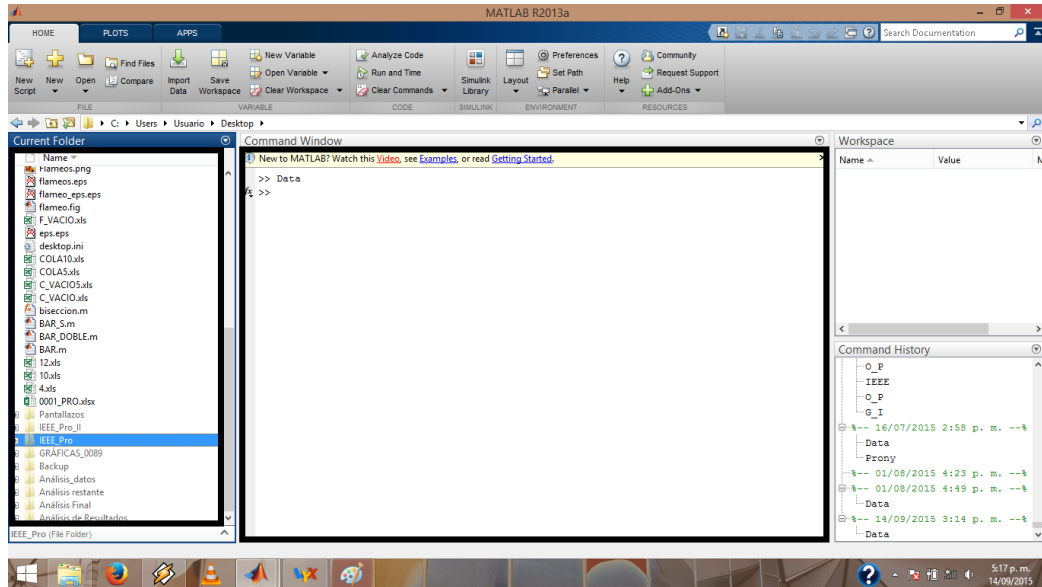
C:\Users\Usuario\Desktop\IA\_Pro

## F.1. EJECUCIÓN DE LA INTERFAZ

2. Ejecutar la instrucción que dará inicio a la interfaz:

```
>> IA_Pro
```

Figura 68: *Current folder* y *Command window* - MATLAB.



### F.1.1 Ventana *Data*

Esta ventana permite importar los diferentes archivos, necesarios para llevar a cabo el análisis de un impulso de tensión. La Figura 69, enmarca seis diferentes recuadros, presentando así, los principales aspectos de ésta:

1. Los recuadros 1 y 2, engloban los vectores y gráficos relativos a cada tipo de evento (1-*Soporte* o *Full impulse*; 2-*Flameo* o *Chopped impulse*). El primero de ellos, expondrá el soporte asignado; el segundo, todo aspecto relacionado a cualquier corte o flameo. No obstante, este último presenta un gráfico adicional, permitiendo observar la adecuación del oscilograma muestreado (puntos azules), es decir, éste prescinde de aquellas muestras situadas justo después del corte. Por otra parte, cada corte requiere, para su debido análisis, un soporte dado al mismo nivel de tensión, esto, a fin de adecuar la herramienta a la metodología propuesta por el *IEEE Std. 4-2013*.
2. Los pequeños recuadros denotados como 3 (*Buscar...*), permiten navegar en busca del soporte y/o corte de interés. Ahora bien, los vectores muestreados deben estar contenidos en un archivo de extensión *.xls* (Libro EXCEL 97-2003), Hoja 1, columnas A (tiempo -  $\mu s$ ) y B (tensión -  $V$ ).

## F.1. EJECUCIÓN DE LA INTERFAZ

- El recuadro 4 (*Truncamiento de muestras*), ha de señalar los tres diversos casos desarrollados para adaptar el corte de la señal. No obstante, éstos pueden no adecuarse de manera exacta dicha señal, rebasando el punto exacto de corte. Para ello, se elimina muestra a muestra la cantidad restante, hasta obtener la señal deseada (*ELIMINAR*).

Figura 69: Ventana Data de la interfaz IA\_Pro.

