



**UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Departamento de Electrotecnia**

**TRABAJO PROFESIONAL DE INGENIERIA**  
**ELECTRICISTA (65.99)**

***“CARACTERIZACIÓN DE DIVISORES DE  
TENSIÓN UTILIZADOS EN MEDIDAS DE ALTA  
TENSIÓN, Y SU CALIBRACIÓN EN CC, CA Y  
TENSION DE IMPULSO SEGÚN LINEAMIENTOS  
DE LA NORMA IEC 60060-2”.***

**BRIAN MIRANDA**

**TUTOR INTERNO: RAFAEL ALBARRACÍN VALENCIA**  
**TUTOR EXTERNO: JOSE LUIS CASAIS**

**2018**

Paseo Colón 850, Ciudad Autónoma de Buenos Aires - Argentina

## **Objetivo**

“Realizar la caracterización de divisores de tensión utilizados en medidas de Alta Tensión, y su calibración en CC, CA y tensión de Impulso según lineamientos de la norma IEC 60060-2 vigente”.

De esta manera se busca calcular la incertidumbre de los factores de escala de los divisores utilizados en las mediciones del laboratorio de Alta Tensión del INTI; así se logra estudiar a los mismos para poder entender su funcionamiento y caracterización, conocer cuáles son las formas para calibrar y ensayar a fin de estimar las contribuciones de diversas fuentes de incertidumbre; comprender los fenómenos a considerar y cálculo de las incertidumbres.

Para el cumplimiento del objetivo, se hará un desarrollo sobre los siguientes temas:

- Introducción a las incertidumbres.
- Términos y definiciones utilizados.
- Instrumentos de medición en AT.
- Divisores de tensión.
- Procedimientos para el uso y calibración de los sistemas de medición.
- Sistemas de medición y sus características.
- Normas de medición en CA, CC e Impulso.
- Ensayos de los divisores en CA, CC e Impulso.

## Índice

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>I - MEDICIONES EN ALTA TENSIÓN.....</b>	<b>5</b>
<b>1.1- TÉRMINOS Y DEFINICIONES .....</b>	<b>5</b>
1.1.1- COMPONENTES DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN.....	5
1.1.2- FACTORES DE ESCALA .....	6
1.1.3- VALORES NOMINALES.....	6
1.1.4- DEFINICIONES RELACIONADAS AL COMPORTAMIENTO DINÁMICO .....	7
<b>1.2- MEDICIONES EN ALTA TENSIÓN.....</b>	<b>8</b>
<b>1.3- MEDICIÓN EN ALTA TENSIÓN CC, CA E IMPULSO .....</b>	<b>9</b>
1.3.1- MICROAMPERÍMETRO Y RESISTENCIA SERIE.....	9
1.3.2- VOLTÍMETRO DE GENERACIÓN .....	10
1.3.3- ESPINTERÓMETRO O EXPLOSOR A ESFERAS.....	11
1.3.4- VOLTÍMETRO ELECTROSTÁTICO .....	14
1.3.5- PICO VOLTÍMETRO .....	16
1.3.6- MILIAMPERÍMETRO CON IMPEDANCIA SERIE .....	17
<b>II - PROCEDIMIENTOS PARA EL USO Y CALIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE MEDICIÓN.....</b>	<b>19</b>
<b>2.1- GENERALIDADES.....</b>	<b>19</b>
2.1.1- PRINCIPIOS GENERALES.....	19
2.1.2- PLANIFICACIÓN DE ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN Y CONTROL DE CARACTERÍSTICAS .....	19
2.1.3- REQUERIMIENTOS PARA LOS REGISTROS DE CARACTERÍSTICA .....	20
2.1.4- CONDICIONES DE OPERACIÓN .....	20
2.1.5- INCERTIDUMBRE .....	20
2.1.6- ENSAYOS Y REQUISITOS DE ENSAYO PARA UN SISTEMA DE MEDICIÓN APROBADO Y SUS COMPONENTES .....	21
<b>2.2- CALIBRACIÓN – DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE ESCALA.....</b>	<b>21</b>
2.2.1- CALIBRACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN POR COMPARACIÓN CON UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE REFERENCIA (MÉTODO PREFERIDO .....	21
2.2.2- COMPARACIÓN SOBRE TODO EL RANGO DE MEDICIÓN ASIGNADO.....	22
2.2.3- COMPARACIÓN SOBRE EL RANGO DE TENSIÓN LIMITADO .....	23
2.2.4- DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE ESCALA DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN A PARTIR DEL FACTOR DE ESCALA DE SUS COMPONENTES (MÉTODO ALTERNATIVO).....	24
2.2.5- ENSAYO DE LINEALIDAD .....	24
2.2.6- COMPORTAMIENTO DINÁMICO .....	26
2.2.7- ESTABILIDAD A CORTO Y LARGO PLAZO.....	26
2.2.8- EFECTOS.....	27
<b>2.3- CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DEL FACTOR DE ESCALA .....</b>	<b>28</b>
2.3.1- INCERTIDUMBRE DE LA CALIBRACIÓN.....	28
2.3.2- INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN UTILIZANDO UN SISTEMA DE MEDICIÓN APROBADO .....	29
2.3.3- CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE DE LA MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE TIEMPO (SOLO IMPULSOS DE TENSIÓN) ...	30
2.3.4- INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN DE PARÁMETROS TEMPORALES UTILIZANDO UN SISTEMA DE MEDICIÓN APROBADO.....	31
2.3.5- ENSAYO DE INTERFERENCIA (SISTEMA DE TRANSMISIÓN E INSTRUMENTOS PARA MEDICIÓN DE TENSIONES IMPULSO).....	32
2.3.6- ENSAYO DE TENSIÓN SOPORTADA POR UN DISPOSITIVO DE CONVERSIÓN.....	32
<b>2.4- INCERTIDUMBRES DE MEDICIÓN .....</b>	<b>32</b>
2.4.1- DEFINICIONES.....	33

2.4.2- INCERTIDUMBRE ESTÁNDAR TIPO A .....	33
2.4.3- INCERTIDUMBRE ESTÁNDAR DE EVALUACIÓN TIPO B.....	34
2.4.4- INCERTIDUMBRE ESTÁNDAR COMBINADA .....	35
2.4.5- INCERTIDUMBRE EXPANDIDA .....	36
2.4.6- GRADOS DE LIBERTAD EFECTIVO .....	36
2.4.7- INCERTIDUMBRE ESTIMADA Y DECLARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE MEDICIÓN .....	37
<b>III - DIVISORES DE TENSIÓN Y SUS CARACTERÍSTICAS EN ALTA FRECUENCIA .....</b>	<b>39</b>
<b>3.1- INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>39</b>
<b>3.2- CARACTERÍSTICAS EN ALTA FRECUENCIA.....</b>	<b>39</b>
3.2.1- DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS EN ALTA FRECUENCIA POR MEDICIÓN DE LA RESPUESTA EN ESTADO ESTABLE.....	39
3.2.2- DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS EN ALTA FRECUENCIA POR MEDICIÓN DE LA RESPUESTA ESCALÓN .....	40
<b>3.3- FUENTES DE PULSOS PARA MEDICIONES DE RESPUESTA ESCALÓN.....</b>	<b>42</b>
<b>3.4- SOBRETENSIONES TRANSITORIAS DE CORTA DURACIÓN.....</b>	<b>44</b>
3.4.1- DEFINICIONES GENERALES.....	45
<b>3.5- TIEMPO DE ASCENSO Y DE RESPUESTA.....</b>	<b>47</b>
<b>3.6- EFECTOS DE CARGA EN DIVISORES DE TENSIÓN EN CIRCUITOS DE ALTA TENSIÓN.....</b>	<b>49</b>
<b>3.7- DIVISORES DE TENSIÓN .....</b>	<b>50</b>
3.7.1- DIVISORES DE TENSIÓN RESISTIVOS .....	50
3.7.1.1- <i>Divisores de tensión compensados que desprecian las inductancias dispersas y capacitancias distribuidas de pérdida a tierra.....</i>	50
3.7.1.3- <i>Divisor de tensión mezcla resistivo-capacitivo.....</i>	55
3.7.1.4- <i>Divisor de tensión de campo controlado.....</i>	56
3.7.1.5- <i>Divisor de tensión resistivo de baja resistencia.....</i>	58
3.7.2- DIVISOR DE TENSIÓN CAPACITIVO .....	59
3.7.2.1- <i>Divisor de tensión capacitivo y cables de conexión.....</i>	60
3.7.2.2- <i>Capacidades parasitas de un divisor capacitivo .....</i>	60
3.7.2.3- <i>Divisor de tensión capacitivo puro.....</i>	61
3.7.2.4- <i>Divisor de tensión capacitivo amortiguado .....</i>	64
<b>IV - NORMAS DE MEDICIÓN EN CA, CC E IMPULSO ATMOSFÉRICO .....</b>	<b>67</b>
<b>4.1- MEDICIÓN CON TENSIÓN CONTINUA.....</b>	<b>67</b>
<b>4.2- MEDICIÓN CON TENSIÓN ALTERNA .....</b>	<b>68</b>
4.2.1- REQUISITOS PARA UN SISTEMA DE MEDICIÓN APROBADO .....	68
4.2.2- CONTROL DE RENDIMIENTO.....	69
<b>4.3- MEDICIÓN DE IMPULSO DE TENSIÓN.....</b>	<b>70</b>
4.3.1- CONTRIBUCIÓN A LA INCERTIDUMBRE .....	70
4.3.2- CONTROL EN SISTEMAS DE MEDICIÓN: MÉTODO DE REFERENCIA Y ALTERNATIVO.....	71
4.3.3- CONTROL DEL ENSAYO.....	72
<b>4.4- SISTEMAS DE MEDICIÓN DE REFERENCIA .....</b>	<b>72</b>
4.4.1- REQUISITOS .....	72
4.4.2- INTERVALO ENTRE CALIBRACIONES SUCESIVAS DE SISTEMAS DE MEDICIÓN DE REFERENCIA .....	73
4.4.3- USO DE SISTEMAS DE MEDICIÓN DE REFERENCIA .....	73
<b>V - CALIBRACIÓN DE DIVISOR RESISTIVO ANTE TENSIÓN CONTINUA.....</b>	<b>74</b>
<b>5.1- CALCULO DE FACTOR DE ESCALA POR RELACIÓN DE RESISTENCIAS.....</b>	<b>74</b>

<b>5.2- CALCULO DE FACTOR DE ESCALA POR RELACIÓN DE TENSIONES .....</b>	<b>78</b>
<b>5.3- REQUISITOS DEL SISTEMA .....</b>	<b>82</b>
<b>5.4- INCERTIDUMBRE TIPO A .....</b>	<b>84</b>
5.4.1- INCERTIDUMBRE TIPO A DEL FACTOR DE ESCALA CORRESPONDIENTE A LA RELACIÓN DE RESISTENCIAS .....	84
5.4.2- INCERTIDUMBRE TIPO A DEL FACTOR DE ESCALA CORRESPONDIENTE A RELACIÓN DE TENSIONES HASTA 5 KV DE CC.....	85
5.4.3- INCERTIDUMBRE TIPO A DEL FACTOR DE ESCALA CORRESPONDIENTE A RELACIÓN DE TENSIONES PARA HASTA 125 KV .....	85
<b>5.5- INCERTIDUMBRES TIPO B .....</b>	<b>86</b>
5.5.1- ENSAYO DE LINEALIDAD .....	86
5.5.2- ENSAYO DE ESTABILIDAD A CORTO PLAZO .....	88
5.5.3- ENSAYO DE ESTABILIDAD A LARGO PLAZO .....	90
<b>5.6- CONCLUSIÓN PRELIMINAR .....</b>	<b>90</b>
<b>5.7- CALCULO DEL FACTOR DE ESCALA CON UNA RESISTENCIA DE BAJA TENSIÓN DE 25 K<math>\Omega</math> .....</b>	<b>90</b>
<b>5.8- CALCULO DE INCERTIDUMBRES DEBIDO A EQUIPOS DE MEDICIÓN .....</b>	<b>95</b>
5.9- INCERTIDUMBRE TIPO A .....	96
<b>5.10- INCERTIDUMBRE TIPO B .....</b>	<b>97</b>
5.10.1- INCERTIDUMBRE TIPO B DEBIDO A LA FALTA DE LINEALIDAD .....	97
5.10.2- INCERTIDUMBRE TIPO B DEBIDO A LA LINEALIDAD .....	97
5.10.3- INCERTIDUMBRE DEBIDO A LA ESTABILIDAD A CORTO PLAZO.....	98
5.10.4- INCERTIDUMBRE DEBIDO A LA ESTABILIDAD A LARGO PLAZO .....	98
<b>5.11- RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS .....</b>	<b>99</b>
<b>5.12- INCERTIDUMBRES ASOCIADAS AL CÁLCULO DEL FACTOR DE ESCALA MEDIANTE RELACIÓN DE RESISTENCIAS .....</b>	<b>100</b>
5.12.1- CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE SENSIBILIDAD .....	102
5.12.2- INCERTIDUMBRE COMBINADA.....	102
<b>5.13- CONCLUSION FINAL .....</b>	<b>103</b>
<b>VI – CALIBRACIÓN DE DIVISOR CAPACITIVO ANTE TENSIÓN DE IMPULSO ATMOSFÉRICO .....</b>	<b>104</b>
<b>6.1- ENSAYO ANTE IMPULSO ATMOSFÉRICO .....</b>	<b>104</b>
6.1.1- FUNCIÓN TRANSFERENCIA - ERRORES .....	105
5.1.2- DETERMINACIÓN DE LA RESPUESTA ESCALÓN DE UN SISTEMA DE MEDIDA DE ALTA TENSIÓN .....	107
<b>6.2 ENSAYO DE CALIBRACIÓN DE DIVISOR ANTE TENSIÓN DE IMPULSO ATMOSFÉRICO.....</b>	<b>109</b>
6.2.1 MEDICIÓN DE CAPACIDAD Y RESISTENCIA DEL DIVISOR .....	109
6.2.2- FACTOR DE ESCALA ANTE EXCITACIÓN.....	111
<b>6.3- COMPORTAMIENTO DINÁMICO .....</b>	<b>112</b>
6.3.1- METODOLOGÍA .....	112
6.3.2- DESARROLLO DE LA PRUEBA .....	114
6.3.3- PROCESAMIENTO DE DATOS .....	116
<b>6.4- INCERTIDUMBRE EN EL CÁLCULO DEL FACTOR DE ESCALA .....</b>	<b>117</b>
6.4.1- ESTABILIDAD A LARGO PLAZO.....	117
6.4.2- INCERTIDUMBRE POR COMPORTAMIENTO DINÁMICO .....	118
<b>6.5- CONCLUSIÓN .....</b>	<b>119</b>

VII – CALIBRACIÓN DE DIVISOR CAPACITIVO A TENSIÓN ALTERNA.....	120
7.1- CÁLCULOS INICIALES EN EL DIVISOR DE REFERENCIA .....	120
7.2- CALCULO DEL FACTOR DE ESCALA DEL DIVISOR EN ESTUDIO.....	121
7.3- INCERTIDUMBRE DEL FACTOR DE ESCALA .....	123
CONCLUSIÓN FINAL.....	125
ANEXO A .....	127
ONDA DE IMPULSO ATMOSFÉRICO NORMALIZADA .....	127
ANEXO B.....	129
B.1- EL PUENTE DE SCHERING .....	129
B.2- GENERADOR DE TENSIÓN CONTINUA UTILIZADO.....	130
ANEXO C.....	133
C.1- PROGRAMACIÓN UTILIZADA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL DIVISOR DE IMPULSO ATMOSFÉRICO. ....	133

***Agradecimientos***

*Quiero agradecer en primer instancia a la Universidad de Buenos Aires por permitirme poder estudiar, por el conocimiento y las experiencias adquiridas y a mis padres Esperanza y Bernardo por su apoyo incondicional y ser en mi vida ejemplo de trabajo y perseverancia.*

*Al Ing. Jose Luis Casais, al Ing. Albarracin y al Ing. Perez por su apoyo y comentarios que pudieron realizar a lo largo de este trabajo y a mis compañeros a lo largo de la carrera que estuvieron ahí colaborando, ayudando y respondiendome todo tipo de dudas, gracias a Ricardo y a Juan.*

*A mi hermana Gabriela que siempre estuvo a mi lado a lo largo de la carrera ayudandome en todo lo que estaba a su alcance y tener fe, al igual que mis padres, que podria alcanzar los objetivos que me proponga y a Daniel, mi cuñado, que es un gran compañero y esta presente para salir de la rutina.*

*A Juan y Andres del INTI, que me explicaron y aportaron su experiencia sobre los diversos equipos y ensayos que se realizan en el Laboratorio de Alta Tension del mismo.*

*Por ultimo, y sobretodo a mi sobrino que desde que llego todo se me volvio mas facil, es el bebe que me da alegria, es el “niño mono” que me hace recordar lo que realmente es importante en la vida.*

*Y a todos, todos los que me ayudaron con todo tipo de consejos y criticas que me hicieron una mejor persona y profesional, que sin su compañía este logro no hubiera sido posible.*



## **Introducción**

Mediante la ley 19.511 se establece que el Sistema Métrico Legal Argentino (SIMELA) estará constituido por las unidades, múltiplos, prefijos y símbolos del Sistema Internacional de Unidades (SI), como ha sido recomendado por la Conferencia General de Pesas y Medidas y las unidades, múltiplos, submúltiplos y símbolos distintos al SI.

El Poder Ejecutivo Nacional establecerá la organización del servicio de patrones para la nación y determinará el periodo de comparación de los mismos. Tendrá la facultad de dictar la reglamentación de especificaciones y tolerancias para instrumentos de medición.

El contraste periódico y la verificación se acreditarán con la marca o sello del contraste y certificados.

Sera obligatorio para los fabricantes, importadores o representantes someter a la aprobación de modelo y a la verificación primitiva todo instrumento de medición reglamentado por imperio de esta Ley. Únicamente serán admitidos a la verificación primitiva los instrumentos de medición cuyo modelo haya sido aprobado.

El SIMELA será de uso obligatorio y exclusivo en todos los actos públicos o privados de cualquier orden o naturaleza. Las disposiciones del presente artículo rigen para todas las formas y los medios con que los actos se exterioricen

Quedando prohibidas la venta, importación, oferta, y exhibición de instrumentos de medición graduados en unidades ajenas al SIMELA, excepto casos de instrumentos de exportación.

Los servicios locales de aplicación tendrán las siguientes funciones:

- a) ejercer en su jurisdicción el contraste periódico de los instrumentos de medición y la vigilancia del cumplimiento de esta ley, en tanto cuanto no esté reservado al servicio nacional;
- b) conservar los patrones que tengan asignados y someterlos al contraste periódico;
- c) llevar el registro detallado de los instrumentos de medición sujetos a su jurisdicción, así como de sus tenedores o usuarios responsables;
- d) percibir las tasas que correspondan a los servicios que presten

### **El INTI**

EL INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL, independientemente de las competencias que tiene asignadas por la normativa vigente, tendrá las siguientes funciones:

- a) Efectuar, en todo instrumento de medición reglamentado, los ensayos, certificaciones y/o cualquier otro procedimiento técnico necesario para la aprobación de modelo y la verificación primitiva a los efectos de lo establecido en el inciso c) del Artículo 2º del presente decreto.
- b) Efectuar, en todo instrumento de medición reglamentado, la verificación periódica por sí o por terceros y la vigilancia de uso en todo el territorio de la Nación. Proponer la actualización de las unidades, múltiplos y submúltiplos, prefijos y símbolos del Sistema Métrico Legal Argentino (SIMELA).
- c) Realizar, reproducir y mantener los patrones nacionales de medida y difundir la exactitud de medición.
- d) Definir los reglamentos, especificaciones y tolerancias para el servicio de patrones y sus instrumentos.
- e) Realizar investigaciones en los aspectos científico-técnico y legal de la metrología.
- f) Desarrollar centros de calibración de instrumentos utilizados con fines científicos, industriales o técnicos.

El SI se basa en siete unidades llamadas de base, que por convención se consideran como dimensionalmente independientes, estas son la longitud, la masa, el tiempo, la corriente eléctrica, la temperatura termodinámica, la cantidad de materia y la intensidad luminosa.

1. El metro es la longitud del camino recorrido por la luz en el vacío durante el lapso de 1/299792458

segundos (17a.CGPM, 1983).<sup>1</sup>

2. El kilogramo es la masa del prototipo internacional del kilogramo (1a. y 3a. CGPM, 1889 y 1901) compuesto de una aleación de platino e iridio, que se guarda en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas.

3. El segundo es la duración de 9192631770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133 (13a. CGPM, 1967).

4. El ampere es la corriente eléctrica constante que, mantenida en dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable y ubicados a una distancia de 1 metro entre sí, en el vacío, produciría entre ellos, por unidad de longitud de conductor, una fuerza de  $2 \times 10^{-7}$  newton (9a. CGPM, 1948).

5. El kelvin es la fracción  $1/273,16$  de la temperatura termodinámica del punto triple del agua (13a. CGPM, 1967).

6. El mol es la cantidad de materia de un sistema que tiene tantos entes elementales como átomos hay en 0,012 kg de carbono 12. Cuando se emplea el mol, se deben especificar los entes elementales, que pueden ser: átomos, moléculas, iones, electrones u otras partículas o grupos especificados de tales partículas.

Un intervalo o una diferencia de temperatura Celsius pueden expresarse tanto en grados Celsius como en kelvin.

7. La candela es la intensidad luminosa en una dirección dada, de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12}$  hertz y cuya intensidad energética en esa dirección es  $1/683$  watt por esterradián.

### Unidades SI Derivadas

Unidades SI derivadas con nombres especiales				
Nº	MAGNITUD	UNIDAD SI	SIMBOLO SI	EXPRESION EN SIMBOLOS DE OTRAS UNIDADES SI
1	frecuencia	hertz	Hz	1/s
2	fuerza	newton	N	m.kg/s <sup>2</sup>
3	presión, tensión mecánica	pascal	Pa	N/m <sup>2</sup>
4	energía, trabajo, cantidad de calor	joule	J	N.m
5	potencia, flujo energético	watt	W	J/s
6	cantidad de electricidad, carga eléctrica	coulomb	C	A.s
7	potencial eléctrico, diferencia de potencial, fuerza electromotriz, tensión eléctrica	volt	V	W/A
8	capacitancia, capacidad	farad	F	C/V
9	resistencia eléctrica	ohm	Ω	V/A
10	conductancia eléctrica	siemens	S	A/V
11	flujo magnético	weber	Wb	V.s
12	inducción magnética, densidad de flujo magnético	tesla	T	Wb/m <sup>2</sup>
13	inductancia	henry	H	Wb/A
14	flujo luminoso	lumen	lm	cd.sr
15	iluminancia	lux	lx	lm/m <sup>2</sup>
16	actividad (de un radionucleido)	becquerel	Bq	1/s
17	dosis absorbida, energía impartida mástica, kerma, índice de dosis absorbida	gray	Gy	J/kg
18	dosis equivalente	sievert	Sv	J/kg

<sup>1</sup> CGPM es la Conferencia General de Pesas y es el órgano de decisión de la Convención del Metro. Tiene a su cargo tomar decisiones en materia de metrología y en particular, en lo que concierne al Sistema Internacional de Unidades.

## Trabajo Profesional de Ingeniería Electricista (65.99) – Brian Miranda

Respecto de unidades SI derivadas propias del campo de la electricidad y magnetismo, se encuentra:

Electricidad y Magnetismo	campo eléctrico	volt por metro	V/m
	campo magnético	ampere por metro	A/m
	carga eléctrica volumica, densidad de carga eléctrica	coulomb por metro cúbico	C/m <sup>3</sup>
	conductividad elétrica	siemens por metro	S/m
	densidad de corriente eléctrica	ampere por metro cuadrado	A/m <sup>2</sup>
	desplazamiento eléctrico, densidad de flujo eléctrico	coulomb por metro cuadrado	C/m <sup>2</sup>
	fuerza magnetomotriz	ampere	A
	permeabilidad	henry por metro	H/m
	permitividad	farad por metro	F/m
	reluctancia	henry a la menos 1	H <sup>-1</sup>
resistividad	ohm metro	Ω .m	



## **I - Mediciones en Alta Tensión**

### **1.1- Términos y Definiciones**

#### *Sistema de medición*

Conjunto completo de dispositivos adecuados para realizar una medición de alta tensión; el software utilizado para obtener o calcular la medición de los resultados, también forma una parte del sistema de medición.

Un sistema de medición generalmente contiene los siguientes componentes:

- Un dispositivo de conversión con los cables necesarios para la conexión de este dispositivo al objeto de prueba o al circuito y las conexiones a tierra.
- Un sistema de transmisión que conecta los terminales de salida del dispositivo de conversión a los instrumentos de medida y el uso de impedancias o redes.
- Un instrumento de medida junto con cualquier conexión a la fuente de alimentación.

Los sistemas que sólo comprenden algunos de los componentes anteriores o que se basan en principios no convencionales, son aceptables si cumplen con los requisitos de incertidumbre especificados en la norma de medición.

#### *Registro de desempeño*

Registro detallado, establecido y mantenido por el usuario, que describe al sistema de medición y que contiene evidencia de que se han cumplido los requisitos establecidos por la normativa.

La evidencia tiene en cuenta los resultados de la prueba de rendimiento inicial y la programación y resultados de las pruebas de rendimiento posteriores y control de características.

#### *Sistema de medición aprobado*

Hace referencia al sistema que queda demostrado que cumple con uno o más de los requisitos establecidos por norma.

#### *Sistema de medición de referencia*

Sistema de medición cuya calibración es trazable a las normas nacionales y/o internacionales pertinentes, y que poseen una precisión y estabilidad para su uso en la aprobación de otros sistemas por medio de mediciones comparativas simultáneas con determinadas formas de onda y rango de tensión.

Un sistema de medición de referencia puede utilizarse como un sistema de medición aprobado, pero no lo es en viceversa.

### **1.1.1- Componentes de un sistema de medición**

#### *Dispositivo de conversión*

Dispositivo para convertir la magnitud a medir (mensurando) en una cantidad compatible con el instrumento de medición.

#### *Divisor de tensión*

Dispositivo que presenta un brazo de alta tensión y otro de baja tensión tal que la tensión de entrada se aplica al dispositivo completo y la tensión de salida se toma del brazo de baja tensión. Los elementos de los dos brazos son por lo general resistores o capacitores o una combinación de ellos.

#### *Transformador de tensión*

Dispositivo de conversión que consiste en un transformador en el que la tensión secundaria, en condiciones normales de uso, es sustancialmente proporcional a la tensión del primario y difiere en fase de la misma por un ángulo, el cual se trata que sea próximo a cero.

*Sonda de campo eléctrico*

Dispositivo de conversión para la medición de la amplitud y la forma de onda de un campo eléctrico.

*Sistema de transmisión*

Conjunto de dispositivos que transfieren la señal de salida de un dispositivo de conversión a un instrumento de medición.

Un sistema de transmisión consiste por lo general de un cable coaxial con su impedancia terminal, pero puede incluir atenuadores, amplificadores u otros dispositivos conectados entre el dispositivo de conversión y el instrumento de medición.

Un sistema de transmisión puede estar parcial o totalmente incluido en el dispositivo de conversión o en el instrumento de medición.

*Instrumento de medición*

Dispositivo destinado a realizar mediciones, solos o en combinación con dispositivos complementarios.

**1.1.2- Factores de escala**

*Factor de escala de un sistema de medición*

Factor por el cual el valor de la lectura de medición del instrumento se multiplica para obtener el valor de la magnitud de entrada del sistema completo de medición. El sistema puede tener múltiples factores de escala para diferentes rangos de escala, de frecuencia o forma de onda. Pero para sistemas de medición en los que se muestra el valor de la magnitud de entrada en forma directa, el factor de escala es la unidad.

*Factor de escala de un dispositivo de conversión*

Factor por el cual la salida del dispositivo de conversión es multiplicada para obtener la cantidad de entrada.

El factor de escala de un dispositivo de conversión puede ser adimensional (por ejemplo, la relación de un divisor) o puede tener dimensiones (por ejemplo, la impedancia de una impedancia de conversión de tensión).

*Factor de escala de un sistema de transmisión*

Factor por el que la salida de un sistema de transmisión se multiplica para obtener su cantidad de entrada.

*Factor de escala de un instrumento de medición*

Factor por el cual se multiplica la lectura del instrumento para obtener su cantidad de entrada.

*Factor de escala asignada F*

Factor de escala de un sistema de medición determinado en la prueba de caracterización más reciente.

Un sistema de medición puede tener varios factores de escala asignados; por ejemplo, para un determinado rango nominal un factor de escala específico.

**1.1.3- Valores nominales**

*Condiciones de operación*

Determinadas condiciones bajo las cuales el sistema de medición deberá operar entre los límites de incertidumbre especificados.

*Tensión de operación nominal*

Nivel máximo de tensión, de frecuencia o forma de onda especificada a la que un sistema de medición esta designado para ser usado.

La tensión nominal de funcionamiento puede ser mayor que el límite superior del rango de medición asignado.

*Rango de medición asignado*

Rango de tensión, de frecuencia y forma de onda especificada, caracterizado por un factor de escala

unitario, en el cual un sistema de medición puede ser usado.

Los límites de los rangos de medición asignado son elegidos por el usuario y verificado por un ensayo de caracterización especificados por norma.

Además, los sistemas de medición podrán tener más de un rango de medición asignado con distintos factores de escala.

#### Tiempo de operación asignado

Mayor tiempo durante el cual un sistema de medición para tensión alterna o continua puede operar al mayor límite del rango de medición asignado.

#### Tasa de aplicación asignada

Tasa más alta de impulsos de tensión especificados para un intervalo de tiempo especificado, en el que el sistema de medición puede funcionar al límite superior del rango de medición asignado.

La tasa se da generalmente como aplicaciones por minuto y el intervalo de tiempo en minutos u horas.

### 1.1.4- Definiciones relacionadas al comportamiento dinámico

#### Respuesta de un sistema de medición

$G$

Salida, como una función de tiempo o frecuencia, cuando una tensión especificada es aplicada a la entrada del sistema.

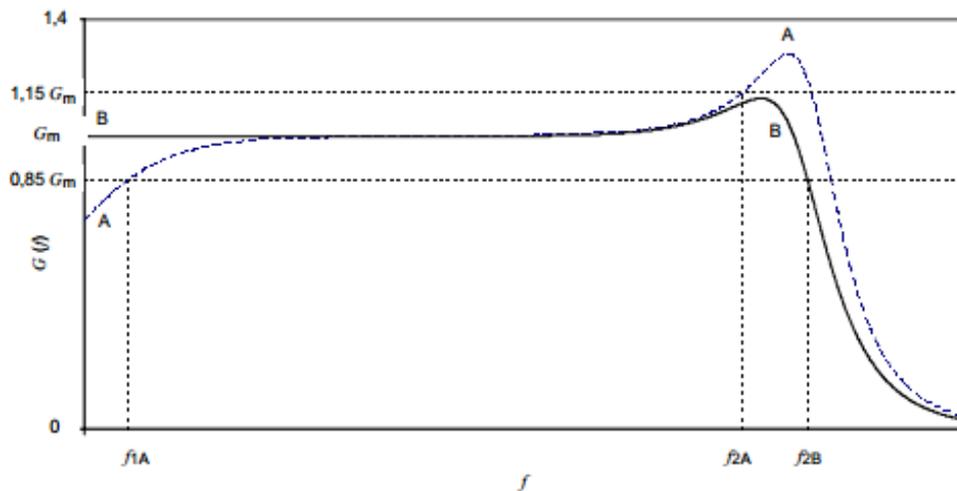


Fig.1.1. Respuesta Amplitud-Frecuencia.

#### Respuesta Amplitud-Frecuencia

$G(f)$

Relación entre la salida y la entrada de un sistema de medición como una función de frecuencia  $f$ , cuando la entrada es sinusoidal (ver Fig.1.1).

Las frecuencias límite inferior y superior se muestran en la curva A.

La curva B muestra una respuesta constante hasta la tensión continua.

#### Respuesta escalón

$G(t)$

Salida de un sistema de medición como una función de tiempo cuando la entrada es una función escalón.

#### Rango nominal (solo tensión impulso)

$\tau_{N1}$

Rango de valores entre el mínimo ( $t_{\min}$ ) y el máximo ( $t_{\max}$ ) de los parámetros de tiempo relevantes de la tensión impulso para los cuales el sistema de medición debe ser aprobado.

Entre los parámetros de tiempo relevantes están:

- El tiempo de frente  $T_1$  para impulsos completos y de cola cortada
- El tiempo de corte  $T_c$  para impulsos de frente cortado
- El tiempo de valor pico  $T_p$  para impulsos de maniobra.

Un sistema de medición puede tener uno o más rangos nominales para diferentes formas de onda. Por ejemplo, un sistema de medición particular podría ser aprobado:

- Para impulso atmosférico completo y de cola cortada con un factor de escala asignado  $F_1$  sobre el rango nominal  $\tau_{N1}$  de  $T_1 = 0,8 \mu s$  a  $T_1 = 1,8 \mu s$ , aunque la tolerancia sea de  $0,84 \mu s$  a  $1,56 \mu s$ ;
- impulso atmosférico de frente cortado con un factor de escala asignado  $F_2$  sobre el rango nominal  $\tau_{N2}$  de  $T_c = 0,5 \mu s$  a  $T_c = 0,9 \mu s$ ;
- Para impulsos de maniobra con un factor de escala asignado  $F_3$  sobre el rango nominal  $\tau_{N3}$  de  $T_p = 150 \mu s$  a  $T_p = 500 \mu s$ .

#### *Frecuencias límite*

#### *$f_1$ y $f_2$*

Límites inferior y superior del rango entre los cuales la respuesta en frecuencia-amplitud es prácticamente constante.

Estos límites son donde la respuesta primero se desvía por una determinada cantidad ( $\pm 15 \%$ ) del valor constante. La desviación admisible debe estar relacionada con la incertidumbre aceptable de un sistema de medición.

## **1.2- Mediciones en Alta Tensión**

Antes de continuar con el estudio de las mediciones en Alta Tensión se recuerda cuáles son los diferentes niveles de tensión:

- Muy Baja Tensión (MBT): corresponde a tensiones de hasta 50 V en CC o iguales valores eficaces entre fases en CA.
- Baja Tensión (BT): correspondiente a tensiones mayores a 50 V hasta 1 kV, en CC o iguales valores eficaces entre fases en CA.
- Media Tensión (MT): para tensiones entre 1 kV y 33 kV inclusive.
- Alta Tensión (AT): tensiones superiores a 33 kV.

Para todos estos niveles de tensión es necesario el uso de diversos equipos que permitan la generación y transmisión de la energía eléctrica por un sistema interconectado, a los cuales se les efectúa una serie de ensayos antes de su puesta en marcha y durante el tiempo que permanecen en servicio. De los análisis realizados a cada uno de los dispositivos se obtiene un conjunto de datos que permite tomar decisiones acerca de mantenerlos en funcionamiento o someterlos a algún tipo de mantenimiento.

Para la medición de variables de interés como lo son la tensión, la corriente, la frecuencia y la potencia se debe tener en cuenta una serie de condiciones, directamente ligadas con el nivel de tensión que se está manejando, que generan diferencias en su metodología de medición. Cuando el nivel de tensión se eleva, la infraestructura se hace más compleja, lo que dificulta la toma de medidas, debiendo además contemplarse el valor de tensión y corriente máxima que manejan los equipos; algunos dispositivos están diseñados para recopilar información de manera directa y otros lo hacen a través de métodos indirectos.

La medición en AT no siempre se puede ejecutar de manera directa sobre el equipo, por las razones anteriormente nombradas (dimensión de las estructuras y nivel de tensión), además de que pone en riesgo la seguridad del operario que realiza la maniobra.

#### *Medición Indirecta*

La medición indirecta es la más común en los ensayos en alta tensión. Estas metodologías a diferencia de la directa que obtiene los datos inmediatamente sobre el parámetro que se está censando (corriente, tensión, potencia, frecuencia, etc.), obtiene el resultado buscado a partir de los valores obtenidos de forma

indirecta, mediante el uso de una fórmula o ley física que relacione las cantidades medidas con el parámetro que se desea obtener.

Las mediciones de altas tensiones, corriente continua, corriente alterna o tensiones de impulso, implican problemas inusuales que no siempre se pueden manejar con las técnicas especializadas en medición eléctrica. Estos problemas aumentan con la magnitud de la tensión; aunque pueden ser fáciles de resolver para mediciones de tensiones aproximadas a los 10 kV, no lo son para tensiones de cientos de kilovolt o incluso de megavolt. Las dificultades están relacionadas principalmente con las grandes estructuras necesarias para el control de los campos eléctricos, con el fin de evitar la descarga disruptiva y, a veces, para controlar la disipación de calor dentro de los circuitos, por lo que para proteger a los equipos de medida de las grandes tensiones y de las corrientes y elevadas temperaturas que se puedan generar en el ensayo de alta tensión, se opta por la medición indirecta. Un claro ejemplo es el uso de divisores de tensión.

#### *Medición directa*

La medición directa es la más habitual a nivel de baja tensión. Consiste en tomar una lectura directa del parámetro sobre el que se desea obtener un valor numérico o su forma gráfica. Por ejemplo, al verificar la continuidad de corriente en un transformador trifásico de baja tensión, debido a que las puntas de los cables del instrumento de medida se conectan directamente sobre los contactos propios del transformador, se obtiene como evidencia de la continuidad un sonido emitido por el equipo de medida y un valor de la impedancia entre los terminales.

Para el caso de las altas tensiones, es posible realizar mediciones directas si se cuenta con instrumentos de medida diseñados para soportar los niveles de las variables de AT; por ejemplo, tensión, corriente, potencia, etc.

### **1.3- Medición en Alta Tensión CC, CA e Impulso**

Entre los equipos de medición para CC se encuentran los divisores de tensión resistivos, resistencias de alta tensión, voltímetros electrostáticos, espinterómetros y voltímetros de generación.

En CA para las mediciones se emplean voltímetros con impedancia en serie, para poder reducir la corriente que circula por el dispositivo de medición, divisores de tensión resistivos y capacitivos (que serán estudiados más adelante) voltímetros electrostáticos, espinterómetros y pico voltímetros.

Estos presentaran diseños diferentes a los utilizados para baja tensión, debido al aislamiento y la carga de origen; por ejemplo, para determinar un valor máximo, se pueden utilizar voltímetros tales que su lectura se limite al valor pico del parámetro a estudiar o utilizar un espinterómetro.

Para mediciones de Impulso, las altas tensiones se representarán en laboratorios por medio de generadores de impulso, que consisten de un cierto grupo de capacitores que se cargan en paralelo por medio de rectificadores de alta tensión, a través de resistencias de carga. Se crea la descarga de los capacitores por medio de espinterómetros de esferas a través de un circuito serie de resistencias amortiguadoras. Cuando se requiere hacer una variación en la tensión de prueba, basta con hacer una regulación en la tensión y gaps de las esferas.

Para la medición de las tensiones de impulso se utilizan los espinterómetros o gaps de esferas, divisores de tensión resistivos o capacitivos y voltímetros pico.

El estudio de los Divisores de Tensión será tratado especialmente.

#### **1.3.1- Microamperímetro y resistencia serie**

Si se utiliza una resistencia de alto valor y siendo  $i = V/R$ , la corriente en el medidor se limita a microampere para la deflexión máxima.

La caída de tensión en el medidor es despreciable, ya que la impedancia del mismo es de sólo unos pocos ohm en comparación con los megaohm de la resistencia en serie R.

Un dispositivo de protección como un gap de papel, un tubo de neón resplandeciente, o un diodo zener con una resistencia en serie adecuada se conecta a través del medidor como protección contra altas tensiones en caso de que la resistencia en serie  $R$  presente algún problema o falla.

Suelen aparecer problemas a tensiones muy elevadas, debido a la gran disipación de potencia, corrientes de fuga, variación de la resistencia por el cambio de la temperatura, entre otras.

Para evitar cargar a la fuente y no consumir corriente de la misma, se puede utilizar voltímetros de generación (“generating voltmeters”) que son de alta impedancia. Estos otorgan un aislamiento a la Alta Tensión, debido a que no están directamente conectados al terminal de alta.

Las limitaciones en este método son:

- La disipación de potencia y carga de la fuente,
- Efectos de temperatura y estabilidad a largo plazo,
- Dependencia de la tensión de los elementos resistivos, y
- Sensibilidad a los esfuerzos mecánicos.

Por lo que se utilizan divisores de tensión resistivos junto a voltímetros electrostáticos cuando se requiere precisión.

Los medidores con resistencia serie se construyen para 500 kV CC con una exactitud mejor a 0.2%.

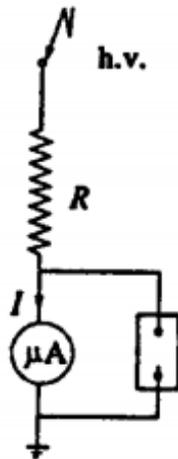


Fig1.2. Microamperímetro con resistencia serie.

### 1.3.2- Voltímetro de generación

Se trata de un generador de tensión electrostática de capacitor variable que genera una corriente proporcional a la tensión externa aplicada. El dispositivo es accionado por un motor externo síncrono o de velocidad constante.

Se basa en que si la carga almacenada en un capacitor de capacitancia  $C$  viene dada por  $q = C.V$ , y si la capacitancia del condensador varía con el tiempo cuando está conectada a la fuente de tensión  $V$ , la corriente a través del condensador es:

$$i = \frac{dq}{dt} = V \frac{dC}{dt} + C \frac{dV}{dt} \quad (1.1)$$

Siendo para CC: “ $dV/dt = 0$ ” y si la capacidad varía de manera senoidal:

$$C = C_0 + C_m \text{sen}(wt) \quad (1.2)$$

La corriente es:

$$i = i_m \cos(wt) \quad (1.3.1)$$

$$i_m = VC_m w \quad (1.3.2)$$

Siendo  $i_m$  el valor pico de la corriente  $i$ , cuyo valor rms es:

$$i_{rms} = \frac{VC_m\omega}{\sqrt{2}} \quad (1.4)$$

El dispositivo puede ser utilizado para mediciones en CA siempre que la velocidad del motor de accionamiento sea de la mitad de la frecuencia de la tensión a medir, de esta forma un motor sincrónico de 1500 rpm es adecuado para 50 Hz.

Los voltímetros de generación emplean sectores de rotación o álabes para la variación de la capacitancia. La Fig. 1.3 muestra un diagrama esquemático de un voltímetro de generación. La fuente de alta tensión está conectada a un electrodo disco  $S_3$  que se mantiene a una distancia fija en el eje de los otros electrodos de baja tensión  $S_0, S_1$  y  $S_2$ . El rotor  $S_0$  es accionado a una velocidad constante por un motor síncrono a una velocidad adecuada (1500, 1800, 3000 o 3600 rpm). Los alabes del rotor de  $S_0$  causan una variación periódica en la capacitancia entre el disco aislado  $S_2$ , y el electrodo de AT  $S_3$ .

La corriente generada a través de la resistencia R es rectificada y leída por un instrumento de bobina móvil. Se precisará un amplificador, si la capacitancia de derivación es alta o si se utilizan cables más largos para la conexión al rectificador y al medidor. El instrumento se calibrará utilizando un divisor de tensión o mediante un espinterómetro.

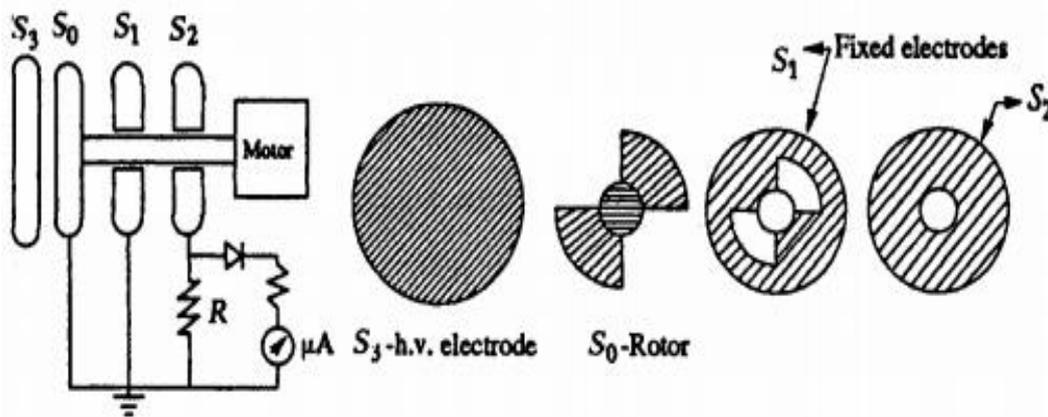


Fig.1.3. Diagrama esquemático de un voltímetro de generación (tipo de paletas giratorias)

Las curvas de calibración típicas de un voltímetro de generación se aprecian en la Fig. 1.4:

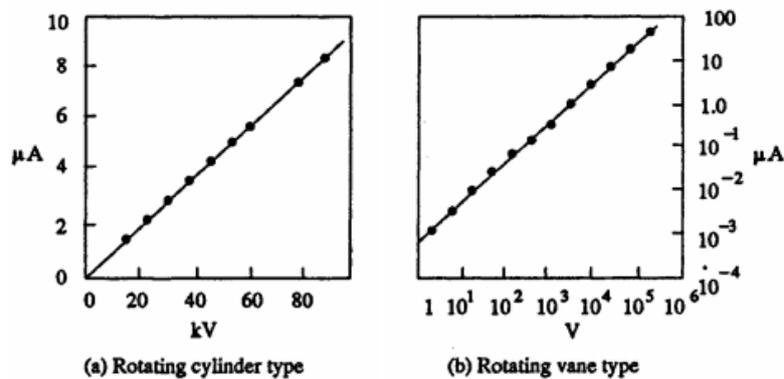


Fig. 1.4. Curvas de calibración para un voltímetro de generación

### 1.3.3- Espinterómetro o explosor a esferas

Debido a la simplicidad constructiva y de montaje de este dispositivo es ampliamente utilizado en la técnica de medición de AT. Permite determinar valores de cresta entre 2 y 3000 kV. Se pueden medir tensiones continuas, alternas y de impulso.