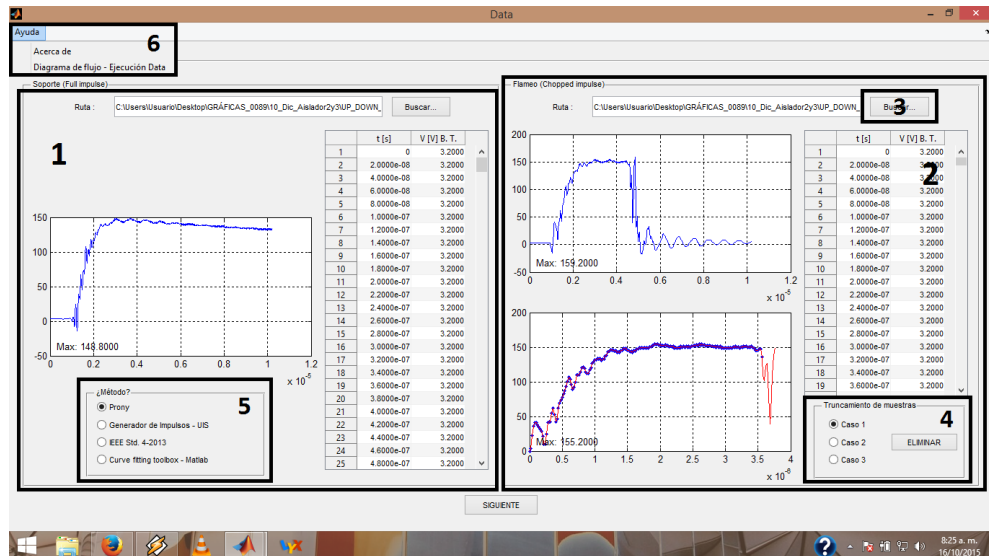
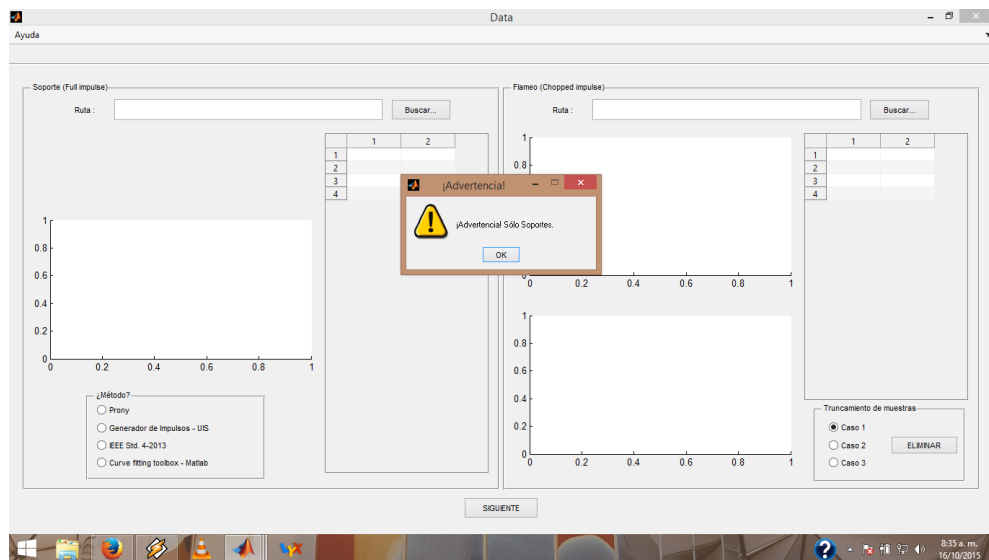


Figura 70: Cuadro de advertencia de la interfaz IA\_Pro.

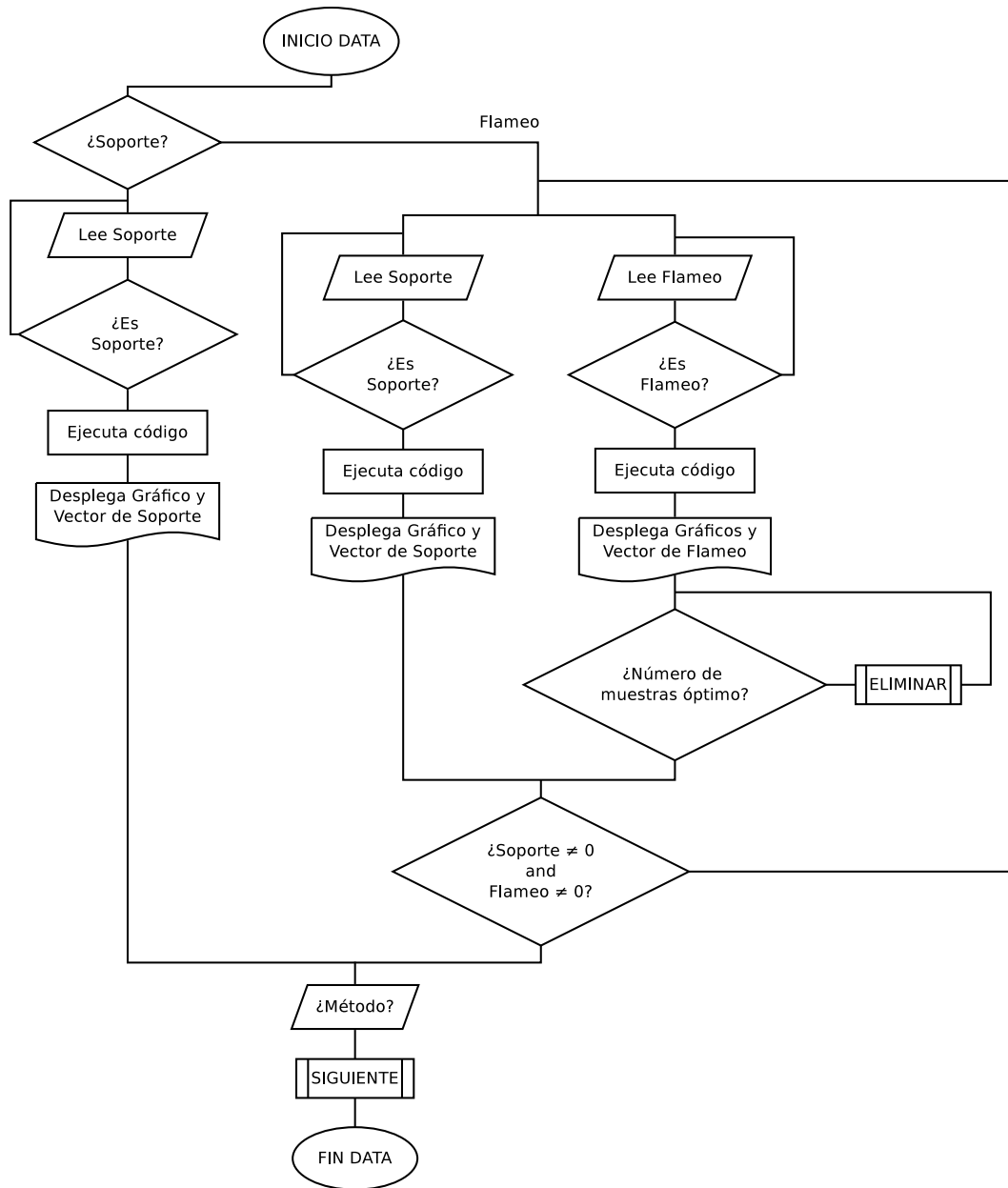


## F.1. EJECUCIÓN DE LA INTERFAZ

- Finalmente, el recuadro 5 (*¿Método?*) lista los diferentes métodos que puede ejecutar la herramienta.

En resumen, se debe seleccionar el, o los vectores muestreados, adecuando, dado el caso, la señal cortada, a la muestra exacta que da inicio al flameo en el objeto de prueba. Luego, se selecciona cualquiera de los diferentes métodos, dando paso a la siguiente ventana (*SIGUIENTE*).

Figura 71: Diagrama de flujo - Ejecución ventana Data.



El diagrama de flujo de la Figura 71, presenta el procedimiento general de ejecución de esta ventana (este diagrama y un detallado mensaje de ayuda, acerca de esta ventana, podrán desplegarse del menú *Ayuda* situado en la parte superior izquierda de ésta - recuadro 6, Figura 69).

En todo caso, y dado cualquier tipo de error, la interfaz arrojará un cuadro de advertencia acorde a éste (Figura 70).

**SECCIÓN F.2**

**MÉTODOS DE AJUSTE**

El Capítulo 5, contiene una descripción detallada de los diferentes métodos de ajuste usados.

Cada interfaz (una por método), presenta:

- Entradas (varían según el método).
- Oscilograma de la señal muestreada, ajuste y residuo de la misma.
- Tabla tipo EXCEL con los vectores tiempo y tensión del ajuste.
- Ecuación de ajuste usada.
- *Salidas* (en p.u. o [V] B. T. - aplica sólo al ejecutar la opción *CALCULAR*), donde,

$T_{1\_W}$  : tiempo de frente tomado del soporte [s].

$T_{1\_F}$  : tiempo de frente tomado del flameo [s].

$T_2$  : tiempo de cola [s].

$T_c$  : tiempo de corte [s].

*Modo* : modo óptimo (sólo disponible en la interfaz Prony).

*Máx* : valor máximo del ajuste en p.u. o V por B.T..

*Base* : valor máximo de la señal muestreada [V] por B.T..

*Error* : error de ajuste.

$\beta$  : amplitud relativa de sobretensión.

Adicional a éstas, cada método arrojará las diferentes constantes de ajuste, según dicha ecuación.

- Opción *CALCULAR*: ejecutará el método actual.
- Opción *ZOOM*: ubicada en la parte inferior del oscilograma, abrirá una nueva ventana, permitiendo visualizar a mayor escala, dichos gráficos.

- Opción *EXPORTAR*: permite exportar los datos a una hoja de cálculo (EXCEL).
- Opción *REGRESAR A DATA*: ejecuta la ventana *Data* (esto borrará cualquier variable antes guardada).
- Opción *SIGUIENTE*: ejecutará el método seleccionado, conservando cualquier variable, siempre que ésta haya sido ejecutada anteriormente.
- Opción *RESULTADOS*: arrojará una ventana comparativa de los métodos ya ejecutados.

Las entradas requeridas por cada método variarán, dependiendo del mismo. Al igual que en *Data*, cada ventana método dispondrá de un menú *Ayuda*, situado en la parte superior izquierda de éstas.

### **F.2.1 G.I. (Generador de impulsos)**

Este método hace uso del circuito y las constantes características que representan el Generador de Impulsos (Apéndice A). Previo a su ejecución, cada método requiere el ingreso de las variables de entrada necesarias para llevar a cabo el ajuste. Así pues, la Figura 72, expone el diseño de la ventana *Generador de Impulsos - UIS*, enmarcando los aspectos fundamentales de ésta:

- Las *Entradas* requeridas por este método (recuadros 1 y 2) indican lo siguiente:

$kV/etapa$  : kV por etapa.

$\eta$  : eficiencia de la máquina

$R_p$  : resistencia paralelo de la cola (azul) [ $\Omega$ ].

$R_s$  : resistencia serie del frente (roja) [ $\Omega$ ].

$R_{se}$  : resistencia externa serie (esterilla para I. A.) [ $\Omega$ ].

$C$  : capacitancia del Generador de Impulsos [ $F$ ].

$C_b$  : capacitancia del Objeto de prueba (aislador) [ $F$ ].

*Etapas* ( $n$ ) : número de etapas.

Los valores de resistencia y capacitancia usados, se establecen por defecto en la interfaz, estando, sin embargo, sujetos a cualquier tipo de modificación de ser necesario.

El método requiere también, la previa selección del *tipo de evento* (*Soporte* o *Flameo*) y *descarga* (*Serie*) - ver recuadro 2.

Así, se ingresan las condiciones iniciales requeridas, ejecutando la opción *CALCULAR*. Los oscilogramas, ecuación, constantes de ajuste y demás salidas, podrán ser visualizados de no surgir inconveniente alguno (Figura 73). De lo contrario, múltiples mensajes

## F.2. MÉTODOS DE AJUSTE

de advertencia permitirán al usuario llevar la ejecución de éste a buen término.

La ejecución de una nueva ventana o método, requerirá la selección previa de cualquiera de ellos (Figura 72 - recuadro 6), o de las diferentes opciones ya expuestas (*EXPORTAR*, *REGRESAR A DATA*, *RESULTADOS*).

Figura 72: Ventana G.I. (Generador de impulsos) de la interfaz IA\_Pro.