El inconveniente que presenta radica en que no se puede llevar a cabo una lectura continua y, además, en el momento de la descarga se produce una perturbación en el circuito bajo medida.

El dispositivo está constituido por dos esferas metálicas (de cobre, bronce, latón o aluminio) montadas sobre sendos aisladores. Los diámetros normalizados (según norma IRAM 2038 en Argentina) están comprendidos entre 20 y 2000 mm. También es muy importante la configuración de los soportes y distancias mínimas de todo lo que rodea a las esferas.

A continuación, se presentan en las Fig. 1.5 dos tipos de espinterómetros que se pueden encontrar:

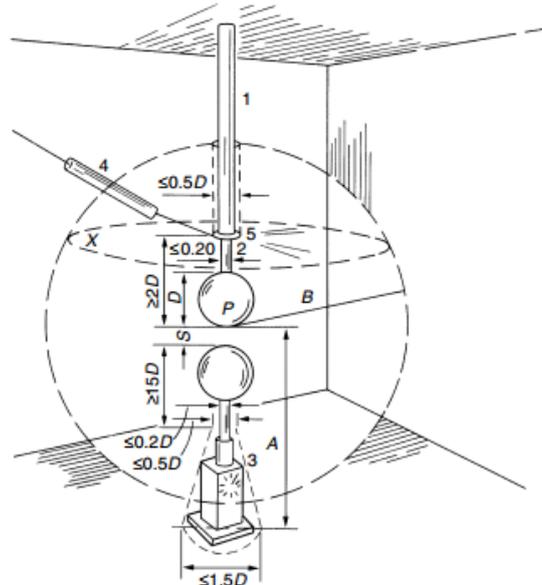


Fig. 1.5. (a) Explosor de esferas tipo vertical.

1 Soporte aislante; 2 Espiga de soporte de la esfera; 3 Mecanismo de maniobra con medida máximas; 4 Conexión de AT con resistencia en serie; 5 Electrodo de repartición de campo, con medidas máximas; P Punto de chispa de la esfera de AT; A Altura de P sobre el plano de Tierra; B Radio del espacio libre de objetos externos; X Plano que los elementos citados en 4 no deben atravesar dentro de una distancia a P que sea menor que B.

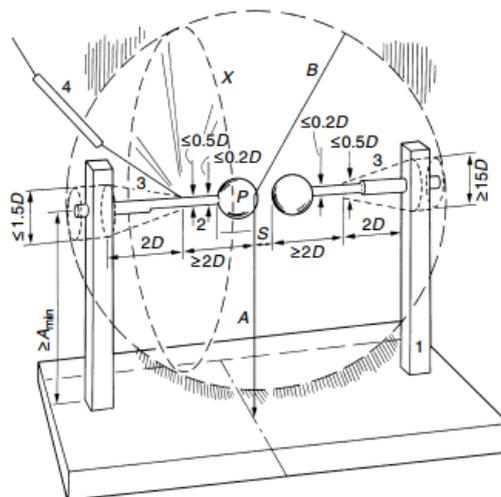


Fig. 1.5 (b). Explosor de esferas tipo horizontal.

1 Soporte aislante; 2 vástago soporte de la esfera; 3 mecanismos de movimiento con dimensiones máximas; 4 conexiones a la AT con resistencia en serie; P punto de arco de la esfera de AT; A altura de P sobre el plano de tierra; B Radio libre de la esfera respecto a la estructura metálica; X plano que no debe atravesar el órgano 4 dentro de la distancia B.P

Algunos aspectos importantes para el uso del explosor son:

- Irradiar con luz ultravioleta para evitar el retardo en las descargas.
- Limpieza de las esferas de modo que el polvo no altere el valor de la descarga.

- Realizar descargas preliminares para que se establezca el valor de la descarga.
- Tener en cuenta la influencia de la presión y la temperatura.

De acuerdo a la exactitud en las mediciones se tiene que es del orden de  $\pm 3\%$  para tensión alterna y de impulso. Mientras que para tensión continua es del orden de  $\pm 5\%$ .

Para el ensayo se establece condiciones atmosféricas normalizadas, tales son:

Temperatura: 20° C.

Presión: 101,3 kPa.

Humedad Absoluta: 11 g/m<sup>3</sup>.

De alterarse estos parámetros habrá una variación de la tensión disruptiva de descarga en el aire. La misma es proporcional a un factor de corrección atmosférica  $k_t = k_1 k_2$ , en el que  $k_1$  es el factor de corrección de la densidad del aire y  $k_2$  el correspondiente a la humedad.

### 1.3.3.1- Influencia de la densidad del aire

El factor de corrección por la densidad del aire depende de la densidad relativa del aire  $\delta$ , por lo cual se hará uso de la relación entre  $k$  y  $\delta$ :

$$\delta = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{273 + t_0}{273 + t} \quad (1.5)$$

<b>d</b>	<b>0.70</b>	<b>0.75</b>	<b>0.80</b>	<b>0.85</b>	<b>0.90</b>	<b>0.95</b>	<b>1.0</b>	<b>1.05</b>	<b>1.10</b>	<b>1.15</b>
<b>k</b>	<b>0.72</b>	<b>0.77</b>	<b>0.82</b>	<b>0.86</b>	<b>0.91</b>	<b>0.95</b>	<b>1.0</b>	<b>1.05</b>	<b>1.09</b>	<b>1.12</b>

Tabla 1.1. Relación entre Factor de corrección k y densidad del aire  $\delta$

### 1.3.3.2- Influencia de la Humedad

El factor de corrección por humedad se expresa mediante: “ $k_2 = k^w$ ”, en la que  $w$  se obtiene de un gráfico que depende del parámetro  $g = U_{50} / (500L\delta k)$  con  $U_{50}$  la tensión disruptiva al 50% en las condiciones atmosféricas actuales,  $L$  el camino mínimo de la descarga y  $\delta$  la densidad relativa del aire. Para el caso de humedades relativas superiores al 80%, su influencia es irregular, en especial en descargas superficiales.



Fig. 1.6. Influencia Condición Atmosférica-Humedad

La influencia de la humedad en las tensiones disruptivas para una esfera de 25 cm de diámetro y una separación de 1 cm se presenta en la Fig. 1.7. Se puede ver que el aumento de la tensión disruptiva es menor a 3% y la variación entre las tensiones de ruptura de CA y CC son insignificantes (<0,5%). Por lo tanto, se puede concluir que:

- El efecto de la humedad aumenta con el tamaño de las esferas y es máximo para gaps de campo uniformes.
- La tensión disruptiva aumenta con la presión parcial del vapor de agua en el aire y la humedad.

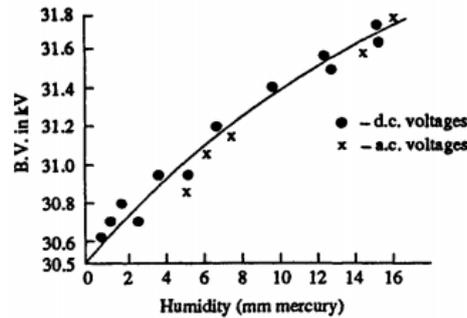


Fig. 1.7. Influencia de la humedad en tensiones disruptivas de CA y CC.

1.3.3.3- Efecto de objetos a tierra

El efecto de objetos cercanos conectados a tierra fue estudiado y se observó que hay una disminución de la tensión disruptiva:

$$\Delta V = m \log\left(\frac{B}{D}\right) + C \quad (1.6)$$

Con:

$\Delta V$ : Porcentaje de reducción.

$B$ : Diámetro del cilindro envolvente conectado a tierra.

$D$ : Diámetro de las esferas.

$S$ : Espaciamiento, y  $m$  y  $C$  son constantes.

La reducción será menor a 2% para  $S/D \leq 0,5$  y  $B/D \geq 0,8$  y para  $S/D \approx 1$  y  $B/D \geq 1$ , de solo un 3%.

En la Fig.1.8 se representa la variación que existe entre la tensión disruptiva y y la relación  $A/D$  (Fig. 1.8 (a)) y  $P/D$  (Fig. 1.8 (b)).

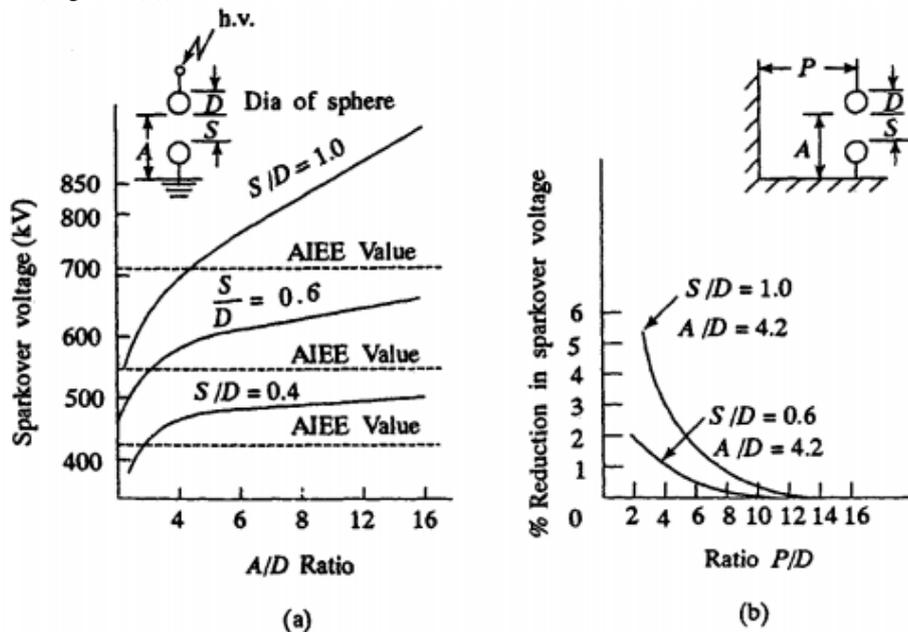


Fig. 1.8. Efecto de proximidad a tierra en la tensión disruptiva

1.3.4- Voltímetro Electroestático

Un voltímetro electrostático utiliza la fuerza existente entre dos placas opuestas. La fuerza se crea por el proceso en el que un cambio en la energía electrostática almacenada se convierte en trabajo mecánico. Haciendo referencia a la Fig. 1.9, se ve que el voltímetro electrostático está constituido por dos placas en paralelo, en la que una es fija y la otra tiene una parte móvil muy pequeña que es contenida por un resorte.

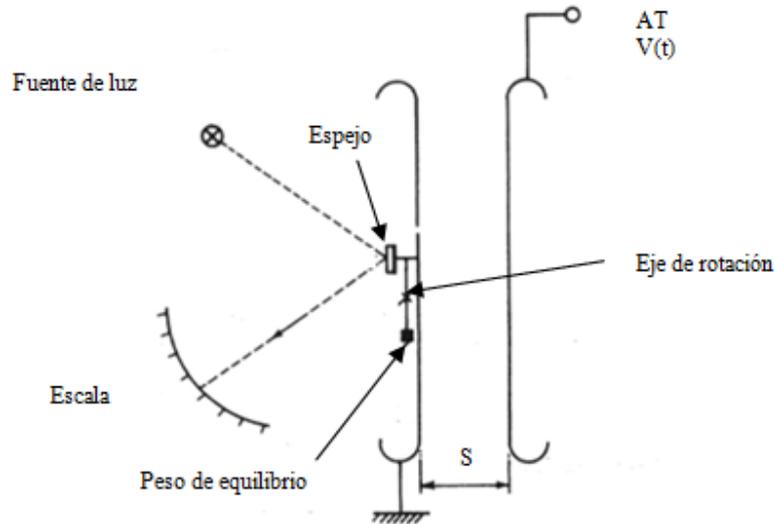


Fig. 1.9. Esquema de Voltímetro electrostático.

La fuerza de atracción  $F(t)$  creada por la tensión aplicada hace que la parte móvil a la que está unido un espejo asuma una posición en la que tiene lugar un equilibrio de fuerzas. Por lo tanto, un haz de luz incidente se reflejará hacia una escala calibrada para leer la magnitud de tensión aplicada.

Suponiendo que la capacitancia entre las placas sea  $C$ , la energía electrostática  $W$  almacenada en el sistema será  $W(t) = (1/2) \cdot C \cdot V^2(t)$ . Una variación  $dW(t)$  en la energía se convertirá en trabajo mecánico. Por lo tanto:

$$dW(t) = -F(t) dS \quad (1.7)$$

En la que  $dS$  representa la variación en  $S$ , la separación entre los platos. La fuerza de atracción es una función tal que:

$$|F(t)| = \frac{dW(t)}{dS} = \frac{1}{2} V^2(t) \frac{dC}{dS} \quad (1.8)$$

Cuyo valor medio es igual a:

$$\bar{F} = \frac{1}{2} \frac{dC}{dS} \left[ \frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt \right] \quad (1.9)$$

Donde  $T$  es el periodo de variación existente. La ecuación anterior relaciona la fuerza con el valor rms de la tensión aplicada  $V$ :

$$\bar{F} = \frac{1}{2} \frac{dC}{dS} V^2 \quad (1.10)$$

En general para el tipo de disco atraído del voltímetro electrostático, el factor  $\frac{dC}{dS}$  puede ser calculado a partir de que  $C = A\epsilon_0/S$ , donde  $A$  es el área del plato y  $\epsilon_0$  la permitividad del espacio libre. Resultando:

$$|\bar{F}(t)| = \frac{A\epsilon_0}{2S^2} V_{rms}^2 \quad (1.11)$$

De esta manera se obtienen valores rms por medio de voltímetros electrostáticos.

Habrà una leve variación del campo eléctrico causada por el movimiento de los electrodos en la mayoría de los instrumentos debido a su diseño. Para el caso de que se reduzca al mínimo o impida el movimiento del electrodo, y se calcule la distribución del campo, el dispositivo de medición electrostático se puede utilizar para mediciones absolutas de tensión.

Su aplicación en AT es muy limitada, en CC compiten con el divisor de tensión resistivo, debido a que no es necesario el uso de impedancias muy altas a la entrada. En CA, se puede utilizar un divisor de

tensión capacitivo junto con instrumentos electrónicos de baja tensión, que presentan bajas incertidumbres. Aunque presentan ventajas tales como un extremado bajo efecto de carga, ya que solo se deben formar los campos eléctricos; además proporciona una elevada resistividad al aire atmosférico, al gas a alta presión o incluso a altas presiones de vacío entre los electrodos; por lo que se minimizan las pérdidas de potencia activa producida por las resistencias de materiales aislantes utilizados en otras partes del equipo.

Estos dispositivos actúan por la acción de la tensión que se les aplica y no por la corriente. Su exactitud no es muy elevada (clase 0,5) y no influye la forma ni la frecuencia de la onda de tensión.

Puede soportar grandes cargas y no se ven afectadas por los campos magnéticos, pero si los eléctricos.

### 1.3.5- Pico Voltímetro

En algunas situaciones solo es necesario conocer el valor pico de una onda de CA, y si la misma no es senoidal, el valor rms de la tensión multiplicada por  $\sqrt{2}$  no es correcto.

El circuito de medición de un voltímetro pico se aprecia en la Fig. 1.10 y está formado por dos diodos, un capacitor y un miliamperímetro que puede ser recalibrado para valores pico.

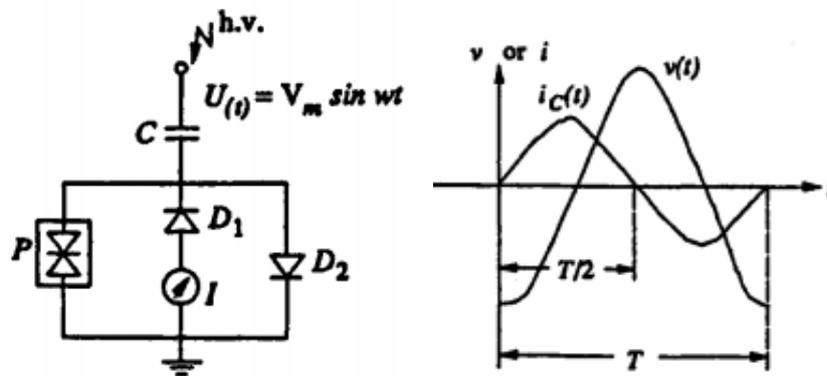


Fig. 1.10. Voltímetro de pico con capacitor serie.

- $C$ : Capacitor
- $D_1, D_2$ : Diodos
- $P$ : dispositivo de protección
- $I$ : Indicador de medición de corriente rectificadas
- $v(t)$ : forma de onda de la tensión
- $i_C(t)$ : forma de onda de la corriente del capacitor
- $T$ : periodo

El valor medio de la corriente rectificadas indicada por el instrumento es:

$$I = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i_1(t) dt = \frac{C}{T} \int_{-v}^{+v} dv = \frac{C}{T} \left[ V \left( \frac{T}{2} \right) - V(0) \right] \quad (1.12)$$

Y si la tensión es simétrica alrededor de 0 y su valor pico es  $V$ , entonces:

$$\bar{I} = 2fCV \quad V = \frac{\bar{I}}{2fC}$$

La forma de onda de la corriente deberá ser monitorizada con osciloscopio para determinar si hay más de una variación de signo en un semiciclo.

Este método es conocido como el método Chubb-Fortescue para la medición de tensiones pico. En este, un diodo  $D_1$  es utilizado para rectificar la CA en un medio ciclo mientras  $D_2$  pasa por el otro medio ciclo. Esta disposición es valida para medios ciclos positivos o negativos simétricos e iguales. Resultando inapropiado para tensiones no senoidales con más de un valor pico como se observa en la Fig. 1.11:

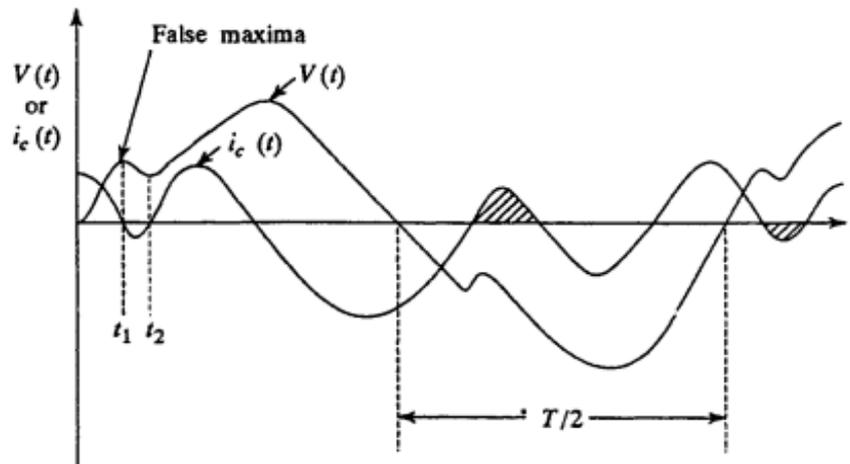


Fig. 1.11. Forma de onda de la tensión con armónicos.

Las áreas sombreadas de la figura dan la corriente inversa en cualquiera de los semiciclos y la corriente dentro de ese periodo resta de la corriente neta. Por lo tanto, la lectura del medidor será menor y no será proporcional a  $V_m$ , ya que la corriente que fluye durante los intervalos  $(t_1 - t_2)$ , etc. no será incluida en el valor medio.

Las diferentes fuentes que contribuyen al error son:

- El valor efectivo de la capacitancia es diferente del valor medido de C.
- Rectificadores imperfectos que permiten pequeñas corrientes inversas.
- Formas de onda de tensión no sinusoidales con más de un pico o máximos por medio ciclo.
- Desviación de la frecuencia de la del valor utilizado para la calibración.

Por lo que el error en la medición de la tensión es una función de errores de la corriente, la frecuencia y la capacitancia.

$$dV = di + df + dC \quad (1.13)$$

El voltímetro pico puede ser de tipo analógico o digital.

### 1.3.6- Miliamperímetro con Impedancia serie

Se puede utilizar una impedancia en serie con un microamperímetro o un miliamperímetro para la medición de altas tensiones. Despreciando la impedancia del instrumento, la corriente a través del instrumento será proporcional a la tensión aplicada.

Evidentemente, si la impedancia es una resistencia, la corriente está en fase con la tensión y representa fielmente la tensión. El instrumento puede ser sustituido por un osciloscopio si la forma de onda de la tensión debe ser registrada.

Se pueden usar resistencias de alambre o de película delgada. Las resistencias bobinadas son usualmente preferidas por su estabilidad superior en servicio y su coeficiente de temperatura extremadamente pequeña,  $\pm 0,01\%/K$ . La liberación de descarga corona y un enfriamiento mejorado puede lograrse sumergiendo la resistencia en aceite aislante.

Para grandes resistencias, la variación con la temperatura es un problema, y la inductancia térmica de la resistencia da lugar a una impedancia diferente.

Las unidades de alta resistencia para altas tensiones tienen capacitancias dispersas y, por lo tanto, la resistencia tendrá un circuito equivalente como se muestra en la Fig. 1.12. En cualquier frecuencia  $w$  de la tensión CA, la impedancia de la resistencia R es:

$$Z = \frac{R + jwL}{(1 - w^2LC) + jwCR} \quad (1.14)$$

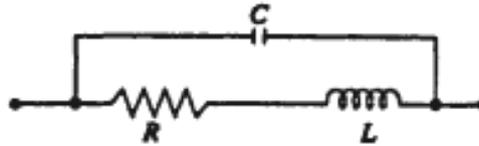


Fig. 1.12. Circuito equivalente de parámetros agrupados simplificados de alta resistencia óhmica  $R$ .  
 $L$ : inductancia residual y  $C$ : capacitancia residual.

Si  $\omega L$  y  $\omega C$  son pequeñas comparadas con  $R$ :

$$Z = R \left[ 1 + j \left( \frac{\omega L}{R} - \omega C R \right) \right] \quad (1.15)$$

Y el ángulo de fase es:

$$\varphi \approx \left( \frac{\omega L}{R} - \omega C R \right) \quad (1.16)$$

El cual puede ser llevado a cero e independiente de la frecuencia si  $L/C = R^2$ .

El circuito equivalente de una resistencia de alta tensión que desprecia la inductancia y el circuito de un resistor en serie compensado usando resistencias de protección y temporización se muestran en las Figs. 1.13 a) y b), respectivamente.

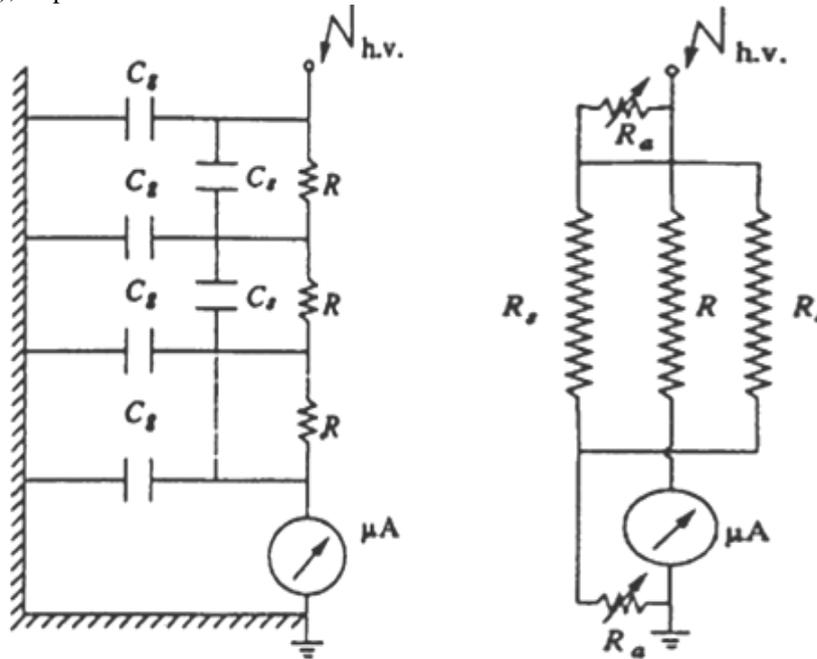


Fig. 1.13. Resistencia serie extendida para tenciones CA de AT  
 a) Resistencia serie extendida con inductancia despreciada. b) Resistencia serie con resistencias de ajuste y guarda  
 $C_g$ : capacitancia de perdida a tierra;  $C_s$ : capacitancia del bobinado;  $R$ : resistor serie;  $R_g$ : resistor de guarda;  $R_a$ : Resistencia de ajuste.

Los efectos de capacitancia a tierra se pueden eliminar protegiendo la resistencia  $R$  por una segunda espiral circundante  $R_g$  que no contribuye a la corriente a través del instrumento.

## **II - Procedimientos para el uso y calificación de los sistemas de medición**

### **2.1- Generalidades**

#### **2.1.1- Principios generales**

Cada sistema de medición aprobado deberá ser sometido a pruebas iniciales, seguido de ensayos de caracterización y comprobación de características a lo largo de su vida útil.

Los ensayos iniciales consisten de ensayos tipo (realizado en un sistema o componente representativo, verificación de su calidad y estado ante condiciones normales y anormales, ensayo de tensión impulso de onda completa, por ejemplo; se trata en general de ensayos costosos) y pruebas de rutina (realizado sobre cada sistema o componente, verifico que cumple con las especificaciones de diseño).

Los ensayos de caracterización y de comprobación deben demostrar que los sistemas de medición pueden medir la tensión de prueba dentro de las incertidumbres dadas en las normas, y que la medición sea trazable a las normas nacionales e internacionales de medición. Siendo solamente aprobado el sistema para las condiciones de operación y asentadas en su registro de desempeño.

Un requisito importante para un dispositivo de conversión, un sistema de transmisión, y un instrumento de medición utilizado en un sistema de medición es la estabilidad dentro del rango especificado de las condiciones de operación, de manera que el factor de escala del sistema de medición permanezca constante durante largos periodos.

El factor de escala asignado es determinado en los ensayos de caracterización mediante calibración. El usuario deberá llevar a cabo ensayos dados en las normas para calificar su sistema de medición. Sucesivamente, cualquier usuario podrá optar por tener el ensayo de características hecho por un Instituto de Metrología Nacional o por un Laboratorio de Calibración acreditado para ello. En todos los casos, el usuario deberá incluir los datos de prueba en los registros de caracterización.

Cualquier calibración deberá ser conforme a las normas nacionales y/o internacionales. El usuario deberá asegurarse que cualquier calibración hecha sea realizada por personal competente utilizando un sistema de medición de referencia y procedimientos adecuados.

Las calibraciones realizadas por Institutos de Metrología Nacional, o por un laboratorio acreditado para las magnitudes a calibrar, son consideradas trazables a la norma nacional y/o internacional.

#### **2.1.2- Planificación de ensayos de caracterización y control de características**

Para mantener la calidad de un sistema de medición, su factor de escala asignado deberá ser determinado periódicamente, siendo recomendado que la prueba de caracterización se repita anualmente o como máximo en cinco años. Largos intervalos entre ensayos de caracterización logran aumentar el riesgo de una variación indetectable en el sistema de medición.

El ensayo de caracterización se realizará tras modificaciones en el sistema de medición si es necesario, y siempre que se utilice un circuito que esté más allá de los límites indicados en el registro de caracterización.

Cuando se requiera un ensayo de caracterización porque un control muestra que el factor de escala asignado ya no es válido, se deberá investigar la causa de este cambio antes de realizar el ensayo de caracterización.

Los controles de características deben ser realizados en intervalos basados en la estabilidad registrada del sistema de medición como se muestra en el registro de características.

El intervalo desde el último ensayo de caracterización o el último control de características no debe ser superior a un año. Siendo para los sistemas de medición nuevos o reparados, controles de menor intervalo para asegurar la estabilidad.

### 2.1.3- Requerimientos para los registros de característica

El resultado de todos los ensayos y controles, incluso las condiciones bajo las cuales el resultado fue obtenido, deberá estar establecido en los registros de características. El registro deberá identificar singularmente los componentes del sistema de medición y se diseñará de manera que las características del sistema de medición puedan ser trazadas en el tiempo.

El registro de características deberá disponer de:

- Descripción general del sistema de medición
- Resultados de ensayos tipo y de rutina del dispositivo de conversión, sistemas de transmisión e instrumentos de medición, y si se realiza en el sistema de medición.
- Resultados de los siguientes ensayos característicos en el sistema de medición.
- Resultados de los siguientes controles de características en el sistema de medición.

Como excepción los sistemas o componentes de medición fabricados antes de la fecha de publicación de la segunda edición CEI 60060-2 (1994), la evidencia requerida puede no estar disponible para algunas partes del tipo de ensayo tipo y de rutina. Los ensayos realizados en base a versiones anteriores son aceptables si el factor de escala se mantiene estable.

Los sistemas de medición aprobados que comprendan a varios equipos utilizados de forma intercambiable pueden ser cubiertos por un único registro de características. Cada dispositivo de conversión se cubrirá individualmente, pero los sistemas de transmisión e instrumentos de medición pueden ser cubiertos genéricamente.

### 2.1.4- Condiciones de operación

Un sistema de medida debe ser conectado directamente a los terminales del objeto de prueba o de una manera tal que la diferencia de tensión entre los terminales del objeto de prueba y las del sistema de medición sean despreciables. El acoplamiento parasito entre el circuito de prueba y el de medición debe ser minimizado.

La incertidumbre del sistema aprobado debe estar dentro de las especificaciones, en los rangos de las condiciones operativas y ambientales indicadas en el registro.

Se deberá especificar el tiempo de operación asignado para el sistema de medición de tensión alterna y continua, siendo el mínimo recomendado 1 hora.

Se especificará la velocidad máxima de aplicación de las tensiones de impulso, siendo el valor mínimo recomendado para la tasa máxima de aplicaciones de uno o dos impulsos / min y se especificará en función del tamaño del dispositivo de conversión.

También se indicará el rango de condiciones ambientales, en las que los componentes del sistema de medición cumplen los requisitos de esta norma.

### 2.1.5- Incertidumbre

Cuando se habla de la misma, hacemos referencia a una duda en un valor, lo que nos da idea de la calidad de una medición. Según la GUM, es un parámetro asociado al resultado de una medida que caracteriza la dispersión de los valores. La incertidumbre de toda medición realizada bajo las normas internacionales se evaluará en base a la guía ISO/IEC 98-3.

En general, el mensurando a considerar es el factor de escala del sistema de medición, aunque en algunos casos se deba considerar otros factores, por ejemplo, para el caso de los parámetros de tiempo de una tensión impulso y sus errores asociados.

Un divisor de tensión se caracteriza por la relación de tensión e incertidumbre para el rango de medición asignado. Un transformador es caracterizado por su error de relación, su desplazamiento de fase y su correspondiente incertidumbre.

La incertidumbre de medición se obtendrá por combinación de las incertidumbres tipo A (relacionada en la comparación en sí misma y suponiendo que las desviaciones de la media adoptan una distribución normal de Gauss; se basa en observaciones) y B (supone una distribución rectangular en general, se basa en distribuciones supuestas a priori.).

Durante el ensayo de tensión, por lo general se deben considerar magnitudes de influencia adicionales aparte de la incertidumbre de calibración del factor de escala indicado en el certificado de calibración, para obtener la incertidumbre de medición del valor de la tensión de prueba.

La incertidumbre se da como la incertidumbre expandida para una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95% que corresponde a un factor de cobertura  $k=2$  bajo el supuesto de una distribución normal.

### **2.1.6- Ensayos y requisitos de ensayo para un sistema de medición aprobado y sus componentes**

El factor de escala asignado del sistema de medición debe ser determinado por una calibración acorde a las especificaciones del ensayo de caracterización. El factor asignado es un único valor para el rango de medición asignado. De ser necesario, varios rangos de medición con diferentes factores de escala pueden ser definidos.

Para un sistema de medición de impulso, el ensayo de características también debe mostrar que su comportamiento dinámico es adecuado para la medición y que el nivel de interferencia es menor a los límites especificados.

Debido al gran tamaño de los equipos y las condiciones ambientales reales, la calibración se debe realizar preferiblemente en el sitio por comparación con un sistema de medición de referencia.

Los sistemas de medición de tamaño más pequeño o sus componentes pueden ser transportados a otro laboratorio para calibración en una disposición que simula las condiciones de funcionamiento, siempre que la prueba de interferencia, cuando se especifique, se realice en la instalación de prueba del usuario.

Si un dispositivo de conversión es sensible a los efectos de proximidad, se determinará el intervalo de holgura en el que el factor de escala asignado es válido e ingresará en el registro de características.

Se pueden asignar uno o más rangos de estos factores de escala respectivos.

El factor de escala asignado de un sistema de medición debe ser determinado en el rango de medición asignado, preferiblemente por comparación con un sistema de medición de referencia. Sin embargo, como los sistemas de medición de referencia no siempre están disponibles a altas tensiones, la comparación puede hacerse con tensiones tan bajas como 20% del rango de medición asignado.

Todo el equipamiento utilizado para obtener el factor de escala del sistema de medición debe tener calibraciones trazables a las normas nacionales y/o internacionales.

## **2.2- Calibración – Determinación del factor de escala**

### **2.2.1- Calibración de un sistema de medición por comparación con un sistema de medición de referencia (método preferido)**

El o los factores de escala son determinados por un completo sistema de medición por comparación con un sistema de medición de referencia.

La tensión de entrada usada para la calibración debería ser del mismo tipo, frecuencia o forma de onda que la tensión a medir. Si esta condición no es cumplida, la contribución a la incertidumbre de relación deberá ser estimada.

Para la comparación, un sistema de medición de referencia, trazable a un Instituto de Metrología Nacional, deberá ser conectado en paralelo con el sistema de medición a ser calibrado. Se debe tomar cuidados para evitar bucles de tierra entre el dispositivo de conversión y el instrumento de medición y simultáneamente se deben tomar lecturas de ambos sistemas. El valor de la magnitud de entrada obtenida para cada medición por el sistema de medición de referencia es dividida por la correspondiente lectura del instrumento en el sistema bajo ensayo para obtener un valor  $F_i$  de su factor de escala. El procedimiento es repetido  $n$  veces para obtener el valor medio  $F_g$  del factor de escala del sistema bajo ensayo a un nivel de tensión  $U_g$ .

$$F_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{i,g} \quad (2.1)$$

La desviación estándar relativa  $s_g$  de  $F_g$  esta dado por:

$$s_g = \frac{1}{F_g} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (F_{i,g} - F_g)^2} \quad (2.2)$$

Y la incertidumbre estándar relativa tipo A  $u_g$  del valor principal  $F_g$  es dado por:

$$u_g = \frac{s_g}{\sqrt{n}} \quad (2.3)$$

Usualmente son necesarias menos de diez lecturas independientes.

Para mediciones de tensiones continuas y alternas, lecturas independientes deben ser obtenidas ya sea por la aplicación de una tensión de prueba y toma de n lecturas o por la aplicación de la tensión de prueba n veces y tomar una lectura en cada ocasión. Para el caso de impulsos, son aplicados n impulsos.

Un sistema de medición con varios rangos de medición asignados (como por ejemplo un divisor de tensión con varios brazos de baja tensión) o diferentes sistemas de transmisión debe ser calibrado para cada rango o sistema de transmisión. Los sistemas de medición con atenuadores secundarios pueden ser calibrados en un solo ajuste, siempre que la carga a la salida del dispositivo de conversión se pueda demostrar que es constante para todos los ajustes para las otras pruebas.

El factor de escala debe ser determinado sobre el rango de medición asignado por alguno de los métodos a describir.

### 2.2.2- Comparación sobre todo el rango de medición asignado

Esta prueba incluye tanto la determinación del factor de escala asignado como la determinación de la linealidad. La determinación del factor de escala se realizará mediante comparación directa con un sistema de medición de referencia en los niveles mínimo y máximo del rango de medición asignado y en al menos tres niveles intermedios aproximadamente iguales (Fig. 2.1). El factor de escala asignado F se toma como el valor medio de todos los factores de escala  $F_g$  registrados en h niveles de tensión:

$$F = \frac{1}{h} \sum_{g=1}^h F_g \text{ para } h \geq 5 \quad (2.4)$$

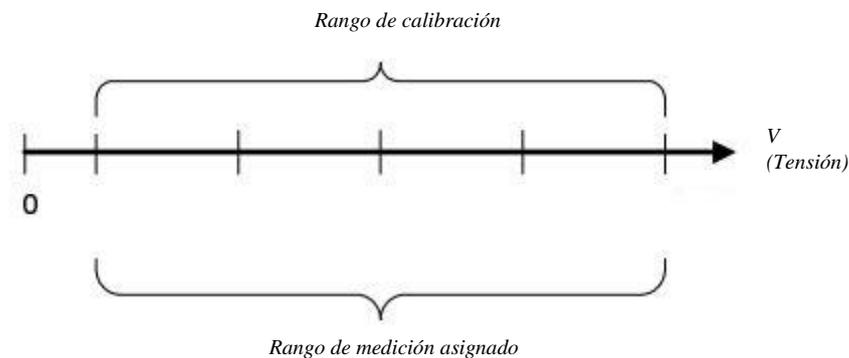


Fig. 2.1. Calibración por comparación en todo el rango de tensión

La incertidumbre estándar de la determinación del factor de escala asignado F se obtiene como la mayor de las incertidumbres estándar individuales de tipo A (Fig. 2.2):

$$u_A = \max_{g=1}^h u_g \quad (2.5)$$

El efecto de la no linealidad en F es estimado como una incertidumbre estándar tipo B expresada como:

$$u_{B0} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{g=1}^h \left| \frac{F_g}{F} - 1 \right| \quad (2.6)$$

Un valor redondeado  $F_0$  puede tomarse como el factor de escala asignado si la diferencia entre  $F_0$  y F se introduce como una contribución de incertidumbre de Tipo B en la estimación de la incertidumbre expandida del factor de escala  $F_0$ .

Los factores de escala individuales y sus incertidumbres a los niveles de tensión h deben figurar en el certificado de calibración.

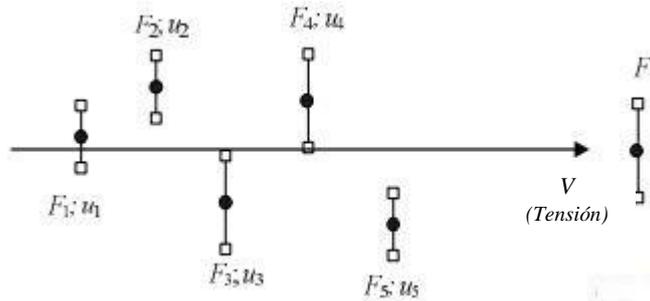


Fig. 2.2. Contribución a la incertidumbre de la calibración

$$u_{B0} = \max_{g=1}^5 \left| \frac{F_g}{F} - 1 \right| = \left| \frac{F_5}{F} - 1 \right|$$

$$u_A = \max_{g=1}^5 |u_g| = u_5$$

### 2.2.3- Comparación sobre el rango de tensión limitado

En casos donde el rango de medición asignado excede la capacidad del sistema de medición de referencia, el factor de escala debe ser determinado por comparación hasta la tensión máxima del sistema de medición de referencia. La comparación se realizará siempre a una tensión que no sea inferior al 20% del límite superior del rango de medición asignado (Fig. 2.3).

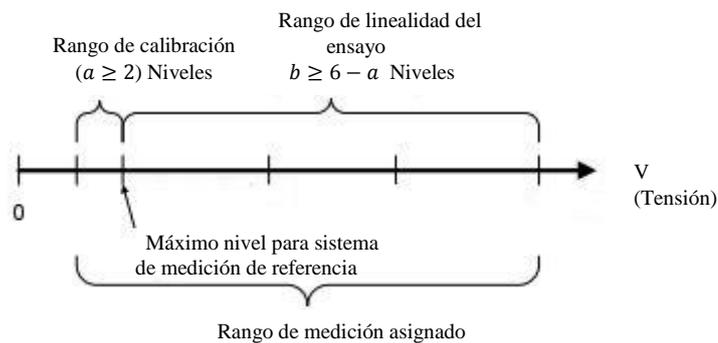


Fig. 2.3. Comparación sobre el rango de tensión.

La comparación será complementada por un ensayo de linealidad. El aporte a la incertidumbre respecto a la linealidad se considera en el cálculo de incertidumbres de medición cuando se utiliza el sistema de medición.

La comparación con el sistema de medición de referencia es llevada a cabo a  $a \geq 2$  niveles de tensión, donde el nivel de alta tensión es igual a la tensión máxima del sistema de medición de referencia.

Los niveles de tensión se elegirán además de manera que comprendan el nivel máximo de medición del sistema de referencia y el máximo nivel del rango de trabajo, respetándose, además:

$$a + b \geq 6 \quad (2.7)$$

El factor de escala asignado se adopta como valor medio del factor de escala registrado con el sistema de medición referencia.

$$F = \frac{1}{a} \sum_{g=1}^a F_g \quad (2.8)$$

La incertidumbre estándar tipo A del factor de escala  $F_m$  se obtiene como la mayor incertidumbre estándar individual  $u_g$ .

$$u_A = \max_{g=1}^a u_g \quad (2.9)$$

y la contribución de la no linealidad para los valores obtenidos en el sistema de referencia:

$$u_{B0} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max \left| \frac{F_g}{F} - 1 \right| \quad (2.10)$$

Un valor redondeado  $F_0$  puede tomarse como el factor de escala asignado si la diferencia entre  $F_0$  y  $F$  es introducida como una contribución a la incertidumbre tipo B en la estimación de la incertidumbre expandida del factor de escala  $F_0$ .

#### 2.2.4- Determinación del factor de escala de un sistema de medición a partir del factor de escala de sus componentes (Método alternativo)

El factor de escala asignado del sistema de medición se determinará como el producto de los factores de escala de su dispositivo de conversión, su sistema de transmisión, cualquier atenuador secundario, y su instrumento de medición.

Para el dispositivo de conversión y el sistema de transmisión o su combinación, el factor de escala se medirá por uno de los métodos indicados a continuación. No se requieren pruebas separadas para los sistemas de transmisión que consisten únicamente en cables. El factor de escala de un instrumento de medida se determina de acuerdo con la norma correspondiente (véase, por ejemplo, IEC 61083-1 y IEC 61083-2) o realizando una calibración y pruebas acordes.

Por alguno de los siguientes métodos es posible determinar el factor de escala de un componente:

- Comparación con un componente de referencia (el caso de un divisor de tensión comparado con un divisor de tensión de referencia) o el uso de un calibrador de baja tensión.
- Mediciones simultáneas de las magnitudes de entrada y salida.
- Un método de puente o una medición precisa de relación de baja tensión.
- Cálculo basado en impedancias medidas.

Para cada componente del sistema de medición las contribuciones a la incertidumbre tipo A y B del sistema de medición, deberán ser estimadas y la incertidumbre combinada para cada componente se determinará teniendo en cuenta las contribuciones a la incertidumbre de los dispositivos de medición utilizados.

La estimación de las contribuciones a la incertidumbre en el método de calibración de componentes requiere del análisis de cada componente en todo el rango de condiciones, que pueden influir en el resultado, como la tensión, temperatura, el efecto de proximidad, etc. Este análisis es complejo y requiere de una comprensión profunda del proceso de medición.

La incertidumbre expandida de la medición de tensión se obtiene combinando estas incertidumbres combinadas de los componentes de acuerdo con las disposiciones de la Guía ISO-CEI 98-3.

#### 2.2.5- Ensayo de linealidad

##### 2.2.5.1- Aplicación

El ensayo sólo tiene por objeto proporcionar una extensión de la validez del factor de escala de la tensión máxima a la que se ha efectuado una calibración, hasta el límite superior del rango de medición asignado.

La salida del sistema de medición debe ser comparada con un sistema o dispositivo que demuestre su linealidad o pueda presumirse su linealidad sobre el rango completo de tensión. El fracaso de demostrar la linealidad utilizando un método de este tipo no lleva a que el sistema sea no lineal. En este caso, se opta por otro método para el ensayo de linealidad. La relación de la lectura entre el sistema de medición y el dispositivo o sistema de comparación, debe ser establecida para  $b$  tensiones diferentes que van desde el límite superior del rango de medición asignado hasta una tensión en la que se ha determinado el factor de escala (Fig. 2.3).

La desviación máxima se toma como una estimación de tipo B de la incertidumbre estándar relacionada con la no linealidad del factor de escala en el rango de tensión extendido (Fig. 2.4):

$$U_{B1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{g=1}^b \left| \frac{Rg}{Rm} - 1 \right| \quad (2.11)$$

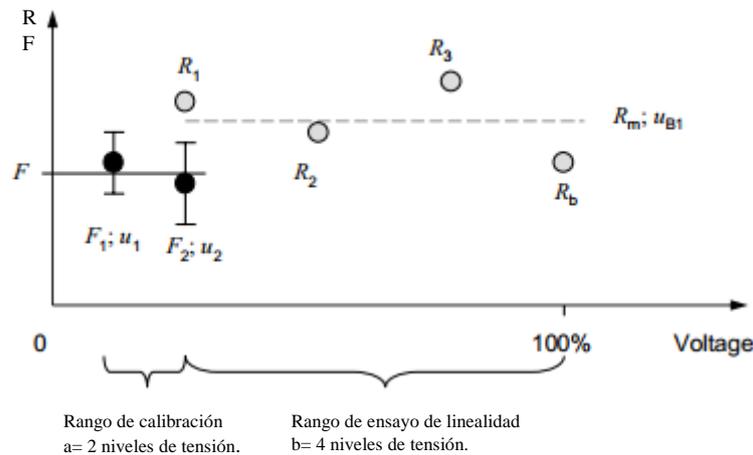


Fig. 2.4. Representación de la no linealidad del factor de escala.