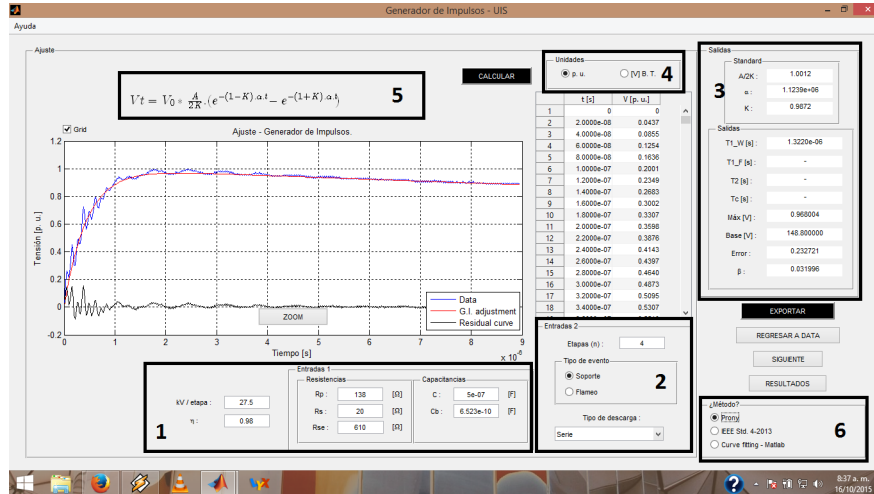
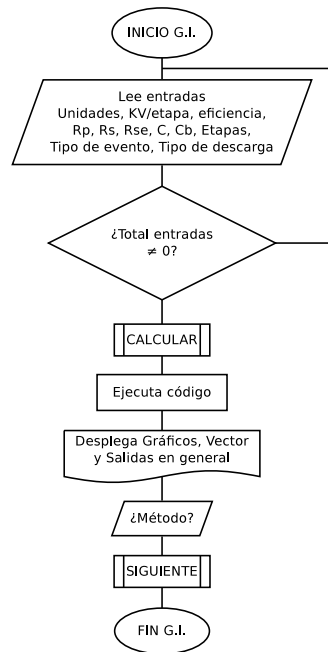


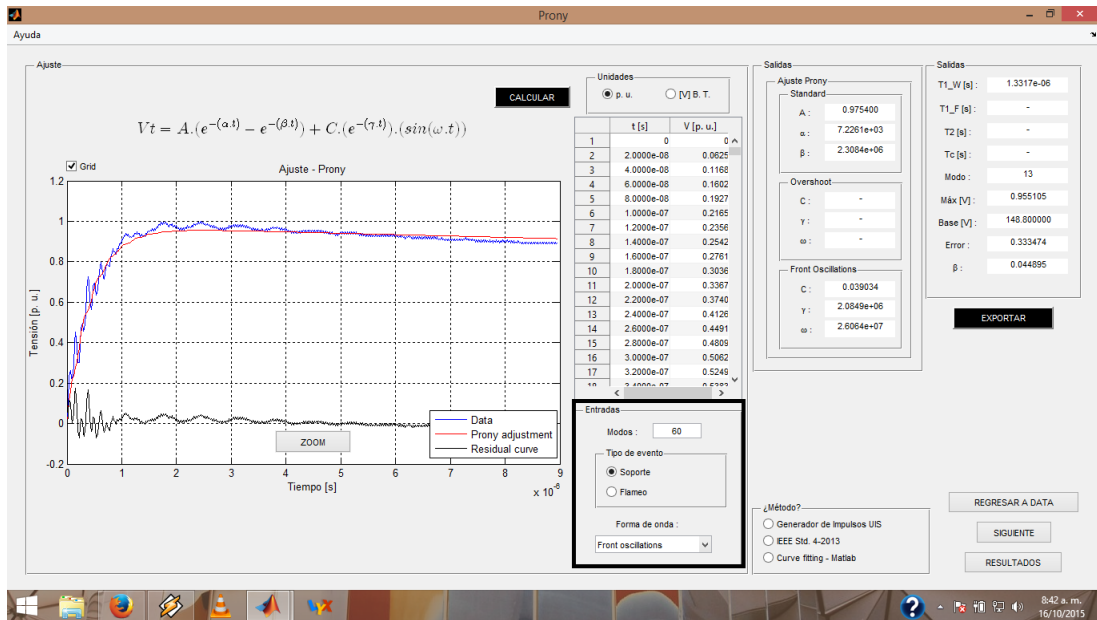
Figura 73: Diagrama de flujo - Ejecución ventana G. I.



### F.2.2 Prony

El método de ajuste Prony permite ajustar los datos muestreados a una suma de términos exponenciales complejos.

Figura 74: Ventana Prony de la interfaz IA\_Pro.



Este método requiere tres entradas (Figura 74 - ver recuadro):

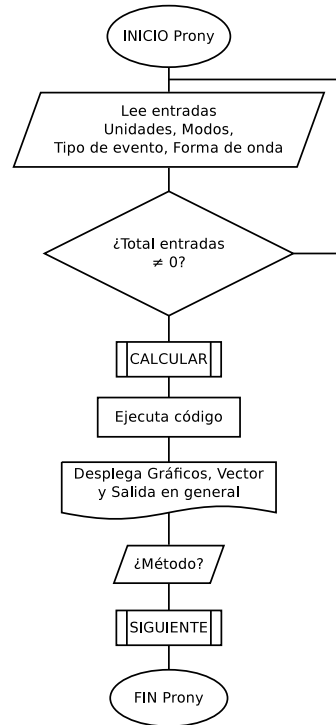
1. *Modos*: el número de modos representa la cantidad de componentes exponenciales amortiguadas a calcular, o, el número de iteraciones que realizará la herramienta ( $20 < Mode < 60$ ).\*
2. *Tipo de evento*: indicará el tipo de evento (*Soporte* o *Flameo*).
3. *Forma de onda*: designa el tipo o forma de onda, según las ya expuestas en la Sección 5.2 (*Standar*, *Overshoot* o *Front oscillations*).

El proceso de ejecución, en éste y otros métodos, resulta similar al descrito anteriormente (Figura 75).

Se recuerda la diferencia entre las dos formas de onda estándar usadas: una, relativa al Generador de Impulsos; la otra, propia del método de ajuste Prony.

\*El número de muestras debe ser mayor a 2 veces el número de modos (esto, debido a que algunos cortes presentan un número de muestras menor a 60).

Figura 75: Diagrama de flujo - Ejecución ventana Prony.



### F.2.3 Curve fitting

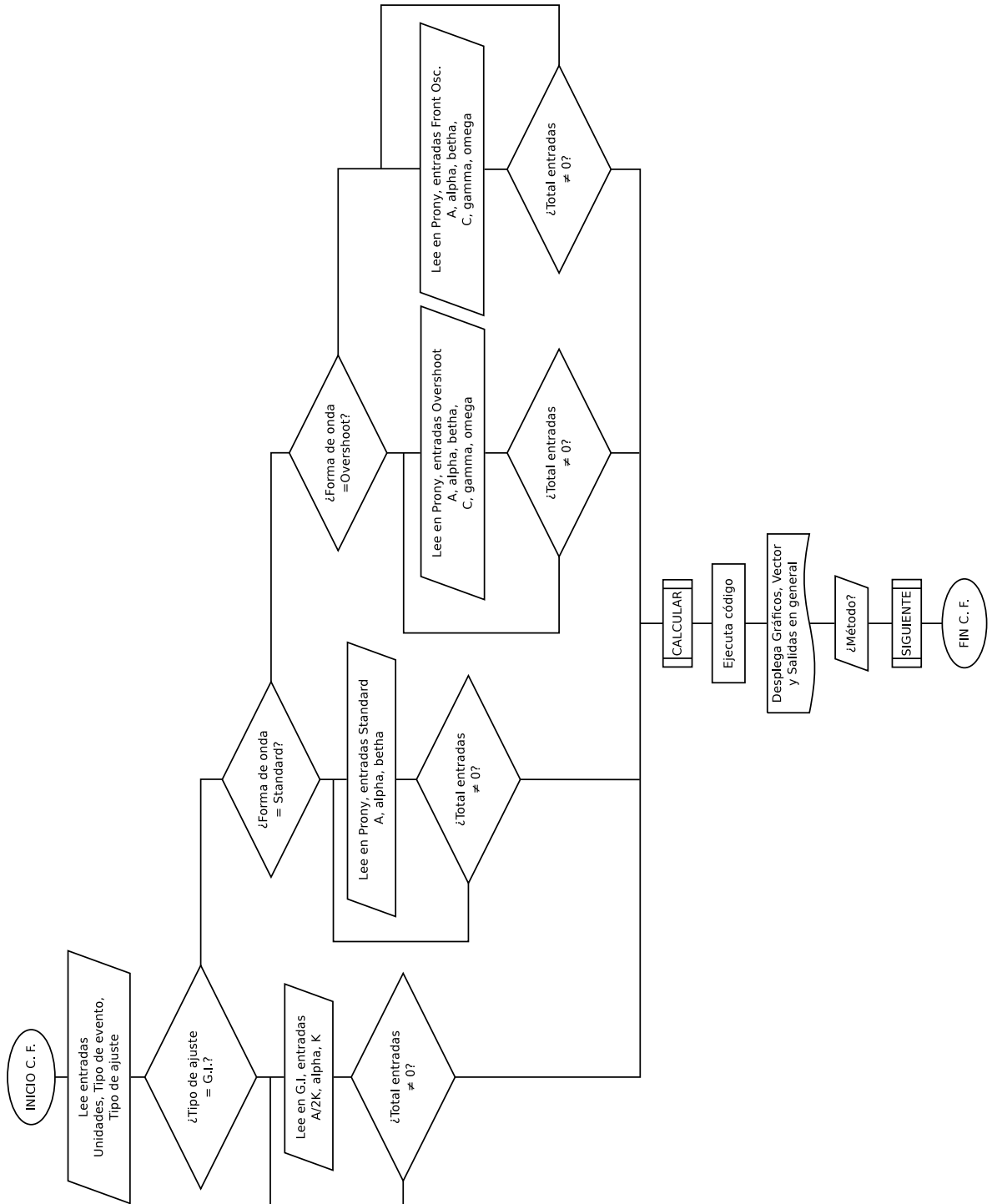
En éste, se hace uso de la Curve fitting toolbox de MATLAB, permitiendo ajustar el conjunto de datos a una ecuación de tipo doble exponencial.

Los recuadros 1 y 2 de la Figura 77, muestran las diferentes entradas requeridas. Así, las opciones del recuadro 2 permiten elegir el tipo de evento (*Tipo de evento*), ajuste (*Tipo de ajuste*) y forma (*Forma de onda*). Por otra parte, el recuadro 1 exige el ingreso de valores cercanos a las constantes de ajuste optimizadas.

El tipo de ajuste hace referencia a las ecuaciones de ajuste usadas en *G.I.* y *Prony*. *Prony* permite ajustar el conjunto de datos a tres diferentes formas de onda (*Standard*, *Overshoot* y *Front oscillations*), mientras *G.I.*, sólo ejecutará la forma *Standard*. De igual manera, y puesto que dichas opciones requieren valores cercanos a los esperados, se recomienda ejecutar previamente, las interfaces relativas a éstos dos métodos, permitiendo así, importar las constantes de ajuste de allí extractadas. De lo contrario, dichos valores deberán ser ingresados directamente por el usuario.