#### 2.2.5.2- Método alternativo en orden de idoneidad

##### - Comparación con un sistema de medición aprobado

La salida del sistema de medición debe ser chequeada contra la salida de sistema aprobado acorde a los procedimientos anteriormente descritos. La linealidad del sistema de medición aprobado deberá preferiblemente haber sido establecido con el método de referencia durante las calibraciones indicadas anteriormente.

##### - Comparación con la tensión de entrada de un generador de alta tensión lineal

La salida del sistema de medición debe ser chequeada contra la tensión de entrada del generador de alta tensión considerando los niveles de tensión descritos (Ensayo de Linealidad).

El método es especialmente aplicable para la tensión de carga de los generadores de impulsos de múltiples etapas o en la entrada de tensión alterna de un generador de tensión continua multietapa.

Se deberá prestar atención a la igualdad de cargas de todas las etapas de un generador de tensión. Se permitirá un tiempo suficiente para todas las etapas, para cargar antes de hacer funcionar el generador.

##### - Comparación con la salida de un instrumento de medición de campo eléctrico (sondeo de campo)

El sistema de medición se puede comprobar contra un sistema de medición de respuesta de campo eléctrico que está situado de tal manera que mide un campo proporcional a la tensión que está siendo medida. El sistema de medición del campo eléctrico proporciona una respuesta adecuada para el tipo de tensión que se mide.

Este método es aplicable para tensiones alternas y de impulso.

##### - Comparación con un gap normalizado acorde a IEC 60052

El sistema de medición para tensiones alternas o de impulso atmosférico o de maniobra puede ser chequeada contra un espinterómetro. Para un sistema de medición para tensiones continuas una determinada separación entre vástago y vástago es necesaria aplicarse. En ambos casos la comparación se deberá realizar de acuerdo a la IEC60052.

El ensayo de linealidad completo se realizará en un tiempo suficientemente breve para que las condiciones atmosféricas no cambien y, por lo tanto, no sea necesario utilizar correcciones. De lo

contrario, las correcciones según la IEC 60060-1 se aplicarán en función de las condiciones atmosféricas registradas.

- *Método para dispositivos de conversión de múltiples secciones*

Para un dispositivo de conversión formado por varias unidades de alta tensión idénticas los siguientes ensayos deberán ser registrados:

- Un ensayo tipo en un dispositivo de conversión equivalente completo (equipado con sus electrodos) deberá ser llevado a cabo.
- Una medición de la capacidad y/o resistencia de cada unidad de alta tensión para cinco tensiones espaciadas igualmente se efectuará. El factor de escala se calculará para cada tensión a partir de los valores de capacitancia y/o resistencia.
- Una comprobación de que el dispositivo de conversión ensamblado no se ve afectado significativamente por influencias en el límite superior del rango de medición asignado.

### **2.2.6- Comportamiento dinámico**

La respuesta de un componente o sistema de medición debe ser determinada en condiciones representativas de su uso, en particular las distancias a estructuras conectadas a tierra y energizadas. Los métodos de medición preferidos son la respuesta de amplitud/frecuencia para tensiones continuas o alternas y la determinación de los factores de escala y los parámetros de tiempo en los límites superior e inferior del rango nominal para tensiones de impulso.

Una estimación tipo B de la incertidumbre estándar relacionada al comportamiento dinámico está dado por:

$$u_{B2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{i=1}^k \left| \frac{F_i}{F} - 1 \right| \quad (2.12)$$

Donde  $k$  es el número de factor de escala determinado para un rango de frecuencias, o dentro de un rango de parámetros de tiempo de impulso que definen el rango nominal,  $F_i$  son los factores de escala y  $F$  es el factor de escala medio dentro del rango nominal.

#### *2.2.6.1- Determinación de la respuesta en modulo/frecuencia*

El sistema o componente es sometido a una entrada senoidal de amplitud conocida, por lo general a baja tensión, y la salida es medida. La medición se repetirá para un rango apropiado de frecuencias y la desviación del factor será evaluada acorde a la formula anteriormente descrita.

#### *2.2.6.2- Método de referencia para sistemas de medición de tensión impulso*

Los registros de las tensiones impulso tomadas para calibración del factor de escala son utilizados para los límites del rango nominal, y la contribución a la incertidumbre de las mediciones de tensión y parámetros de tiempo serán también evaluados acorde a la formula anteriormente descrita.

### **2.2.7- Estabilidad a corto y largo plazo**

En corto plazo la tensión máxima del rango de medición asignado se aplicará al sistema de medición de forma continua (o a la velocidad asignada para los impulsos) durante un período adecuado al uso previsto. El factor de escala se medirá tan pronto como se alcance la tensión máxima y de nuevo inmediatamente antes de que se reduzca la tensión.

El ensayo de estabilidad de corto plazo cubre los efectos del propio calentamiento en el dispositivo de conversión.

No deberá ser mayor el periodo de aplicación de la tensión que el tiempo de operación asignado, aunque puede ser limitado un tiempo suficiente para alcanzar el equilibrio.

El resultado del ensayo es una estimación de la variación del factor de escala dentro del tiempo de aplicación de la tensión a partir del cual se obtiene la contribución a la incertidumbre estándar como una estimación tipo B.

$$u_{B3} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{F_{after}}{F_{before}} - 1 \right| \quad (2.13)$$

Donde  $F_{\text{before}}$  y  $F_{\text{after}}$  son los factores de escala antes y después de la prueba de estabilidad a corto plazo.

A largo plazo la estabilidad del factor de escala se considera y evalúa durante un largo periodo de tiempo y es usualmente estimado como una contribución a la incertidumbre válida para un tiempo proyectado de uso,  $T_{\text{use}}$  (generalmente hasta la siguiente calibración). La evaluación se basa en datos del fabricante o en resultados de una serie de ensayos de caracterización. El resultado de la evaluación es una estimación de un cambio del factor de escala. La evaluación proporciona una contribución de incertidumbre estándar, que es una estimación de tipo B:

$$u_{B4} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{F_2}{F_1} - 1 \right| \frac{T_{\text{use}}}{T_2 - T_1} \quad (2.14)$$

Donde  $F_1$  y  $F_2$  son los factores de escala de dos ensayos consecutivos de tiempos  $T_1$  y  $T_2$ .

Para los casos donde una serie de resultados de ensayos de caracterización son obtenidos, la estabilidad a largo plazo se caracteriza por una contribución tipo A:

$$u_{B4} = \frac{T_{\text{use}}}{T_{\text{mean}}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{F_i}{F_m} - 1 \right)^2}{n - 1}} \quad (2.15)$$

En la que el resultado de los ensayos de caracterización repetidos son los factores de escala  $F_i$ , con un valor medio  $F_m$  y un intervalo de tiempo de repetición  $T_{\text{mean}}$ .

La estabilidad a largo plazo se indica por lo general para un periodo de un año.

## **2.2.8- Efectos**

### *2.2.8.1- Efectos de la temperatura ambiente*

La temperatura ambiente puede afectar al factor de escala de un sistema de medición, lo cual puede ser cuantificado por la determinación del factor de escala a distintas temperaturas o a partir de cálculos en base a propiedades de los componentes, en la que los detalles son incluidos en los registros de características.

El resultado del cálculo o ensayo es una estimación de la variación del factor de escala debido a la temperatura ambiente. La incertidumbre estándar relativa se observa en la siguiente estimación tipo B:

$$u_{B5} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{F_T}{F} - 1 \right| \quad (2.16)$$

Donde  $F_T$  es el factor de escala a la temperatura considerada y  $F$  a la de temperatura de calibración.

Se deberá considerar que:

- En el caso de que la desviación de  $F_T$  y  $F$  sea mayor a 1% se recomienda una corrección del factor de escala.
- Efectos de calentamiento propio está cubierto por el ensayo de estabilidad a corto plazo.
- Un factor de corrección de temperatura para el factor de escala puede ser usado en casos donde la temperatura varié sobre un determinado rango. Para casos donde una corrección de temperatura ha sido aplicada, la incertidumbre  $u_{B5}$  del factor de corrección de temperatura puede ser tomada como una contribución a la incertidumbre.

### *2.2.8.2- Efectos de proximidad*

Variaciones del factor de escala de un parámetro de un dispositivo, debido a efectos de proximidad pueden ser determinadas por mediciones realizadas a diferentes distancias del dispositivo de puesta a tierra de las paredes o estructuras energizadas.

El resultado de la prueba es el cambio de factor de escala a partir del cual se calcula la contribución a

la incertidumbre estándar tipo B:

$$u_{B6} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{F_{max}}{F_{min}} - 1 \right| \quad (2.17)$$

En donde,  $F_{max}$  y  $F_{min}$  son los factores de escala para las distancias máximas y mínimas a otros objetos.

Pueden darse valores diferentes para  $u_{B6}$  para diferentes rangos de distancias.

Algunas instalaciones de prueba pueden optar por aprobar sus sistemas de medición para determinadas distancias, o para algunos rangos de las mismas.

### 2.2.8.3- Efecto de software

La forma en que el software se encarga de la evaluación de los datos medidos puede introducir una incertidumbre que se estima. Esto se puede hacer mediante la evaluación de un conjunto de datos de prueba con valores de referencia establecidos. Para las tensiones de impulso se deberá consultar la norma IEC 61083-2.

El resultado de la evaluación es una estimación de la influencia del procesamiento de datos, de la que la contribución a la incertidumbre estándar relativa  $u_{B7}$  se obtiene como una estimación de tipo B.

## 2.3- Cálculo de la incertidumbre del factor de escala

Un procedimiento simplificado para determinar la incertidumbre expandida del factor de escala  $F$  de un sistema de medición se basa en varios supuestos que por lo general pueden ser ciertos, pero que deben ser verificados en cada caso particular:

- No existe correlación entre las magnitudes de medición.
- La incertidumbre estándar evaluada por el método tipo B presenta una distribución rectangular.
- Las tres mayores contribuciones a la incertidumbre presentan una magnitud aproximadamente igual.

Estos supuestos conducen a un procedimiento de evaluación de la incertidumbre expandida del factor de escala  $F$ , tanto para la situación de calibración y para el uso de un sistema de medición aprobado en las mediciones.

La incertidumbre expandida de la calibración  $U_{cal}$  se estima a partir de la incertidumbre de la calibración del sistema de referencia y de la influencia de otros factores, tales como la estabilidad del sistema de medición de referencia y los parámetros ambientales durante la calibración.

La incertidumbre expandida de una medición  $U_M$  de la magnitud de ensayo se evalúa a partir de la incertidumbre de la calibración del factor de escala del sistema de medición aprobado y de la influencia de otros factores, como la estabilidad del sistema de medición y los parámetros ambientales durante la medición, ya que no son considerados en el certificado de calibración.

### 2.3.1- Incertidumbre de la calibración

La incertidumbre expandida de una calibración del factor de escala  $U_{cal}$  se calcula a partir de la incertidumbre del sistema de medición de referencia y las incertidumbres tipo A y B explicadas:

$$U_{cal} = k \cdot u_{cal} = 2 \sqrt{u_{ref}^2 + u_A^2 + \sum_{i=0}^N u_{Bi}^2} \quad (2.18)$$

En el que:

$$k = 2$$

Es el factor de cobertura para una probabilidad de cobertura de aproximadamente 95% y con distribución normal.

$U_{ref}$

Es la incertidumbre estándar combinada del factor de escala del sistema de medición de referencia en la calibración.

$U_A$

Es la incertidumbre estadística tipo A en la determinación del factor de escala.

$U_{B0}$

Es la contribución no lineal a la incertidumbre estándar determinada durante la calibración del factor de escala.

$U_{Bi}$

Son las contribuciones a la incertidumbre estándar combinada del factor de escala causada por la magnitud de influencia  $i^{th}$  y evaluada como una contribución tipo B. Esta contribución está relacionada al sistema de medición de referencia, y surgen de la no linealidad, términos de inestabilidad cortos y largos, entre otros, y son determinados ya sea por mediciones adicionales o fuentes de datos. Las influencias relacionadas al sistema de medición aprobado, tales como su corto término de estabilidad, y la resolución de la medición también deberán ser tomadas en cuenta si su valor es significativo para la calibración.

Si el factor de escala asignado del sistema de medición se calcula a partir de sus componentes, las incertidumbres estándar de la calibración de los componentes se combinarán con las que describan las condiciones adicionales del sistema de medición y su entorno.

### 2.3.2- Incertidumbre de medición utilizando un sistema de medición aprobado

La estimación de la incertidumbre expandida de la medición del valor de tensión de prueba es responsabilidad del usuario. Sin embargo, esta estimación puede ser dada para un rango definido de condiciones de medición junto con el certificado de calibración.

La incertidumbre expandida de la medición del valor de la tensión de prueba  $U_M$  se calcula a partir de la incertidumbre estándar combinada del factor de escala asignado determinado en la calibración del sistema de medición aprobado y las contribuciones adicionales de incertidumbre de Tipo B.

$$U_M = k \cdot u_M = 2 \sqrt{u_{cal}^2 + \sum_{i=0}^N u_{Bi}^2} \quad (2.19)$$

Donde:

$k = 2$

Es el factor de cobertura para una probabilidad de cobertura de aproximadamente 95% y con distribución normal.

$u_M$

Es la incertidumbre estándar combinada de la medición utilizando el sistema de medición aprobado, válido para un determinado tiempo de uso, como el intervalo de calibración.

$u_{cal}$

Es la incertidumbre estándar combinada del factor de escala del sistema de medición aprobado determinado en la calibración.

$u_{Bi}$

Es la contribución a la incertidumbre estándar combinada del factor de escala del sistema de medición aprobado y causada por la  $i^{th}$  magnitud de influencia, evaluada como una contribución tipo B. Estas contribuciones están relacionadas con el uso normal del sistema de medición aprobado y surgen de la no linealidad, inestabilidades a corto y largo plazo, etc. Y se determinan basándose en mediciones adicionales o estimadas a partir de otras fuentes de datos. También se tendrán en cuenta otras influencias significativas, como la resolución de la visualización del instrumento del sistema de medición aprobado.

El certificado de calibración puede incluir información sobre la incertidumbre de la calibración,  $U_{cal}$ , y la incertidumbre expandida de la medición del valor de tensión de prueba,  $U_M$ , cuando se utiliza el sistema de medición aprobado en condiciones predefinidas establecidas.

### 2.3.3- Cálculo de incertidumbre de la medición de parámetros de tiempo (solo impulsos de tensión)

Un sistema de medición aprobado para tensiones de impulso deberá ser capaz de medir los parámetros de tiempo ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_p$ ,  $T_c$ ) dentro de los límites de incertidumbre especificados cuando el parámetro se encuentre dentro de su rango especificado. Para el tiempo de frente este es el rango nominal. La prueba experimental puede ser dada por el método de comparación o por el método de componentes. La prueba también puede darse por cálculo, utilizando el método de convolución sobre la base de la respuesta escalonada experimental detallados en el anexo C y D de la norma IEC 60060-2, explicada más adelante.

El procedimiento general para evaluar los parámetros de tiempo y sus incertidumbres se describe para el tiempo inicial  $T_1$ , determinado por el método de comparación. Esto también es aplicable para otros parámetros de tiempo de la misma forma.

$$\Delta T_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{1X,i} - T_{1N,i}) \quad (2.20)$$

Y el desvío estándar experimental es:

$$s(\Delta T_1) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta T_{1,i} - \Delta T_1)^2} \quad (2.21)$$

Donde  $\Delta T_{1,i}$  es la  $i^{\text{mo}}$  diferencia del tiempo de frente medido por el sistema x y N.

Consideraciones:

- 1- Normalmente no se necesitan más de  $n = 10$  lecturas independientes.
- 2- En general, los tiempos de frente se evalúan a partir de los mismos registros de N y X, utilizados para evaluar los valores de pico para determinar el factor de escala.

A partir de  $s(\Delta T_1)$ , se calcula la incertidumbre estándar tipo A:

$$u_A = \frac{s(\Delta T_1)}{\sqrt{n}} \quad (2.22)$$

La comparación se realiza a un nivel de tensión adecuado utilizando al menos dos tiempos de frente, incluyendo los valores  $T_1$  mínimo y máximo del rango nominal, para los que se ha de aprobar el sistema de medición. El error medio  $\Delta T_{1j}$  se calcula como se ha descrito anteriormente. La media global de los errores medios  $m \geq 2$  es:

$$\Delta T_{1m} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \Delta T_{1,j} \quad (2.23)$$

La incertidumbre tipo B ( $u_B$ ) es:

$$u_B = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{j=1}^m |\Delta T_{1,j} - \Delta T_{1m}| \quad (2.24)$$

De manera más general, el sistema de medición de referencia N puede caracterizarse de la misma manera por su error medio del tiempo de frente, indicado por  $\Delta T_{1ref}$ , tal como se indica en su certificado de calibración para el rango nominal. El error resultante del propio sistema X calibrado para mediciones de tiempo de frente es:

$$\Delta T_{1cal} = \Delta T_{1m} + \Delta T_{1ref} \quad (2.25)$$

La incertidumbre expandida de la calibración del parámetro de tiempo es determinada por:

$$U_{cal} = k \cdot u_{cal} = 2 \sqrt{u_{ref}^2 + u_A^2 + u_B^2} \quad (2.26)$$

Donde:

$u_{cal}$

Es la incertidumbre estándar combinada del error medio de tiempo de frente,  $\Delta T_{1cal}$ , del sistema de medición calibrado.

$K = 2$

Es el factor de cobertura para una probabilidad de cobertura de 95% y distribución normal.

$u_{ref}$

Es la incertidumbre estándar combinada del error medio de tiempo de frente medio,  $\Delta T_{1ref}$ , del sistema de medición de referencia.

$u_A$

Es la incertidumbre estándar tipo A del error de tiempo de frente medio,  $\Delta T_{1m}$ , del sistema de medición calibrado.

$u_B$

Es la incertidumbre estándar tipo B del error de tiempo de frente medio,  $\Delta T_{1m}$  del sistema de medición calibrado.

Contribuciones adicionales a la incertidumbre expandida  $U_{cal}$  pueden ser importantes en casos especiales y se deberán considerar.

### 2.3.4- Incertidumbre de medición de parámetros temporales utilizando un sistema de medición aprobado

La estimación de la incertidumbre ampliada de una medición de parámetros de tiempo es responsabilidad del usuario. Sin embargo, esta estimación puede ser dada para un rango definido de condiciones de medición junto con el certificado de calibración.

Si la incertidumbre expandida de la calibración del parámetro de tiempo es inferior al 70% de la incertidumbre expandida especificada para la medición de parámetros de tiempo de la norma IEC 60060-2, se puede asumir en general que la incertidumbre de utilizar el sistema de medición aprobado para la medición de parámetros de tiempo  $U_M$  es igual a  $U_{cal}$ .

La incertidumbre ampliada de la medición de parámetros de tiempo  $U_M$  se calculará como

$$U_M = k \cdot u_M = 2 \sqrt{u_{cal}^2 + \sum_{i=1}^N u_{Bi}^2} \quad (2.27)$$

Donde:

$u_{cal}$

Es la incertidumbre estándar combinada del error medio de tiempo de frente,  $\Delta T_{1cal}$ , del sistema de medición ya calibrado.

$K = 2$

Es el factor de cobertura para una probabilidad de cobertura de 95% y distribución normal.

$u_{Bi}$

Es la contribución a la incertidumbre estándar combinada de los parámetros temporales de un impulso utilizando un sistema de medición aprobado y causada por la  $i^{th}$  magnitud de influencia y evaluada como una incertidumbre tipo B, que está relacionada a un uso normal del sistema de medición aprobado y surgen por ejemplo de inestabilidades de largo plazo, influencia de software, etc.

$u_M$

Es la incertidumbre estándar combinada de los parámetros temporales de la tensión de impulso medida con el sistema de medición aprobado, válido para un periodo proyectado de uso.

Contribuciones adicionales a la incertidumbre expandida  $U_{cal}$  pueden ser importantes en casos especiales y se deberán considerar para el cálculo de  $U_M$ , por ejemplo cuando la tensión impulso es superpuesta por oscilaciones frontales.

Cuando se utiliza el sistema de medición aprobado para medir tensiones de impulso sin oscilaciones, el

parámetro de tiempo medido  $T_{1meas}$  puede ser corregido por el error  $\Delta T_{1cal}$  del parámetro de tiempo relevante determinado en la calibración:

$$T_{1corr} = T_{1meas} - \Delta T_{1cal} \quad (2.28)$$

### **2.3.5- Ensayo de interferencia (sistema de transmisión e instrumentos para medición de tensiones impulso)**

El ensayo se debe llevar a cabo en el sistema de medición, con el cable o sistema de transmisión desconectado, situado en su posición frecuente y cortocircuitada en sus terminales de entrada sin cambiar las conexiones a tierra del cable o sistema de transmisión. En la entrada del sistema de medición se producirá un estado de interferencia por una descarga perturbadora con una tensión de impulso, su forma y el instante de una posible descarga durante el ensayo se registran; un instrumento registrará la salida<sup>2</sup>.

La relación de interferencia se determinará como la amplitud máxima de la interferencia medida dividida por la salida del sistema de medición al medir la tensión de prueba.

Para pasar la prueba de interferencia, la amplitud máxima de la interferencia medida deberá ser inferior al 1% de la salida del sistema de medición cuando se mide la tensión de prueba. Aunque una interferencia superior al 1% es permitida si se demuestra que no afecta a la medición.

### **2.3.6- Ensayo de tensión soportada por un dispositivo de conversión**

Un dispositivo de conversión deberá pasar una prueba de resistencia en seco realizado con una tensión de la frecuencia o forma requerida a una tensión determinada.

Se deberá considerar que:

- El nivel de prueba de resistencia recomendado es del 110% de la tensión nominal de funcionamiento. Para los procedimientos de prueba de resistencia se debe recurrir a la IEC 60060-1.
- El diseño y construcción de cualquier componente de un sistema de medición aprobado debe ser tal que pueda resistir una descarga disruptiva en el objeto de prueba sin ningún cambio en sus propiedades y características.

## **2.4- Incertidumbres de medición**

Se desarrollará un procedimiento simplificado para la evaluación de la incertidumbre de medición bajo condiciones usualmente aplicables y totalmente suficientes en mediciones de alta tensión.

En algunos casos, puede, sin embargo, ser necesario o deseable evaluar incertidumbres de una manera más compleja.

Cada medición de una cantidad es en algún punto imperfecta, y el resultado de la medición es solo una aproximación (“estimación”) del verdadero valor de la medición. La incertidumbre de la medición nos brinda información sobre la calidad de la medición. Permite al usuario comparar y ponderar los resultados de la medición, por ejemplo, obtenidas a partir de diferentes laboratorios, y proporciona información acerca de si un resultado de la medición está dentro de los límites especificados por la norma. Una Guía para la expresión de la incertidumbre de medición (GUM), publicada originalmente en 1993 por la Organización Internacional de Normalización (ISO), ahora existe como ISO / IEC 98-3: 2008 que es la norma internacionalmente aceptada para la estimación de la incertidumbre de la medición.

La guía ISO/IEC 98-3 proporciona reglas para evaluar y expresar incertidumbres en un amplio espectro de mediciones de distintos niveles. Es por lo tanto necesario extraer de la Guía 98-3 ISO / IEC un conjunto de reglas específicas que se ocupa del campo específico de medición de alta tensión y su nivel de precisión y complejidad.

En correspondencia con los principios básicos de la Guía ISO / IEC 98-3, las incertidumbres se

---

<sup>2</sup> Para la protección de la salida del dispositivo de conversión o divisor de tensión de las sobretensiones, es aconsejable cortocircuitar el terminal de salida del divisor.

agrupan en dos categorías de acuerdo con sus métodos de evaluación. Ambos métodos se basan en las distribuciones de probabilidad de las cantidades.

Dentro del alcance de esta norma, se requiere una incertidumbre expandida correspondiente a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%.

#### **2.4.1- Definiciones**

##### *Magnitud mensurable*

La Oficina Internacional de Pesas y Medidas por medio del VIM (Vocabulario Internacional de Metrología) define magnitud como una propiedad de un fenómeno, un cuerpo o sustancia que pueda ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente, pudiendo ser escalar como la masa, la temperatura, densidad o vectoriales como la velocidad, la fuerza o el campo eléctrico.

##### *Valor de una magnitud*

Cantidad de una magnitud particular, expresada generalmente como unidad de medida multiplicada por un número.

##### *Mensurando*

Magnitud específica sometida a medición.

##### *Varianza*

Elevación al cuadrado de la desviación de una variable aleatoria en función de la muestra.

##### *Correlación*

Relación entre dos o varias variables aleatorias dentro de una distribución de dos o más variables aleatorias.

##### *Probabilidad de cobertura*

Fracción, generalmente grande, de la distribución de valores que, como resultado de una medición razonablemente podría atribuirse a una magnitud.

##### *Función Modelo*

Cada medición puede ser descrita por una relación funcional.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_N) \quad (2.29)$$

En la que Y es la magnitud a medir, y  $X_i$  corresponde a las magnitudes de entrada numeradas de 1 a N. En la ISO/IEC GUÍA 98-3 la función modelo f comprende los valores medidos, magnitudes de influencia, correcciones, factores de corrección, constantes físicas y algún otra información que pueda contribuir significativamente al valor de Y y su incertidumbre correspondiente. Esta puede existir como una sola o múltiple expresión analítica o numérica, o una combinación de ambas. Por lo general las magnitudes de entrada  $X_i$  son variables aleatorias descritas por observaciones  $x_i$  (entradas estimadas) teniendo una distribución de probabilidad específica y asociada a una incertidumbre estándar  $u(x_i)$  de tipo A o B. La combinación de estos errores lleva a la incertidumbre estándar  $u(y)$  de la estimación del valor de salida y.

Cabe aclarar que la función modelo f expresada anteriormente es válida para los valores de entrada y salida,  $x_i$  e  $y_i$  respectivamente.

#### **2.4.2- Incertidumbre estándar Tipo A**

El método para este tipo de evaluación es aplicado para cantidades que varían aleatoriamente y para las cuales n observaciones independientes se han obtenido bajo las mismas condiciones de medición. En general, se asume una distribución de probabilidad normal a las n observaciones  $x_{ik}$ .

$X_i$  puede ser un factor de escala, una tensión de prueba o un parámetro temporal según las observaciones  $x_{ik}$ .

El valor aritmético medio  $\bar{x}_i$  de las observaciones  $x_{ik}$  es definido como:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \bar{x}_{ik} \quad (2.30)$$

Considerada como la mejor estimación de  $X_i$ . Su incertidumbre estándar Tipo A es igual a la desviación estándar experimental de la media:

$$u(\bar{x}_i) = s(\bar{x}_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (2.31)$$

En la que  $s(x)$  es la desviación estándar experimental (de los valores individuales).

$$S(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)^2} \quad (2.32)$$

Los valores cuadráticos de  $s^2(x_i)$  y  $s^2(\bar{x}_i)$  se denominan varianzas de la muestra y varianzas de la media, respectivamente. El número de observaciones debe ser  $n \geq 10$ , de lo contrario la fiabilidad de una evaluación tipo A de la incertidumbre estándar debe comprobarse por medio de los grados de libertad efectivos (según Cláusula A.8 de la norma IEC 60060-2).

### 2.4.3- Incertidumbre estándar de evaluación Tipo B

Este método se aplica a todos los casos distintos que el análisis estadístico de una serie de observaciones. La incertidumbre estándar Tipo B es evaluada por un criterio científico basada en toda la información disponible sobre la variabilidad posible de una cantidad de entrada  $x_i$ , tales como:

- Método de cantidades evaluadas.
- Incertidumbre de calibración del sistema de medición y sus componentes.
- No linealidad de instrumentos de medición y divisores.
- Comportamiento dinámico, como variación del factor de escala con la frecuencia u onda de impulso.
- Estabilidad a corto plazo, autocalentamiento.
- Estabilidad a largo plazo.
- Condiciones ambientales durante la medición.
- Efectos de proximidad de objetos cercanos.
- Efecto causado por software usado en instrumentos o en la evaluación de resultados.
- Resolución limitada de instrumentos digitales, lectura de instrumentos analógicos.

Información acerca de la cantidad y la incertidumbre pueden obtenerse de mediciones previas y actuales, certificados de calibración, normas, especificaciones del fabricante, o conocimiento de instrumentos o materiales relevantes. Entre los casos de evaluación Tipo B de incertidumbre pueden identificarse:

- Con frecuencia solo un valor de entrada  $x_i$  y su incertidumbre estándar  $u(x_i)$  es conocida, un único valor medido y, un valor de corrección o valor de referencia. Este valor y su incertidumbre se adoptan en la función modelo.
- La incertidumbre de un dispositivo es expresada como una incertidumbre estándar multiplicada por el factor de cobertura  $k$ , como la incertidumbre estándar expandida  $U$  de un voltímetro digital en un certificado de calibración

Cuando el voltímetro es usado en un complejo sistema de medición, este contribuye a la incertidumbre por:

$$u(x_i) = \frac{U}{k} \quad (2.33)$$

Donde  $k$  es el factor de cobertura. En lugar de expresar la incertidumbre expandida y el factor de cobertura, se puede encontrar un estado de nivel de confianza, como 68,3 %, 95,45 %, 99,7 %. En general, una distribución normal puede ser asumida y el estado sobre el nivel de confianza será

equivalente al factor de cobertura  $k = 1, 2$  o  $3$  respectivamente.

- Se estima que el valor  $x_i$  de una magnitud de entrada  $X_i$  se encuentra dentro del intervalo  $a_-$  a  $a_+$  con una distribución de probabilidad  $p(x_i)$ . Por lo general no existe un conocimiento específico de  $p(x_i)$  y se asume una distribución rectangular de los valores posibles. Entonces el valor esperado de  $X_i$  es el punto medio  $\bar{x}_i$  del intervalo:

$$\bar{x}_i = \frac{a_+ + a_-}{2}$$

Y la incertidumbre estándar asociada:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2.34)$$

Siendo:

$$a = \frac{a_+ - a_-}{2} \quad (2.35)$$

En algunos casos, otras distribuciones de probabilidades pueden ser más apropiadas, tales como la triangular, trapezoidal o la distribución normal<sup>3</sup>.

La guía ISO / IEC 98-3 establece que una incertidumbre de Tipo B no debe considerarse dos veces si el efecto particular ya ha contribuido a una incertidumbre de Tipo A. Además, la evaluación de la incertidumbre debe ser realista y basada en incertidumbres estándar, evitando el uso de factores personales o de cualquier otro tipo de seguridad para obtener incertidumbres mayores que las evaluadas de acuerdo con la GUÍA ISO / CEI 98-3.

Además, el conteo doble de las contribuciones de incertidumbre puede ocurrir cuando se usa un registrador digital para mediciones de impulso repetitivo, como cuando se calibra el factor de escala. La dispersión de los  $n$  valores de medición que producen una incertidumbre estándar Tipo A puede ser causada parcialmente por una resolución limitada del registrador y el ruido.

La evaluación de las incertidumbres de tipo B requiere un amplio conocimiento y experiencia de las relaciones físicas pertinentes, las magnitudes de influencia y las técnicas de medición. Dado que la evaluación en sí no es una ciencia exacta que conduce a una única solución, profesionales experimentados pueden juzgar el proceso de medición de una manera diferente y obtener diferentes valores de incertidumbre de Tipo B.

#### 2.4.4- Incertidumbre estándar combinada

Cada incertidumbre estándar  $u(x_i)$  de la estimación  $x_i$  de cada magnitud de entrada  $X_i$  evaluada por el método Tipo A o Tipo B contribuye a la incertidumbre estándar de la magnitud de salida por:

$$u_i(y) = c_i \cdot u(x_i) \quad (2.36)$$

Donde  $c_i$  es el coeficiente de sensibilidad. Describe cómo la estimación de salida y está influenciada por pequeñas variaciones de la estimación de entrada  $x_i$ . Se puede evaluar directamente como la derivada parcial de la función del modelo  $f$ .

$$c_i = \left. \frac{\partial f}{\partial X_i} \right|_{X_i=x_i} = \frac{\delta f}{\delta x_i} \quad (2.37)$$

O utilizando métodos numéricos y experimentales equivalentes. El signo de  $c_i$  puede ser positivo o negativo. En los casos en que las cantidades de entrada no estén correlacionadas, el signo no necesita ser considerado más, ya que sólo el valor cuadrático de las incertidumbres estándar se usa en los pasos siguientes.

Las  $N$  incertidumbres estándar  $u_i(y)$  definidas por la ecuación contribuyen a una incertidumbre

<sup>3</sup> La incertidumbre estándar es  $u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}}$  para la distribución triangular y  $u(x_i) = \sigma$  para la distribución normal

estándar combinada  $u_c(y)$  de la cantidad de salida de acuerdo con la “ley de propagación de la incertidumbre”.

$$u_c^2(y) = u_1^2(y) + u_2^2(y) + \dots + u_N^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (2.38)$$

Siendo:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2} \quad (2.39)$$

Si la magnitud de salida  $Y$  es un producto o cociente de las magnitudes de entrada  $X_i$ , se puede obtener una relación similar como se muestra en las ecuaciones (2.38) y (2.39) para las incertidumbres relativas  $u_c(y)/|y|$  y  $u(x_i)/|x_i|$ .

En el caso donde existe correlación, los términos lineales estarán presentes en la ley de propagación de la incertidumbre, y el signo de los coeficientes de sensibilidad será relevante. La correlación se produce cuando, por ejemplo, se utiliza el mismo instrumento para medir dos o más magnitudes de entrada. Para evitar un cálculo complicado, se elimina la correlación añadiendo magnitudes de entrada adicionales en la función  $f$  del modelo con correcciones e incertidumbres apropiadas. En algunos casos, la presencia de magnitudes de entrada correlacionadas puede incluso reducir la incertidumbre combinada. Por lo tanto, tener en cuenta la correlación es esencial para un análisis de incertidumbre para lograr una estimación más precisa de la incertidumbre.

#### 2.4.5- Incertidumbre expandida

En el campo de las mediciones de alta corriente y de alta tensión, como en la mayoría de las aplicaciones industriales, se necesita una declaración de incertidumbre correspondiente a una probabilidad de cobertura de aproximadamente  $p = 95\%$ . Esto se logra multiplicando la incertidumbre estándar combinada  $u_c(y)$  por un factor de cobertura  $k$ :

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (2.40)$$

En la que  $U$  es la incertidumbre expandida<sup>4</sup>. El factor de cobertura  $k = 2$  se utiliza en los casos en que una distribución normal se puede atribuir a  $y$  y  $u_c(y)$  tiene suficiente fiabilidad, es decir, los grados efectivos de libertad de  $u_c(y)$  son suficientemente grandes. De lo contrario, se debe determinar un valor de  $k > 2$  para obtener una  $p = 95\%$ .

Dado que las incertidumbres se definen como números positivos, el signo de  $U$  es siempre positivo. Para los casos en que  $U$  se utiliza en el significado de un intervalo de incertidumbre, se cita  $k$  como  $\pm U$ .

#### 2.4.6- Grados de libertad efectivo

La suposición de una distribución normal de la incertidumbre expandida es, en general, válido en casos donde varios ( $N \geq 3$ ) componentes de incertidumbre de valores comparables y distribución de probabilidad definida (Gaussiana, rectangular, entre otras) contribuyen a la incertidumbre estándar combinada y donde la incertidumbre tipo A se basa en  $n \geq 10$  observaciones repetidas. Correspondiendo:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (2.41)$$

Donde  $u_i(y)$  esta dada por (2.36) para  $i = 1, 2, \dots, N$  y  $v_i$  es el grado de libertad correspondiente. Los valores de confianza de  $v_i$  son:

$$v_i = n - 1$$

<sup>4</sup> En algunas normas antiguas se utiliza el término "incertidumbre general". En la mayoría de los casos, este término se interpreta como una incertidumbre expandida  $U$  con el factor de cobertura igual a 2.

Para una incertidumbre Tipo A basada en n observaciones independientes.

$$v_i \geq 50$$

Para una incertidumbre Tipo B tomada de certificados de calibración, y cuando la probabilidad de cobertura está fijada a no menos de 95%.

$$v_i = \infty$$

Para una incertidumbre Tipo B, asumiendo una distribución rectangular entre  $a_-$  y  $a_+$ .

Los grados de libertad efectivos pueden ser calculados por la ecuación (2.41) y el factor de seguridad puede tomarse de la Tabla 2.1 que está basada en una distribución-t evaluada a una probabilidad de cobertura de  $p = 95\%$ . Si  $v_{eff}$  no es un entero interpolado o truncado, al siguiente entero inferior.

$v_{eff}$	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	$\infty$
k	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2

Tabla 2.1. Factor de Cobertura k para  $v_{eff}$  grados efectivos de libertad.

La fórmula siguiente puede también ser usada para calcular k a partir de  $v_{eff}$ .

$$K = 1,96 + \frac{2,374}{v_{eff}} + \frac{2,818}{v_{eff}^2} + \frac{2,547}{v_{eff}^3}$$

#### 2.4.7- Incertidumbre estimada y declaración de los resultados de medición

El cálculo de incertidumbre de una medición es un análisis detallado de todas las fuentes y valores de incertidumbre según la función modelo  $f$ . Los datos pertinentes deben mantenerse para su inspección en forma de una tabla en la que la última línea indique los valores del resultado de medición  $y$ , la incertidumbre combinada  $u_c(y)$  y los grados de libertad efectivos  $v_{eff}$ .

En los certificados de calibración y prueba, la medida  $Y$  se expresará como  $y \pm U$  para una probabilidad de cobertura (o nivel de confianza) de aproximadamente  $p = 95\%$ . El valor numérico de la incertidumbre expandida  $U$  se redondeará para dar no más de dos cifras significativas. Si el redondeo hacia abajo reduce el valor en más de  $0,05 U$ , se utilizará el valor redondeado para arriba.

El valor numérico de  $y$  se redondeará a la cifra menos significativa que podría verse afectada por la incertidumbre expandida.

A modo de ejemplo, se indica el resultado de una medición de tensión:

$$\begin{aligned} &(227,2 \pm 2,4) \text{ kV,} \\ &227,2 \times (1 \pm 0,011) \text{ kV,} \\ &227,2 \times (1 \pm 1,1 \cdot 10^{-2}) \text{ kV} \end{aligned}$$

Deberá agregarse una nota explicativa informando sobre la probabilidad de cobertura  $p$  y el factor de cobertura  $k$ .

Se recomienda la siguiente redacción como ejemplo:

*“La incertidumbre expandida obtenida de la medición, se establece como la incertidumbre de medición multiplicada por el factor de cobertura  $k = 2$  que para una distribución normal (distribución t con  $v_{eff}$  grados de libertad efectivos) corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%. La incertidumbre estándar de medición se ha determinado de acuerdo con IEC 60060-2.”*

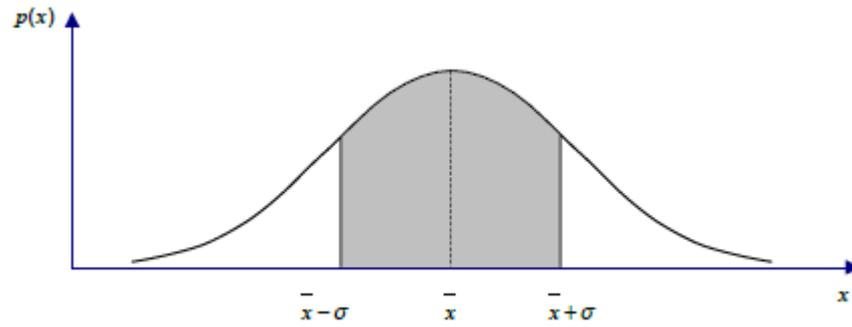


Fig. 2.5 (a). Distribución de probabilidad normal  $p(x)$

El área sombreada indica la incertidumbre estándar arriba y debajo de  $\bar{x}_{ii}$ .

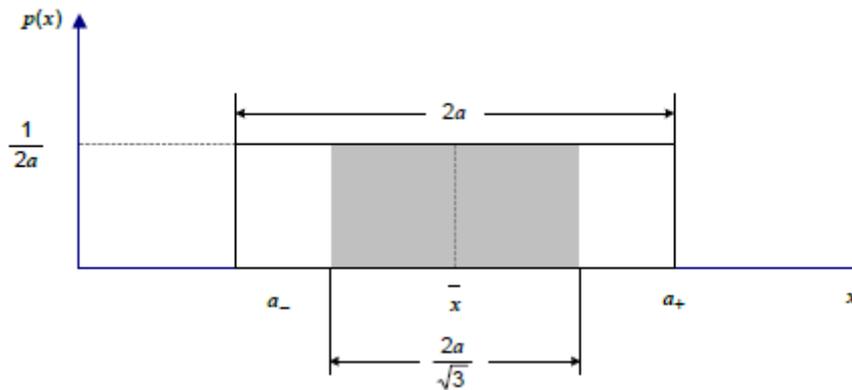


Fig. 2.5 (b). Distribución de probabilidad rectangular  $p(x)$

### III - Divisores de tensión y sus características en alta frecuencia

#### 3.1- Introducción

La necesidad para determinar las tensiones que varían rápidamente no solo en pruebas de equipos de alta tensión para sistemas de potencia es interesante, sino también en la investigación de problemas físicos, debiendo tomar la precaución de no distorsionar la forma de onda ni de exceder los límites del sistema de medición.

Además del divisor las conexiones de los cables pueden ser también la causa de errores. Por lo tanto, para determinar la exactitud, el sistema completo debe ser considerado.

En alta frecuencia la inductancia residual del cable y la capacidad de pérdida a tierra se vuelven significantes. Además, una resistencia por la humedad variable no deseada es frecuente en partes de los cables, de manera que las corrientes fluyen al divisor de tensión produciendo una caída de tensión a través de la impedancia del cable. En consecuencia la tensión  $v_1(t)$  en el objeto de prueba no será necesariamente idéntica a la de los terminales del divisor.

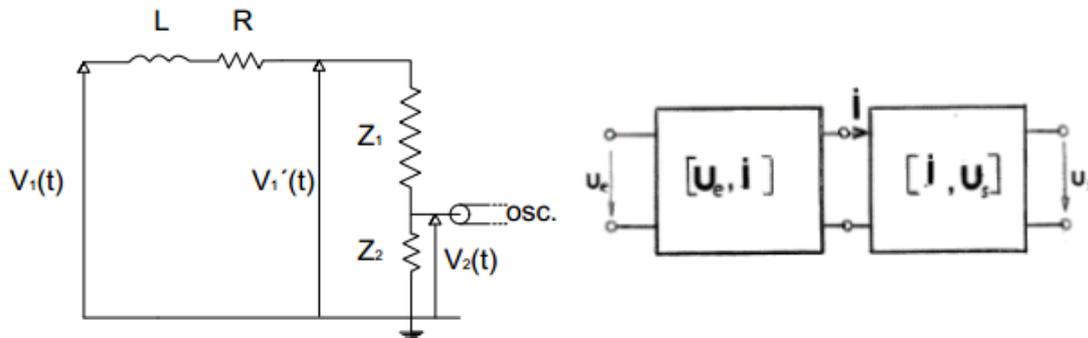


Fig. 3.1. Divisor de Tensión incluyendo cable de conexión y su correspondiente cuadripolo.  
L inductancia del cable de conexión, R resistencia de amortiguación,  $Z_1$  y  $Z_2$  brazos de alta y baja tensión.

Para una mayor velocidad en las señales de subida, las conexiones entre el circuito de ensayo y el divisor deben ser considerados como una línea de transmisión con parámetros distribuidos, cuyo tiempo de retraso posee una fuerte influencia en el tiempo de respuesta total del sistema.

Para minimizar la influencia de los cables de alta tensión y tierra en el desempeño del circuito, los mismos deben ser minimizados al máximo.

Para las consideraciones siguientes nosotros asumimos al divisor de tensión y sus cables como dos puertos, mientras la tensión de entrada  $v_1(t)$  esta entre la alta tensión y los terminales de tierra, la tensión de salida  $v_2(t)$  se encuentra a través del brazo de baja tensión del divisor (Fig. 3.1).

#### 3.2- Características en alta frecuencia

##### 3.2.1- Determinación de las características en alta frecuencia por medición de la respuesta en estado estable

Mediciones en estado estable son frecuentemente utilizadas para comprobar la respuesta de la tensión de salida  $v_2(t)$ . Para una tensión de entrada senoidal  $v_1(t)$ , la magnitud y ángulo de fase de la tensión de salida  $v_2(t)$  son determinados después de que los transitorios de conmutación desaparecen.

$$\left. \begin{aligned} v_1(t) &= V_{m_1} \sin(\omega t + \phi_1) \\ v_2(t) &= V_{m_2} \sin(\omega t + \phi_2) \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

La relación de la amplitud compleja de la tensión de salida  $V_{m_2}$  a la de la tensión de entrada  $V_{m_1}$  es la función del sistema o función de respuesta de red:

$$G(j\omega) = \frac{V_2}{V_1} = |G(j\omega)| \cdot e^{j(\phi_2 - \phi_1)} \quad (3.2)$$

Su magnitud  $|G(j\omega)| = G(\omega)$  y ángulo de fase  $\phi(\omega) = \phi_2(\omega) - \phi_1(\omega) = \arg G(j\omega)$  representan la respuesta en amplitud y fase del sistema.

La función del sistema describe una tensión de salida del sistema para cualquier tensión excitación senoidal estable de entrada. Para entradas no senoidales, la tensión de salida se puede determinar por análisis de Fourier; la transformada de Fourier de la tensión de entrada  $v_1(t)$  es:

$$\mathcal{F}_1(j\omega) = \int_{\tau=-\infty}^{\infty} v_1(\tau) \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (3.3)$$

Y si se lo multiplica por la función del sistema  $G(j\omega)$ :

$$\mathcal{F}_2(j\omega) = G(j\omega) \cdot \mathcal{F}_1(j\omega)$$

Obteniéndose la respuesta en el dominio del tiempo por la transformada de Fourier inversa:

$$v_2(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega=-\infty}^{\infty} \mathcal{F}_2(j\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega=-\infty}^{\infty} G(j\omega) \cdot \mathcal{F}_1(j\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega$$

Que es evaluada en forma de integral real por:

$$v_2(t) = \int_0^{\infty} G(\omega) \cdot F_1(\omega) \cdot \cos[\omega t + \phi_2(\omega) - \phi_1(\omega)] d\omega \quad (3.4)$$

Para grandes diferencias de amplitud entre la tensión de entrada y de salida se complica la evaluación de la respuesta de fase. Sin embargo, esta medición es en general innecesaria en la mayoría de los circuitos de divisores resistivos, que son sistemas de variación de fase mínima.

En la práctica, la respuesta de fase se puede determinar gráfica y analíticamente a partir de la respuesta en modulo por medio de diagrama de Bode, método valido para circuitos de variación de fase mínima.

Para trabajar con frecuencia compleja, donde  $p = \sigma + j\omega$ , la función del sistema generalizado o función transferencia será  $G(p) = \frac{V_2(p)}{V_1(p)}$ , donde  $G(p)$  es una función racional con coeficientes reales.

$$G(p) = \frac{N(p)}{D(p)} \quad (3.5)$$

Esta función describe un sistema compuesto de agrupaciones, componentes lineales, siempre que se cumplan las siguientes tres condiciones: el denominador  $D(p)$  es un polinomio de Hurwitz<sup>5</sup>; el grado del numerador  $N(p)$  es igual o menor que el del denominador  $D(p)$ ; y los ceros del numerador  $N(p)$  están en el semiplano izquierdo de  $p$  o en su límite, es decir en el eje  $j\omega$ .

Los circuitos divisores de tensión son usualmente sistemas planos con propiedades de cambio de fase mínima inherentes.

Investigaciones acerca de propiedades en alta frecuencia de los divisores de tensión por medio de mediciones de respuesta en frecuencia proveen buena información acerca de los comportamientos físicos del dispositivo de medición. Sin embargo, para usos prácticos el método de la respuesta escalón es preferido por ser simple y rápido.

### 3.2.2- Determinación de características en alta frecuencia por medición de la Respuesta Escalón

Ante tensiones impulso el divisor de tensión deberá tener una buena fidelidad de impulso y tanto el

---

<sup>5</sup> Polinomio cuyas raíces (ceros) están localizados en el semiplano izquierdo del plano complejo, o en el eje imaginario, esto quiere decir que la parte real de cada raíz es cero o negativa. Siendo además real si  $p$  es real.

divisor como los cables de conexión deben ser considerados.

En lugar de explorar las características de frecuencia de un divisor, es más común examinar su respuesta a una tensión escalón aplicada en sus terminales de alta tensión.

Una forma de onda de tensión de entrada generada por una variación de la magnitud de la tensión de CC a  $t = 0$  se describe por:

$$v_1(t) = V_0 \cdot u_{-1}(t), \quad u_{-1}(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

Es la función escalón unitaria. Cuando es aplicada a un sistema, esta tensión de entrada produce una tensión de respuesta, de salida  $v_2(t)$ . Normalizada por  $V_0$ :

$$v_2(t) = V_0 \frac{v_2(t)}{V_0} = V_0 \cdot w(t)$$

La función adimensional:

$$w(t) = \frac{v_2(t)}{V_0} \quad (3.7)$$

Es independiente de la amplitud de la tensión de entrada y es conocido como la respuesta escalón del sistema. Para evaluar las características en alta frecuencia de los divisores de tensión, es conveniente una normalización adicional con la relación  $a_0 = V_0/V_2$ .

$$h(t) = w(t) \cdot a_0 = \frac{v_2(t) \cdot a_0}{V_0} \quad (3.8)$$

La función transferencia  $G(p)$  (siendo la transformada de Laplace de la función escalón igual a  $1/p$ ) y  $w(t)$ , están relacionados por:

$$G(p) = p \cdot \mathcal{L}\{w(t)\}$$

$$G(p) = w(+0) + \int_0^{\infty} w'(t) \cdot e^{-pt} dt = w(+0) + \mathcal{L}\{w'(t)\} \quad (3.9)$$

Si  $w(t)$  es de simple forma analítica, la transformada de Laplace se puede utilizar para calcular la tensión de salida del divisor para cualquier tensión de entrada  $v_1(t)$  que puede ser expresada analíticamente. Utilizando la transformada de Laplace de la tensión de entrada  $V_1(p)$  y la respuesta escalón  $W(p)$ , la tensión de salida en el dominio de la frecuencia puede ser calculada por la relación de ambas:

$$V_2(p) = V_1(p) \cdot W(p) \cdot p \quad (3.10)$$

La tensión de salida en el dominio del tiempo se obtiene por la transformada inversa de Laplace:

$$v_2(t) = \mathcal{L}^{-1}\{V_2(p)\}$$

Generalmente,  $w(t)$  no es encontrada en forma analítica si no a partir de mediciones experimentales empleando osciloscopios de rayos catódicos. La respuesta de la tensión de salida para una señal de entrada se calcula por el teorema de la Superposición.

$$V_2(t) = w(+0) \cdot v_1(t) + \int_0^t v_1(\tau) \cdot w'(t - \tau) d\tau \quad (3.11)$$

Una medida razonable de la fidelidad de la respuesta es el área total encerrada entre las respuestas real e ideal (Fig. 3.2). Esta área tendrá las dimensiones de tiempo y se lo denomina como tiempo de respuesta del divisor.

Un criterio importante para la evaluación de la respuesta es que el tiempo de respuesta total debe ser lo más pequeño posible.

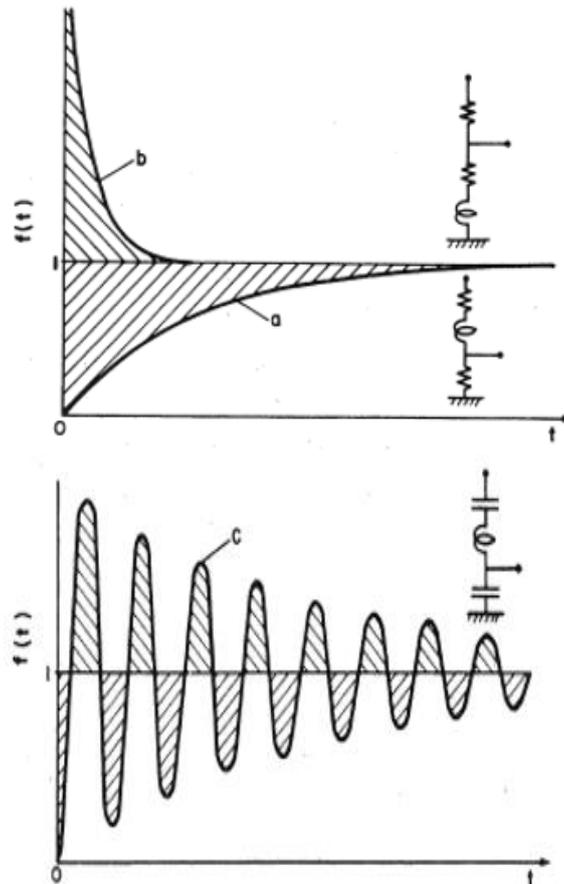


Fig. 3.2. Posibles respuestas de divisor de impulso: (a) para divisor resistivo con brazo de alta tensión inductivo; (b) para divisor de tensión con brazo de baja tensión inductivo; (c) para divisor capacitivo con brazo de alta tensión inductivo.

### 3.3- Fuentes de pulsos para Mediciones de Respuesta Escalón

Para medir la respuesta escalón de un sistema, se necesitan tensiones de prueba con formas de onda descritas por:

$$v_1(t) = V_0 \cdot u_{-1}(t) , \quad u_{-1}(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

Debido a que las regiones de baja frecuencia no presentan dificultades exceptuando divisores capacitivos, solo las características en alta tensión son de interés en los divisores de tensión.

La amplitud de los pulsos debe durar lo suficiente para que permita alcanzar un valor estacionario; este debe ser mayor que el tiempo de estabilización del sistema. Este último es definido como el tiempo necesario para que las oscilaciones parasitas de la respuesta disminuyan a menor valor.

Escalones de tensión que asciendan en tiempo cero no pueden ser realizados físicamente.

Sin embargo, pequeños tiempos de ascenso en comparación con lo esperado para el sistema bajo ensayo son suficientes. Aplicando un escalón de tensión con tiempos de ascenso  $T_{r1}$ , a un sistema con tiempo de ascenso  $T_{r2}$  y asumiendo determinadas condiciones detalladas más adelante, el tiempo de ascenso de la tensión de salida puede ser calculada como:

$$T_{r3} = \sqrt{T_{r1}^2 + T_{r2}^2} \quad (3.13)$$

Con una proporción de  $T_{r1}/T_{r2} = 1/5$ , el tiempo de subida medido difiere solo por 2% de la de una función de prueba con pendiente infinita.

La Fig. 3.3 muestra un circuito equivalente básico de un generador de pulso para pulsos de tensiones de aproximadamente  $10^{-9}$  segundos de tiempo de ascenso y 100 V de amplitud de señal.

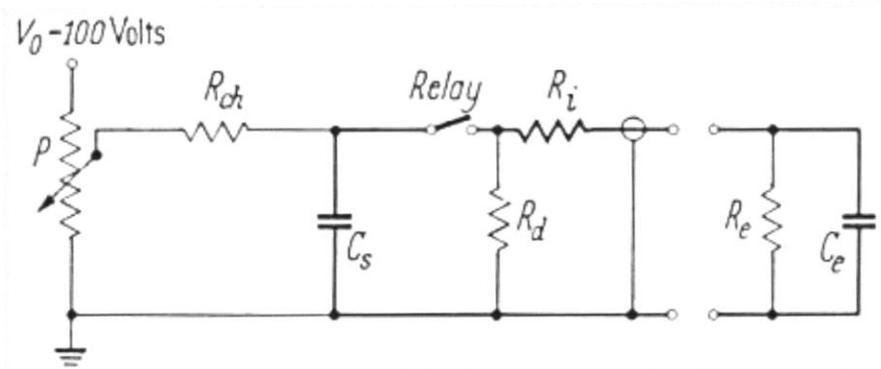


Fig. 3.3. Generador de impulsos que proporciona impulsos de prueba de 100 V con tiempos de ascenso  $T_r \leq 1 \text{ ns}$   
*P*: potenciómetro de altura de pulso,  $R_{ch}$ : resistor de carga,  $C_s$ : capacitor de almacenamiento,  $R_d$ : resistor de descarga,  $R_i$ : impedancia de la fuente,  $R_e$ ,  $C_e$ : impedancias de carga externa (divisor de tensión).

La conmutación del relé excitado periódicamente descarga el capacitor a través de la resistencia de fuente interna  $R_i$ , el resistor de  $R_d$ , y la impedancia de carga  $Z_e$ .

La carga usualmente consiste de una resistencia  $R_e$  en paralelo con una capacitancia  $C_e$ .

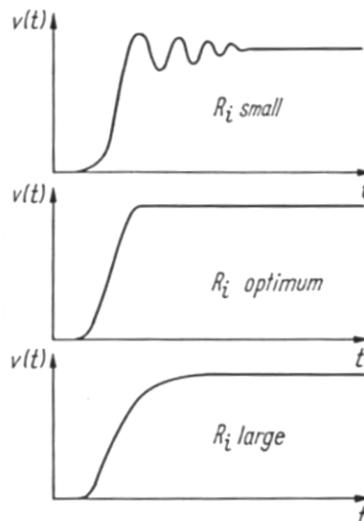


Fig. 3.4. Forma de la tensión de salida del generador de pulsos como función de la impedancia de carga.

En la Fig. 3.4 se puede observar la tensión de salida del generador de pulsos para diferentes impedancias de la fuente durante la carga capacitiva. Para el caso de una resistencia de la fuente muy pequeña, la tensión escalón será afectado por un ruido, mientras que para valores muy elevados se incrementará el tiempo de subida de la tensión de salida.

La evaluación del tiempo de subida de la función de prueba para pequeñas capacitancias puede ser obtenido a partir de  $R_i$  y  $C_e$ :

$$T_r = 2,2 \cdot R_i \cdot C_e \quad (3.14)$$

Además, se tiene el uso de un generador con un gap de aceite aislante (Fig. 3.5). En el que el gap de conmutación principal funciona como un trigatión (válvula de disparo empleada para potencias muy elevadas) en el que a un electrodo intermedio se le aplica un pulso que forma una chispa y forma una ionización entre el electrodo de disparo y el más próximo a presión atmosférica. Así aparece un camino de baja resistencia entre los dos electrodos principales, que produce una fuerte descarga entre ellos.

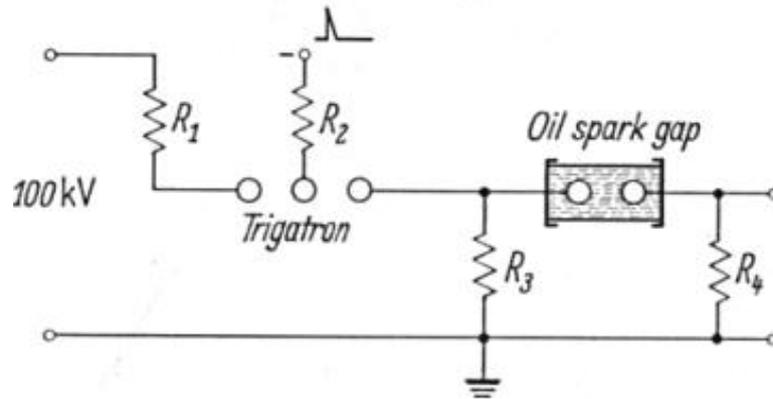


Fig. 3.5. Generador de pulsos de AT con gap de formación de pulsos.  
 $R_1$  y  $R_2$  resistores de amortiguación y limitadores de corriente,  $R_3$  y  $R_4$  resistencias temporizadas.

La ruptura del gap total es iniciada por la alimentación del electrodo intermedio con un impulso de disparo procedente de una fuente externa. El pulso resultante estresa el gap de aceite con altas sobretensiones, generando un escalón de tensión escarpado a través de  $R_4$  de unos 100 kV con 5 ns de tiempo de subida.

Otros generadores de pulso pueden ser contruidos con trigatrón de hidrogeno. Cambiando la frecuencia en el orden de 10 kHz y altas tensiones inversas, hacen su funcionamiento superior a los interruptores y relés de mercurio.

Para el desarrollo del trabajo se utilizará un generador de AT de tensión continua como el de la Fig. 3.6 para la caracterización de un divisor resistivo, cuyos detalles se verán más adelante:



Fig. 3.6. Circuito generador de tensión continua hasta 150 kV y divisor resistivo.

### 3.4- Sobretensiones transitorias de corta duración

En ellas el valor de cresta está muy por encima del valor nominal de diseño del equipo.

Entre las fuentes de sobretensiones transitorias están la caída de rayos: sobretensiones de frente rápido (o escarpado). Las maniobras en redes (por ejemplo, apertura/cierre de interruptores) generan sobretensiones de frente lento y también sobretensiones de frente muy rápido, como las maniobras en subestaciones tipo GIS (Gas Insulated System).

### 3.4.1- Definiciones generales

Las siguientes definiciones se aplican a los impulsos sin oscilaciones ni sobreimpulsos, o a la curva promedio trazada a través de las oscilaciones o del sobreimpulso:

#### *Impulso atmosférico completo*

Impulso atmosférico que no resulta interrumpido por una descarga disruptiva.

#### *Impulso atmosférico cortado*

Impulso atmosférico interrumpido por una descarga disruptiva que provoca una brusca caída de la tensión, hasta alcanzar un valor nulo. El corte se puede producir sobre el frente, sobre la cresta o sobre la cola de la onda de impulso.

El corte se puede provocar o puede producirse a consecuencia de una descarga disruptiva en la aislación interna o externa del objeto en ensayo.

#### *Valor de la tensión de ensayo*

Valor de cresta de un impulso atmosférico exento de oscilaciones.

Para otras formas de impulsos, las normas respectivas definen el valor de la tensión de ensayo, teniendo en cuenta el tipo de ensayo y el tipo de objeto en ensayo.

#### *Tiempo de frente $T_1$*

Parámetro convencional definido como 1,67 veces el intervalo de tiempo  $T$  comprendido entre los instantes en que la tensión alcanza el 30 % y el 90% del valor de cresta (puntos A y B de la Fig. 3.7 (a)).

#### *Origen convencional $O_1$*

Instante que precede en un tiempo igual a  $0,3T_1$  a aquel que corresponde al punto A (Fig. 3.7 (a)) Para los registros realizados con escala de tiempo lineal, es la intersección con el eje de las abscisas de la recta que pasa por los puntos de referencia del frente A y B.

#### *Tiempo hasta la mitad del valor $T_2$*

Parámetro convencional definido como el intervalo de tiempo comprendido entre el origen convencional  $O_1$  y el instante en que la tensión ha disminuido hasta la mitad del valor de cresta.

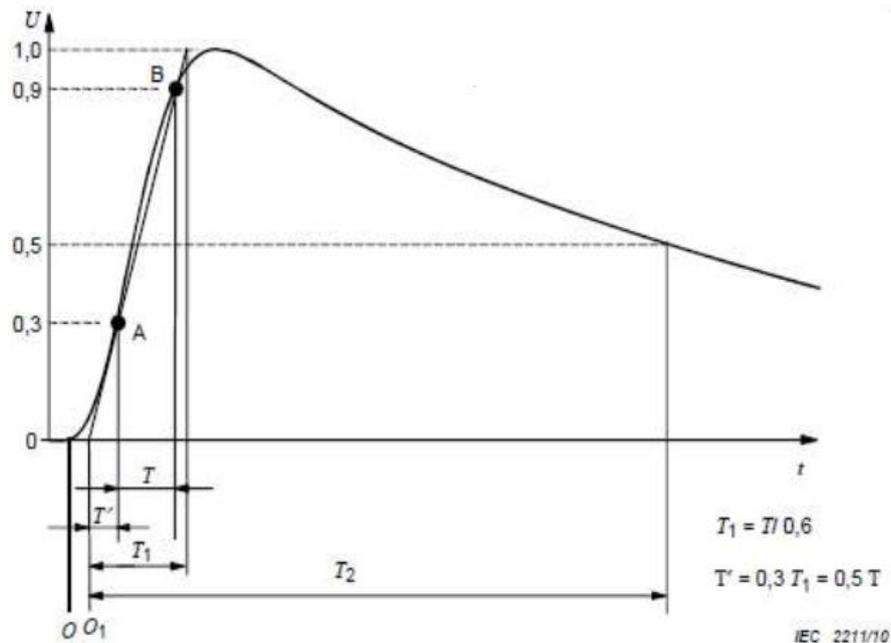


Fig. 3.7 (a). Onda de Impulso Atmosférico Normalizada

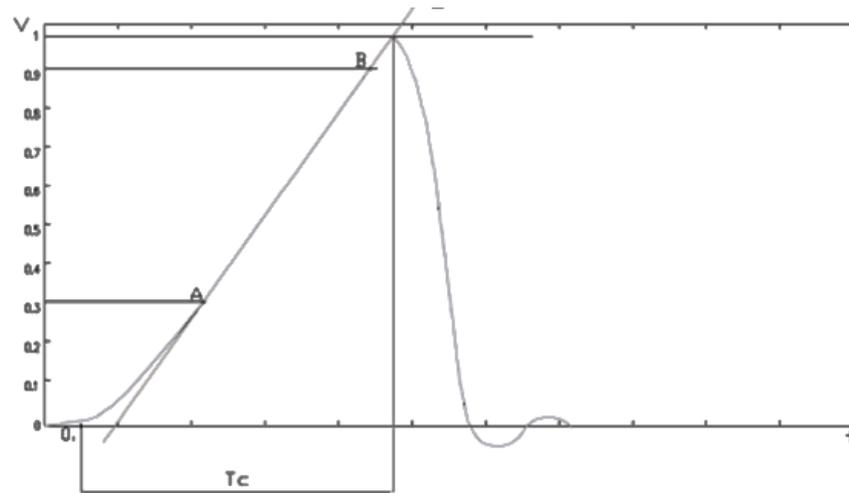


Fig. 3.7 (b). Tensión de impulso cortado en el frente.

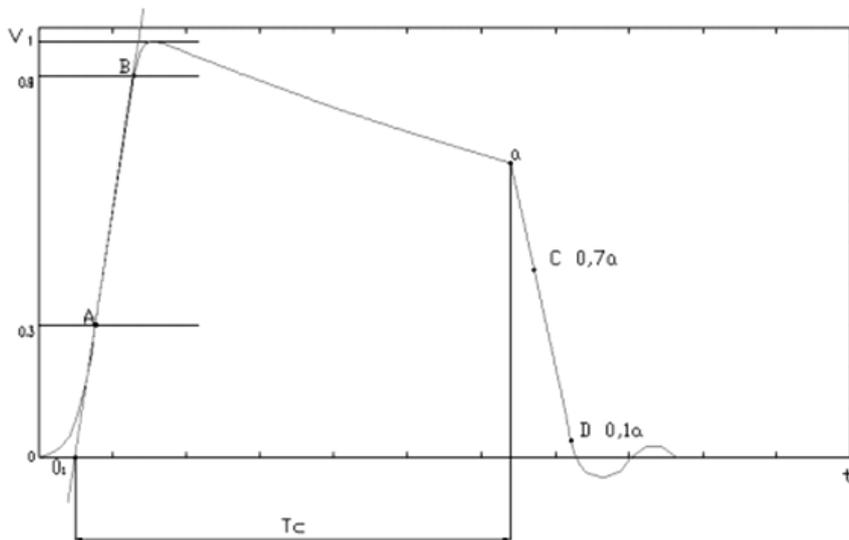


Fig. 3.7 (c). Tensión de impulso cortado en la cola.

### 3.4.1.1- Definiciones aplicables a impulsos cortados

El corte de un impulso se caracteriza por una reducción brusca de la tensión, que se manifiesta en la discontinuidad de la pendiente de la curva. En esta caída la tensión llega a cero, o prácticamente a cero, con o sin oscilaciones (Fig. 3.7 (b) y (c)).

#### *Instante del corte*

Instante en que se inicia la caída brusca de la tensión que caracteriza al corte.

#### *Tiempo de corte $T_c$*

Parámetro convencional definido como el intervalo de tiempo comprendido entre el origen convencional  $O_1$  y el instante del corte.

#### *Características relativas a la caída de tensión durante el corte*

Las definidas por dos puntos C y D situados al 70% y al 10% de la tensión de corte en el instante del corte (Fig. 3.7 c). La duración de la caída de tensión es 1,67 veces el intervalo de tiempo comprendido entre los puntos C y D. La pendiente de la caída de tensión es la relación entre la tensión en el instante del corte y la duración de la caída de tensión.

#### *Impulso cortado en un frente lineal*

Tensión que crece con una pendiente aproximadamente constante hasta que es cortada por una descarga disruptiva.

Condiciones atmosféricas normales:

- La temperatura  $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- Presión absoluta  $p_0 = 1013 \text{ hPa}$  (1013 mbar);
- Humedad absoluta  $h_0 = 11 \text{ g/m}^3$ .

### 3.5- Tiempo de ascenso y de respuesta

Las características en alta frecuencia de un sistema de medición son principalmente descritas por el ancho de banda B, por el tiempo de ascenso  $T_r$  o en terminología de alta tensión por el tiempo de respuesta  $T_{res}$ . El tiempo de ascenso de un pulso de tensión o corriente se define como el tiempo requerido para incrementar de un 10% a 90% de su valor final (Fig. 3.8).

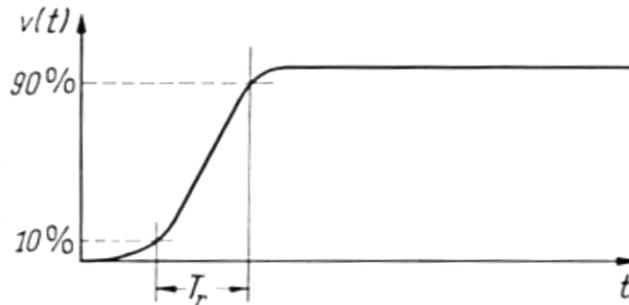


Fig. 3.8. Tiempo de subida  $T_r$  de un pulso de tensión.

Hasta que se introdujo el término de “tiempo de ascenso”, la calidad de los divisores de tensión estaba comúnmente descrita por sus constantes de tiempo.

Existe una relación entre el tiempo de ascenso  $T_r$  y la constante de tiempo  $T$  del incremento exponencial para una señal de medición; si se aplica una tensión de entrada  $v_1(t)$  al terminal de entrada de un circuito RC como el de la Fig. 3.9, se obtiene un crecimiento exponencial de la tensión de salida (Fig. 3.10).

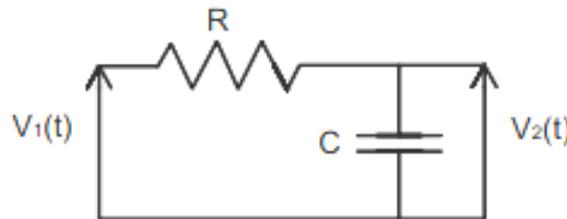


Fig. 3.9. Circuito RC, relación entre tiempo de subida  $T_r$  y constante de tiempo  $T_c=RC$

Con:

$$v_1(t) = V_0 \cdot u_{-1}(t) \quad (3.15)$$

El tiempo de ascenso para el circuito es:

$$T_r = 2,2 \cdot R \cdot C = 2,2 \cdot T \quad (3.16)$$

La constante de tiempo de la respuesta escalón puede ser evaluada por medio de la tangente al origen o por medio de la integral:

$$T \equiv S = \int_0^{\infty} [1 - w(t)] dt = \int_0^{\infty} e^{-\frac{t}{RC}} dt \quad (3.17)$$

Donde S corresponde al área sombreada en la Fig. 3.10:

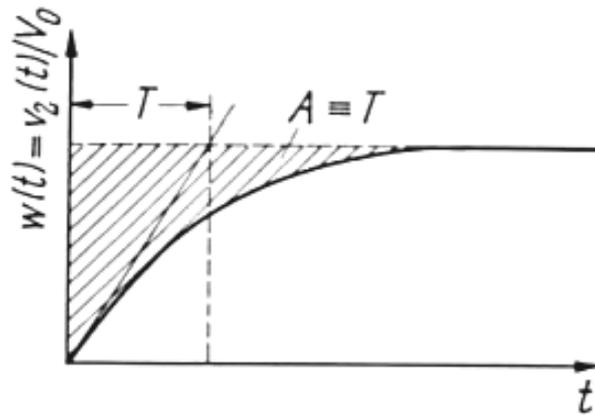


Fig. 3.10. Crecimiento de la tensión de salida del circuito RC.

En la Fig. 3.11 se pueden apreciar distintas constantes de tiempo, donde el termino tiempo de respuesta representa el área encerrada por la respuesta escalón normalizada, cuyo valor final es 1 y comienza a  $t = 0$ .

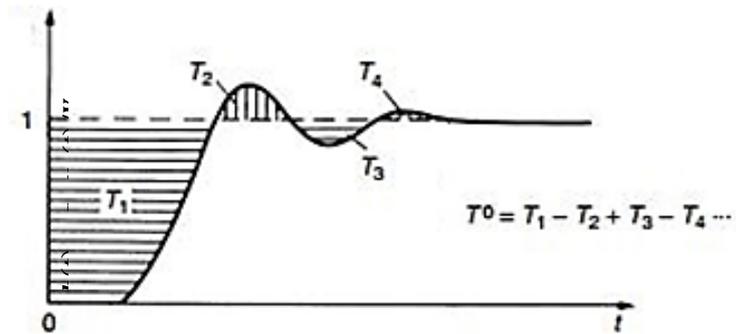


Fig. 3.11. Esquema de onda con distintas constantes de tiempo y S.

$$T_{res} = \int_0^{\infty} [1 - h(t)] dt = T_1 - T_2 + T_3 - T_4 \dots \quad (3.18)$$

En otras partes, el tiempo de respuesta también es conocido como la constante de tiempo de distorsión o generalizada. El cual es empleado en alta tensión para el cálculo de incertidumbres en la amplitud asociada con mediciones de tensiones de impulso cortado, tal como se puede apreciar en la Fig. 3.12, medida por un divisor de tensión con tiempo de respuesta  $T_{res}$ . El error relativo en amplitud puede ser calculado por:

$$\delta = \frac{T_{res}}{T_c} \quad (3.19)$$

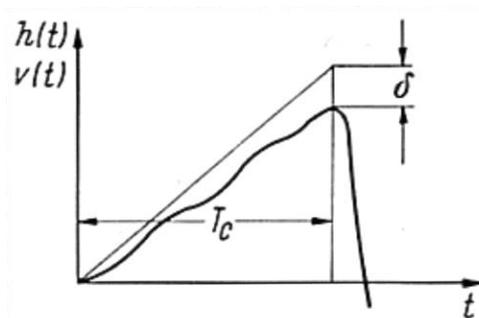


Fig. 3.12. Error en medición de valor pico de tensión de impulso cortado,  $T_c$  tiempo de corte

La cual es válida para incrementos de tensión lineales  $v(t)$  y sistemas de medición con respuesta escalón exponencial. Para sistemas de medición de respuesta escalón oscilante esto es inválido, ya que el tiempo de corte excede el tiempo de estabilización del sistema.

El tiempo de respuesta no puede ser definido si la respuesta escalón presenta un excesivo ruido, un tiempo de estabilización largo, o presenta un gran rebasamiento (overshoot) o si hay demasiado tiempo de retardo en el sistema (como en el caso de los divisores de alta tensión diseñados para muy cortos tiempos de subida)

Cuando la respuesta escalón o al menos el porcentaje de overshoot (Fig. 3.13) para una función de prueba es conocida, un tiempo de respuesta del divisor puede servir como un criterio general de las características en alta frecuencia. Un correcto puesto a punto de un divisor capacitivo amortiguado o compensado permite la igualdad de las áreas  $T_2$  y  $T_1$ , o incluso la ampliación de  $T_2$  para lograr un valor mayor de  $T_1$ , el cual implica un tiempo de respuesta negativo. El tiempo de respuesta solo no otorga suficiente información acerca de la calidad de un divisor de pulsos de alta tensión.

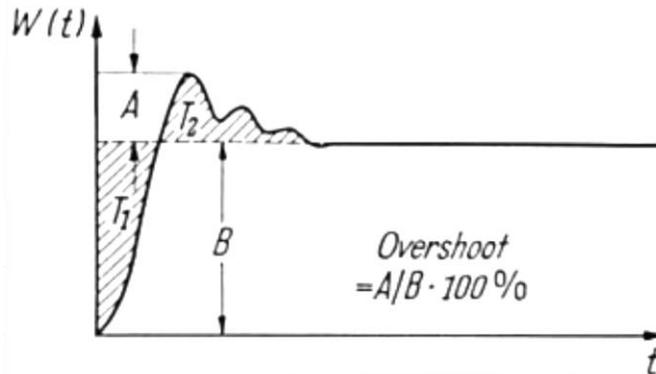


Fig. 3.13. Definición de porcentaje de Overshoot.

El divisor de tensión de impulsos de uso general es caracterizado por su tiempo de subida  $T_r$ , cuya definición permanece valida hasta un overshoot de 5%, dependiendo de la exactitud requerida para una medición particular. Ya que el uso de divisores de tensión con un alto overshoot es cuestionable en varias aplicaciones, el conocimiento del tiempo de subida es preferible al tiempo de respuesta.

Para tiempos de subida de sistemas en cascada, interconectados sin efectos de carga, se puede sumar geoméricamente:

$$T_{r_{tot}} = \sqrt{T_{r_1}^2 + T_2^2 + \dots + T_{r_n}^2} \quad (3.20)$$

El tiempo de subida de una señal con una cantidad finita de escarpado puede ser evaluado a partir de la medida del tiempo de subida en un osciloscopio.

$$T_s = \sqrt{T_m^2 - T_r^2} \quad (3.21)$$

Donde  $T_s$  es el actual tiempo de subida de una señal, mientras que  $T_m$  y  $T_r$  representan el tiempo de subida medido y el tiempo de subida del osciloscopio respectivamente.

### 3.6- Efectos de carga en divisores de tensión en circuitos de alta tensión

Se desea que los dispositivos de medición de tensión no afecten la medición, así la tensión a medir no se ve modificada por la conexión del dispositivo a la fuente, que, a fines prácticos, esta condición es satisfecha si la impedancia del dispositivo es mayor que el de la fuente. El efecto de carga es normalmente analizado por un circuito equivalente que consiste de una fuente de impedancia nula, en serie con una resistencia  $R_i$  (equivalente de Thevenin).

Si la inductancia en el cable de alta tensión a la fuente es despreciada, el divisor de tensión puede ser modelado como un circuito RC (Fig. 3.14). Los componentes  $R_e$  y  $C_e$  representan la resistencia total del divisor y la capacitancia paralela y de perdida a tierra respectivamente.

Debido a que el escarpado de la pendiente de la tensión no sinusoidal es determinado por sus armónicos en alta frecuencia, el tiempo de subida de la tensión de los terminales se incrementa con el aumento de la carga capacitiva, y puede ser fácilmente calculado por:

$$T_r = 2,2 \cdot R_i \cdot C_e \quad (3.22)$$

El divisor de tensión no afecta significativamente la forma de onda cuando el tiempo de subida así calculado es próxima a 5 veces menor que el de la tensión en terminales de circuito abierto.

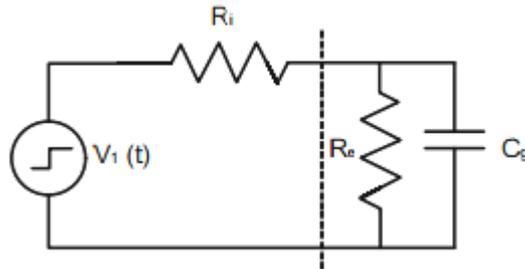


Fig. 3.14. Efecto carga de divisor de tensión impulso sobre una fuente de tensión con su impedancia fuente  $R_i$ .

### 3.7- Divisores de tensión

#### 3.7.1- Divisores de tensión resistivos

3.7.1.1- Divisores de tensión compensados que desprecian las inductancias dispersas y capacitancias distribuidas de pérdida a tierra

Un divisor de tensión consiste de dos resistores  $R_1$  y  $R_2$  en serie, en la que el primero es mayor, como se puede observar en la Fig. 3.15.

El factor de atenuación del divisor es la relación de tensión entre  $v_1(t)$  y la señal medida  $v_2(t)$  en los terminales de baja tensión del divisor:

$$a = \frac{v_1(t)}{v_2(t)} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (3.23)$$

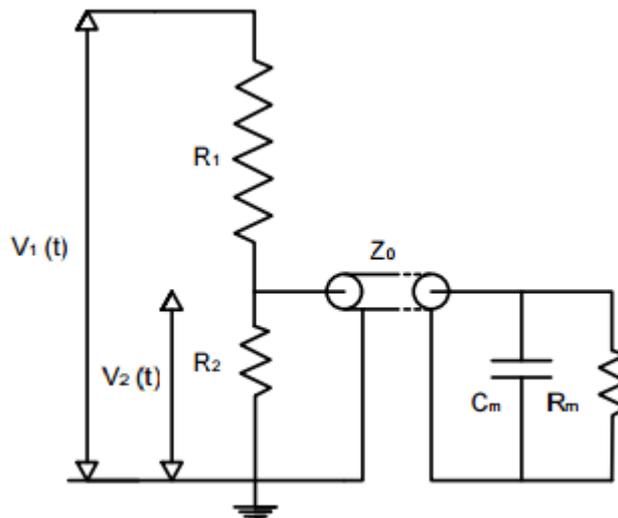


Fig. 3.15. Divisor de tensión resistivo con cable de sobretensión y terminales de osciloscopio

Durante las mediciones prácticas, el resistor de baja tensión  $R_2$  está en paralelo con la impedancia del dispositivo de medición; este puede afectar significativamente el factor de atenuación. Para las mediciones de rápidas tensiones de impulso la señal medida es transmitida desde el divisor al osciloscopio por medio de cable coaxial.

La impedancia del terminal del osciloscopio o voltímetro electrónico es usualmente representada por

un resistor  $R_m$  del orden de 1 megaohm en paralelo con una capacitancia  $C_m$  de 10 a 50 pF, a lo cual se le debe sumar la capacitancia del cable que puede ser de unos 20 a 100 pF/m.

En alta frecuencia o tensiones no senoidales que contengan componentes de alta frecuencia, la carga capacitiva hará que se tenga una relación de forma compleja “a”, que en el dominio de la frecuencia será:

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{R_1 + \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_m}}{\frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_m}} \quad (3.24)$$

Siendo para tensiones no senoidales la relación en sistema complejo:

$$G(j\omega) = \frac{V_2}{V_1} = \frac{\frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_m}}{R_1 + \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_m}} \quad (3.25)$$

Para simplificar los cálculos, los divisores de tensión de carga capacitiva son compensados; se incrementa el circuito divisor al introducir una capacitancia adicional a través del resistor de alta tensión  $R_1$  (Fig. 3.16). El capacitor  $C_1$  causa que  $R_1 C_1$  disminuya a altas frecuencias de la misma manera que la impedancia  $R_2 C_m$  del brazo de baja tensión ( $C_m$  es la capacidad en la rama de BT por lo que también se puede llamar  $C_2$ ).

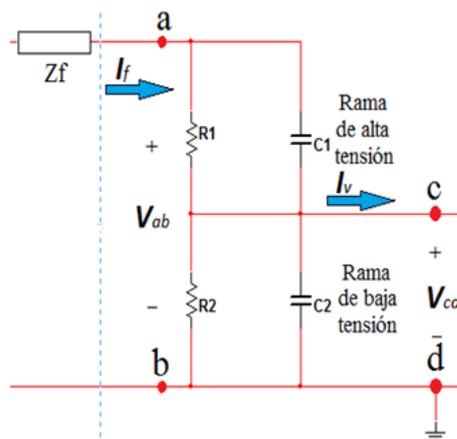


Fig. 3.16. Divisor de tensión resistivo compensado.

Para la tensión de salida  $v_2(t)$  de un divisor de tensión compensado para una tensión escalón de entrada  $V_0$ , se tiene:

$$v_2(t) = V_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left( 1 + \frac{R_1 C_1 - R_2 C_m}{R_2 (C_1 - C_m)} e^{-t/\tau} \right) \quad (3.26)$$

Los capacitores inicialmente descargados representan un pequeño circuito inmediatamente después de la maniobra. La tensión de salida instantánea salta al valor de  $v_2(+0)$  determinada por una relación capacitiva y la magnitud del escalón de entrada:

$$v_2(+0) = \frac{C_1}{C_1 + C_m} V_0 \quad (3.27)$$

Y que presenta un valor final  $v_2(\infty)$ :

$$v_2(\infty) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_0 \quad (3.28)$$

Siendo la constante de tiempo de la exponencial:

$$T_m = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot (C_1 + C_m) \quad (3.29)$$

Para el caso de una correcta compensación, el segundo término de la ecuación de  $v_2(t)$  desaparecería:

$$R_1 \cdot C_1 = R_2 \cdot C_m \quad (3.30)$$

Esto explica la operación básica de las sondas de tensión utilizadas en conexiones con osciloscopios. A pesar del divisor de tensión, estas sondas son empleadas principalmente para incrementar la impedancia de los terminales del osciloscopio y así reducir el efecto de carga.

Las formas de onda de salida de un divisor compensado excitado por una onda cuadrada se muestran en la Fig. 3.17, con sobre y sub compensación para una entrada de onda cuadrada. En la Fig. 3.17 (i) se muestra la forma de onda de un divisor R-C cuando  $C_1$  es demasiado grande o sobrecompensado, mientras que en (iii) se muestra la forma de onda cuando  $C_1$  es pequeña o bajo compensada.

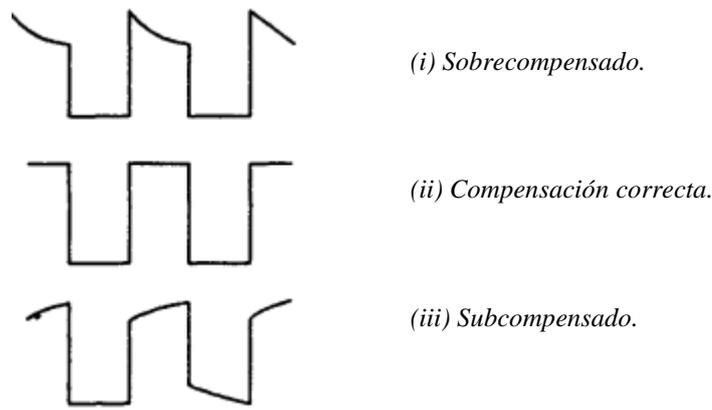


Fig. 3.17. Salida de divisor resistivo compensado para distintos grados de compensación.

Para la pendiente exponencial o para la porción ascendente de la onda, la constante de tiempo era de la ecuación 3.29:

$$\tau = \left( \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) \cdot (C_1 + C_m)$$

La cual será demasiado grande cuando el valor de  $C_1$  sea mayor que el requerido para la compensación correcta, es decir,  $R_1 \cdot C_1 = R_2 \cdot C_m$  y por lo tanto un rebasamiento con un decaimiento exponencial ocurre como se muestra en la Fig. 3.17 (i). Para la subcompensación, el tiempo de carga es demasiado alto y, como tal, se produce un aumento exponencial como se muestra en la Fig. 3.17 (iii).

### 3.7.1.2- Divisor de tensión resistivo incluyendo sus capacitancias distribuidas de pérdida a tierra

En alta tensión las dimensiones de  $R_1$  crecen significativamente por lo que las capacitancias distribuidas de pérdida a tierra deben ser consideradas. Por lo tanto, el divisor ya no es una pequeña resistencia de parámetros agrupados, sino que debe considerarse como una red distribuida como se muestra en la Fig. 3.18.

La inductancia de cada elemento ( $L'_1$ ) no se muestra en la figura, ya que usualmente es pequeña comparada con los otros elementos.

Las capacitancias de pérdidas llevan a que la respuesta escalón posea un acercamiento gradual a su valor final, es decir, inherente al largo tiempo de subida y tiempo de respuesta. Esto es particular de divisores de alta carga resistiva.

El brazo de alta tensión se asume que contiene  $N$  resistores elementales  $R'_1 = R_1/N$ , en la que cada uno presenta sus propias capacitancias paralelas  $C'_p = C_p/N$ . La indeseable capacitancia de pérdida a tierra elemental  $C'_g = C_g/N$ , surge de los campos eléctricos inherentes entre cada elemento y el ambiente (piso, pared, proximidad a equipos de alta tensión) a potencial de tierra.

La capacitancia distribuida a tierra presenta valores de aproximadamente 10 a 20 pF/m. En general, la

capacitancia a tierra por largo de unidad disminuirá de la parte superior hacia la inferior del divisor, aunque algunas investigaciones teóricas y experimentales han demostrado que una distribución uniforme generalmente se puede asumir sin errores excesivos, incluso en divisores de algunos metros de largo.

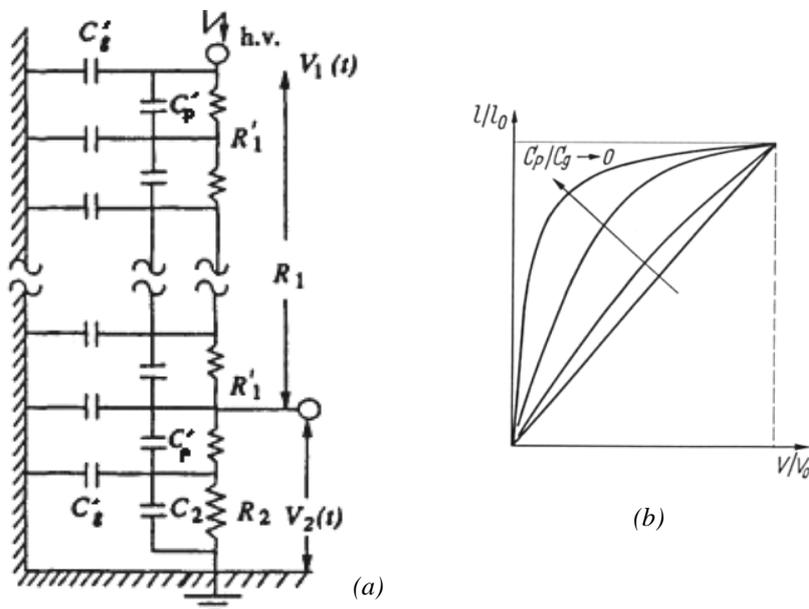


Fig. 3.18. (a) Circuito equivalente del divisor de tensión resistivo con capacitancias en paralelo y de pérdidas a tierra distribuidas; (b) Distribución del potencial no lineal dependiente de la frecuencia a través del divisor de tensión resistivo con capacidades de pérdidas distribuidas a tierra,  $C_p$  capacitancia paralela,  $C_g$  capacitancia total a tierra.

La corriente de carga entregada de la fuente disminuye desde la parte alta del divisor a su extremo conectado a tierra. Esta pérdida genera una distribución no lineal de la tensión, alejándose de la linealidad según la relación de  $C_p/C_g$  (Fig. 3.18 (b)).

Mediante la disposición de anillos de protección en varios puntos elementales, el circuito equivalente se puede modificar como se muestra en la Fig. 3.19, donde  $C_h$  representa la capacitancia de dispersión introducida entre el conductor de alta tensión y los elementos de protección. Esto reduce la distorsión introducida por el divisor original.

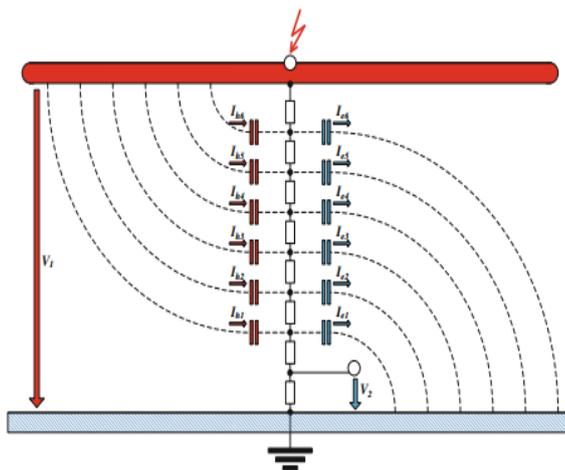


Fig. 3.19. Circuito de divisor de tensión resistivo con anillo de protección.