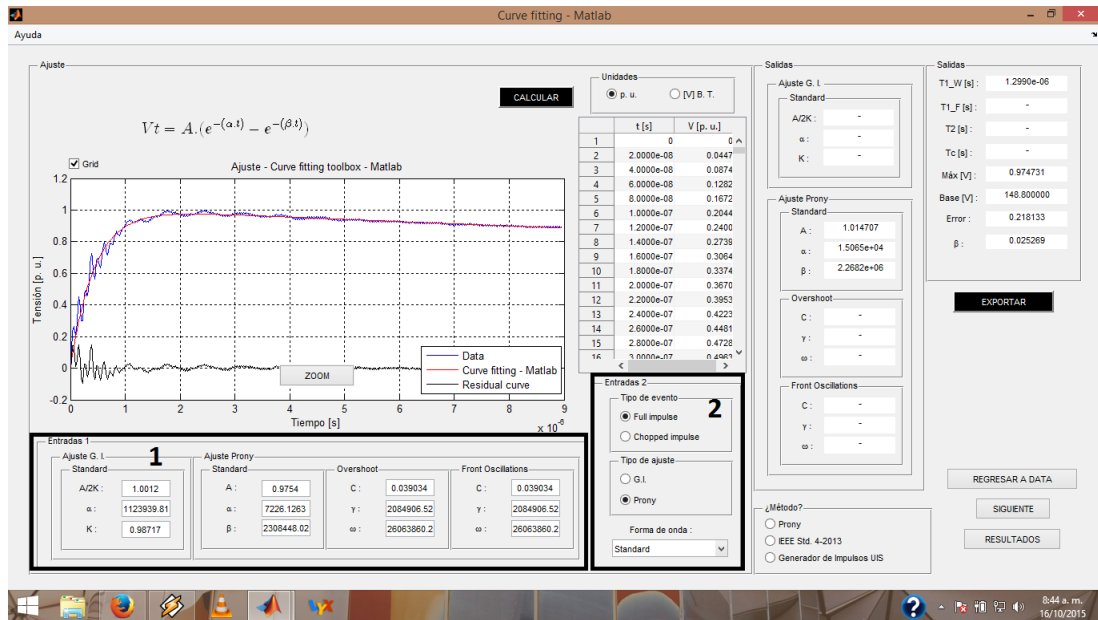
El proceso de ejecución será similar al descrito en apartados anteriores (Figura 76).

Figura 76: Diagrama de flujo - Ejecución ventana C. F.



## F.2. MÉTODOS DE AJUSTE

Figura 77: Ventana Curve fitting - MATLAB de la interfaz IA\_Pro.



### F.2.4 IEEE Std. 4-2013

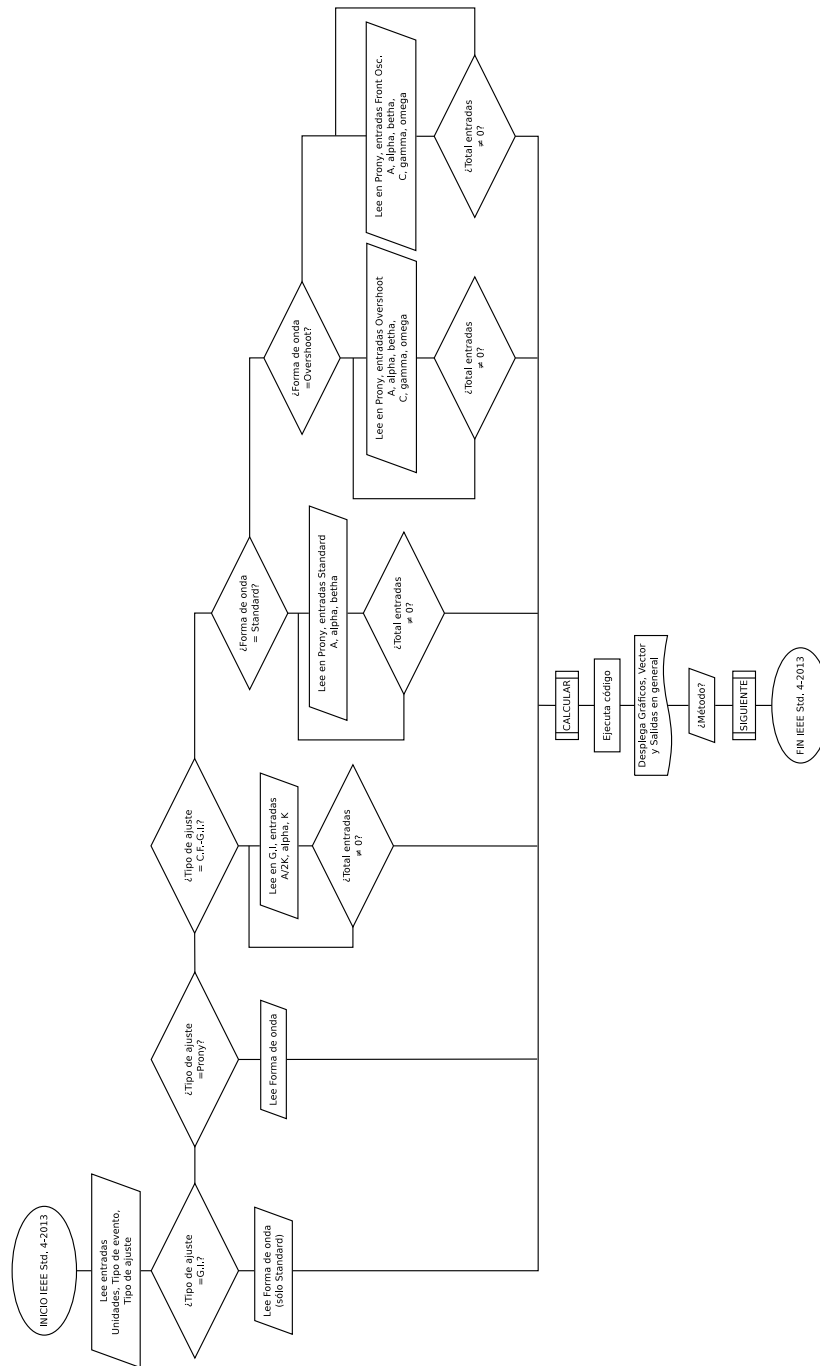
Esta interfaz engloba las tres herramientas de ajuste ya expuestas, haciendo uso de la metodología propuesta por el *IEEE Std. 4-2013*. El recuadro 1 de la Figura 79, idéntico al expuesto en la Sección F.2.3, presenta las diferentes entradas requeridas, según el método y tipo de ajuste ejecutado; el recuadro 2, las entradas relativas al *tipo de evento* (*Soporte* o *Flameo*), *ajuste* (*G.I.*, *Prony*, *C.F.-G.I.* o *C.F.-Prony*) y *forma de onda* (*Standard*, *Overshoot* o *Front oscillations*). En este caso, el tipo de ajuste hará referencia a las herramientas de ajuste o métodos mencionados anteriormente (*G.I.*, *Prony* o *C.F.*). Así, se tiene:

- La opción *G.I.*, ejecutará el método o ajuste desarrollado a partir del circuito representativo del Generador de Impulsos, bajo el marco propuesto por el *IEEE Std. 4-2013*.
- *Prony*, ejecutará el método de ajuste Prony, haciendo uso de cualquiera de las diferentes ecuaciones en él presentes, todo esto, bajo el marco propuesto por el *IEEE Std. 4-2013*.
- *C.F.-G.I.*, ejecutará la Curve fitting toolbox de MATLAB, haciendo uso de las constantes y ecuación característica del Generador de Impulsos, bajo el marco propuesto por el *IEEE Std. 4-2013*.

## F.2. MÉTODOS DE AJUSTE

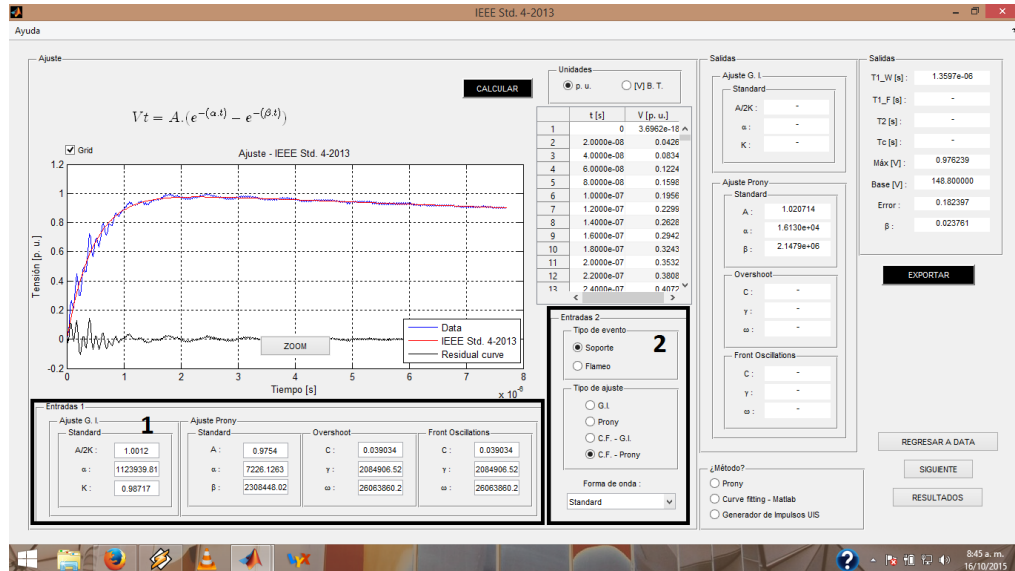
- *C.F.-Prony* ejecutará la Curve fitting toolbox de MATLAB, haciendo uso de las diferentes ecuaciones disponibles en *Prony*, todo esto, claro está, bajo el marco propuesto por el *IEEE Std. 4-2013*.

Figura 78: Diagrama de flujo - Ejecución ventana IEEE Std. 4-2013.



### F.3. RESULTADOS Y GRÁFICOS

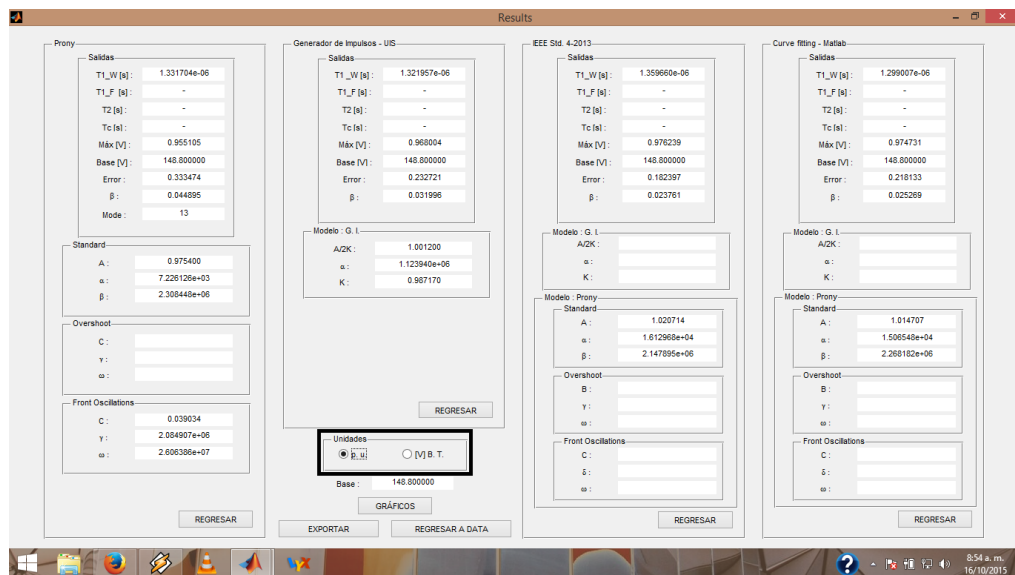
Figura 79: Ventana IEEE Std. 4-2013 de la interfaz IA\_Pro.