O sea que, a pesar de la resistencia comparativamente alta del brazo de alta tensión, se puede lograr un tiempo de respuesta experimental mucho menor gracias a reducir el impacto de la capacitancia de tierra

Usando un electrodo de "Blindaje". Bajo esta condición, las corrientes parciales  $I_{e1}$ ,  $I_{e2}$  ... e  $I_{e6}$  entre la columna divisora y la tierra están más o menos compensadas por las corrientes parciales  $I_{h1}$ ,  $I_{h2}$  ... e  $I_{h6}$

entre el electrodo de AT y la columna divisora (Fig. 3.20). En la Fig. 3.21 se aprecia el efecto del electrodo de protección.

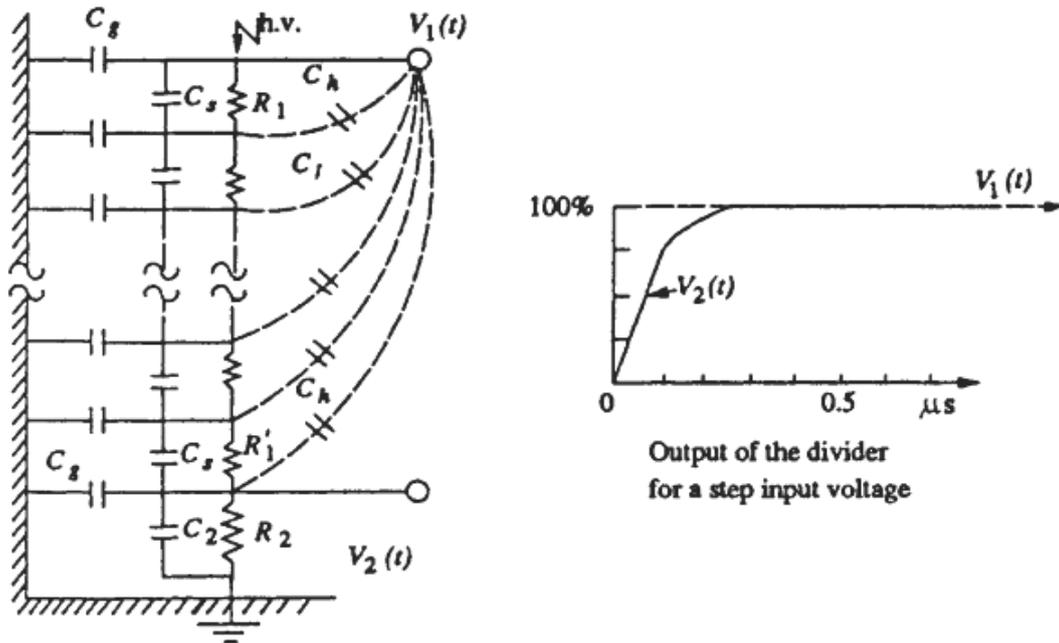


Fig. 3.20. Divisor con electrodo de blindaje.

Las corrientes de fuga y efecto corona que ocurren en el divisor provocan cambios en la resistencia efectiva del mismo. Estos efectos se pueden eliminar o reducir considerando la distribución de campo en el divisor.

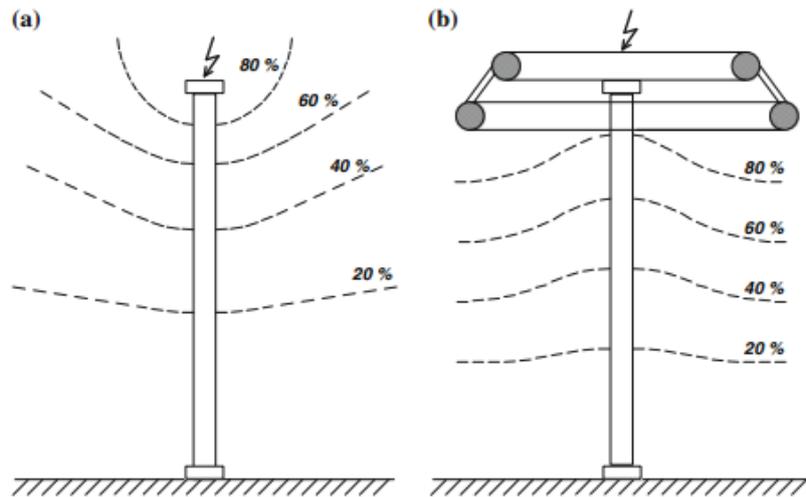


Fig. 3.21. Divisor resistivo con columna de AT sin y con electrodo de protección:  
(a) Sin regulación de campo. b) Con regulación de campo, mediante un gran electrodo de protección.

Las resistencias en el brazo de alta tensión están fijadas en una forma helicoidal conectada a una columna aislante, que está montada en una placa a tierra y cubierto con una corona protectora de metal. Esta construcción minimiza los efectos corona entre el electrodo de alta tensión y tierra.

La carcasa del divisor de alta tensión consiste en un cilindro hecho de polimetil metacrilato (PMMA)<sup>6</sup> o resina.

<sup>6</sup> Material transparente, excelente aislante térmico y eléctrico, ligero, resistente a la intemperie y luz ultravioleta, de fácil mecanizado y de dureza similar al aluminio.

Su propiedad aislante causa una carga estática en la superficie de la lámina la cual atrae partículas de polvo y pelusa, por lo que se usan compuestos antiestáticos cuando la acumulación de carga estática y la concentración de polvo representan un problema.

La tensión alimenta al electrodo de alta tensión del divisor y las resistencias de alta tensión se fijan uniformemente con clips hechos de material antiestático y conectores en forma helicoidal sobre un soporte hecho también de PMMA.

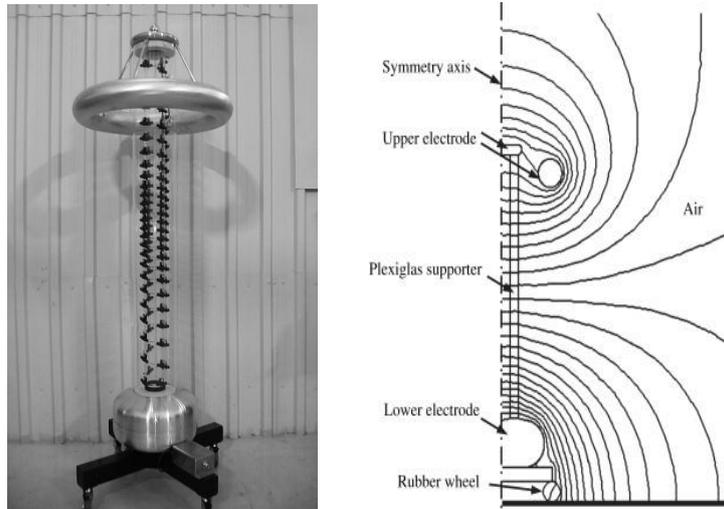


Fig. 3.22. Distribución de líneas equipotenciales en un divisor de AT de CC.

### 3.7.1.3- Divisor de tensión mezcla resistivo-capacitivo.

Los divisores de tensión mixtos utilizan elementos R-C en serie o en paralelo. Esto se emplea con éxito para divisores de tensión del rango de 2 MV y superiores. Una construcción mejor consiste en hacer una conexión de elementos en serie R-C. El circuito equivalente de tal construcción se muestra en la Fig. 3.23.

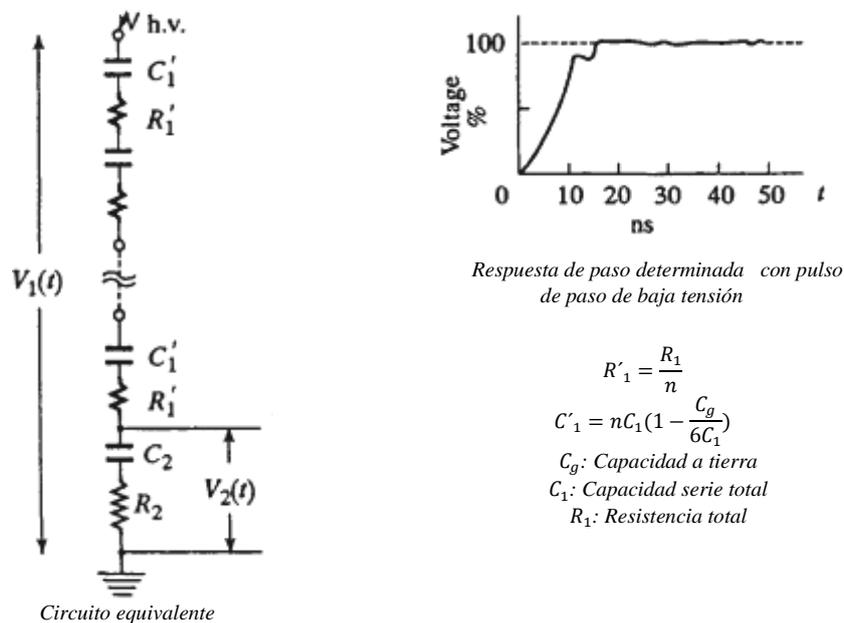


Fig. 3.23. Circuito equivalente de un divisor de tensión RC serie y su respuesta escalón.

Tales divisores se hacen para 5 MV con tiempos de respuesta inferiores a 30 ns. La respuesta escalón del divisor y la conexión esquemática del brazo de baja tensión se muestran en la Fig. 3.24.

La influencia de la capacitancia de tierra distribuida puede ser eliminada por alargamiento de las capacitancias en paralelo  $C_p$ . Esto es realizado mediante capacitores adicionales en paralelo con la capacidad paralela elemental a tierra  $C'_p$ . A pesar de que una respuesta en frecuencia ideal puede ser lograda si la relación  $C_p/C_g$  se convierte infinita, el divisor podría quedar inservible debido a su alto efecto de carga, por lo que se asume una relación  $C_p/C_g > 3$  para ser suficiente.

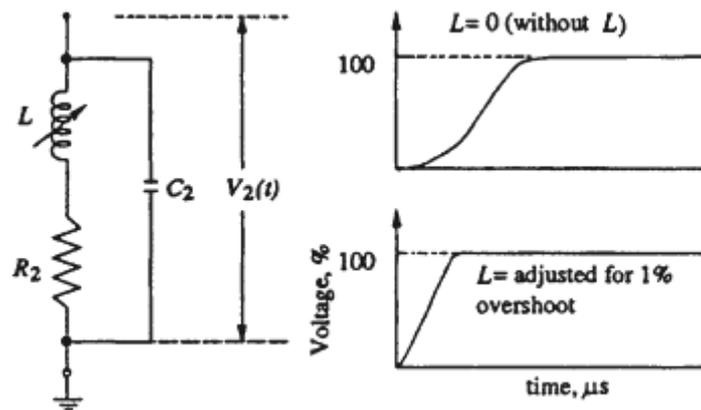


Fig. 3.24. *L peaking en brazo de baja tensión y respuesta escalón del divisor con L peaking.*

Mientras los divisores mezcla necesitan de capacitores en paralelo, el divisor compensado (descrito anteriormente) requiere de una capacitancia adicional  $C_1$  para igualar la constante de tiempo. En alta frecuencia el divisor mezcla actúa como un divisor capacitivo puro.

Si la capacitancia paralela adicional es diseñada cuidadosamente, la capacitancia de pérdidas a tierra puede ser despreciada y el circuito equivalente puede volver a ser aplicado.

#### 3.7.1.4- Divisor de tensión de campo controlado

Un montaje de un electrodo de protección en la parte superior del divisor permite lograr un campo uniforme en las cercanías de la columna resistiva. Una distribución de campo uniforme a lo largo del divisor es equivalente a la desaparición de campos de pérdida a tierra. El electrodo protegido entonces genera una distribución lineal de tensión a lo largo del divisor. Sin embargo, un suficiente grado de uniformidad es obtenido solo por el uso de electrodos de protección de grandes dimensiones físicas. Este problema puede ser superado en un cierto grado, por medio de electrodos de protección en forma de cono a partir del cual parte de la corriente de carga para la capacitancia de pérdida superior se traslada directamente allí, protegiendo de esta manera la columna resistiva.

Utilizando una resistencia óhmica no lineal por unidad de longitud, se adapta la resistencia a la distribución de potencial capacitivo. Para la reducción del alto stress de tensión local cerca de la parte superior del divisor, un electrodo de protección adicional de relativamente menores dimensiones será necesario. Además, este electrodo produce una distribución de campo en la parte superior que es relativamente independiente de la forma y ubicación de los cables de alta tensión.

La principal ventaja de una resistencia no lineal por unidad de largo radica en su pequeña capacitancia paralela, lo cual evita la excesiva carga del circuito de alta tensión.

La capacitancia paralela resultante del electrodo de protección y la inductancia del cable genera una respuesta escalón con ruido.

Este problema es usualmente superado por medio de una resistencia de amortiguación  $R_d$  conectada en serie con la carga en alta tensión o entre el divisor y el electrodo de protección Fig. 3.25.

Considerando una resistencia por unidad de longitud idealmente adaptada a la distribución de potencial capacitivo, y despreciando la componente inductiva de la columna de resistencias, el circuito equivalente simplificado (Fig. 3.26 (a)) puede ser utilizado para cálculos de propiedades de transmisión. Este circuito equivalente de elementos agrupados exhibe la misma respuesta escalón que el divisor de tensión mezcla resistivo-capacitivo compensado idealmente.

Las oscilaciones adicionales superpuestas en la respuesta escalón, son causadas por un circuito resonante serie que consiste de la inductancia del cable y de la capacitancia paralela del divisor.

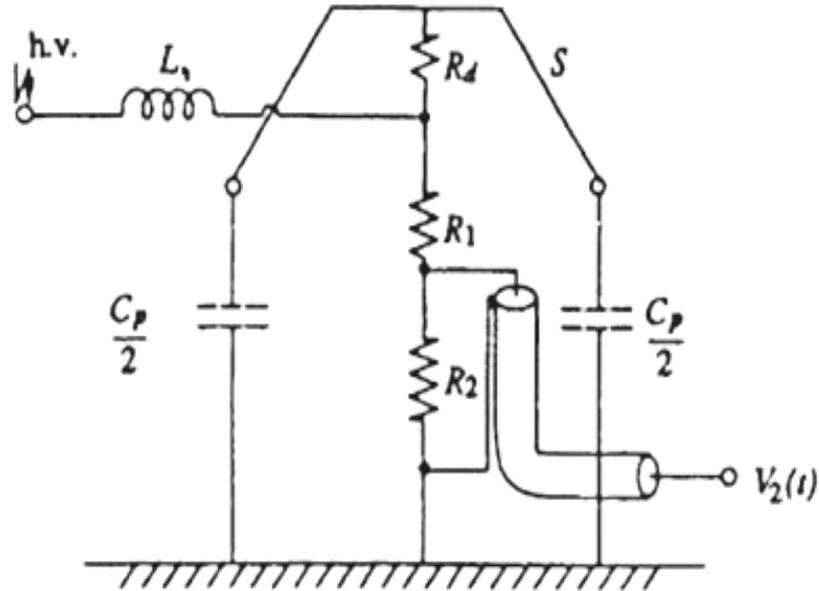


Fig. 3.25. Divisor resistivo de campo controlado con  $R_d$  resistor de amortiguamiento,  $L$  inductancia del cable,  $C_p$  capacitancia del blindaje a tierra,  $S$  blindaje o electrodo de protección.

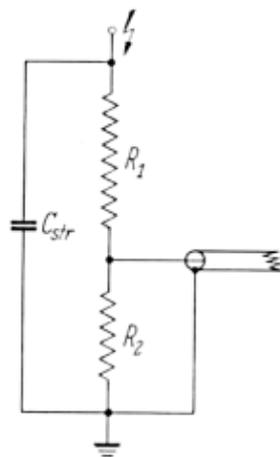


Fig. 3.26. Divisor de tensión resistivo de campo controlado.  
(a) Circuito equivalente simplificado; (b) Figura del mismo.

En la Fig. 3.26 (b) se puede apreciar un divisor resistivo de campo controlado, para hasta 2 MV, de tiempo de respuesta de 30 ns con 10% de sobrecarga. La columna consiste de un resistor de estructura entrelazada de 20 k $\Omega$  con una rama capacitiva en paralelo sin tener interconexiones adicionales.

En estos divisores la respuesta escalón con y sin resistencia de amortiguación es como se observa en la Fig. 3.27, con una resistencia de amortiguación apropiada, el tiempo de respuesta es mucho menor y el overshoot es reducido.

Estos divisores a menudo son restringidos para aplicaciones especiales, como campos industriales de pruebas de alta tensión.

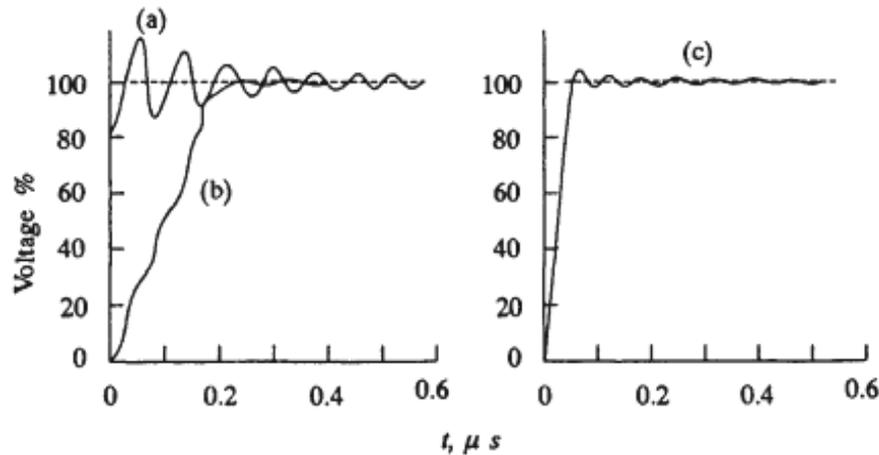


Fig. 3.27. Respuesta escalón de divisor de tensión de campo controlado  
 (a)  $R_d = 0$  y cable largo; (b)  $R_d = 0$  y cable con baja inductancia. (c)  $R_d = 500 \Omega$  y cable largo.

### 3.7.1.5- Divisor de tensión resistivo de baja resistencia

Como se observó anteriormente, la carga capacitiva limita el uso de divisores con una gran capacitancia paralela cuando se debe medir incrementos de tensión muy rápidos. Sin embargo, el tiempo de respuesta del divisor resistivo puede ser mejorado con la linealización de la distribución de tensión, que puede ser realizada por la selección de un resistor  $R_1$ , cuyo valor normal es de varios  $k\Omega$ , siendo su aplicación restringida para mediciones de tensiones de impulso cortado y para ondas completas con muy pequeños tiempos de cola.

Las mejoras en las características de la respuesta escalón de los divisores resistivos con valores de resistencias decrecientes se aprecian en la Fig. 3.28. Cuando la resistencia es reducida a menos de un determinado valor, una respuesta escalón con ruido será el resultado. Además, a  $t = +0$  un valor finito está presente siempre, debido al divisor de tensión asociado con  $C_p$  y  $C_g$ . La respuesta en frecuencia, correspondiente a la respuesta escalón 1 y 2 exhibidas en la figura, presentan un muy atenuado carácter curvilíneo, y para la respuesta escalón 3 se tiene un pico de resonancia.

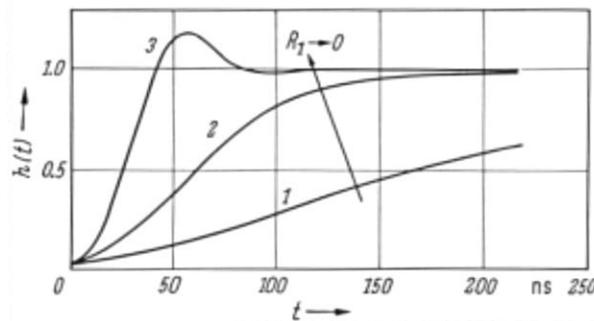


Fig. 3.28. Respuesta escalón de divisor de tensión resistivo de baja resistencia.

Cuando la inductancia de pérdida y la capacitancia de pérdida en paralelo son despreciadas, el ancho de banda  $B$  del divisor resistivo podrá ser calculado por medio de la fórmula:

$$B = \frac{1,46}{R \cdot C_g} \quad (3.31)$$

Mientras la respuesta escalón exhibe un crecimiento cuasi exponencial, el tiempo de crecimiento puede ser calculado a partir de la ecuación:

$$T_r = \frac{0,35}{B} = \frac{0,35}{1,46} \cdot R \cdot C_g = 0,24 \cdot R \cdot C_g$$

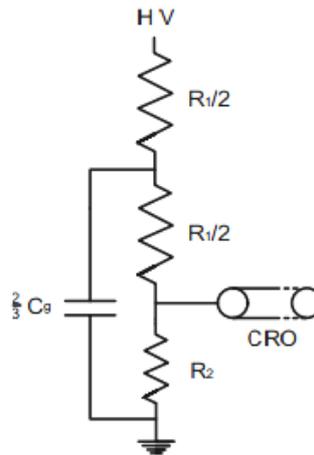


Fig. 3.29. Circuito equivalente para la determinación del error de medición en los divisores de tensión resistivos de baja resistencia.

El circuito equivalente que se muestra en la Fig. 3.29 es utilizado a veces para la evaluación de la exactitud del divisor resistivo. La misma exhibe un crecimiento cuasi-exponencial ante una entrada escalón. Este crecimiento puede ser reemplazado por un crecimiento exponencial especial que presentara el mismo tiempo de respuesta. La constante de tiempo del aumento exponencial es calculado como  $R.C_g/6$ , lo cual se obtiene por medio del conjunto de capacitancias a tierra  $2.C_g/3$  conectada entre tierra y el punto medio de los resistores de alta tensión  $R_1$ . Sin embargo, este circuito equivalente frecuentemente utilizado es exacto solo para divisores de alto grado resistivo, para los cuales  $\omega.L_1$  se puede asumir muy pequeño frente a  $R_1$  o mientras la constante de tiempo inductiva  $L/R$  es alrededor de una decima de la constante de tiempo capacitivo  $R.C_g$ .

### 3.7.2- Divisor de tensión capacitivo

Los divisores de tensión resistivos sufren dos inconvenientes principalmente, la pérdida de potencia y la capacitancia parásita a tierra. Estos factores limitan su uso a tensiones inferiores a 100 kV a 50 Hz e incluso a tensiones más bajas en frecuencias más altas, por lo que los divisores capacitivos de tensión son los más adecuados para usar en CA, particularmente a altas tensiones y altas frecuencias, estando limitados solamente por sus inductancias internas o los dieléctricos de sus componentes (Fig. 3.30 (a)).

El condensador de baja tensión  $C_2$  consistirá normalmente en una unidad fija de ángulo de pérdida bajo “ $tg \delta$ ” (aire, mica o dieléctrico de poliestireno). En paralelo se tiene una resistencia elevada  $R_2$ , que puede introducirse deliberadamente para evitar la acumulación de una carga aleatoria sobre  $C_2$  o ser inherente en el instrumento de medición. Los capacitores de alta tensión  $C_1$  pueden estar protegidos o no blindados.

A tensiones más altas se puede utilizar como componente de alta tensión un capacitor con electrodos cilíndricos coaxiales, como el mostrado en la Fig. 3.30 (b). El cilindro externo esta abocinado en los extremos para evitar descargas. La capacitancia  $C_1$  se calcula a partir de las dimensiones del electrodo:

$$C_1 = \frac{111L}{2\ln(r_1/r_2)} \text{ pF} \quad (3.32)$$

Donde  $L$  es el largo efectivo del electrodo de baja tensión (m),  $r_1$  el radio del cilindro exterior (m), y  $r_2$  el radio del cilindro interior (m).

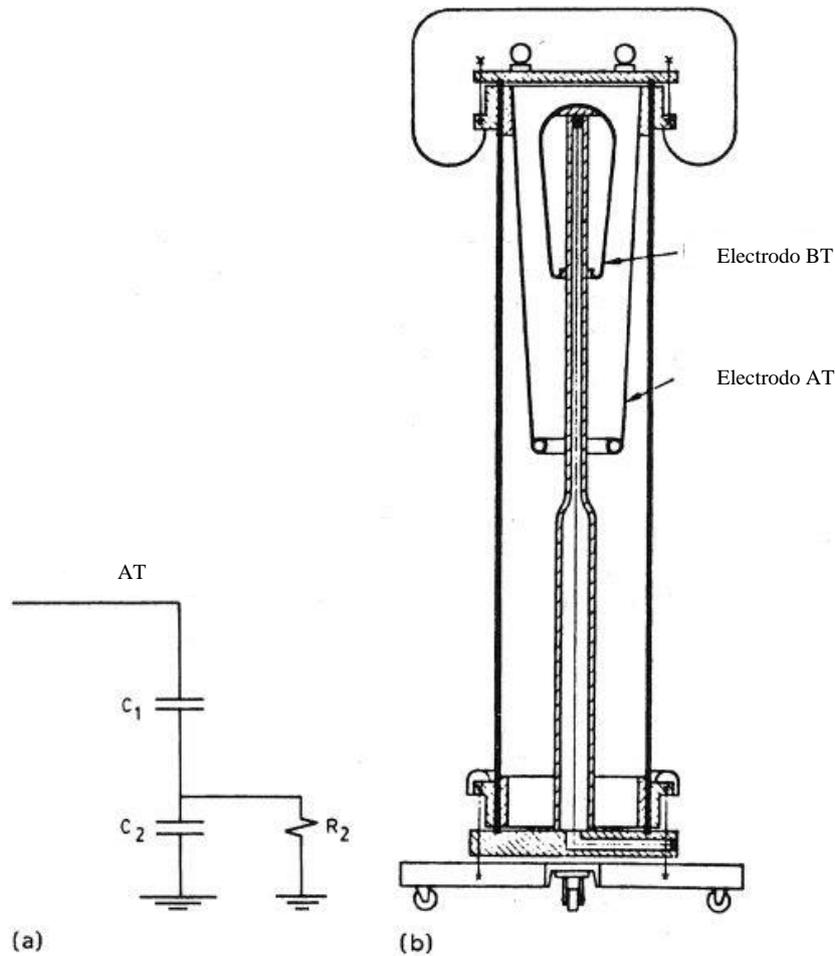


Fig. 3.30. (a) Divisor de tensión capacitivo; (b) Capacitor blindado típico.

### 3.7.2.1- Divisor de tensión capacitivo y cables de conexión

Las secciones anteriores trataron mejorar las características de la respuesta escalón y frecuencia de simples divisores resistivos mediante la adición de capacidades en paralelo. La rama capacitiva se comporta como cortocircuito a alta frecuencia. Por lo tanto, es natural omitir la rama resistiva completamente. Se deberá considerar que los divisores se hallan conectados a la fuente mediante cables que presentan inductancias residuales. Esta junto con la capacitancia del divisor, forma un circuito resonante, que causan excesivas oscilaciones en la respuesta escalón. A bajas tensiones, hasta 10 kV, la inductancia del cable puede ser mantenida muy baja por el uso de mínimas longitudes del mismo y el diseño del cable coaxial.

Para los divisores capacitivos y muy altas tensiones, la capacitancia primaria ya no puede ser asumida como un elemento agrupado, sino que debe ser tratado como una línea de transmisión. Debido a las bajas pérdidas en el divisor, reflexiones en ambos extremos causa oscilaciones de ondas viajeras que no pueden ser atenuadas por una resistencia amortiguadora en los terminales de alta tensión.

Hasta hace poco, la aparición de ondas viajeras limitaba el uso de divisores de impulso capacitivos puros, pero debido a la distribución uniforme de resistencias amortiguadoras a lo largo del brazo de alta tensión, esas oscilaciones y el ruido causado por las inductancias del cable, pueden ser atenuadas lo suficiente para no afectar las excelentes propiedades en alta frecuencia del divisor capacitivo.

### 3.7.2.2- Capacidades parasitas de un divisor capacitivo

Los divisores de tensión capacitivos son ideales para la medición de tensiones y pulsos rápidos. Normalmente los divisores están conectados a la tensión de la fuente a través de cables largos que introducen inductancias y resistencias residuales.

Además, la capacitancia utilizada para trabajos de muy elevada tensión no es pequeña en dimensión y por lo tanto no puede considerarse como un elemento agrupado. Por lo tanto, la salida del divisor para frecuencias e impulsos elevados es distorsionada como en el caso de divisores resistivos.

Respecto al grado de capacidades parasitas lineales de un divisor capacitivo se tiene:

- Capacidad lineal del brazo de alta tensión entre 10-15 pF/m.
- Capacidad lineal parasita media contra tierra, 20-40 pF/m.

3.7.2.3- Divisor de tensión capacitivo puro

Se distinguen dos modelos básicos de divisores capacitivos puros, para el primer tipo el brazo de alta tensión está representado por un lumped capacitivo  $C_1$ , cuya resistencia dieléctrica está diseñada para la tensión a ser medida (Fig. 3.31).

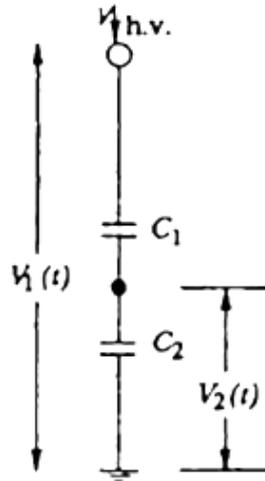


Fig. 3.31. Divisor de tensión capacitivo despreciando capacitancias a tierra.

Entre la tensión de entrada y de salida existe un factor de atenuación constante independiente de la frecuencia:

$$a = \frac{v_1(t)}{v_2(t)} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad (3.33)$$

Hay que considerar que se pueden introducir en forma paralela a  $C_2$ , si los valores lo justifican, ciertas capacidades como:

- la del cable coaxial de medición, en función del largo;
- la de entrada de instrumentos de medición;
- la de limitadores de sobretensión.

Según informes de divisores de alta tensión, la capacitancia de  $C_1$  es mucho menor que la del capacitor  $C_2$  del lado de baja tensión, por lo que:

$$a = \frac{C_2}{C_1} \quad (3.34)$$

- $C_1$  debe ser menor a  $C_2$  con el fin de que haya una mayor caída de tensión en  $C_1$  (almacena la mayor cantidad de energía en campo eléctrico) para así proteger el instrumento de medida.
- La impedancia del capacitor interno del equipo de medida debe ser mayor que la impedancia de  $C_2$  para no afectar la relación de transformación del divisor.

La capacitancia  $C_1$  se forma entre el terminal de alta tensión de la fuente (generador de impulso) y la del objeto de prueba o cualquier otro punto de medición;  $C_2$  incluye la capacitancia utilizada, la capacitancia del cable, la capacitancia de entrada del osciloscopio (CRO) y otras capacidades a tierra.

A tensiones muy altas el brazo de alta tensión es representado como en la Fig. 3.32, con un electrodo superior perteneciente al circuito de alta tensión y un electrodo de acoplamiento de guarda conectado al lado alto del capacitor de baja tensión o tierra  $C_2$ .

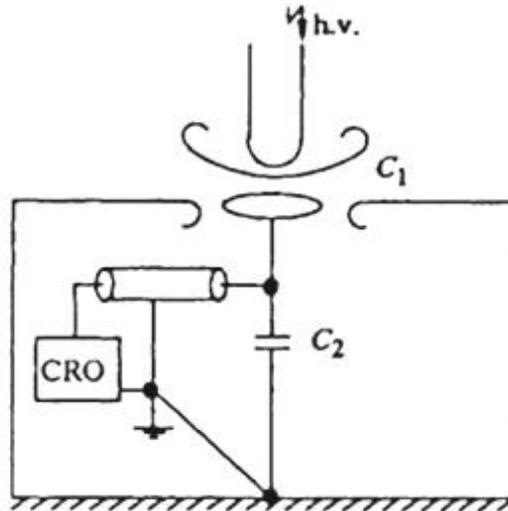


Fig. 3.32. Divisor de tensión capacitivo diseñado para muy altas tensiones.

El osciloscopio es ubicado dentro de una cabina protegida y conectada con cables cortos a los terminales de baja tensión del capacitor  $C_2$ .

La ventaja del dispositivo de la Fig. 3.32 radica en su efecto de carga despreciable en los circuitos de alta tensión (el divisor es simplemente parte de la capacitancia de pérdida a tierra de la configuración de prueba la cual debe ser cargada de todas formas) y el dieléctrico de aire natural de la capacitancia de alta tensión  $C_1$ .

Pero una pequeña perturbación en la ubicación de  $C_2$  o en el electrodo de alta tensión o la presencia de cualquier objeto disperso cercano cambia la capacitancia  $C_1$ , y por lo tanto la proporción de divisor es afectada; también se debe considerar la ubicación y el medio ambiente. Por lo tanto, es esencial calibraciones frecuentes.

Un diseño práctico para divisores capacitivos para uso en alta tensión se observa en la Fig. 3.33. Capacitores de alta y baja tensión son construidas de tres electrodos metálicos cilíndricos coaxiales con alto vacío y vidrios de bajas pérdidas como dieléctricos. Se pueden introducir capacitores adicionales en paralelo a  $C_2$  en la conexión a tierra en la parte inferior del divisor.

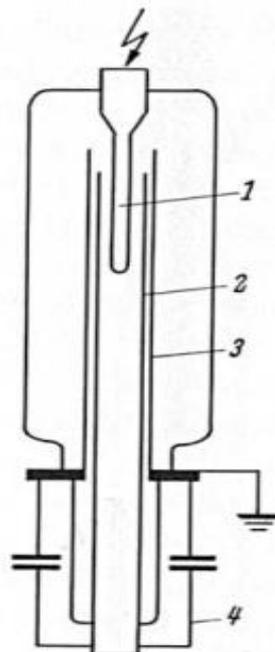


Fig. 3.33. Vista de sección transversal de divisor capacitivo coaxial:  
 1- Electrodo de AT. 2- Electrodo común. 3-Electrodo a tierra del brazo de baja tensión. 4- Capacitor auxiliar para ajuste de relación.

El divisor ilustrado está diseñado para tensiones de hasta 60 kV. Por la conexión de un capacitor de alto vacío en serie la tensión puede ser aumentada a 120 kV.

Para el diseño de un divisor capacitivo de precisión para calibración de construcción coaxial con anillos de guarda y cuidadosas consideraciones de todo aspecto deben ser tomadas en cuenta, pudiendo lograr por ejemplo un factor de atenuación de 1000:1, dentro de una exactitud de algunas décimas de por ciento, de tensión de impulso máxima de 350 kV y límite de la frecuencia máxima de 8 MHz aproximadamente.

Al igual que los divisores resistivos, se podrá establecer un circuito equivalente incluyendo capacitancias distribuidas de pérdida a tierra, como se observa en la Fig. 3.34.

La distribución de tensión a lo largo de la cadena del condensador no es lineal y, por lo tanto, provoca una variación de la señal de onda de salida. Pero el error de relación es constante y es independiente de la frecuencia en comparación con los divisores resistivos.

Asumiendo un divisor normal,  $C_1 \ll C_2$  y  $C_g < C_1$ , el circuito equivalente de la Fig. 3.34 puede ser simplificado al de la Fig. 3.35.

El factor de atenuación para rápidos transitorios, así como para el estado estacionario se puede calcular como:

$$\frac{v_1(t)}{v_2(t)} \approx \frac{C_1 + C_2}{C_1} \cdot \left(1 + \frac{C_g}{6 C_1}\right) \quad (3.35)$$

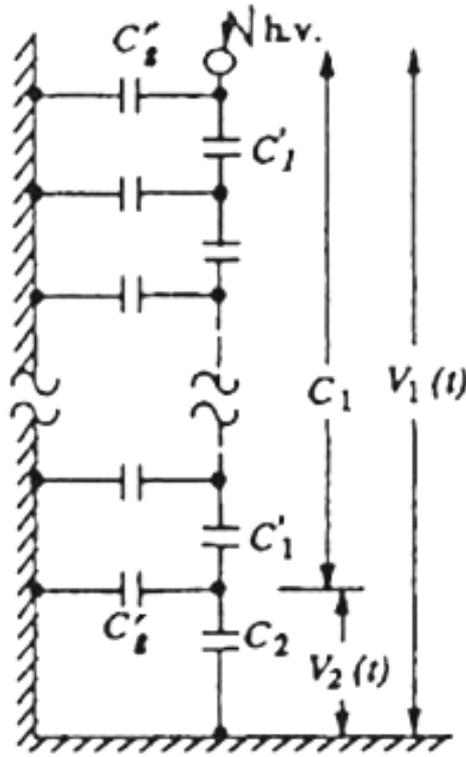


Fig. 3.34. Circuito equivalente de divisor de tensión capacitivo con capacidades de pérdida a tierra distribuidas.  $C'_1$ : Capacidad por unidad de longitud;  $C'_g$ : Capacidad a tierra por unidad de longitud.

Esta relación exhibe un error constante independiente de la frecuencia. Por ejemplo, cuando  $C_1 = 3C_g$  habrá un 5% de error comparado a la relación nominal dada.

La ecuación es ampliamente utilizada para caracterizar ensayos de alta frecuencia de divisores capacitivos con capacidades distribuidas de pérdida a tierra. Esto es válido para cerca de 1 MHz; a frecuencias más altas, las inductancias residuales ya no podrán ser despreciadas.

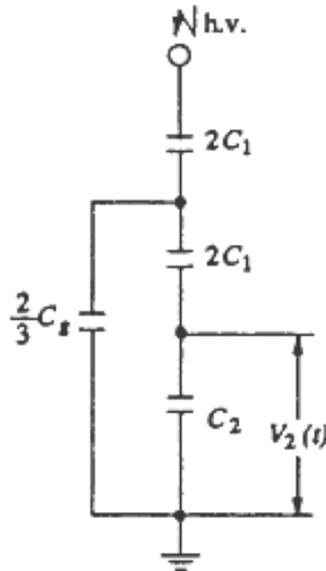


Fig. 3.35. Circuito equivalente aproximado para el cálculo de error de divisores de tensión capacitivos con capacidades de pérdida a tierra distribuidas.

Se debe recordar que las características en alta frecuencia del divisor capacitivo a muy altas tensiones deben ser siempre evaluadas en conjunto con las inductancias del cable. Incluso cuando el problema del cable pueda ser superado por un hábil arreglo del circuito de ensayo, el divisor capacitivo puro con elementos distribuidos, Fig. 3.34, será inadecuado para impulsos muy rápidos debido a las oscilaciones de ondas viajeras internas.

#### 3.7.2.4- Divisor de tensión capacitivo amortiguado

Debido a que el brazo de alta tensión de divisores capacitivos diseñados para muy altas tensiones consiste de varios capacitores individuales de gran valor, se debe suponer que se producen inductancias dispersas considerables. A pesar de que el brazo de alta tensión es por lo general tratada como una capacitancia pura, es en realidad una línea de transmisión. De la teoría de líneas de transmisión, oscilaciones de onda viajera resultan de múltiples reflexiones que ocurren si la línea tiene baja atenuación y terminales indefinidos. Ambas condiciones son cumplidas en divisores capacitivos: hay pequeñas atenuaciones en la línea por pérdidas en los capacitores individuales y sus cables, y un extremo de la línea es cortocircuitada por  $C_2$ . Así una tensión escalón en el terminal de alta tensión viajará mediante el brazo de alta tensión, se reflejará en el extremo cortocircuitado, volverá al terminal de alta tensión, se reflejará nuevamente y así repetirá el ciclo. En función de las pérdidas en la línea, más o menos será la atenuación de las oscilaciones de las ondas viajeras. La frecuencia fundamental de las oscilaciones, el cual puede ser del orden de 10 MHz, es calculada a partir del tiempo de retraso de la línea:

$$f \approx \frac{1}{2\sqrt{LC_g}} = \frac{1}{2\tau} \quad (3.36)$$

Esta frecuencia es la fundamental de la oscilación dentro de un divisor capacitivo.

Debido a que estas oscilaciones no pueden ser atenuadas por un grupo de resistores en la entrada del divisor, se diseñó el divisor de tensión capacitivo amortiguado continuo (Fig. 3.40). Siendo:

$$R'_1 = \frac{R_1}{n} \quad (3.37.1)$$

$$C'_1 = nC_1 \left[ 1 - \frac{C_g}{6C_1} \right] \quad (3.37.2)$$

Con:

$C_g$ : Capacitancia a tierra.

$C_1$ : Capacitancia serie total.

$R_1$ : Resistencia total.

$$R_1 C_1 = R_2 C_2 \quad (3.38)$$

Una adecuada atenuación es alcanzada si la onda viajera que entra al terminal de alta tensión decae a un valor despreciable durante el primer tránsito para que no logre causar serias reflexiones. Se evaluó la atenuación requerida en forma experimental y teórica como:

$$R = 3 \text{ a } 4 \sqrt{\frac{L}{C_g}}$$

Por lo tanto, la resistencia total del divisor debe ser de 3 a 4 veces mayor que la impedancia característica  $Z_0 = \sqrt{L/C_g}$  de la representación de línea de transmisión del divisor. A muy altas frecuencia la reactancia capacitiva del brazo de alta tensión es considerablemente disminuida, posibilitando al divisor actuar como un divisor de tensión de bajo carácter óhmico. El menor límite de alta frecuencia entonces puede ser calculado a partir de la ecuación para el ancho de banda de un divisor de tensión resistivo:

$$B = \frac{1,46}{RC_g} \quad (3.39)$$

Que supone un aumento exponencial de la respuesta escalón, en la práctica se obtiene un ancho de banda ligeramente mayor. El ancho de banda puede ser precisamente determinado por el tiempo de crecimiento de la respuesta medida experimentalmente para una entrada escalón.

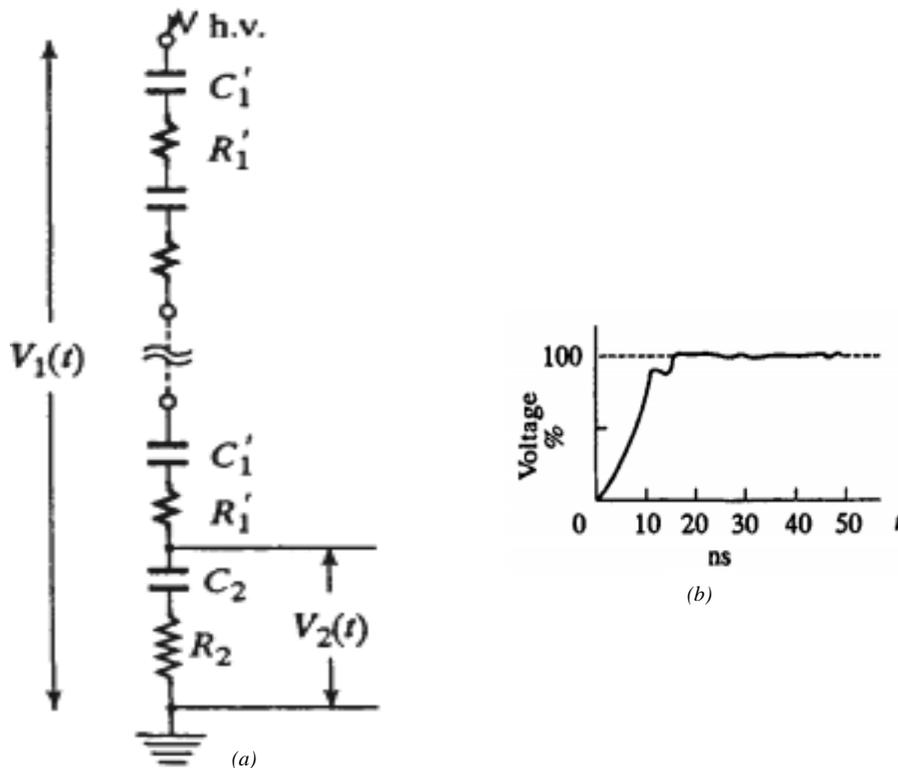


Fig. 3.36. Divisor de tensión capacitivo amortiguado.

(a) Circuito equivalente; (b) Respuesta escalón determinada con pulso escalón de baja tensión.

La Fig. 3.37 muestra las excelentes características en alta frecuencia de un divisor capacitivo amortiguado. El oscilograma muestra una función de prueba de baja tensión conectada por conductores de baja inductancia.

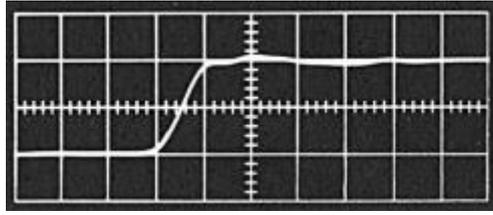


Fig. 3.37. Respuesta escalón de un divisor de tensión capacitivo amortiguado para 1 MV determinado a un nivel de baja tensión y cable de baja inductancia.

La realización práctica de divisores de tensión impulso requiere componentes con baja inductancia residual. La inductancia total debe ser reducida por arreglos cuidadosos del sistema y por conexiones correctas de los componentes. En el ejemplo de la Fig. 3.36, las resistencias elementales de amortiguación entre condensadores consisten en aproximadamente diez resistencias individuales paralelas. Además, la capacitancia de baja tensión  $C_2$  está compuesta por varias decenas de capacitores individuales en paralelo.

Un divisor capacitivo amortiguado comercial de 3MV se muestra en la Fig. 3.38.

Dentro de un tubo fenólico se halla encerrado la capacitancia de alta tensión con resistores de amortiguamiento distribuidos. Todos los componentes son secados por vacío e impregnados en aceite, estando la construcción total herméticamente sellada y la expansión del aceite amortiguada con nitrógeno.

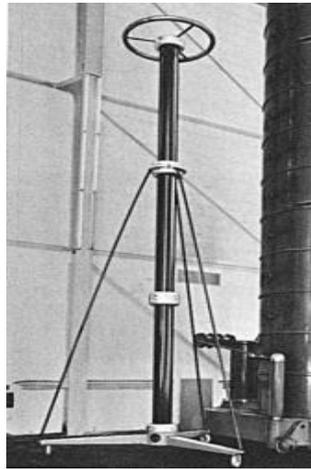


Fig. 3.38. Divisor de tensión capacitivo amortiguado para 3 MV.  
Tiempo de respuesta  $T_{res}=20$  ns, Tiempo de estabilización  $T_0=150$  ns, Overshoot  $O \leq 20\%$ .



Fig. 3.39. Divisor de tensión capacitivo amortiguado serie para 6 MV de tensión impulso.

**IV - Normas de medición en CA, CC e Impulso Atmosférico**

**4.1- Medición con Tensión Continua**

Se tiene como requisito general medir el valor de la tensión de ensayo o de prueba, de acuerdo a la norma IEC 60060-1 (media aritmética) con una incertidumbre expandida:

$$U_M \leq 3 \% \quad (4.1)$$

En sistemas de medición de tensión continua, la incertidumbre expandida debe ser evaluada con una probabilidad de cobertura del 95 %.

Generalmente se utilizan para la medición un divisor de tensión e impedancias (Resistor de alta tensión) y deben ser tales que las corrientes de fuga no sean influenciables en el cálculo de la incertidumbre.

Además, la constante de tiempo del sistema de medición en alta tensión no deberá ser mayor a 0,25 s para la medición de las tensiones que oscilan en 1 % de la tensión de prueba.

Por lo general, los instrumentos de medición de la tensión no son afectados por el ripple presente, sin embargo, en equipos de alta respuesta será necesario asegurarse que la medición no se vea afectada.

Cuando se mida la caída de tensión transitoria, la constante de tiempo del sistema de medición deberá ser inferior a un tercio del tiempo de subida del transitorio.

A modo de resumen se presenta la siguiente tabla de tipos de pruebas y ensayos a realizarse según la norma IEC 60060-2.

Tipo de Prueba	Ensayo tipo	Ensayo de rutina	Ensayo de caracterización	Control de características
Factor de escala en la calibración			5.2	
Control de factor de escala				6.3
Linealidad, ver nota 2		5.3	5.3 (si es aplicable)	
Comportamiento dinámico	5.4			
Estabilidad a corto plazo		5.5		
Estabilidad a largo plazo	5.6		5.6 (si es aplicable)	
Efecto de temperatura ambiente	5.7			
Efecto de proximidad, ver nota 3	5.8 (si es aplicable)		5.8 (si es aplicable)	
Efecto software	5.9 (si es aplicable)			
Ensayo de resistencia en seco en dispositivos de conversión	5.13	5.13 (si es aplicable)		
Ensayo de resistencia a la humedad o contaminación en el dispositivo de conversión	5.13 (si es aplicable)			
Factor de escala en dispositivo de conversión	5.2.2	5.2.2		
Factor de escala de sistema de transmisión distinto de un cable	5.2.2	5.2.2		
Factor de escala de instrumentos de medición	5.2.2	5.2.2		
Responsabilidad	en componentes, por fabricantes		en el sistema por usuario, ver nota 1	
Tasa de repetición recomendada	solo una vez (ensayo tipo y de rutina)		propuesta anual, al menos cada 5 años	según la estabilidad al menos anualmente

Tabla 4.1. Pruebas y ensayos según norma IEC 60060-2.

Consideraciones:

- Sólo se requiere un ensayo de linealidad si la calibración no puede realizarse por comparación en todo el rango de medición asignado.
- Los efectos de proximidad pueden ser causados por efecto corona y los efectos de carga espacial relacionados. La investigación del efecto de proximidad en los ensayos de caracterización sólo es necesaria si los datos en los ensayos tipo no son suficientes.

El factor de escala de un sistema de medición aprobado puede ser comprobado por algunos métodos

como:

- Comparación con un sistema de medición aprobado: se lleva a cabo a partir de una comparación con otro sistema de medición aprobado, logrando la calibración. Si la diferencia entre los dos valores medidos es hasta  $\pm 3\%$ , el factor de escala asignado será tomado como válido, caso contrario se deberá determinar un nuevo factor de escala.
- Control de los factores de escala de los componentes: el factor de escala de cada componente deberá ser chequeado, utilizando un calibrador con una incertidumbre de hasta  $1\%$ .

Respecto al ripple presente, la amplitud del mismo debe ser medida con una incertidumbre expandida menor a  $10\%$  de su amplitud o  $1\%$  del valor medio de la tensión, según cuál sea mayor.

Respecto al comportamiento dinámico, para un estudio más minucioso el sistema de medición se puede someter a una entrada sinusoidal de amplitud conocida a baja tensión, y la salida es medida. Esta medición se repite para un rango de frecuencias entre 0,5 y 7 veces la frecuencia fundamental del ripple, verificando que la diferencia de las tensiones medidas sea de hasta 3 dB.

#### 4.2- Medición con Tensión Alterna

##### 4.2.1- Requisitos para un sistema de medición aprobado

Se deberá medir la tensión de prueba acorde a IEC 60060-1 (valor eficaz) a frecuencia nominal con una incertidumbre expandida  $U_M \leq 3\%$ , que deberá ser evaluada con una probabilidad de cobertura de  $95\%$ . En la Tabla 4.3 se resumen las pruebas para el cálculo de incertidumbres.

Tipo de Prueba	Ensayo tipo	Ensayo de rutina	Ensayo de caracterización	Control de características
Factor de escala en la calibración			5.2	
Control de factor de escala				7.4
Linealidad, ver nota 2		5.3	5.3 (si es aplicable)	
Comportamiento dinámico	5.4/7.3		5.4	
Estabilidad a corto plazo		5.5		
Estabilidad a largo plazo	5.6		5.6 (si es aplicable)	
Efecto de temperatura ambiente	5.7			
Efecto de proximidad, ver nota 3	5.8 (si es aplicable)		5.8 (si es aplicable)	
Efecto software	5.9 (si es aplicable)			
Ensayo de resistencia en seco en dispositivos de conversión	5.13	5.13 (si es aplicable)		
Ensayo de resistencia a la humedad o contaminación en el dispositivo de conversión	5.13 (si es aplicable)			
Factor de escala en dispositivo de conversión	5.2.2	5.2.2		
Factor de escala de sistema de transmisión distinto de un cable	5.2.2	5.2.2		
Factor de escala de instrumentos de medición	5.2.2	5.2.2		
Responsabilidad	en componentes, por fabricantes		en el sistema por usuario, ver nota 1	
Tasa de repetición recomendada	solo una vez (ensayo tipo y de rutina)		propuesta anual, al menos cada 5 años	según la estabilidad al menos anualmente

Tabla 4.2. Tipos de pruebas para cálculo de incertidumbre en CA.

Consideraciones:

- Sólo se requiere un ensayo de linealidad si la calibración no puede realizarse por comparación en todo el rango de medición asignado.
- El estudio del efecto de proximidad en el ensayo de caracterización será solo necesario si la información del ensayo no es suficiente.

La respuesta de amplitud/frecuencia de un sistema de medición, destinado a operar en una sola frecuencia fundamental  $f_{nom}$ , deberá estar dentro de la zona marcada de las curvas en escala logarítmica.

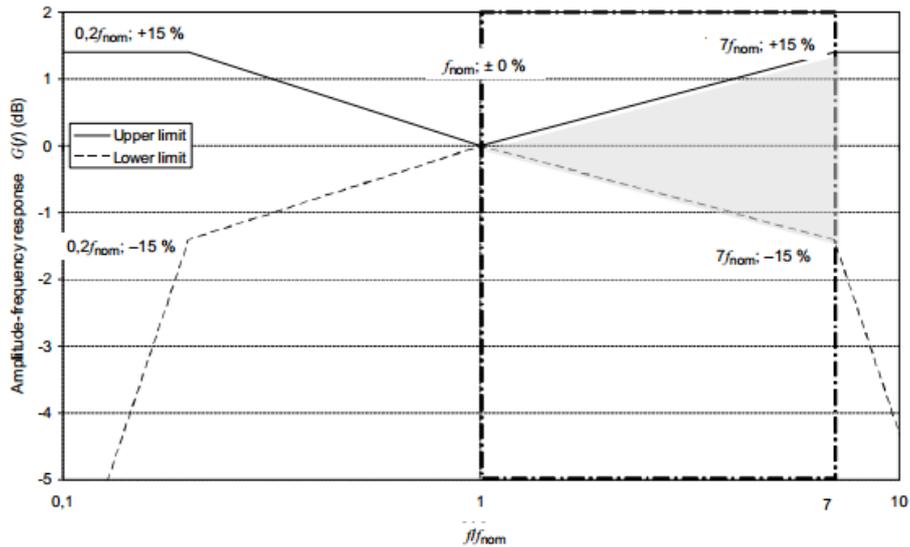


Fig. 4.3. Área marcada para Respuesta en Amplitud-Frecuencia normalizada aceptada de un sistema de medición para frecuencias fundamentales  $f_{nom}$  (a ser ensayada en el rango  $(1...7) f_{nom}$ ).

El ensayo deberá ser probado en el rango de  $f_{nom}$  a  $7f_{nom}$  mediante pruebas o análisis de circuito; la respuesta Amplitud-frecuencia fuera de este rango es solo informativa.

Un sistema de medición podrá también ser aprobado para un rango de frecuencias fundamentales (por ejemplo, 45 Hz a 65 Hz según IEC 60060-1).

La respuesta de amplitud/frecuencia dentro del intervalo de  $f_{nom1}$  a  $7f_{nom2}$ , deberá estar dentro del área marcada de la Fig. 4.2. La respuesta fuera de este rango es solo informativa.

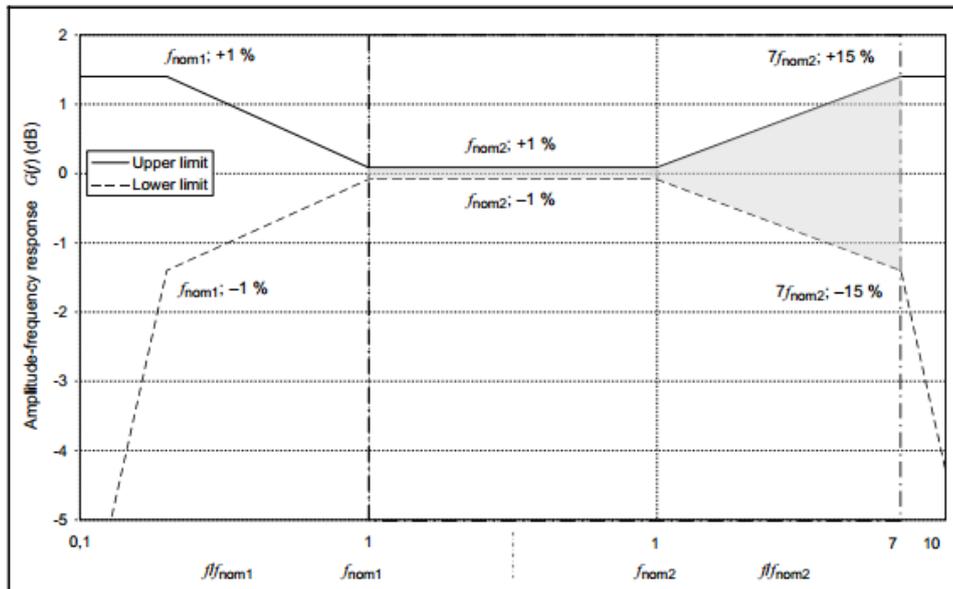


Fig. 4.4. Área marcada para Respuesta en Amplitud-Frecuencia normalizada aceptada de un sistema de medición para un rango de frecuencias fundamentales  $f_{nom1}$  a  $f_{nom2}$  (a ser ensayada en el rango  $f_{nom1}$  a  $7f_{nom2}$ ).

Para el estudio del comportamiento dinámico, el sistema es sometido a una onda senoidal de baja tensión (por lo general) y la salida es medida. Esta medición es repetida dentro del rango 1 a 7 veces la frecuencia de prueba.

#### 4.2.2- Control de rendimiento

El factor de escala de un sistema de medición aprobado puede ser chequeado por uno de los siguientes métodos.

- Comparación con un sistema de medición aprobado: se puede recurrir a otro sistema de medición o mediante un espinterómetro acorde a la IEC-60052. Si la diferencia entre los valores medidos es menor o igual a  $\pm 3\%$ , el factor de escala asignado será tomado como válido. Pero si la diferencia es mayor, se deberá determinar un nuevo factor de escala para la calibración.
- Control del factor de escala de los componentes: el factor de escala de cada componente puede ser chequeado por medio de un calibrador teniendo una incertidumbre expandida menor que  $1\%$ . Si la diferencia de cada factor está entre  $\pm 1\%$ , es tomado como válido. Caso contrario, se determina un nuevo factor de escala.

#### 4.3- Medición de Impulso de Tensión

Entre los requisitos generales están:

- Cálculo de la tensión acorde a IEC 60060-1 para impulsos completos o de cola cortada con una incertidumbre expandida de  $U_{M1} \leq 3\%$ ;
- Medición del valor pico del impulso de frente cortado con una incertidumbre  $U_{M2} \leq 5\%$  ( $0,5 \mu s < T_C < 2 \mu s$ );
- Estimación de los parámetros de tiempo, los cuales definen la forma de onda conforme a la IEC 60060-1 con una incertidumbre expandida de  $U_{M3} \leq 10\%$ ;
- Medición de oscilaciones que pueden ser superpuestas en un impulso para asegurar de que no se exceda los niveles permitidos por la IEC 60060-1.

##### 4.3.1- Contribución a la Incertidumbre

Para el sistema de medición de tensión impulso, la incertidumbre expandida de medición  $U_M$  debe ser evaluada con una probabilidad de cobertura de  $95\%$ . Las pruebas para el cálculo de incertidumbre se resumen en la Tabla 4.5:

Tipo de Prueba	Ensayo tipo	Ensayo de rutina	Ensayo de caracterización	Control de características
Factor de escala/ parámetros temporales en la calibración			5.2 5.11/8.3	
Control de factor de escala				8.5
Linealidad, ver nota 2		5.3	5.3 (si es aplicable)	
Comportamiento dinámico	5.4/8.4		5.4/8.4	8.5
Estabilidad a largo plazo	5.6		5.6 (si es aplicable)	
Efecto de temperatura ambiente	5.7			
Efecto de proximidad, ver nota 3	5.8 (si es aplicable)		5.8 (si es aplicable)	
Efecto software (IEC 61083-2)	5.9 (si es aplicable)			
Ensayo de interferencia			5.12	5.12
Ensayo de resistencia en seco	5.13	5.13 (si es aplicable)		
Ensayo de resistencia a la humedad o contaminación	5.13 (si es aplicable)			
Factor de escala/ parámetros temporales en dispositivo de conversión	5.2.2	5.2.2		
Factor de escala/ parámetros temporales de sistema de transmisión distinto de un cable	5.2.2	5.2.2		
Factor de escala/parámetros temporales de instrumentos de medición	5.2.2 IEC 61083	5.2.2 IEC 61083		
Responsabilidad	en componentes, por fabricantes		en el sistema por usuario, ver nota 1	
Tasa de repetición recomendada	solo una vez (ensayo tipo y de rutina)		propuesta anual, al menos cada 5 años	según la estabilidad al menos anualmente

Tabla 4.5. Ensayos requeridos para sistemas de medición de tensión impulso atmosférico aprobado.

Los instrumentos de medición deberán cumplir con las normas IEC 61083-1 y IEC 61083-2 (requisitos de los instrumentos y software utilizado en ensayos de impulsos de tensión y corriente).

El estado dinámico de un sistema de medición es adecuado para la medición de la tensión pico y los parámetros de tiempo sobre el rango nominal para las formas de onda especificadas:

- El factor de escala es constante dentro de los siguientes límites:
  - Entre  $\pm 1$  % para impulsos completos y de cola cortada.
  - Entre  $\pm 3$  % para impulsos de frente cortado.
- La incertidumbre expandida de los parámetros de tiempo medidos no debe superar el 10 %.

Por lo general un sistema de medición es usado para medir parámetros de tensión, de tiempo y variaciones. Sin embargo, varios sistemas aprobados para la medición de tensión y tiempo no pueden ser aprobados para la medición de oscilaciones. En estos casos, un sistema de medición puede ser aprobado para la medición de estos, mientras un sistema auxiliar es aprobado para la medición de las oscilaciones.

El dispositivo de conversión deberá ser conectado directamente a los terminales del objeto de prueba y no entre la fuente de tensión y el objeto de prueba. Además, el cable del dispositivo solo deberá conducir la corriente al sistema de medición. De esta forma el dispositivo de conversión debe colocarse de modo que el acoplamiento entre el objeto de prueba y el circuito de medición sea insignificante.

Las pruebas resumidas en la tabla son necesarias para la calificación del sistema de medición de tensión impulso y sus componentes como para estimar la incertidumbre de expansión.

#### 4.3.2- Control en sistemas de medición: Método de Referencia y Alternativo

##### 4.3.2.1- Método de referencia (Preferido)

El factor de escala asignado y el comportamiento dinámico del sistema de medición debe ser determinado por comparación con un sistema de medición de referencia.

El ensayo sobre el rango nominal  $t_{min}$  a  $t_{max}$  debe ser probado mediante el uso de impulsos con dos formas de onda diferentes, tales que:

- Para impulsos completos y de cola-cortada:
  - $t_{min}$  es igual al tiempo más corto de frente  $T_{1min}$ .
  - $t_{max}$  es igual al tiempo más largo de frente  $T_{1max}$ .
- Para impulsos de frente cortado:
  - $t_{min}$  es igual al tiempo más corto para cortar  $T_{cmin}$ .
  - $t_{max}$  es igual al tiempo más largo para cortar  $T_{cmax}$ .

##### 4.3.2.2- Método alternativo en base a la respuesta escalón

El factor de escala asignado es determinado por una medición comparativa contra un sistema de medición de referencia, haciendo uso de impulsos completos con tiempo de frente  $T_{1cal}$  entre el rango de  $T_{1min}$  a  $T_{1max}$  y un tiempo a valor medio aproximadamente igual al mayor tiempo a valor medio  $T_{2max}$  para el cual el sistema de medición debe ser aprobado.

La respuesta escalón del sistema de medición es calculada de acuerdo al anexo C de la norma IEC 60060-2, cuyo método es explicado en el desarrollo del trabajo.

Para sistemas de medición de impulsos de frente cortado, los impulsos de calibración deberán tener un tiempo de corte  $T_{ccal}$  dentro de  $T_{cmin}$  a  $T_{cmax}$ .

El nivel de referencia dentro del rango de nivel de referencia para el que se va a aprobar el sistema, no deberá diferir del valor de la respuesta escalón en ese momento, siendo para:

- $T_{1cal}$  por mas de  $\pm 1$  % para impulsos de onda completa y de cola cortada
- $T_{ccal}$  por más de  $\pm 1$  % para impulsos de frente cortado.

La respuesta escalón no se desviará más del 2 % del nivel de referencia en el rango del nivel de referencia  $0,5T_{1min}$  a  $2T_{1max}$ . La respuesta al escalón no se desviará más de un 5 % en el intervalo de  $2T_{1max}$  a  $2T_{2max}$  donde  $T_{2max}$  es el tiempo más largo hasta el valor medio para el que se va a aprobar el sistema

#### 4.3.3- Control del ensayo

Se tiene por un lado la comparación con un sistema de medición aprobado (o de referencia). Siendo empleado para la comparación de valores picos un espinterómetro acorde a la norma IEC 60052.

El factor de escala asignado será tomado como válido si la diferencia entre los valores picos medidos no es mayor a 3 %, caso contrario un nuevo valor deberá ser determinado.

Respecto a los parámetros de tiempo, deberá tener hasta un  $\pm 10\%$  respecto al valor medido por el otro sistema de medición.

Tipo de Prueba	Ensayo tipo	Ensayo de rutina	Ensayo de caracterización	Control de características
Factor de escala/ parámetros temporales en la calibración			5.2 5.11/9.3	
Control de factor de escala				9.5
Linealidad, ver nota 2		5.3	5.3 (si es aplicable)	
Comportamiento dinámico	5.4 ; 9.4		5.4 ; 9.4	9.5
Estabilidad a corto plazo		5.5		
Estabilidad a largo plazo	5.6		5.6 (si es aplicable)	
Efecto de temperatura ambiente	5.7			
Efecto de proximidad, ver nota 3	5.8 (si es aplicable)		5.8 (si es aplicable)	
Efecto software (IEC 61083-2)	5.9 (si es aplicable)			
Ensayo de interferencia			5.12	5.12
Ensayo de resistencia en seco	5.13	5.13 (si es aplicable)		
Ensayo de resistencia a la humedad o contaminación	5.13 (si es aplicable)			
Factor de escala/ parámetros temporales en dispositivo de conversión	5.2.2	5.2.2		
Factor de escala/ parámetros temporales de sistema de transmisión distinto de un cable	5.2.2	5.2.2		
Factor de escala/parámetros temporales de instrumentos de medición	5.2.2 IEC 61083	5.2.2 IEC 61083		
Responsabilidad	en componentes, por fabricantes		en el sistema por usuario, ver nota 1	
Tasa de repetición recomendada	solo una vez (ensayo tipo y de rutina)		propuesta anual, al menos cada 5 años	según la estabilidad al menos anualmente

Tabla 4.6. Ensayos requeridos para sistemas de medición de tensión impulso de maniobra aprobado.

#### 4.4- Sistemas de medición de referencia

##### 4.4.1- Requisitos

##### 4.4.1.1- Tensión Continua

El sistema de medición de referencia deberá permitir la medición de tensión continua con una incertidumbre expandida  $U_M \leq 1\%$  en su rango de uso. La incertidumbre no debe ser expuesta por un factor de ripple mayor a 3%.

##### 4.4.1.2- Tensión Alterna

El sistema de medición de referencia deberá permitir la medición de tensión alterna con una incertidumbre expandida  $U_M \leq 1\%$  en el rango de uso.

##### 4.4.1.3- Tensión de impulso atmosférico completo, cortado y de maniobra

El sistema de medición de referencia deberá permitir tensiones de impulso completo y de cola cortada medidos con una incertidumbre  $U_{M1} \leq 1\%$  para los valores picos de impulsos completos y cola cortada,  $U_{M2} \leq 3\%$  para el valor pico de frente cortado y  $U_{M3} \leq 5\%$  para los parámetros de tiempo en el rango de uso.

##### 4.4.1.4- Calibración de un sistema de medición de referencia

La medición comparativa, en el que el correcto desempeño de un sistema de medición de referencia se demuestra por calibración por medición comparativa a la tensión de prueba contra un sistema de medición de referencia de menor incertidumbre.

Para tensiones impulso, se deberán aplicar diferentes formas de ondas de dos o más tiempos de frente

distintos que cubran el intervalo del rango nominal.

Los requerimientos para un sistema de medición de baja incertidumbre son una incertidumbre expandida  $U_M \leq 0,5 \%$  para medición de tensión y (solo para tensiones impulso)  $U_{M3} \leq 3 \%$  para medición de parámetros de tiempos.

Por otro lado, se encuentra el método alternativo para tensión impulso “Medición del factor de escala y evaluación de los parámetros de respuesta al escalón.

Además, los parámetros de respuesta al escalón evaluados de acuerdo con el Anexo C de la norma IEC 60060-2 deberán cumplir con las recomendaciones de la Tabla 4.7.

Tensión	Recomendaciones para:		
	Impulso atmosférico completo y de cola cortada	Impulso atmosférico de frente cortado	Impulso de maniobra
Tiempo de respuesta experimental $T_N$	$\leq 15$ ns	$\leq 10$ ns	-
Tiempo de ajuste $t_s$	$\leq 200$ ns	$\leq 150$ ns	$\leq 10$ ns
Tiempo de respuesta parcial $t_\alpha$	$\leq 30$ ns	$\leq 20$ ns	-

Tabla 4.7. Parámetros de respuestas recomendados para sistemas de medición de referencia de tensiones impulso

#### 4.4.2- Intervalo entre calibraciones sucesivas de sistemas de medición de referencia

El intervalo entre calibraciones se determina de acuerdo con las regulaciones nacionales. Si no existe una regulación, se recomienda que las calibraciones se repitan al menos una vez cada cinco años, siempre y cuando el sistema de medición de referencia se encuentre estabilizado.

#### 4.4.3- Uso de sistemas de medición de referencia

Se recomienda que los sistemas de medición de referencia deban utilizarse solo para mediciones comparativas en los ensayos de calibración. Sin embargo, estos sistemas pueden ser utilizados para otras mediciones, si se demuestra que tal uso no afecta a su rendimiento. Además, se acepta la sustitución de un instrumento de medición equivalente, que satisfaga la norma correspondiente de la IEC.

## V - Calibración de divisor resistivo ante tensión continua

### 5.1- Calculo de factor de escala por relación de resistencias

El divisor resistivo en estudio es el de la Fig. 5.1 y para su estudio se respetará la norma IEC 60060-2:



*Fig. 5.1. Divisor Resistivo a ensayar.*

Para el estudio del divisor se utilizó un multímetro de alta exactitud de 8 ½ dígitos, modelo HP3458A Fig. 5.2.

El multímetro digital (DMM) HP3458A, es un multímetro de Agilent Technologies. Permite seleccionar una velocidad de lectura de 100.000 lecturas por segundo para el rendimiento máximo de la prueba. Logra los más altos niveles de exactitud con hasta 8,5 dígitos de resolución de medición y 0,1 partes por millón de exactitud.

Características:

- 8 ½ dígitos con resolución de 10 nV de CC.
- Máximo 1000 V y 1 A en CC y CA.
- Exactitud  $V_{CC}$  de 8 ppm a 1 año.
- 100.000 lecturas por segundo a 4 ½ dígitos.
- Mediciones en dos y cuatro hilos.
- Exactitud CC 0,6 ppm en 24 hs.



Fig. 5.2. Medición de las resistencias del divisor resistivo.

A fin de corroborar previamente que las resistencias constituyentes estén en condiciones se realizó una medición de los mismos, los resultados fueron los de la Tabla 1:

Muestra	R [MΩ]								
1	1.00006099	31	1.00038953	61	0.99980882	91	1.00004679	121	1.00002177
2	0.95347494	32	1.00008328	62	0.99982234	92	1.00007708	122	1.00043779
3	1.00014488	33	0.9997798	63	0.99963698	93	1.00027331	123	1.00020527
4	1.00023388	34	0.9995323	64	1.00011141	94	1.00011835	124	1.00025662
5	1.000004	35	0.99976786	65	0.99985092	95	1.00016817	125	1.00014179
6	1.00021107	36	0.99969667	66	0.99995382	96	1.00035103	126	0.9998484
7	1.00026018	37	1.00010838	67	0.99984117	97	0.99963234	127	1.0001879
8	1.00047898	38	0.99990765	68	0.99986367	98	1.00032571	128	1.00026442
9	1.00013523	39	1.00036106	69	1.00004909	99	0.99994881	129	1.00025837
10	1.00032624	40	1.00006965	70	1.00017962	100	1.00076301	130	1.00012311
11	1.00018634	41	1.00026907	71	0.99940638	101	1.00019251	131	1.00032778
12	1.00011733	42	1.00005176	72	1.00004541	102	1.00003849	132	0.99989694
13	1.00028162	43	1.00015262	73	1.00004672	103	0.99988154	133	1.00034077
14	1.00034014	44	0.99995121	74	1.00015371	104	0.99977479	134	1.00017046
15	1.00025982	45	1.00023859	75	0.99541304	105	1.00014292	135	0.99995654
16	1.0002952	46	1.00024804	76	1.00040802	106	1.0001357	136	1.00001607
17	1.00015681	47	0.99998085	77	1.0000958	107	0.99985683	137	1.00018157
18	1.00017217	48	1.00038159	78	1.00017442	108	0.99988987	138	1.00020453
19	1.00038056	49	1.00044175	79	0.99974165	109	1.00001732	139	1.00000725
20	1.00024351	50	1.00020893	80	1.0002125	110	0.99999909	140	0.9996859
21	1.00044998	51	1.00029779	81	1.00043302	111	0.99985187	141	1.00050743
22	1.00031983	52	0.99941728	82	0.9998915	112	1.00047703	142	0.9999757
23	1.00015007	53	0.99996314	83	0.9997692	113	1.00015568	143	1.00030558
24	1.0000655	54	1.0002426	84	1.00011167	114	0.99983708	144	0.99912609
25	1.00024529	55	1.00022898	85	1.00014478	115	1.00023042	145	1.00017903
26	1.00005089	56	1.0000094	86	0.99985493	116	0.99986026	146	1.00030756
27	1.00061989	57	0.99994089	87	0.99989686	117	1.00015779	147	0.9998268
28	1.00029176	58	1.00013852	88	0.9996916	118	1.00011474	148	1.00017451
29	1.00024806	59	0.99990748	89	1.000071	119	0.99920274	149	1.00006256
30	1.00027434	60	0.99908635	90	1.00005281	120	1.00032841	150	1.00006256

Tabla 5.1. Medición de Resistencias.

Luego se procedió a realizar mediciones de bloques de a ocho resistencias con el mismo multímetro sobre el divisor obteniéndose la Tabla 5.2:

Trabajo Profesional de Ingeniería Electricista (65.99) – Brian Miranda

	<b>R8Ri</b>		<b>R8Ri</b>		<b>R8Ri</b>		<b>R8Ri</b>
	7.95287		7.954608		7.96123		8.212348
<b>Rprom8</b>	7.954964	<b>Rprom8</b>	7.953354	<b>Rprom8</b>	7.95887	<b>Rprom8</b>	8.217218
7.9555612	7.95509	7.954342	7.954689	7.9597048	7.958755	8.1785354	8.128726
	7.957188		7.954901		7.959584		8.171554
	7.957694		7.954158		7.960085		8.162831

	<b>R8Ri</b>		<b>R8Ri</b>		<b>R8Ri</b>		<b>R8Ri</b>
	7.879902		7.953983		7.95327		7.94843
<b>Rprom8</b>	7.881541	<b>Rprom8</b>	7.952673	<b>Rprom8</b>	7.953334	<b>Rprom8</b>	7.946191
7.8814056	7.881057	7.9532352	7.954795	7.9535084	7.953799	7.946768	7.946368
	7.881974		7.955007		7.95357		7.946292
	7.882554		7.949718		7.953569		7.946559

	<b>R8Ri</b>		<b>R8Ri</b>		<b>R8Ri</b>		<b>R8Ri</b>
	7.941848		7.940926		7.933813		7.93551
<b>Rprom8</b>	7.942427	<b>Rprom8</b>	7.939602	<b>Rprom8</b>	7.933071	<b>Rprom8</b>	7.93339
7.9424638	7.942334	7.9403612	7.940064	7.936104	7.938507	7.9332842	7.932838
	7.94281		7.940676		7.938142		7.932868
	7.9429		7.940538		7.936987		7.931815

	<b>R8Ri</b>		<b>R8Ri</b>		<b>R8Ri</b>		<b>R8Ri</b>
	7.935843		7.935434		7.939118		7.934821
<b>Rprom8</b>	7.937613	<b>Rprom8</b>	7.935462	<b>Rprom8</b>	7.938639	<b>Rprom8</b>	7.93342
7.9366164	7.936439	7.9352362	7.935039	7.9378756	7.937597	7.93381	7.932913
	7.936636		7.934903		7.936896		7.933574
	7.936551		7.935343		7.937128		7.934322

	<b>R8Ri</b>		<b>R8Ri</b>		<b>R6Ri</b>
	7.935666		7.964121		5.970624
<b>Rprom8</b>	7.927457	<b>Rprom8</b>	7.963937	<b>Rprom6</b>	5.970034
7.9297014	7.927601	7.9641554	7.964166	5.9692536	5.968891
	7.929108		7.96427		5.9686
	7.928675		7.964283		5.968119

Tabla 5.2. Mediciones de resistencias agrupadas.



Fig. 5.3. Medición de una serie de 8 resistencias

Por último se llevó a cabo la medición de la resistencia en alta y baja tensión,  $R_{AT}$  y  $R_{BT}$  respectivamente, obteniéndose los valores de la Tabla 5.3:

Medición	$R_{AT}$ [M $\Omega$ ]	$R_{BT}$ [k $\Omega$ ]
1	150,2909	19,99888
2	150,3119	19,99888
3	150,2772	19,99888
4	150,2909	19,99888
5	150,2952	19,99888
6	150,2885	19,99888
7	150,3034	19,99888
8	150,2975	19,99888
9	150,3114	19,99888
10	150,3041	19,99888
<b>Promedio</b>	150,2971	19,99888
<b>Factor de escala</b>	<b>7516,275855</b>	

Tabla 5.3. Tabla de medición de F.

El factor de escala se calculó mediante la relación de resistencias:

$$F = \frac{R_{AT} + R_{BT}}{R_{BT}} = \frac{(150297,1 + 19,99888)k\Omega}{19,99888 k\Omega} = 7516,275855$$

Este valor de factor de escala será tomado como primera aproximación.

Se realizó también las medidas con un medidor de alta resistencia HP4339A, de las siguientes características:

- Mide resistencia, resistividad volumétrica y superficial, y corriente.
- Tensión de ensayo de 0,1 a 1000  $V_{cc}$  con exactitud de:
  - $\pm(0,16\% + 100mV)$  para  $V_{cc} \leq 200V$
  - $\pm(0,16\% + 500mV)$  para  $V_{cc} > 200V$
- Medición de resistencia en el rango de  $1 \times 10^3 - 1.6 \times 10^{16} \Omega$ .
- Exactitud base de 0.6 %.
- Medición de alta velocidad, 10 ms.
- Función de chequeo de contacto de alta velocidad, 2 ms.
- Comparador incorporado.

Para la medición del factor de escala F se realizaron previamente los ajustes de:

- Autocalibración, calibra el error de compensación del instrumento debido a la variación de temperatura ambiente.

- Circuito abierto, cancela errores de medición causados por capacidades parasitas en los cables y resistencia residual de los accesorios utilizados.

Resultando:

<b>R<sub>alta</sub></b>	150,1 [MΩ]
<b>R<sub>baja</sub></b>	19,998 [kΩ]
<b>F</b>	7506,750575
<b>Error %</b>	0,12672872

Tabla 5.4. Resultado de medición de cálculo de F.



Fig. 5.4. Medición de resistencia de alta.

Se tiene una mínima variación del factor de escala de 0,127 % respecto al calculado anteriormente

## 5.2- Calculo de factor de escala por relación de tensiones

Se utilizó el mismo equipo anterior pero como generador de tensión continua de 1 kV y se midió la caída en baja tensión con un multímetro Fluke 8854A, resultando:

Muestras	U <sub>BT</sub>
1	0,1333355
2	0,1333362
3	0,1333379
4	0,1333354
5	0,1333378
6	0,1333375
7	0,1333391
8	0,1333391
9	0,1333390
10	0,1333403
<b>U<sub>BTprom</sub></b>	<b>0,1333378</b>

Tabla 5.5. Medición de tensión en la rama de baja tensión.

Siendo:

$$F = \frac{U_{AT}}{U_{BT}} = \frac{1000 V}{0,1333378} = 7499,7499$$

Que representa un error porcentual respecto al de referencia por relación de resistencias de 0,22 %.

Para una medición más exacta se utilizó el multímetro HP3458 para medir la tensión en baja, un multímetro de precisión Fluke 8854A, de 6,5 dígitos para la medición de la tensión en alta y un generador de tensión continua Keithley, modelo 248 que alcanza los 5 kV con una corriente de salida máxima de 5 mA con un ripple menor a 0,002%.

Características del generador Keithley:

**VOLTAGE RANGE: 0 TO ±5000V DC<sup>1</sup>**

Output Voltage	Maximum Output Current	Conditions
0 to ± 5000 V DC	5.000 mA DC	NO FILTER
0 to ± 3000 V DC	5.000 mA DC	FILTER 1
0 to ± 5000 V DC	3.000 mA DC	FILTER 2

**VOLTAGE SET ACCURACY:** ±(0.01% of setting + 2.5V).  
**VOLTAGE DISPLAY ACCURACY:** Voltage Set Accuracy ±1V, typical (±2V, max.).  
**VOLTAGE RESOLUTION:** 1V (set and display).  
**VOLTAGE RESETTABILITY:** 1V.  
**VOLTAGE LIMIT RANGE:** 0 to 100% of full scale.  
**VOLTAGE REGULATION:**<sup>2</sup>  
 Line: 0.001% for ±10% line voltage change.  
 Load: 0.005% for 100% load change, typical.  
**OUTPUT RIPPLE (10Hz–100kHz):**<sup>3</sup>  
 0.002% of full scale, Vrms, max. NO FILTER  
 1.0mV rms @ 1kV FILTER 1 or FILTER 2  
 2.0mV rms @ 3kV FILTER 1 or FILTER 2  
 3.0mV Rms @ 5kV Filter 2

Voltage	Current Limit and Trip Range	Filter
0 V to 1.5 kV	0.4 mA to 5.25 mA	NO FILTER or FILTER 1
	0.4 mA to 3.25 mA	FILTER 2
1.5 kV to 5.0 kV	0.5 mA to 5.25 mA	NO FILTER or FILTER 1
	0.5 mA to 3.25 mA	FILTER 2

**CURRENT LIMIT ACCURACY:** 0.01% + 2.5µA.  
**CURRENT RESOLUTION:** 1µA.  
**CURRENT DISPLAY ACCURACY:** Current Set Accuracy ±1µA, typ. (±2µA, max.).  
**STABILITY:** ±0.02% per hour typical for ambient temperature within 2°C.  
**TEMPERATURE DRIFT:** 50ppm/°C, 0° to 50°C, typical.  
**PROTECTION:** Arc and short circuit protected; programmable voltage and current limits and current trip.  
**SETTLING TIME:**  
 From 0 to Programmed Voltage: To within 99.9% of final value within 3s.  
 Discharge Time from Programmed Voltage to Within 50V of Zero: Within 6s for no load (faster with load, slower with filters on).

**MONITOR OUTPUTS:**

**Output Scale:** 0 to +10V for 0 to full range output regardless of polarity.  
**Current Rating:** 10mA maximum.  
**Output Impedance:** <1Ω.  
**Accuracy:** ±0.2% of full scale.  
**Update Rate:** 8Hz.

**EXTERNAL VOLTAGE SET:**

**Input Scale:** 0 to +10V for 0 to full range output regardless of polarity.  
**Input Impedance:** 1MΩ.  
**Accuracy:** ±0.2% of full scale.  
**Update Rate:** 16Hz.  
**Output Slew Rate:** <0.3s for 0 to full range under full load.

Fig. 5.5. Datos del generador de tensión Keithley.

Entre las características básicas del multímetro Fluke 8854A están:

- 6,5 dígitos de resolución.
- Doble display.
- Rango de corriente de 100 µA a 10 A con hasta 100 pA de resolución.
- Rango de 10 Ω a 1 GΩ con hasta 10 µΩ de resolución.
- Técnica de medición en 2 y 4 hilos.
- Mide frecuencias y periodos.
- Admite una entrada de hasta 1 kV.

Las especificaciones de exactitud son válidas para el modo de 6½ dígitos después de al menos un calentamiento de 1 hora con el cero automático activado:

Especificaciones a tensión CC:

**Especificaciones de voltaje de CC**

Entrada máxima .....	1000 V en cualquier rango
Rechazo del modo común .....	140 dB a 50 o 60 Hz $\pm$ 0,1 % (desequilibrio de 1 k $\Omega$ )
Rechazo del modo normal .....	60 dB para NPLC de 1 o más con filtro de CC desactivado y frecuencia de la línea de alimentación de $\pm$ 0,1 % 100 dB para NPLC de 1 o más con filtro de CC activado y frecuencia de la línea de alimentación de $\pm$ 0,1 %
Método de medición .....	A/D multirampa
Linealidad A/D .....	0,0002 % de la medición + 0,0001 % del rango
Corriente de polarización de entrada .....	< 30 pA a 25 °C
Operación con cero automático desactivado .....	Después del calentamiento del instrumento a la temperatura de calibración de $\pm$ 1 °C y menos de 10 minutos, agregue el error: 0,0002 % de error adicional del rango + 5 $\mu$ V.
Consideraciones de estabilización .....	Los tiempos de estabilización de la medición son afectados por la impedancia de la fuente, las características dieléctricas del cable y los cambios en la señal de entrada.

**Características de la entrada**

Rango	Escala completa (6½ dígitos)	Resolución			Impedancia de entrada
		4½ dígitos	5½ dígitos	6½ dígitos	
100 mV	100,0000 mV	10 $\mu$ V	1 $\mu$ V	100 nV	10 M $\Omega$ o > 10 G $\Omega$ <sup>[1]</sup>
1 V	1,000000 V	100 $\mu$ V	10 $\mu$ V	1 $\mu$ V	10 M $\Omega$ o > 10 G $\Omega$ <sup>[1]</sup>
10 V	10,00000 V	1 mV	100 $\mu$ V	10 $\mu$ V	10 M $\Omega$ o > 10 G $\Omega$ <sup>[1]</sup>
100 V	100,0000 V	10 mV	1 mV	100 $\mu$ V	10 M $\Omega$ $\pm$ 1 %
1000 V	1000,000 V	100 mV	10 mV	1 mV	10 M $\Omega$ $\pm$ 1 %

[1] Las entradas  $\pm$  14 V se pizcan típicamente por medio de 200 k $\Omega$ . 10 M $\Omega$  es la impedancia predeterminada de la entrada.

Fig. 5.6. Datos del multímetro Fluke 8854A.

Con estos equipos se llevó a cabo una serie de mediciones (Tabla 5.6) en la que se generó 200 V, 1kV y 5 kV con el generador de tensión continua Keithley, y se midió con el multímetro Fluke la tensión en alta, a fin de asegurarnos su verdadero valor, mientras que con el multímetro HP 3458 se medía la tensión en baja (Fig. 5.7). Para las mediciones siguientes se utilizará este último para la rama de BT.

Los resultados de los ensayos realizados a los distintos niveles de tensión se representan en las siguientes tablas:

- Con generador a 200 V<sub>cc</sub>:

V <sub>AT</sub> [V]	V <sub>BT</sub> [mV]	F
200,601	26,75078	7498,88414
200,604	26,75166	7498,74961
200,602	26,75147	7498,72811
200,607	26,75146	7498,91782
200,216	26,75606	7483,01506
200,204	26,75608	7482,56097
200,602	26,75152	7498,71409
200,608	26,75246	7498,67489
200,608	26,75246	7498,67489
200,602	26,75130	7498,77576
	<b>F<sub>prom</sub></b>	7495,56953
	<b>Desvío F (s)</b>	6,73777984
	<b>I<sub>A</sub> %</b>	0,02842577

- Con el generador a 1 kV<sub>cc</sub>:

$V_{AT}$ [V]	$V_{BT}$ [V]	F
1000,325	0,13339617	7498,90345
1000,326	0,13339654	7498,89015
1000,331	0,13339622	7498,94562
1000,331	0,13339702	7498,90065
1000,327	0,13339738	7498,85043
1000,328	0,13339605	7498,93269
1000,333	0,13339719	7498,90609
1000,329	0,13339724	7498,87329
1000,332	0,13339683	7498,91883
1000,331	0,13339728	7498,88603
	<b>F<sub>prom</sub></b>	7498,90072
	<b>Desvío F (s)</b>	0,0279117
	<b>I<sub>A</sub> %</b>	0,0001177

- Con generador a 5 kV<sub>cc</sub>:

$V_{AT}$ [V]	$V_{BT}$ [V]	F
5000	0,66788631	7486,30407
5000	0,66788916	7486,27212
5001	0,66789396	7487,71556
5000	0,66789901	7486,16172
5001	0,66791784	7487,44786
5000	0,66793444	7485,76462
5001	0,66794941	7487,09397
5000	0,66795960	7485,48265
5001	0,66797379	7486,82070
5001	0,66798837	7486,65729
	<b>F<sub>prom</sub></b>	7486,57206
	<b>Desvío F (s)</b>	0,71375577
	<b>I<sub>A</sub> %</b>	0,00301486

Tabla 5.6. Medición de tensiones y F a distintos niveles de tensión.



(a)



(b)

Fig. 5.7. Equipos utilizados en ensayo del divisor resistivo:

(a) Generador de tensión continua. (b) Conexiones de las pinzas del generador y del medidor



Fig. 5.8. Disposición de los equipos para las mediciones.

Respecto al factor de escala por relación de resistencias se obtuvieron las incertidumbres de la Tabla 5.7:

$V_{AT}$	F	error %	$u_A$ %	$u_A$
5000*	7486,57206*	-0,395193	0,00301	0,22570939
1000	7498,90072	-0,231167	0,00012	0,00882645
200	7495,56953	-0,275486	0,02843	0,02842577

Tabla 5.7. Valores del factor de escala e incertidumbres a diferentes tensiones.

Se observa una mínima variación creciente al elevar la tensión en alta, pero se debe notar que a tensión de 5 kV no se pudo medir con el Fluke ya que se excede en su rango de uso como se puede apreciar en su especificación, debiendo aceptar lo indicado por el generador como la tensión de salida.

Se adoptará el factor de escala obtenido a 1 kV como de referencia.

### 5.3- Requisitos del sistema

La medición de la tensión de ensayo se debe realizar con una incertidumbre expandida menor al 1% para un sistema de medición de referencia con una probabilidad de cobertura de 95%.