### SECCIÓN F.3

## RESULTADOS Y GRÁFICOS

Figura 80: Ventana Results de la interfaz IA\_Pro.



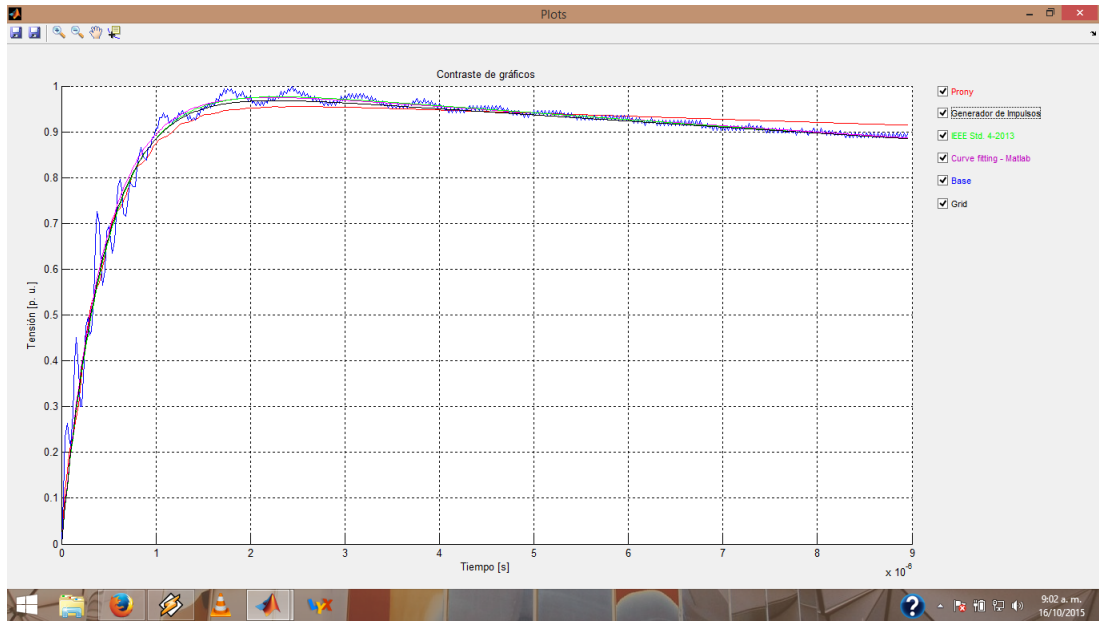
#### F.4. OPCIÓN EXPORTAR

Esta ventana permite comparar los resultados de las interfaces de ajuste ejecutadas previamente. En ella, las cuatro secciones propias de cada método, presentan las múltiples salidas de que dispone cada uno de ellos. Inicialmente, la ventana se mostrará completamente vacía, resultando necesario la elección de una de las opciones presentadas en el recuadro *Unidades* de la Figura 80. Esto permitirá importar los valores arrojados por cada método.

La sección relativa a cada método permite retornar a éstos mediante la opción *REGRESAR*. Las opciones *EXPORTAR* y *REGRESAR A DATA*, también están disponibles.

Por otra parte, la opción *GRÁFICOS* permitirá visualizar los gráficos de los ajustes antes ejecutados (Figura 81), cargando sólo los ajustes deseados (ver recuadro).

Figura 81: Ventana Plots de la interfaz IA\_Pro.



#### SECCIÓN F.4

### OPCIÓN *EXPORTAR*

Ésta permitirá exportar los diferentes valores arrojados por cada interfaz.

Así, dichos valores serán consignados en la hoja de cálculo *Export.xls* contenida en la carpeta anexa. La Figura 82, permite ver los cuadros diseñados para tal fin. En

## F.4. OPCIÓN EXPORTAR

ella, éstos últimos contendrán las salidas de las diferentes formas de onda ejecutadas y exportadas. Así, por ejemplo, para el método de ajuste *Prony*, tres diferentes columnas han sido designadas a cada forma o tipo de onda. Los valores serán ubicados según éstas (*Standard*, *Overshoot* o *Front oscillations*, de izquierda a derecha en dichas columnas).

Figura 82: Hoja de cálculo - EXPORT DATA.

Generador de Impulso			Curva Ritina - Matias			IEEE Std. 4-2011		
TI	W:	1.3418E-006	TI	W:	1.3899E-006	TI	W:	1.3625E-006
TF	F:	0.00000119	TF	F:	1.3418E-006	TF	F:	0.00000119
TZ	Z:	3.7228E-006	TZ	Z:	3.7400E-006	TZ	Z:	3.7336E-006
Maximo		144.3107418	Maximo		145.2370599	Maximo		144.3087918
Base		148.8	Base		148.8	Base		148.8
Error		0.54435664	Error		0.542383561	Error		0.544384539
A		0.02009748	A		0.02384493	A		0.02009748
B		1.0014	B		1.02929253	B		1.0014
g		112.939.816	g		110.195.422	g		112.939.816
K		0.90737	K		0.984132748	K		0.90737

La exportación de datos se realiza así:

- Se ejecuta la opción *EXPORTAR*: esto abrirá el explorador del sistema situando el mismo en la carpeta anexa (*IA\_Pro*).
- Se selecciona la hoja de cálculo *Export.xls* como ruta predeterminada: esto arrojará un mensaje de advertencia.
- Finalmente, se sobrescribe el archivo, pues a menos que se esté exportando un método antes exportado, la interfaz ocupará sólo las casillas relativas a éste.

Después de analizado un impulso de tensión, se recomienda ampliamente limpiar los valores consignados en dicha hoja de cálculo, a fin de evitar posibles errores en eventos posteriores.

---

# G

## CÓDIGOS (ARCHIVO DIGITAL)

---

Códigos y demás archivos digitales estarán contenidos en un CD anexo a este libro.