Respecto al comportamiento dinámico, la norma establece como requisito que la constante de tiempo del sistema de medición no sea superior a 0,25 s para la medición de tensiones continuas que suben o bajan con una tasa del orden del 1% del valor de la tensión de prueba. En general, los instrumentos utilizados para la medición del valor de la tensión de prueba no son muy afectados por el ripple presente. Además, la norma establece que la constante de tiempo del sistema de medición deberá ser inferior a un tercio del tiempo de subida del transitorio. Esto se corrobora con un osciloscopio, pero si considero  $C_E$ :

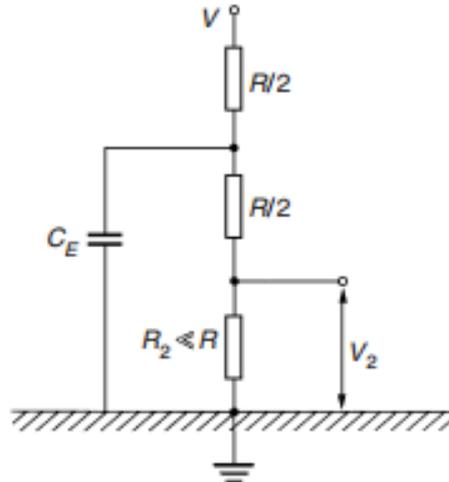


Fig. 5.9. Circuito equivalente del divisor resistivo

El circuito equivalente del divisor resistivo es el de la Fig. 5.9, en la que las capacidades en paralelo a las resistencias y la inductancia en serie con las resistencias se desprecian.

Una aproximación de la constante de tiempo del divisor es:

$$T = \frac{RC_E}{4}$$

Siendo  $C_E$  la capacitancia parasita a tierra equivalente del divisor simplificado

Dado que la capacitancia parasita está asociada a la geometría del divisor y a la construcción de la rama de alta tensión, la misma se puede estimar en función de la geometría del divisor y de las características del medio de propagación del campo eléctrico.

$$C_E = 2\pi\epsilon \frac{(H_1 + H_2 + H_3)}{3} [F]$$

Donde:

$H_1$ : Altura del divisor en metros (1 m);

$H_2$ : Ancho del divisor en metros (0,31 m);

$H_3$ : Largo del divisor en metros (0,31 m);

$\epsilon$ : Permitividad del medio ( $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$  F/m)

Resultando:

$$C_E = 2\pi\epsilon \frac{(H_1 + H_2 + H_3)}{3} [F] = 30,0443 \text{ pF}$$

Obteniéndose una constante de tiempo:

$$T = \frac{RC_E}{4} = 0,00113 \text{ s}$$

Siendo que para una curva de respuesta exponencial de un circuito RC, se tiene que para  $4\tau$  la respuesta alcanza 98,2 % del valor final, y que para  $5\tau$ , 99,3 %, una estimación razonable del tiempo de

respuesta es la longitud de tiempo que necesita la curva de respuesta para alcanzar la línea de 2 % del valor final o cuatro constantes de tiempo.

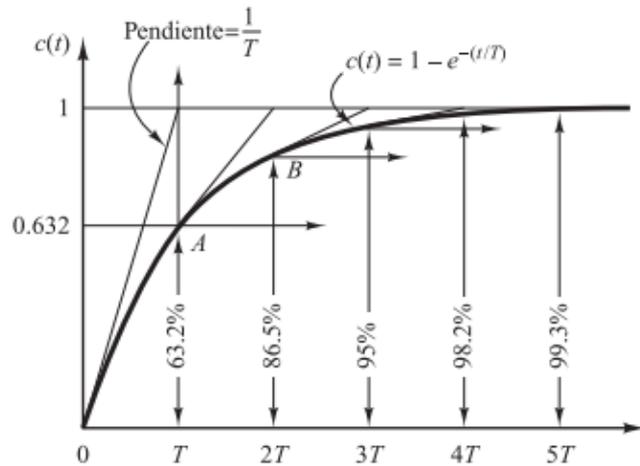


Fig. 5.10. Curva de respuesta exponencial de un circuito RC.

El tiempo de subida de la respuesta en la rama de baja tensión sería de 4,5 ms, cumpliéndose lo estipulado por la norma. Se obtuvo un valor similar con osciloscopio (al trabajar con frecuencias toma relevancia  $C_E$ ).

Otra aproximación más simple es la de asumir una capacidad parasita equivalente de:

$$C_E \approx \frac{2}{3}(10 - 15) \frac{H}{[m]} [pF]$$

Siendo  $H$  la altura del divisor en metros, se obtiene un tiempo de respuesta de 1,5 ms.

#### 5.4- Incertidumbre Tipo A

##### 5.4.1- Incertidumbre Tipo A del factor de escala correspondiente a la relación de resistencias

Para obtener la misma se utilizará los valores registrados en el cálculo del factor de escala de referencia, la misma se aprecia en la Tabla 5.8:

Medición	$R_{AT}$ [ $M\Omega$ ]	$R_{BT}$ [ $k\Omega$ ]	F
1	150,2909	19,99888	7515,96584
2	150,3119	19,99888	7517,0159
3	150,2772	19,99888	7515,2808
4	150,2909	19,99888	7515,96584
5	150,2952	19,99888	7516,18085
6	150,2885	19,99888	7515,84583
7	150,3034	19,99888	7516,59087
8	150,2975	19,99888	7516,29586
9	150,3114	19,99888	7516,9909
10	150,3041	19,99888	7516,62588
$F_{prom}$		7516,27586	
Desvío F (S)		0,54339	

Tabla 5.8. Valores de resistencias y factores de escala.

La incertidumbre tipo A porcentual asociada será:

$$u_A\% = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{0,54339 \cdot 100}{\sqrt{10} \cdot 7516,2759} \cong 0,00229 \%$$

**5.4.2- Incertidumbre Tipo A del factor de escala correspondiente a relación de tensiones hasta 5 kV de CC**

Los cálculos fueron realizados a partir de los valores de las tablas de la sección anterior, resultando:

V <sub>AT</sub>	F	error %F <sub>relres</sub>	u <sub>A</sub> %	u <sub>A</sub>
5000*	7486,57206	-0,395193	0,00301	0,22570939
1000	7498,90072	-0,231167	0,00012	0,00882645

Tabla 5.9. Factores de escala e incertidumbre hasta 5 kV.

Hasta el momento no se puede calcular el factor de escala a tensiones superiores de 1kV, adoptándose a este como el de referencia.

**5.4.3- Incertidumbre Tipo A del factor de escala correspondiente a relación de tensiones para hasta 125 kV**

Para ello se utilizó un rectificador de alta tensión Haefely WO 740003 150 kV-10 mA (ver en Anexo).

Para su cálculo se precisaría poder medir la tensión en alta con un medidor de referencia y verificar si la misma es la que brinda el generador. Se realizaron cálculos de incertidumbre tipo B como de estabilidad a corto y largo plazo y de linealidad para estos niveles de tensión.

Una serie de ensayos a distintos niveles de tensión entrego los valores de la Tabla 5.10:

U <sub>ATgen</sub> [kV]	U <sub>BT</sub> [V]	F	Desvío leído
10	1,361712	7343,69676	1,02799 mV
20	2,693723	7424,66839	1,45009 mV
30	4,081696	7349,88593	992,402 uV
40	5,401289	7405,63965	1,31418 mV
50	6,807268	7345,09057	664,727 uV
60	8,103183	7404,49771	289,733 uV
70	9,382582	7460,63290	523,219 uV
80	10,58379	7558,72896	216,043 uV
90	11,94095	7537,08876	88,7460 uV
100	13,19620	7577,93910	232,018 uV
110	14,49917	7586,64117	349,656 uV
120	15,79488	7597,39865	1,59958 mV
125	16,49468	7578,20097	1,32047 mV
<b>F<sub>prom</sub></b>	<b>7474,62381</b>		

Tabla 5.10. Factores de escala a distintos niveles de tensión y desvío de la medición de tensión en la rama de BT.

Como se refleja de los resultados se aprecia un factor de escala de valor medio 7474,62381 que fluctúa, considerando que se aceptó la hipótesis de que el generador funciona en forma estable y aporta lo que marca el índice analógico, además habría que considerar si las resistencias son aptas para las tensiones de trabajo.

De todas formas, ayuda a estimar el valor del factor de escala para este rango de tensiones y se observa un error respecto al adoptado como de referencia de 0,33 % y respecto a los valores máximo y mínimo de los factores obtenidos se obtuvo un error de 1,32 % y 2,07 % respectivamente.

Para el análisis de la incertidumbre tipo A se deberá utilizar la máxima desviación obtenida al calcular el factor de escala ( $U_{AT}/U_{BT}$ ) para cada nivel de tensión a partir de 10 muestras tomadas para cada caso. Debido a la variación observada del factor, se procederá con los cálculos de las otras incertidumbres.

### 5.5- Incertidumbres Tipo B

El efecto de la no linealidad del factor de escala para las relaciones de tensión hasta 1 kV se obtiene de ecuación 2.10:

$$u_{B0} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{g=1} \left| \frac{F_g}{F} - 1 \right|$$

De esta forma utilizando los valores obtenidos a 0,2 y 1 kV:

$$u_{B0} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{F_g}{F} - 1 \right| = 0,00012826$$

Que representa una incertidumbre porcentual  $u_{B0}\%$ , adoptando el factor de escala obtenido a 1 kV como de referencia, de 0,01283 %.

#### 5.5.1- Ensayo de linealidad

- **Ensayo de linealidad para tensiones hasta 5 kV**

Se realizaron los ensayos correspondientes para diferentes tensiones: 1 kV, 2,333 kV, 3,667 kV y 5 kV y se calculó su incertidumbre tipo B asociada y el error que conlleva con el factor de escala adoptado como de referencia ( $F$ ).

Y siendo la incertidumbre tipo B debido a la linealidad del equipo igual a:

$$u_{BLin} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max \left| \frac{F_g}{F_m} - 1 \right|$$

En el que  $F_g$  representa las relaciones de tensión en nuestro rango de ensayos de linealidad, o los factores de escala fuera de nuestro rango de medición y  $F_m$  el promedio de las  $F_g$ .

Generador (U <sub>AT</sub> )		U <sub>BT</sub>	F
Corriente [mA]	Tensión [V]		
0.005	1000	0.13368755	7480.128105
0.005	1000	0.1336947	7479.728067
0.005	1000	0.13369748	7479.572539
0.005	1000	0.13370583	7479.105436
0.005	1000	0.13371078	7478.828558
0.005	1000	0.13371294	7478.707745
0.005	1000	0.13371396	7478.650696
0.005	1000	0.13371550	7478.564564
0.005	1000	0.13371797	7478.426422
0.005	1000	0.13372050	7478.28493
<b>Fprom</b>	7478.999706		
<b>Desvio</b>	0.615391298	<b>Error % respecto</b>	0.495342099
<b>Ia F %</b>	0.002602003	<b>a Referencia</b>	

Generador (U <sub>AT</sub> )		U <sub>BT</sub>	F
Corriente [mA]	Tensión [V]		
0.014	2332	0.31151543	7485.98553
0.014	2332	0.3115169	7485.9502
0.014	2332	0.31151819	7485.9192
0.014	2332	0.31151851	7485.91151
0.014	2332	0.31151977	7485.88123
0.014	2332	0.31152014	7485.87234
0.014	2332	0.31152176	7485.83341
0.014	2332	0.31152204	7485.82669
0.014	2332	0.31152296	7485.80458
0.014	2332	0.31152386	7485.78295
<b>Fprom</b>	7485.87676		
<b>Desvio</b>	0.06554792	<b>Error % respecto</b>	0.403846
<b>Ia F %</b>	0.0002769	<b>a Referencia</b>	

Generador (U <sub>AT</sub> )		U <sub>BT</sub>	F
Corriente [mA]	Tensión [V]		
0.022	3667	0.48936003	7493.460387
0.022	3667	0.48936185	7493.432518
0.022	3667	0.48936274	7493.41889
0.022	3667	0.48936363	7493.405262
0.022	3667	0.48936394	7493.400515
0.022	3667	0.48936488	7493.386121
0.022	3667	0.48936613	7493.366981
0.022	3667	0.48936815	7493.33605
0.022	3667	0.48936942	7493.316603
0.022	3667	0.48937020	7493.30466
<b>F<sub>prom</sub></b>	7493.382799		
<b>Desvío</b>	0.051150478	<b>Error % respecto</b>	0.303981657
<b>I<sub>A</sub> F %</b>	0.00021586	<b>a Referencia</b>	

Generador (U <sub>AT</sub> )		U <sub>BT</sub>	F
Corriente [mA]	Tensión [V]		
0.032	5000	0.66709927	7495.13637
0.032	5000	0.66711206	7494.99267
0.032	5000	0.66712113	7494.89077
0.032	5000	0.66712671	7494.82808
0.032	5000	0.66712969	7494.7946
0.032	5000	0.66713302	7494.75719
0.032	5000	0.66713751	7494.70675
0.032	5000	0.66714102	7494.66732
0.032	5000	0.66714740	7494.59565
0.032	5000	0.66715295	7494.5333
<b>F<sub>prom</sub></b>	7494.79027		
<b>Desvío</b>	0.1823906	<b>Error % respecto</b>	0.28525589
<b>I<sub>A</sub> F %</b>	0.00076956	<b>a Referencia</b>	

Tabla 5.11. Mediciones a distintos niveles de tensión y sus factores de escala correspondientes.

Se obtiene el valor máximo de incertidumbre tipo B ante una tensión en alta de 1 kV:

$$u_{BLin} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{7478,999706}{7488,262385} - 1 \right| = 0,000714$$

Resultando una incertidumbre tipo B debido a la linealidad del sistema de 0,0715 % respecto al  $F_m$  calculado, o en valor absoluto de 5,36.

- **Ensayo de linealidad para tensiones hasta 125 kV**

Para el estudio de la incertidumbre de linealidad, se adopta como valor de la tensión en alta lo que indica el generador. Para su cálculo se utiliza la Tabla 5.12:

U <sub>ATgen</sub> [kV]	U <sub>BT</sub> [V]	F
5	0,5639589	8865,89431
25	3,273095	7638,03067
45	6,07413	7408,46837
65	8,698736	7472,35001
85	11,25982	7548,96615
105	13,82023	7597,55807
125	16,39876	7622,52756
	<b>F<sub>prom</sub></b>	<b>7736,25645</b>

Tabla 5.12. Factores de escala en rango fuera del nivel referencia.

$$u_{BLin} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{8865,89431}{7736,25645} - 1 \right| = 0,08430392$$

Que representa una incertidumbre estándar porcentual de 8,44 %, que contribuye a una incertidumbre estándar de 652,95 o 8,71% respecto al  $F_{referencia}$  adoptado. Los valores son demasiado altos, aunque no se pudo llevar a cabo una correcta medición de la tensión en alta, y se aceptó la hipótesis de que el generador funciona correctamente, además habría que considerar si las resistencias son aptas para las tensiones de trabajo y la potencia disipada.

5.5.2- Ensayo de estabilidad a corto plazo

- Estabilidad a corto plazo para 5 kV

El mismo se realizó excitando con el generador de CC al divisor durante 30 s, registrándose el factor de escala inicial (luego de haberse estabilizado) y el factor de escala indicado en el momento del corte. Esta operación se realizó con intervalos de 30 s un total de veinte veces. Lo mismo fue repetido 5 veces con intervalos de 5 minutos (Tabla 5.13).

Tiempo	Generador $U_{AT}$ [V]		Tensión $U_{BT}$ [V]			
Minutos	Corriente [mA]	Tensión [V]	UBT cada 30 s			
0	0,032	5000	0,66697200	0,66694345		
1	0,032	5000	0,66697244	0,66705156		
2	0,032	5000	0,66704489	0,66708846		
3	0,032	5000	0,66708082	0,66713450		
4	0,032	5000	0,66707589	0,66713810		
5	0,032	5000	0,66712125	0,66717210		
6	0,032	5000	0,66713113	0,66719217		
7	0,032	5000	0,66715012	0,66721330		
8	0,032	5000	0,66717005	0,66722741		
9	0,032	5000	0,66717717	0,66726667	<b>F<sub>prom</sub></b>	<b>u<sub>B2</sub> %</b>
<b>Prom</b>	<b>0,032</b>	<b>5000</b>	<b>0,66711617</b>		<b>7494,94645</b>	<b>0,02550</b>
0	0,032	5000	0,66697474	0,66712687		
1	0,032	5000	0,66712511	0,66719290		
2	0,032	5000	0,66715616	0,66723257		
3	0,032	5000	0,66719600	0,66725828		
4	0,032	5000	0,66720371	0,66728018		
5	0,032	5000	0,66723767	0,66729398		
6	0,032	5000	0,66725801	0,66731725		
7	0,032	5000	0,66725349	0,66732485		
8	0,032	5000	0,66726125	0,66740010		
9	0,032	5000	0,66725544	0,66732771	<b>F<sub>prom</sub></b>	<b>u<sub>B2</sub> %</b>
<b>Prom</b>	<b>0,032</b>	<b>5000</b>	<b>0,667233814</b>		<b>7493,62502</b>	<b>0,03054</b>
0	0,032	5000	0,66709251	0,66719289		
1	0,032	5000	0,66717493	0,66723676		
2	0,032	5000	0,66721441	0,66728475		
3	0,032	5000	0,66724485	0,66732069		
4	0,032	5000	0,66726591	0,66734742		
5	0,032	5000	0,66727885	0,66735645		
6	0,032	5000	0,66729357	0,66736713		
7	0,032	5000	0,66729539	0,66737349		
8	0,032	5000	0,66732277	0,66737861		
9	0,032	5000	0,66726922	0,66735521	<b>F<sub>prom</sub></b>	<b>U<sub>B2</sub> %</b>
<b>Prom</b>	<b>0,032</b>	<b>5000</b>	<b>0,667283291</b>		<b>7493,06939</b>	<b>0,02273</b>

0	0,032	5000	0,66702891	0,66717446		
1	0,032	5000	0,66717501	0,66723671		
2	0,032	5000	0,66720579	0,66728334		
3	0,032	5000	0,66721706	0,66733714		
4	0,032	5000	0,66728088	0,66735059		
5	0,032	5000	0,66728894	0,66737140		
6	0,032	5000	0,66730622	0,66737628		
7	0,032	5000	0,66731718	0,66738656		
8	0,032	5000	0,66733066	0,66739990		
9	0,032	5000	0,66733436	0,66740330	<b>F<sub>prom</sub></b>	<b>u<sub>B2</sub> %</b>
<b>Prom</b>	<b>0,032</b>	<b>5000</b>	<b>0,667290235</b>	<b>7492,99142</b>	<b>0,03239</b>	
0	0,032	5000	0,66703925	0,66710914		
1	0,032	5000	0,66709792	0,66718179		
2	0,032	5000	0,66715722	0,66724100		
3	0,032	5000	0,66721030	0,66727901		
4	0,032	5000	0,66724269	0,66730580		
5	0,032	5000	0,66725454	0,66731862		
6	0,032	5000	0,66727095	0,66734499		
7	0,032	5000	0,66728404	0,66734361		
8	0,032	5000	0,66728994	0,66736388		
9	0,032	5000	0,66727124	0,66735428	<b>F<sub>prom</sub></b>	<b>u<sub>B2</sub> %</b>
<b>Prom</b>	<b>0,032</b>	<b>5000</b>	<b>0,667248011</b>	<b>7493,46558</b>	<b>0,02726</b>	
0	0,032	5000	0,66701947	0,66715802		
1	0,032	5000	0,66715734	0,66722356		
2	0,032	5000	0,66720538	0,66727131		
3	0,032	5000	0,66723402	0,66729861		
4	0,032	5000	0,66726025	0,66732421		
5	0,032	5000	0,66727504	0,66734243		
6	0,032	5000	0,66729194	0,66737095		
7	0,032	5000	0,66730776	0,66737713		
8	0,032	5000	0,66731636	0,66738509		
9	0,032	5000	0,66731388	0,66739223	<b>F<sub>prom</sub></b>	<b>u<sub>B2</sub>%</b>
<b>Prom</b>	<b>0,032</b>	<b>5000</b>	<b>0,667276249</b>	<b>7493,14846</b>	<b>0,03225</b>	

Tabla 5.13. Medición de tensiones en la rama de BT ante una tensión aplicada de 5 kV y su F y u<sub>B2</sub> correspondiente.

La incertidumbre tipo B para el estudio de estabilidad a corto plazo se calcula como:

$$u_{BCP} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{F_{despues}}{F_{antes}} - 1 \right|$$

Donde el  $F_{antes}$  será el calculado inicialmente y  $F_{despues}$ , el ultimo registrado para el intervalo de tiempo adoptado.

Se concluye que la incertidumbre estándar relativa debida a la estabilidad a corto plazo es de 0,033 % respecto a  $F_{antes}$  de la muestra  $N^{\text{ro}} 4$ .

### 5.5.3- Ensayo de estabilidad a largo plazo

Para este estudio se dejó el equipo generador de tensión aproximadamente 4 horas y se observó la variación de la rama de baja tensión del divisor, si se considera que la tensión brindada por el generador de AT permaneció constante, y los ensayos se hicieron a 125 kV se tiene que:

$$u_{BLP} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{F_2}{F_1} - 1 \right| = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{V_{AT}/V_{2BT}}{V_{AT}/V_{1BT}} - 1 \right| = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{V_{1BT}}{V_{2BT}} - 1 \right|$$

$$u_{BLP} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{16,6670}{13,8642} - 1 \right| = 0,1168$$

De esta forma la incertidumbre debido a la estabilidad a largo plazo “ $u_{B3}\%$ ” es 11,7 %. Lo cual indica, junto a las anteriores incertidumbres que el divisor no cumple con los requisitos para ser aprobado (incertidumbre expandida hasta 3%) además de que el factor no logra estabilizarse y desciende en el tiempo.

### 5.6- Conclusión preliminar

El divisor en estudio en la situación actual no cumple con los requisitos para ser aprobado, además se afirma que los resistores no son los adecuados para la construcción, dado que para 125 kV CC de excitación se tendría aproximadamente para los resistores (150 M $\Omega$ ) una potencia de  $V^2/R$  igual a 104,17 W, que por cada resistor de 1 M $\Omega$  equivale a 0,7 W, lo cual indicaría que los resistores utilizados no son aptos para estas potencias.

Se debe aclarar que el divisor se construyó a partir de resistores que se disponían en otros laboratorios y si bien no son aptos para tensiones que superan los 100 kV debido a la falta de estabilidad, su factor de escala descendiente en el tiempo y elevadas incertidumbres, se procederá a realizar una caracterización del mismo para tensiones inferiores siendo de utilidad para calibrar puntas de prueba para AT de 40 kV CC para lo cual se modificara la resistencia en la rama de baja, pasando de una de 20 k $\Omega$  a otra de 25 k $\Omega$  de Film Metálico marca Vishay que especifica tener una exactitud de 0,01 %, a fin de que se lo pueda utilizar en un laboratorio de medición.

### 5.7- Calculo del factor de escala con una resistencia de baja tensión de 25 k $\Omega$

Se realizó de forma similar a la Sección 5.1, las mediciones con el multímetro HP 3458, la misma indico la Tabla 5.14.

También se calculó a diferentes niveles de tensión aplicado el factor de escala correspondiente y su desvió, recalcando que:

- Para los niveles de tensión inferior a 1 kV se utilizó el multímetro HP 3458 con la función “Ratio” y el generador de tensión continua Keithley para calcular la relación de  $U_{BT}$  y  $U_{AT}$  a fin de obtener el factor de escala del divisor en el display del multímetro.
- Para niveles superiores a 1 kV se volvió a utilizar el generador Haefely y el multímetro HP 3458, previamente se verifico la tensión brindada por el generador a 20 kV con una punta de MT, a fin de verificar la señal y la tensión brindada por el generador, como en la Fig. 5.11.

Muestras	R <sub>AT</sub> [GΩ]	R <sub>BT</sub> [kΩ]	F
1	0,1499671	25,00029	5999,61442
2	0,1499575	25,00029	5999,23042
3	0,1496583	25,00029	5987,26256
4	0,1499928	25,00029	6000,6424
5	0,150133	25,00029	6006,25034
6	0,1499603	25,00029	5999,34242
7	0,149959	25,00029	5999,29042
8	0,1499684	25,00029	5999,66642
9	0,1499479	25,00029	5998,84642
10	0,1498702	25,00029	5995,73846
Promedio	0,14994145	25,00029	5998,58843

Tabla 5.14. Medición de resistencias y F correspondiente.

U <sub>AT</sub> [V]	F	s
100	6003,38	8,76E-05
200	6001,392	8,42E-05
300	6000,786	0,000131
400	6000,364	4,79E-05
500	6000,166	1,34E-05
800	5999,812	3,14E-05

Tabla 5.15. Tabla de factores de escala obtenido a BT.



Fig.5.11. Medición de la tensión aportada al divisor con una punta de MT.

Los resultados de los ensayos realizados como se observa en la Fig. 5.12 se encuentran en las siguientes tablas:



Fig. 5.12. Circuito generador y divisor resistivo.

$U_{AT}$ [kV]	$U_{BT}$ [V]	F
10	1,6666	6000,24001
10	1,666718	5999,81521
10	1,666605	6000,22201
10	1,666567	6000,35882
10	1,666493	6000,62527
10	1,666374	6001,05379
10	1,666498	6000,60726
10	1,666466	6000,72249
10	1,666458	6000,75129
10	1,66629	6001,35631
<b>F<sub>prom</sub></b>	6000,575244	
<b>s</b>	0,441829042	

$U_{AT}$ [kV]	$U_{BT}$ [V]	F
15	2,500069	5999,8344
15	2,500398	5999,04495
15	2,500778	5998,13338
15	2,500463	5998,88901
15	2,500628	5998,49318
15	2,50076	5998,17655
15	2,500254	5999,39046
15	2,50095	5997,72087
15	2,501282	5996,92478
15	2,504225	5989,87711
<b>F<sub>prom</sub></b>	5997,648469	
<b>s</b>	2,85681497	

$U_{AT}$ [kV]	$U_{BT}$ [V]	F
20	3,333257	6000,1374
20	3,333076	6000,46324
20	3,333030	6000,54605
20	3,333000	6000,60006
20	3,332861	6000,85032
20	3,332766	6001,02137
20	3,332705	6001,13121
20	3,332709	6001,12401
20	3,332605	6001,31129
20	3,332621	6001,28247
<b>F<sub>prom</sub></b>	6000,846743	
<b>s</b>	0,393768313	

$U_{AT}$ [kV]	$U_{BT}$ [V]	F
30	5,000220	5999,73601
30	5,000029	5999,9652
30	4,999523	6000,57245
30	4,999204	6000,95535
30	4,999049	6001,14142
30	4,998820	6001,41633
30	4,998599	6001,68167
30	4,998795	6001,44635
30	4,998483	6001,82095
30	4,999610	6000,46804
<b>F<sub>prom</sub></b>	6000,920378	
<b>s</b>	0,715235215	

U <sub>AT</sub> [kV]	U <sub>BT</sub> [V]	F
35	5,833310	6000,024
35	5,833391	5999,94069
35	5,833174	6000,16389
35	5,833218	6000,11863
35	5,832520	6000,83669
35	5,832682	6000,67002
35	5,833625	5999,70001
35	5,832753	6000,59697
35	5,833159	6000,17932
35	5,832148	6001,21945
<b>F<sub>prom</sub></b>	6000,344967	
<b>s</b>	0,467802568	

U <sub>AT</sub> [kV]	U <sub>BT</sub> [V]	F
40	6,66666	6000,006
40	6,666682	5999,9862
40	6,667098	5999,61183
40	6,667419	5999,32298
40	6,666692	5999,9772
40	6,667212	5999,50924
40	6,667617	5999,14482
40	6,667494	5999,25549
40	6,667425	5999,31758
40	6,667353	5999,38236
<b>F<sub>prom</sub></b>	5999,55137	
<b>s</b>	0,328419988	

U <sub>AT</sub> [kV]	U <sub>BT</sub> [V]	F
50	8,333200	6000,096
50	8,332980	6000,25441
50	8,332830	6000,36242
50	8,332960	6000,26881
50	8,333690	5999,74321
50	8,332780	6000,39843
50	8,332140	6000,85932
50	8,332730	6000,43443
50	8,331610	6001,24106
50	8,332440	6000,64327
<b>F<sub>prom</sub></b>	6000,430136	
<b>s</b>	0,412747597	

U <sub>AT</sub> [kV]	U <sub>BT</sub> [V]	F
60	10,000130	5999,922
60	10,000140	5999,916
60	10,000060	5999,964
60	10,000030	5999,982
60	10,000030	5999,982
60	10,000070	5999,958
60	10,000430	5999,74201
60	9,998510	6000,89413
60	9,997530	6001,48237
60	9,998530	6000,88213
<b>F<sub>prom</sub></b>	6000,272464	
<b>s</b>	0,588413529	

U <sub>AT</sub> [kV]	U <sub>BT</sub> [V]	F
65	10,833330	6000,00185
65	10,833879	5999,6978
65	10,833893	5999,69005
65	10,833721	5999,7853
65	10,833608	5999,84788
65	10,833453	5999,93372
65	10,833263	6000,03895
65	10,833017	6000,17521
65	10,832817	6000,28598
65	10,832848	6000,26881

U <sub>AT</sub> [kV]	U <sub>BT</sub> [V]	F
70	11,6666	6000,03429
70	11,666048	6000,31819
70	11,665831	6000,4298
70	11,665706	6000,4941
70	11,665759	6000,46684
70	11,664358	6001,18755
70	11,664624	6001,0507
70	11,664434	6001,14845
70	11,664252	6001,24209
70	11,664024	6001,35939

$F_{prom}$	5999,972555
s	0,221047103

$F_{prom}$	6000,773139
s	0,470895963

Tabla 5.16. Cálculo de factores de escala a distintos niveles de tensión.

Se pudo realizar un registro de la medición total de la resistencia del divisor y se registró un factor de escala de 5999,16 midiendo durante 15 horas aplicando una tensión de 200 V como en la Fig. 5.13, con un multímetro Fluke 8508A (alta exactitud, hasta 20 GΩ con una exactitud anual de ± 7,5 PPM), cabe destacar que durante el mismo la temperatura varía entre 22,4 y 23,4 °C.

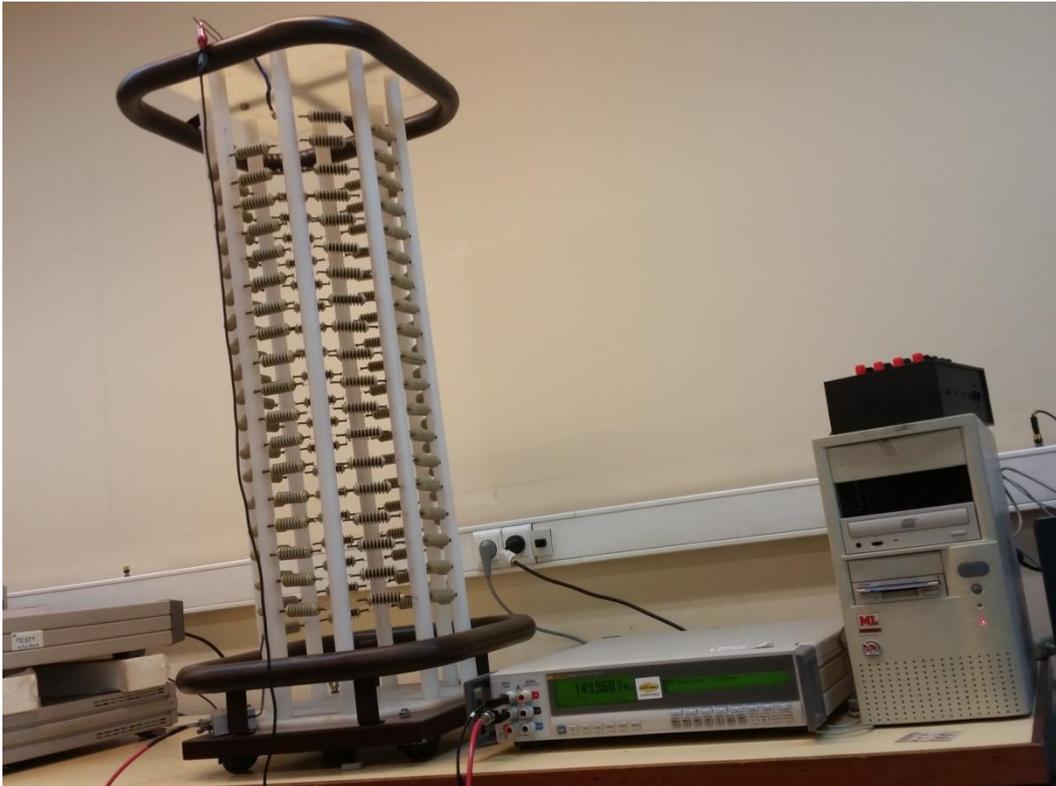
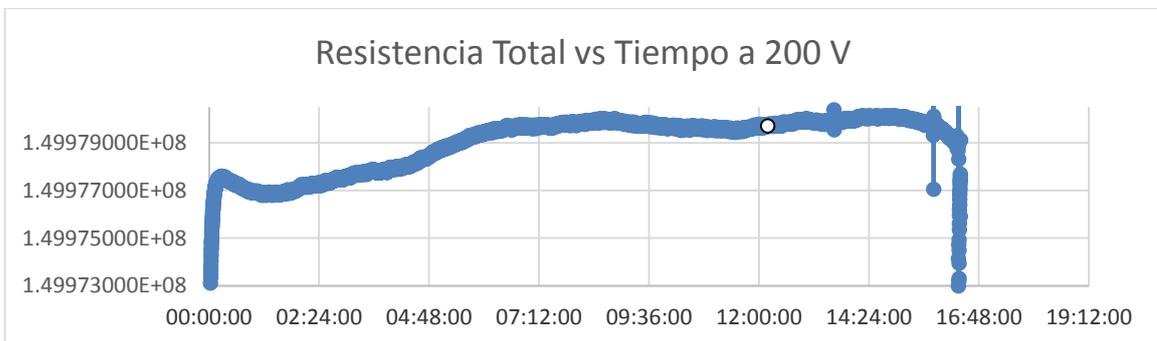


Fig. 5.13. Medición de la resistencia total del divisor y de la temperatura ambiente.



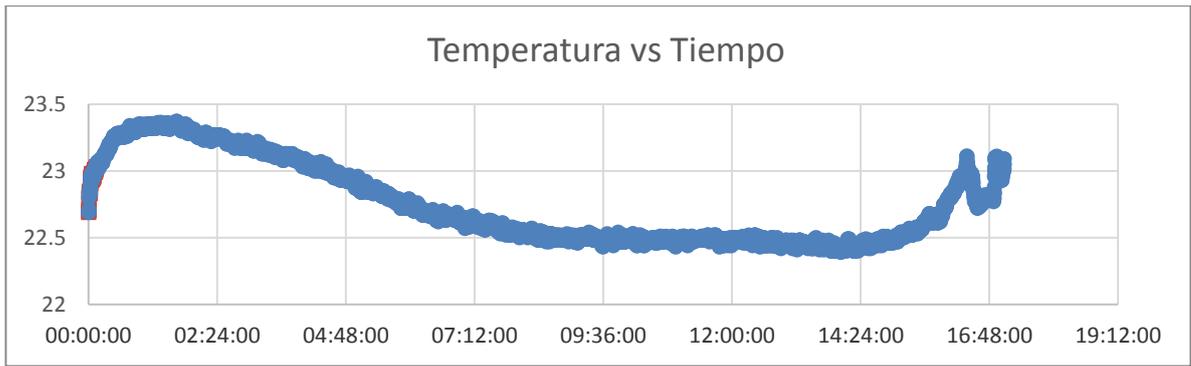


Fig.5.14. Medición de la resistencia total del divisor, la temperatura y el tiempo.

### 5.8- Calculo de incertidumbres debido a equipos de medición

Respecto al cálculo de incertidumbre debido a los equipos utilizados, de forma similar a lo realizado anteriormente, con una tensión aplicada con un generador y la medición con el multímetro HP 3458, correspondiendo para este ultimo la siguiente tabla de exactitud:

Range	(ppm of Reading + ppm of Range)
100 mV	0.5 + 0.5
1 V	0.3 + 0.1
10 V	0.05 + 0.05
100 V	0.5 + 0.1
1000 V	1.5+0.05

Recordando que el factor de escala se calcula como:

$$F = \frac{U_{AT}}{U_{BT}}$$

Los coeficientes de sensibilidad seran:

$$C_1 = \frac{\delta F}{\delta U_{AT}} = \frac{1}{U_{BT}}$$

$$C_2 = \frac{\delta F}{\delta U_{BT}} = -\frac{U_{AT}}{U_{BT}^2}$$

Utilizando la exactitud correspondiente a cada nivel de tensión se obtiene la Tabla 5.17, donde se resumen los cálculos realizados:

U <sub>AT</sub> [V]	U <sub>BT</sub> [V]	u U <sub>AT</sub> [V]	u U <sub>BT</sub> [V]	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>
100	0,016657	0,000075	5,83E-08	60,033800	360405,711843
200	0,033326	0,000100	6,67E-08	30,006962	180083,547692
300	0,049993	0,000125	7,50E-08	20,002619	120031,427057
400	0,066663	0,000150	8,33E-08	15,000909	90010,907730
500	0,083331	0,000175	9,17E-08	12,000333	72003,990295
800	0,133338	0,000250	1,40E-07	7,499765	44997,179144
10000	1,666493	2	5,83E-07	0,600063	3600,751180
15000	2,500244	3	6,25E-07	0,399961	2399,532196

<b>20000</b>	3,332863	4	6,67E-07	0,300042	1800,508080
<b>30000</b>	4,999233	6	7,50E-07	0,200031	1200,368177
<b>35000</b>	5,832998	7	7,92E-07	0,171438	1028,689705
<b>40000</b>	6,667165	8	8,33E-07	0,149989	899,865416
<b>50000</b>	8,332736	10	9,17E-07	0,120009	720,103236
<b>60000</b>	9,999546	12	1,00E-06	0,100005	600,054493
<b>65000</b>	10,833383	13	1,54E-05	0,092307	553,841087
<b>70000</b>	11,665164	14	1,58E-05	0,085725	514,418260

Tabla 5.17. Coeficientes de sensibilidad e incertidumbres de medición de los equipos utilizados ante distintos niveles de tensión.

### 5.9- Incertidumbre tipo A

Se adoptará la de mayor aporte a esta incertidumbre, por lo que la correspondiente es a 30 kV:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0,68}{\sqrt{10}} \cong 0,22$$

La misma equivale a una  $u_A$  % de 0,004 %.

Se representan los factores de escala obtenidos y sus incertidumbres en la Tabla 5.18:

UAT [V]	F	s	UBT [V]	u UAT [V]	u UBT [V]	C1	C2
<b>100</b>	6003,379980	0,000088	0,016657	0,000075	5,83E-08	60,033800	360405,711843
<b>200</b>	6001,392300	0,000084	0,033326	0,000100	6,67E-08	30,006962	180083,547692
<b>300</b>	6000,785625	0,000131	0,049993	0,000125	7,50E-08	20,002619	120031,427057
<b>400</b>	6000,363580	0,000048	0,066663	0,000150	8,33E-08	15,000909	90010,907730
<b>500</b>	6000,166260	0,000013	0,083331	0,000175	9,17E-08	12,000333	72003,990295
<b>800</b>	5999,811940	0,000031	0,133338	0,000250	1,40E-07	7,499765	44997,179144
<b>10000</b>	6000,625951	0,451635	1,666493	2	5,83E-07	0,600063	3600,751180
<b>15000</b>	5999,415217	0,514473	2,500244	3	6,25E-07	0,399961	2399,532196
<b>20000</b>	6000,846741	0,373561	3,332863	4	6,67E-07	0,300042	1800,508080
<b>30000</b>	6000,920371	0,678532	4,999233	6	7,50E-07	0,200031	1200,368177
<b>35000</b>	6000,344964	0,443796	5,832998	7	7,92E-07	0,171438	1028,689705
<b>40000</b>	5999,551368	0,311567	6,667165	8	8,33E-07	0,149989	899,865416
<b>50000</b>	6000,430134	0,391567	8,332736	10	9,17E-07	0,120009	720,103236
<b>60000</b>	6000,272460	0,558218	9,999546	12	1,00E-06	0,100005	600,054493
<b>65000</b>	5999,972554	0,209704	10,833383	13	1,54E-05	0,092307	553,841087
<b>70000</b>	6000,773136	0,446731	11,665164	14	1,58E-05	0,085725	514,418260

Tabla 5.18. Resumen de las  $U_{BT}$ , F, incertidumbres de medición del multímetro y de los generadores, y los coeficientes de sensibilidad a diferentes niveles de tensión.

De la misma se aprecia que se tiene un factor de escala medio de 6000,565786.

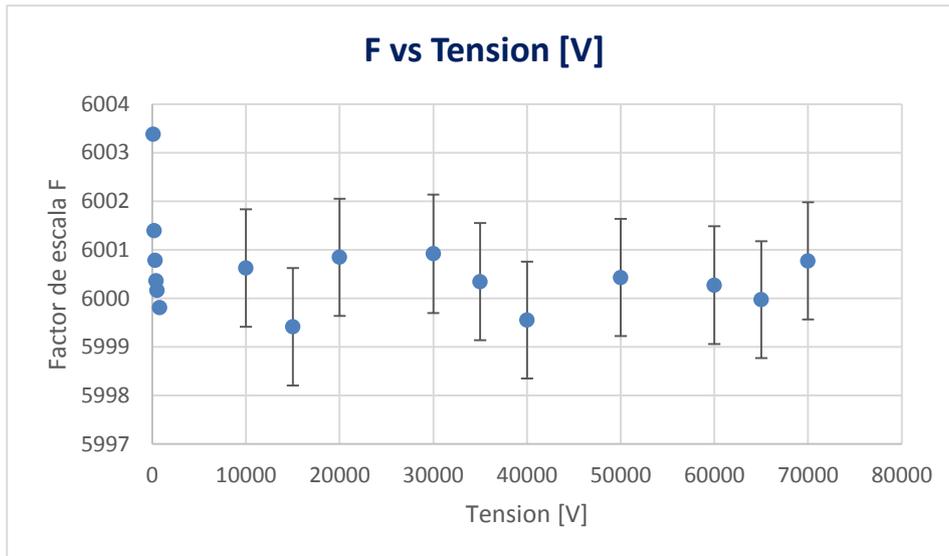


Fig. 5.15. Diagrama de incertidumbres de F vs V.

### 5.10- Incertidumbre tipo B

#### 5.10.1- Incertidumbre tipo B debido a la falta de linealidad

El efecto de la no linealidad del factor de escala para las relaciones de tensión hasta 1 kV se obtiene de ecuación 2.10:

$$u_{B0} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{g=1}^a \left| \frac{F_g}{F} - 1 \right|$$

Utilizando los valores obtenidos para una tensión de 100 V aplicado se obtiene el máximo valor de  $u_{B0}$ , recordando utilizar para este caso el valor medio de los F obtenidos para los niveles de tensión en el rango de trabajo utilizado:

$$u_{B0} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{6003,38}{6000,98} - 1 \right| = 0,00023$$

Que representa una incertidumbre de 1,38 que en forma porcentual  $u_{B0}\%$ , adoptando el factor de escala de referencia de 6000,56579, es de 0,024 % o 240 PPM.

#### 5.10.2- Incertidumbre tipo B debido a la linealidad

Para su cálculo se utilizó los F para los cuales no se pudo utilizar un sistema de medición de referencia:

$U_{AT}$ [V]	F
10000	6000,625951
15000	5999,415217
20000	6000,846741
30000	6000,920371
35000	6000,344964
40000	5999,551368
$F_{prom}$	6000,284102

Tabla 5.19. Factores de escala a distintos niveles de tensión en el rango de medición adoptado.

La incertidumbre se calcula como:

$$u_{BLin} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{g=1}^n \left| \frac{F_g}{F_{prom}} - 1 \right|$$

Siendo la máxima incertidumbre calculada para una tensión aplicada de 30 kV:

$$u_{BLin} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{6000,920371}{6000,284102} - 1 \right| = 0,000084$$

Esta incertidumbre relativa presenta una incertidumbre absoluta de 0,51 para el factor de escala que referido al factor adoptado como de referencia es de 0,0084 % o 84 PPM.

### 5.10.3- Incertidumbre debido a la estabilidad a corto plazo

Respecto a este tipo de incertidumbre se realizaron una serie de ensayos a 65, 60 y 40 kV (Tabla 5.20), midiendo la tensión en baja cada minuto por un periodo de diez minutos, resultando una incertidumbre a corto plazo relativa porcentual  $u_{CP}\%$  de 0,11, 0,09 y 0,04 % respectivamente. Para los cálculos solo se tuvo en cuenta el primer y último factor de escala calculado.

U <sub>AT</sub> [kV]	U <sub>BT</sub> [V]	U <sub>AT</sub> [kV]	U <sub>BT</sub> [V]	U <sub>AT</sub> [kV]	U <sub>BT</sub> [V]
65	10,833358	60	10,00005	40	6,666594
65	10,832847	60	10,000143	40	6,671462
65	10,830172	60	9,997667	40	6,671497
65	10,827618	60	9,996396	40	6,671168
65	10,826000	60	9,994536	40	6,670936
65	10,825493	60	9,992803	40	6,670810
65	10,822714	60	9,992000	40	6,670742
65	10,820509	60	9,990992	40	6,671098
65	10,818400	60	9,989100	40	6,671274
65	10,816153	60	9,987278	40	6,671517
65	10,813607	60	9,985426	40	6,671101
U <sub>CP</sub> %	0,105453	U <sub>CP</sub> %	0,084555	U <sub>CP</sub> %	0,039006

Tabla 5.20. Tensiones en la rama de BT registrado cada minuto durante diez minutos para el estudio de la estabilidad a corto plazo.

Ensayos similares realizados a una temperatura ambiente mayor a los 24,5 °C, que oscilaba los 25,5 °C presentaba una incertidumbre de este tipo 15 % mayor bajo las mismas condiciones de ensayo.

Para el rango de tensión de 40 kV el equipo generador registraba una corriente de 0,5 mA, que nos permite asegurarnos despreciar las corrientes de fuga según aconseja la norma IEC 60060-2 sección 6.1.3.

Entre cada ensayo realizado se respetaron las mismas condiciones de trabajo como la temperatura de trabajo de 24,5 °C y descargando los equipos.

La incertidumbre a corto plazo tuvo un valor de 2,34 y en forma relativa porcentual respecto al adoptado como de referencia, de 0,039 % o 390 PPM.

### 5.10.4- Incertidumbre debido a la estabilidad a largo plazo

La misma se realizó de manera similar al anterior descrito, pero para un lapso de tiempo igual a 2 horas, registrándose la tensión en la rama de BT cada cinco minutos.

De la misma se pudo apreciar que para una tensión de entrada de 60 kV aplicada durante 1 hora, se tiene una alta incertidumbre, la misma se puede apreciar en la Tabla 5.21.

LP	60 kV	1 HORA				
10	9,990957	9,984000	9,978461	9,971323	9,963558	9,957678
9,95	9,944362	9,936719	9,933170	9,927946	9,921389	9,910856
$u_{LP} \%$	0,519442					

Tabla 5.21. Valores de la tensión en la rama de BT cada 5 minutos durante 1 hora.

Para el nivel de tensión máximo a caracterizar el divisor resistivo, se obtuvo los resultados de la Tabla 5.22:

LP	40 kV	2 Horas				
6,666594	6,670810	6,671701	6,67201	6,673147	6,6735	6,674308
6,67522	6,675950	6,67644	6,677658	6,6788	6,67935	6,681522
6,683039	6,684869	6,686625	6,688064	6,689867	6,691161	6,692846
6,694669	6,694890	6,695125	6,695507			
$u_{LP} \%$	0,249315					

LP	40 kV	2 Horas				
6,666010	6,669709	6,670900	6,678010	6,672500	6,674020	6,674190
6,675068	6,676000	6,679140	6,679310	6,680120	6,689510	6,690132
6,695100	6,698702	6,699510	6,705760	6,706010	6,707889	6,707810
6,705010	6,707010	6,706890	6,705911			
$u_{LP} \%$	0,343531					

Tabla 5.22. Valores de la tensión en la rama de BT cada 5 minutos durante 2 horas.

Para el cálculo de incertidumbres se adopta el peor caso posible, por lo que se considerara una  $u_{LP} \%$  de 0,35 %.

### 5.11- Resumen de resultados obtenidos

En la Tabla 5.23 se resumen de las incertidumbres calculadas anteriormente:

Fuente de Incertidumbre	Incertidumbre estándar "u"	Incertidumbre relativa %	Coefficiente de sensibilidad "C"	Grados de libertad	Contribución a la $U_c \text{ "}(C_i \cdot u_i)^2"$
$U_{alta}$	8	0,02	0,149989	50	1,439784665
$U_{baja}$	$8,33 \cdot 10^{-7}$	$1,25 \cdot 10^{-5}$	899,865416	50	$5,62365 \cdot 10^{-7}$
Tipo A	0,22	0,004	1	9	0,0484
Tipo B - No linealidad	1,39	0,024	1	$\infty$	1,9321
Tipo B - Linealidad	0,51	0,0084	1	$\infty$	0,2601
Tipo B - Estab. Corto Plazo	2,340000	0,040000	1	$\infty$	5,4756
Tipo B - Estab. Largo Plazo	21,002069	0,350000	1	$\infty$	441,0868898

Tabla 5.23. Resumen de las incertidumbres calculadas anteriormente.

De esta manera la incertidumbre estándar combinada es:  $u_c = 21,22$ .

Para obtener la incertidumbre expandida con una probabilidad de cobertura de 95 %, se deberá calcular los grados de libertad efectivos para que a partir de este obtener el factor de cobertura  $K$  correspondiente:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$$

$$v_{eff} = \frac{21,22^4}{\frac{(0,15,8)^4}{50} + \frac{(899,86,8,33 \cdot 10^{-7})^4}{50} + \frac{(1,0,22)^4}{9} + \frac{(1,1,39)^4}{\infty} + \frac{(1,0,51)^4}{\infty} + \frac{(1,2,34)^4}{\infty} + \frac{(1,21)^4}{\infty}}$$

$$v_{eff} = 4858580,01$$

Según la Tabla 2.1, para este valor de  $v_{eff}$  corresponde utilizar una  $K$  igual a 2, por lo que la incertidumbre expandida con una probabilidad de cobertura de 95 % es:

$$U = k * u_c(F) = 2 * 21,22 \cong 43$$

Esta incertidumbre expresada en forma relativa porcentual equivale a 0,72 %.

### 5.12- Incertidumbres asociadas al cálculo del factor de escala mediante relación de resistencias

Las mediciones se realizaron con el multímetro digital (DMM) HP3458A, para el cual se utilizó un procedimiento específico de medición interno que conlleva las siguientes fuentes de incertidumbre:

FUENTE	DESCRIPCIÓN	DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD	VALOR TÍPICO
Multímetro	Error adicional y ruido, se obtiene del manual, pero se buscó una cota para simplificar el cálculo. Válido para 50 y 100 NPLC.	Rectangular	0,1 $\mu\Omega/\Omega$ multiplicado por: x10 para rangos de 10 y 100 $\Omega$ . x2 desde 1 k $\Omega$ hasta 10 M $\Omega$ . x120 para rango de 100 M $\Omega$ . x1200 para rango de 1 G $\Omega$ .
Multímetro	Linealidad del ADC. Se obtuvo del manual del instrumento, asumiendo que siempre se corrige con un elemento con valor igual al 10% del rango. Se calculó a partir de las especificaciones en tensión y asignando un rango de tensión a cada rango de resistencia según la tensión de medición.	Rectangular	5,5 $\mu\Omega/\Omega$ para rangos de 10 y 100 $\Omega$ . 1,3 $\mu\Omega/\Omega$ para rangos de 1 y 10 k $\Omega$ . 0,55 $\mu\Omega/\Omega$ para más de 100 k $\Omega$ .
Multímetro	Resolución del instrumento.	Rectangular	1 $\mu\Omega/\Omega$ para el rango de 10 $\Omega$ . 0,1 $\mu\Omega/\Omega$ para todo otro rango.

Fig. 5.16. Fuentes de incertidumbre para la corrección de un valor medido con DMM HP3458A

Para la medición de las resistencia en alta tensión se usó la siguiente configuración del equipo para una medición más exacta:

- Activar comando OHMF para medición con 4 hilos.
- LFILTER activado.
- AZERO activado ( con el fin de mantener la estabilidad y la precisión en el tiempo y la temperatura, se mide intermitentemente las tensiones internas correspondientes a las compensaciones y ganancias de los amplificadores. Este proceso se conoce como autocero).
- NDIG 8.
- NPLC según rango de medición.

El término NPLC (Number of Power Line Cycles) es el número de ciclos de red o línea de alimentación y expresa el tiempo de integración. En las mediciones de tensión continua, corriente continua y resistencia, la precisión se reduce por el ruido de CA inducido por la línea de alimentación. El uso de NPLC de 1 o mayor aumenta el tiempo de integración del ruido de CA, y

aumenta la resolución y precisión de la medición, sin embargo, la compensación es una tasa de medición más lenta.

La resistencia de la rama de alta tensión presenta las siguientes incertidumbres:

- Error adicional y ruido:

$$\frac{0,1 \mu\Omega}{\Omega} 149,94145 M\Omega \cdot 1200 \cong 17993 \Omega$$

- Error debido a la linealidad:

$$\frac{0,55\mu\Omega}{\Omega} 149,94145 M\Omega \cong 82,5 \Omega$$

- Error de resolución:

$$\frac{0,1\mu\Omega}{\Omega} 149,94145 M\Omega \cong 15 \Omega$$

Aunque se adoptara para este ultimo error lo que indica la tabla del fabricante de 100 Ω. Siendo que las misma adoptan una distribución rectangular se tiene que:

$$u_{R ATadic y ruido} = \frac{17993}{\sqrt{3}} \cong 10400 \Omega$$

$$u_{R ATlinealidad} = \frac{82,5}{\sqrt{3}} \cong 50 \Omega$$

$$u_{R ATresolucion} = \frac{100/2}{\sqrt{3}} \cong 30 \Omega$$

Resultando una incertidumbre total en la medición de la resistencia en la rama de alta tensión medida con el DMM HP3458A de:

$$u_{R AT} = \sqrt{10400^2 + 50^2 + 30^2} = 10401 \Omega$$

Obteniéndose una  $u_{R AT} \%$  de:

$$u_{R AT} \% = \frac{10401 \Omega}{149,94145 M\Omega} \cdot 100 = 0,007 \%$$

Equivalente a 69,4 PPM.

De la misma forma se procedera con la resistencia del lado de baja tensión de 25 kΩ:

- Error adicional y ruido:

$$\frac{0,1 \mu\Omega}{\Omega} 25,00029 k\Omega \cdot 2 \cong 0,0051 \Omega$$

- Error debido a la linealidad:

$$\frac{1,3 \mu\Omega}{\Omega} 25,00029 k\Omega \cong 0,033 \Omega$$

- Error de resolución:

$$\frac{0,1\mu\Omega}{\Omega} 25,00029 k\Omega \cong 0,0026 \Omega$$

Aunque se adoptara para este ultimo error lo que indica la tabla del fabricante de 10 mΩ.

$$u_{R BTadic y ruido} = \frac{0,0051}{\sqrt{3}} \cong 0,003 \Omega$$

$$u_{R_{BT} \text{linealidad}} = \frac{0,033}{\sqrt{3}} \cong 0,02 \Omega$$

$$u_{R_{BT} \text{resolucion}} = \sqrt{\frac{(10/1000)/2}{1,7}} \cong 0,054 \Omega$$

Resultando una incertidumbre total en la medición de la resistencia en la rama de baja tensión medida con el DMM HP3458A de:

$$u_{R_{BT}} = \sqrt{0,003^2 + 0,02^2 + 0,054^2} \cong 0,06 \Omega$$

Obteniéndose una  $u_{R_{BT}}\%$  de 0,00024 % o 2,4 PPM.

### 5.12.1- Cálculo de los coeficientes de sensibilidad

Recordando que el factor de escala se calcula como:

$$F = \frac{R_{AT} + R_{BT}}{R_{BT}} = \frac{R_{AT}}{R_{BT}} + 1$$

Los coeficientes de sensibilidad son:

$$c_1 = \frac{\delta F}{\delta R_{AT}} = \frac{1}{R_{BT}} = \frac{1}{25,00029 \text{ k}\Omega} \cong 0,00004 \Omega^{-1}$$

$$c_2 = \frac{\delta F}{\delta R_{BT}} = \frac{R_{AT}}{R_{BT}^2} = -\frac{149,94145 \text{ M}\Omega}{25,00029^2 \text{ k}\Omega^2} \cong -0,24 \Omega^{-1}$$

### 5.12.2- Incertidumbre combinada

Respecto a la incertidumbre tipo A, para su calculo se utiliza los factores de escala de relacion de resistencias de la Tabla 5.14, y se obtiene:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{4,76}{\sqrt{10}} = 1,51$$

De esta forma, se llega a la Tabla 5.24 donde se encuentran las incertidumbres calculadas para el factor de escala según relacion de resistencias.

Fuente de Incertidumbre	Incertidumbre estándar "u"	Coefficiente de sensibilidad "c"	Grados de libertad	Contribución a la $u_c$ "(c <sub>i</sub> .u <sub>i</sub> ) <sup>2</sup> "
R <sub>alta</sub>	10401	0,00004	50	0,173089282
R <sub>baja</sub>	0,06	0,24	50	0,00020736
Tipo A	1,51	1	9	2,2801

Tabla 5.24. Incertidumbres, coeficientes de sensibilidad y grados de libertad correspondientes a las mediciones realizadas.

Se tiene una incertidumbre estandar combinada de 1,57 para el factor de escala , similar a lo obtenido en la Tabla anterior excluyendo la incertidumbre tipo B.

**5.13- Conclusion final**

Se concluye que el divisor resistivo presenta un factor de escala con probabilidad de cobertura de 95 % de:

$$F = 6000 \pm 42$$

Y dado que la incertidumbre expandida relativa porcentual es de 0,71 % se puede afirmar que el divisor en cuestion es de referencia, ya que la norma establece para tal caso una  $U \leq 1 \%$ .

## VI – Calibración de divisor capacitivo ante tensión de impulso atmosférico

### 6.1- Ensayo ante Impulso Atmosférico

En principio, para el ensayo de Impulso atmosférico sería necesario un circuito de generación y otro de medición, como se puede apreciar en la Fig. 6.1, donde se detallan las partes constituyentes.

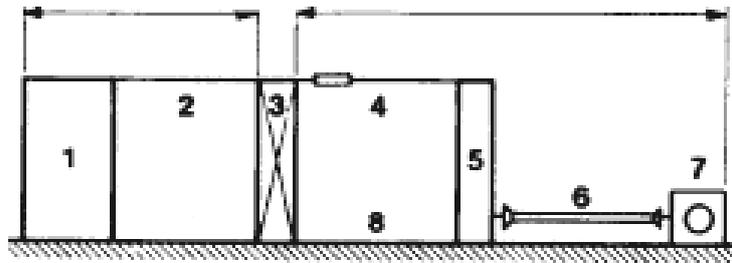


Fig. 6.1. Circuito para ensayo de impulso atmosférico.

1: Generador de Tensión Impulso; 2: Conexión al objeto de prueba; 3: Objeto de prueba; 4: Conexión al divisor de tensión; 5: Divisor de tensión; 6: Cable de medición o señal; 7: Instrumento de medición o registrador; 8: Línea de retorno a tierra.

El dispositivo para mediciones de impulso en alta tensión anteriormente era el espinterómetro a esferas, pero debido a que solo se puede determinar la cresta de la onda, a que no se puede obtener información sobre la forma de la misma y a que según la IEC 60052 la incertidumbre realizadas con el mismo alcanza un 3 %, lo cual es superior a los requerimientos de la IEC 60060-2, para lo cual se admite una incertidumbre menor a 1 % para la medición de la cresta, por lo que el registro se efectúa mediante osciloscopios para lo cual se utiliza un dispositivo convertidor que realiza la atenuación de la señal a tensiones compatibles con la electrónica convencional.

Como dispositivos convertidores se utilizaron divisores de tensión, los cuales ya fueron explicados anteriormente.

De esta manera el osciloscopio adquiere y registra la señal  $u_3(t)$  como se aprecia en la Fig. 6.2 , siendo igual a  $u_2(t)$  para el caso que el sistema de transmisión no produzca distorsión a la onda.

Conociendo el factor de escala o constante del divisor  $F$ , tal que:

$$u_1(t) = F \cdot u_2(t) \quad (6.1)$$

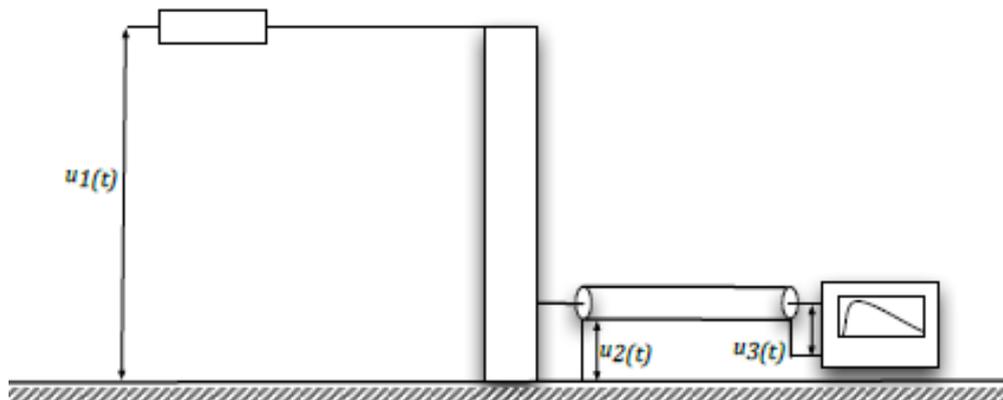


Fig. 6.2. Esquema de medición del osciloscopio

El factor  $F$  deberá ser constante para diversos parámetros dentro de un rango determinado. También deberá serlo para parámetros que dependan de la señal a medir, comportamiento dinámico y linealidad con la tensión.

El comportamiento dinámico es analizado en el dominio de la frecuencia, mediante su función transferencia, o en el dominio del tiempo, mediante la prueba de la respuesta al escalón; recordando que

esta última es la preferida porque realizar un barrido en frecuencia sobre un sistema de medición hace que las señales (las de más alta frecuencia) resulten de muy bajo valor y difíciles de medir.

El sistema anterior se puede pensar como un cuadripolo de la Fig. 6.3:

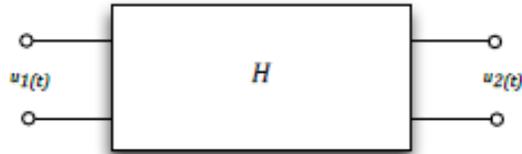


Fig. 6.3. Resumen a cuadripolo del sistema.

### 6.1.1- Función Transferencia - Errores

Como se vio en anteriormente, un sistema de medición de impulsos de Alta Tensión se puede representar como un circuito similar a un filtro pasa bajos (Fig. 6.4).

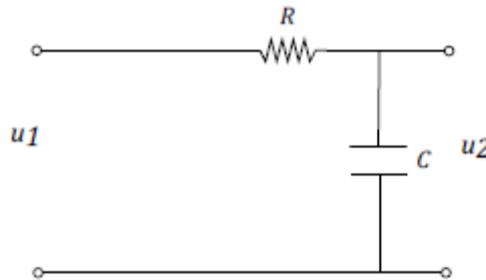


Fig. 6.4. Sistema de medición de impulsos de AT representado como filtro pasa bajos.

Obteniendo una respuesta normalizada (tensión igual a 1 p.u. con  $t = \infty$ ) ante escalón unitario  $u(t)$ , como el de la Fig. 6.5:

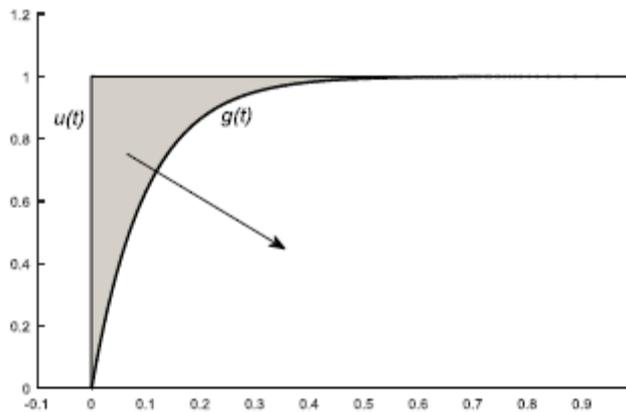


Fig. 6.5. Respuesta normalizada ante  $u(t)$  para el circuito de la Fig. anterior.

Para el caso de un impulso cortado en el frente, el mismo es representado por una combinación de funciones, rampas y escalón (Función de Heaviside,  $u(t - T_c)$  para  $t > T_c$ ).

$$u_1(t) = \begin{cases} \frac{\hat{U}}{T_c} t & 0 < t < T_c \\ 0 & t > T_c \end{cases} \quad (6.2)$$

De esta manera se logra obtener la señal  $u_1(t)$ :

$$u_1(t) = \text{rampa}(+) + \text{rampa}(-) + \text{escalón} \quad (6.3)$$

Por medio de la transformada de Laplace es posible determinar la señal de salida:

$$u_2(t) = \frac{\hat{U}}{T_c} \left\{ \left[ t - \tau(1 - e^{-t/\tau}) \right] - \left[ (t - T_c) - (\tau - T_c)(1 - e^{-(t-T_c)/\tau}) \right] \right\} \quad (6.4)$$

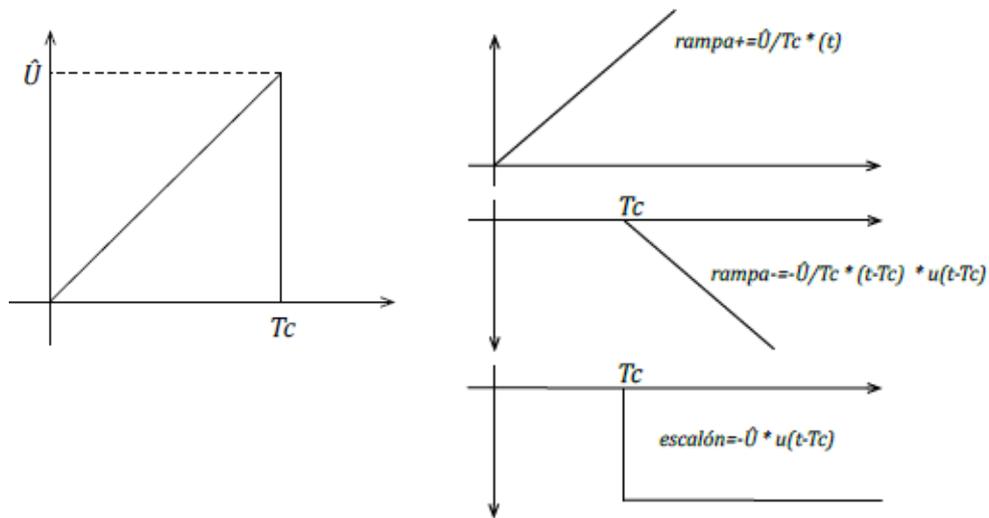


Fig. 6.6. Representación de un impulso cortado en el frente.

Lo que permite apreciar una diferencia entre la señal de entrada y de salida y un  $\Delta U$  en la tensión máxima. Siendo que  $\tau \ll T_c$ , y analizando la ecuación anterior, la salida tiene un retraso temporal  $\tau = RC$  respecto de la entrada.

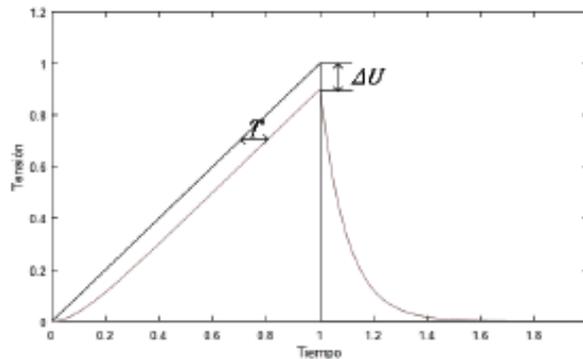


Fig. 6.7. Curva Tensión-Tiempo

Lo que lleva a un tiempo de respuesta  $T$  para una respuesta normalizada al escalón  $g(t)$ :

$$T = \int_0^{\infty} [1 - g(t)] dt \quad (6.5)$$

Con un  $\Delta U$  en el tiempo de corte:

$$\Delta \hat{U} = \frac{\hat{U}}{T_c} \left[ -\tau \left( 1 - e^{-T_c/\tau} \right) \right] \quad (6.6)$$

Y al ser  $T_c \gg \tau$  :

$$\Delta \hat{U} = -\frac{\hat{U}}{T_c} \tau = -S.T \quad (6.7)$$

Con  $S = \frac{\dot{U}}{T_c}$ , la velocidad de crecimiento de la tensión, se concluye que la incertidumbre es proporcional a la velocidad  $S$  y al tiempo de respuesta  $T$ .

Para un circuito de un sistema de medición de impulso modelado como un RLC (Fig. 6.8), la respuesta al escalón podrá ser sobre amortiguada, críticamente amortiguada o subamortiguada.

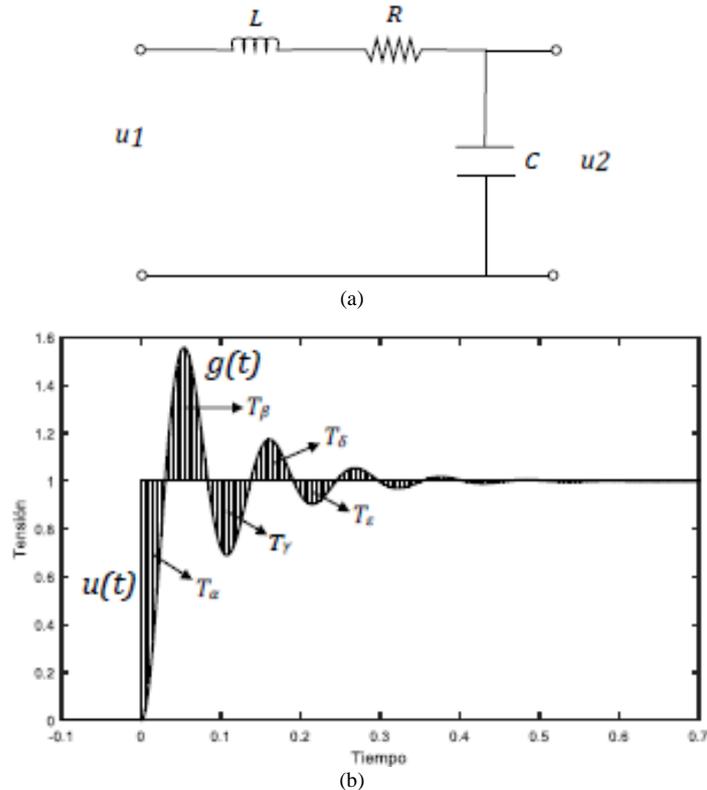


Fig. 6.8. Circuito modelado como RLC y respuestas posibles ante escalón.  
 (a) Sistema de medición de impulso como un circuito RLC. (b) Respuesta al escalón de un circuito RLC subamortiguado.

Resultando un tiempo de respuesta  $T$  producto de la suma o resta de las áreas sombreadas.

$$T = T_{\alpha} - T_{\beta} + T_{\gamma} - T_{\delta} + T_{\epsilon} \quad (6.8)$$

### 5.1.2- Determinación de la respuesta escalón de un Sistema de medida de Alta Tensión

La medida de la respuesta escalón es un método tradicional para caracterizar divisores de tensión y osciloscopios o registradores digitales. A partir de la respuesta escalón  $g(t)$  se caracteriza el comportamiento dinámico de divisores e instrumentos de medida. La evaluación del desempeño dinámico mediante los parámetros de respuesta es aplicable para la evaluación de los sistemas de referencia. Los parámetros se obtienen a partir de la respuesta integral al escalón  $T(t)$ :

$$T = \int_{O_1}^{\infty} [1 - g(t)] dt \quad (6.9)$$

Siendo  $O_1$  el origen de la respuesta escalón, el instante en el que la curva de respuesta arranca su crecimiento monótono desde nivel cero (ver Fig. 6.9).

Se aprecia el periodo de nivel de referencia que corresponde con el intervalo de tiempo  $[0, 5t_{min}, 2t_{max}]$  en el que el factor de referencia está dentro del 1%.

El nivel de referencia de la respuesta escalón es el valor medio  $I_R$  de la respuesta en su periodo de nivel de referencia; un sistema de medición puede presentar distintos niveles de referencia si tiene diferentes factores de escala, como uno para cada forma de onda distinta a medir. Cuando la curva de la

respuesta escalón se divide por el nivel de referencia se obtiene la respuesta escalón unidad  $g(t)$ , por lo que se encontraran diversas funciones  $g(t)$  como niveles de referencia establecidos.

$T_N$  es el tiempo de respuesta experimental de un sistema de medida, siendo igual al valor de la función  $T(t)$  para el instante  $t = 2t_{max}$ .

$$T_N = T(2t_{max})$$

El tiempo de respuesta parcial  $T_\alpha$  es el máximo valor de la integral de la respuesta escalón para  $t \leq 2t_{max}$ , igual al área sombreada en la Fig. 6.9; por lo general es igual  $T(t_1)$ , siendo  $t_1$  el instante del primer corte de la curva de la respuesta escalón unidad  $g(t)$  con la amplitud unidad.

$$T_\alpha = T(t_1)$$

El tiempo de respuesta residual es la diferencia entre el tiempo de respuesta experimental  $T_N$  y la integral de la respuesta escalón para un determinado instante  $t_i$ , en el que  $0_1 < t_i \leq 2t_{max}$ .

$$T_R(t_i) = T_N - T(t_i)$$

Se tendrá el tiempo de estabilización  $T_s$  (Fig. 6.10), el cual es el tiempo en que la respuesta alcanza un comportamiento estable, fuera de las oscilaciones que pueda tener; es considerado luego del tiempo de respuesta experimental como el parámetro más importante, definido como el menor tiempo en que se cumple la siguiente relación:

$$|T_N - T(t_s)| < 0,02 \cdot t_s \quad (6.10)$$

Se tendrá una sobretensión en la respuesta escalón de valor igual a la diferencia entre el valor máximo de la respuesta escalón  $g_{max}(t)$  y la unidad de referencia, expresada en valor porcentual:

$$\beta_{rs} = 100\% (g_{max}(t) - 1)$$

La norma IEC 60060-2:2010 fija los valores máximos de estos parámetros (Tabla 4.6).

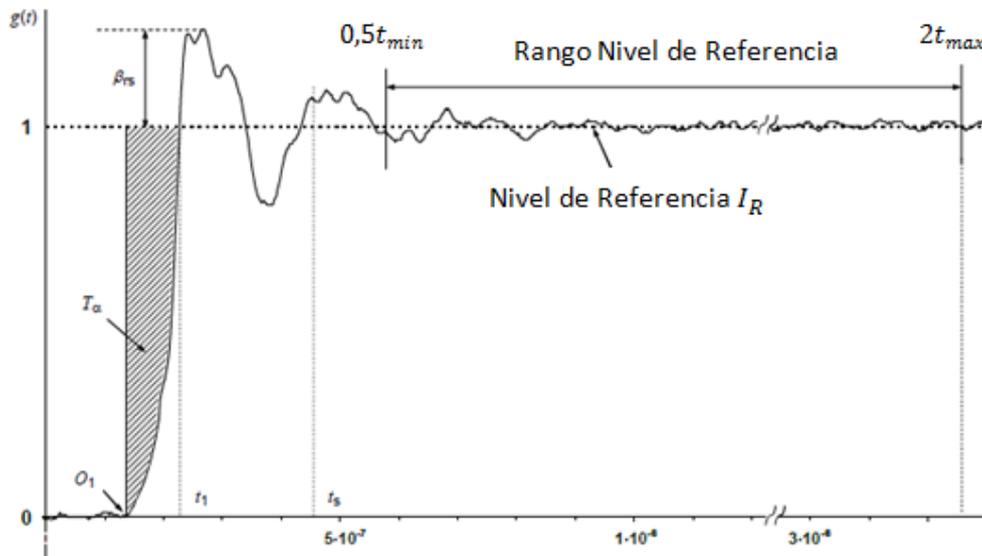


Fig. 6.9. Definición de la respuesta escalón unidad  $g(t)$ .

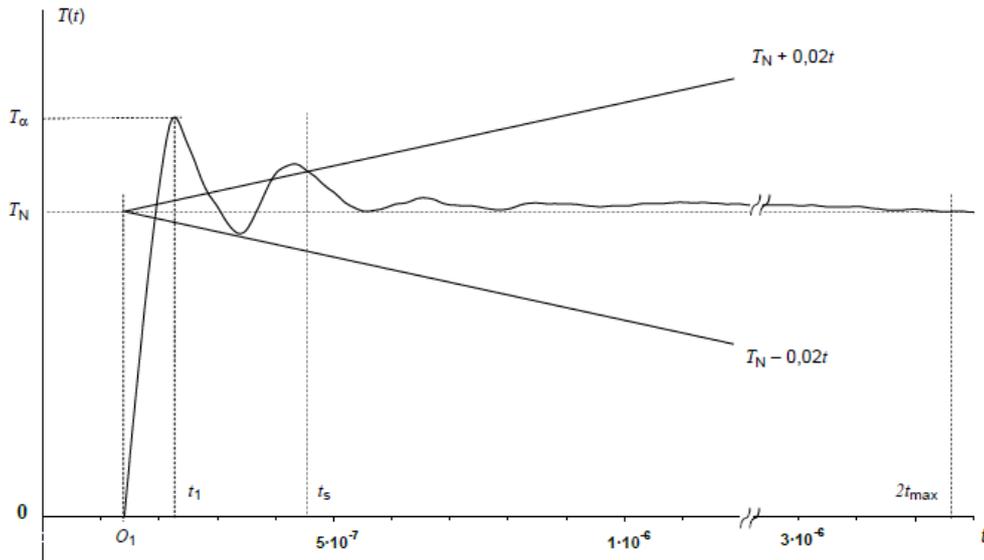


Fig. 6.10. Definición de la Integral Respuesta Escalón.

## 6.2 Ensayo de calibración de divisor ante tensión de impulso atmosférico

Para efectuar acabo la calibración del divisor se efectuará la caracterización del comportamiento dinámico, verificación del factor de escala según puntos 8.1.4 y 8.5.2 respectivamente de la norma IEC 60060-2, explicadas anteriormente, considerando además las incertidumbres de los distintos elementos utilizados.

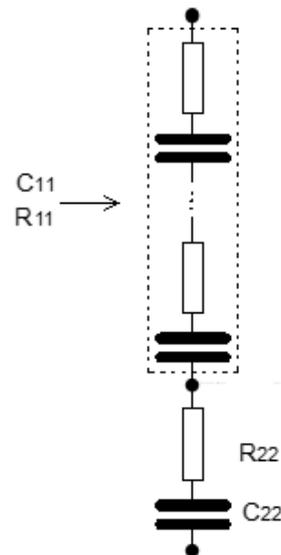
Datos de chapa del divisor capacitivo amortiguado:  
 Marca: HAEFELY BASEL.  
 Modelo (WO): 554013.  
 N° Serie: 148111.  
 Tensión máxima: 1000 kV.  
 Valor de capacidad mostrado en chapa: 1440 pF.

### 6.2.1 Medición de capacidad y resistencia del divisor

Para la medición se utilizó un medidor RLC, marca Hewlett Packard, modelo 4263 A para realizar las mediciones de los parámetros del divisor:

Ensayo	R <sub>z2</sub> [Ω]	C <sub>z2</sub> [nF]	C <sub>11</sub> [nF]	R <sub>11</sub> [Ω]
2012	0.767	1058	1.334	725
2018	0.7669	1059	1.347	735

Tabla 6.1. Resultado de mediciones de parámetros del divisor capacitivo.





(a)



(b)



(c)

Fig. 6.11. Divisor y equipo de medición.

a) circuito de medición de R y C, b) chapa de características del Divisor Haefely – Basel, c) medidor RLC HP 4263.

Entre las características del equipo de medición se encuentran:

- Exactitud de 0,1%.
- Frecuencias de ensayo: 100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz.
- Niveles de tensión de 50, 100, 250 y 500 mV y 1 Vrms.
- Alta velocidad de medición de 25 ms.
- Display, 5 dígitos.

Para usar el medidor RLC, se hace primero una corrección del aparato estando las pinzas abiertas en su posición de conexión a utilizar y otra estando en cortocircuito.

Los valores de resistencias y capacidades se obtuvieron una vez estabilizados los valores que brinda el medidor.

El factor de escala del divisor de tensión en forma analítica se calcula como:

$$F = \frac{U_{AT}}{U_{BT}} = \frac{C_{22}(1 + R_{11}C_{11})}{C_{11}}$$

o

$$F = \frac{C_{22} + C_{11}}{C_{11}} = \frac{C_{22}}{C_{11}} + 1$$

En el que se desprecia el bajo valor de la resistencia en lado de baja “R<sub>22</sub>” por su bajo valor y siendo que prácticamente son iguales los factores calculados por las dos maneras, debido a los valores de las capacidades, y además de que la forma simplificada fue el utilizado en el factor de escala registrado en 2012; se adopta en general la forma simplificada. Se aprecia una diferencia entre los factores de 0,12%.

Los resultados de la medición realizada fueron los de la Tabla 6.2:

Ensayo	$F_{\text{simplificado}}$	F
2018	787,191537	786,192315

Tabla 6.2. Valores de los Factores de escala calculados.

Un valor adecuado de relación de tensión sería uno al que ante una señal de entrada del orden del 10% de tensión nominal del divisor, se obtenga una señal de salida suficientemente grande (decenas de volt) de manera que sea poco susceptible de ser perturbado por ruidos, y a la vez para una señal de entrada igual al valor nominal del divisor, una señal de salida inferior al máximo valor de entrada del equipo registrador.

### 6.2.2- Factor de escala ante excitación

Para un ensayo realizado con anterioridad ante una entrada senoidal a 50 Hz, se utilizó (ver Fig. 6.12):

- Transformador de medida de tensión MESSWANDLER, relación 100:1
- 2 Multímetro FLUKE 8845A, N° serie 1677029, 1736015



Fig. 6.12. Equipos utilizados para el cálculo del F ante una excitación senoidal.  
(a) Transformador de medida Messwandler. (b) Multímetro Fluke 8845 A.

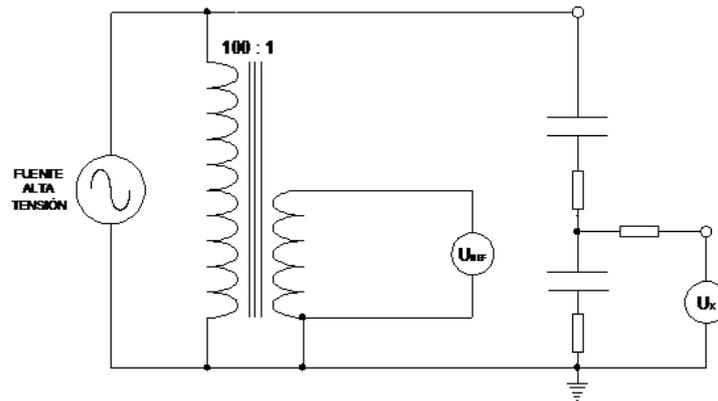


Fig. 6.13. Circuito de ensayo para el cálculo del F ante excitación senoidal.

Las mediciones realizadas tuvieron los resultados de la Tabla 6.3:

$U_{Ref}$ [V]	$U_x$ [V]	F
100,3192	12,71654	788,89
100,3453	12,71977	788,89
100,3309	12,71830	788,87
100,3568	12,72087	788,91
100,3226	12,71654	788,91
100,2846	12,71223	788,88
100,3246	12,71724	788,89
100,3057	12,71469	788,90
100,3558	12,72099	788,90
100,2845	12,71239	788,87
Media		788,89
DS		0,02

Tabla 6.3. Valores de mediciones realizadas ante una tensión senoidal y el F correspondiente.

Observar que existe una mínima diferencia entre los factores de escala presentados, del orden de 0,215%.

### 6.3- Comportamiento Dinámico

El circuito para efectuar las medidas de las respuestas escalón de un divisor debe ser lo más próximo posible a las condiciones reales de operación. En la figura se aprecian los diferentes circuitos aceptados para la medida de la respuesta escalón, siendo el recomendado el primero, y para el caso de divisores de grandes dimensiones los restantes.

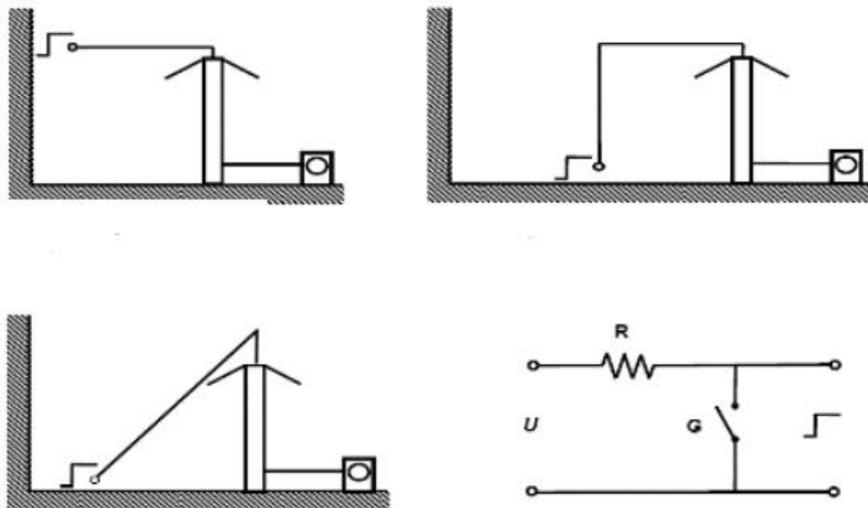


Fig. 6.14. Circuitos de medición recomendados por la Norma IEC 60060-2 para estudio del comportamiento dinámico.

En la figura también se aprecia el circuito eléctrico para generar un escalón de tensión a partir de una fuente de continua con una resistencia de salida R. La salida del generador es cortocircuitada por un interruptor G para producir una caída de tensión súbita (escalón de tensión negativo, con valor de nivel cero la tensión de continua y nivel de referencia del escalón el nivel de la tensión de tierra).

#### 6.3.1- Metodología

Se aplicó una señal escalón al borne de alta tensión del divisor de impulso registrándose la señal de salida con un osciloscopio de almacenamiento digital.

Los datos numéricos obtenidos del oscilograma, fueron procesados con el programa de cálculo matemático MATLAB a fin de poder obtener los parámetros dinámicos de acuerdo al ANEXO C de la norma de referencia.

En la Fig. 6.15 se muestra el esquema circuital utilizado, siendo:

- Q: Generador de onda cuadrada HIPOTRONICS HG-1B, 200 V de tensión pico de salida, frecuencia de 25 pps.
- OSCILOSCOPIO: WaveSurfer 104MXs-B – Lecroy.
- Distancia desde el centro del divisor a la pared (L): 3 m.
- Altura del divisor (h): 3,3 m.

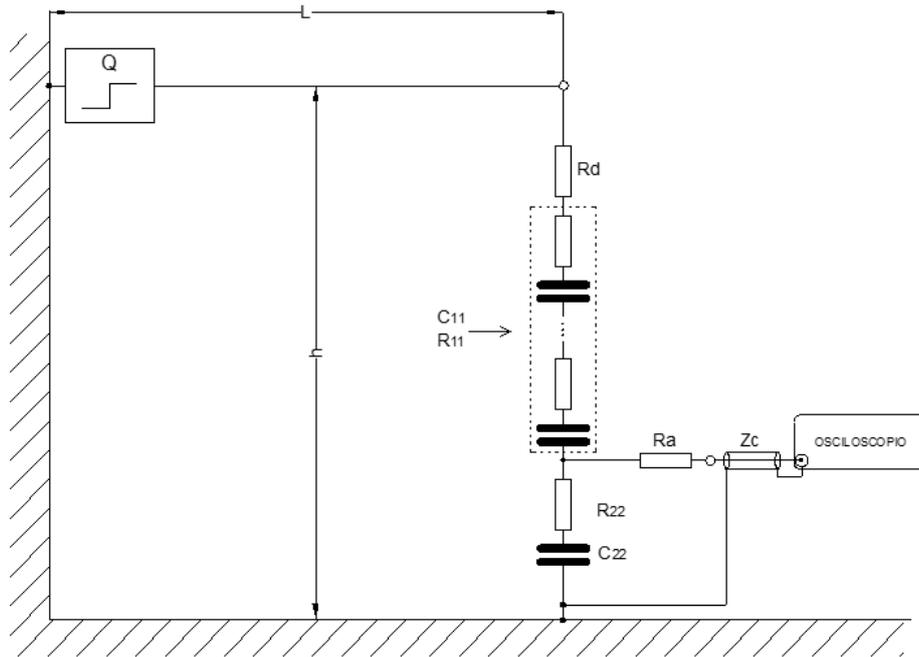


Fig. 6.15. Esquema circuital utilizado para estudio de comportamiento dinámico.

El generador de onda cuadrada debe estar a la altura del divisor (3 m) a fin de que se logre lo que recomienda la norma IEC-60060-2 Anexo C sobre la disposición de los equipos.

En las Fig. 6.16 se pueden apreciar el circuito utilizado y los componentes:



(a)



(b)



(c)

Fig. 6.16. Equipos y su disposición para estudio del comportamiento dinámico.  
(a) Generador de onda cuadrada. (b) Osciloscopio LeCroy – WaveSurfer 104 MXs. (c) Configuración del circuito.

### 6.3.2- Desarrollo de la prueba

Se procede a iniciar el funcionamiento del generador de onda cuadrada y configurar adecuadamente el nivel de disparo, ganancia del canal vertical utilizado y base de tiempo del osciloscopio, de manera de poder visualizar en pantalla el flanco descendente de la señal y su posterior estabilización en un ciclo de la señal.

En este caso la señal ingresaba al canal N° 1 de los osciloscopios, los cuales presentan una escala de tensión 50 mV/div y de tiempo de 0,5  $\mu$ s/div.

Se adopta un rango de nivel de referencia de  $t_{\text{mín}}=1,15 \mu\text{s}$  a  $t_{\text{máx}}=4,7 \mu\text{s}$  para nuestro rango de tiempo de frente para las clausulas 8.3 y el anexo C de la norma, abarcando de esta forma el rango del tiempo de frente de una onda de impulso atmosférica normalizada.

De esta manera se puede abarcar los impulsos de tensión atmosférica de  $1,2 \pm 30 \%$ . En la Figura se puede apreciar la respuesta al escalón, observándose que el valor de la amplitud se ha estabilizado claramente a partir de la muestra numero 4000 (3,68  $\mu$ s).

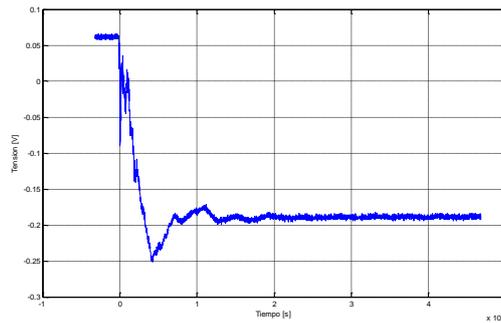


Fig. 6.17. Oscilogramas originales de la respuesta al escalón medido con ruido a la salida del divisor.

En la Fig. 6.17 se visualiza la respuesta que brinda el oscilograma con los datos originales (“plot(t,a)”), al cual antes se eliminó el ruido inicial que presentaba mediante cuadrados mínimos a fin de poder apreciar más la forma de la verdadera respuesta (Fig. 6.18).

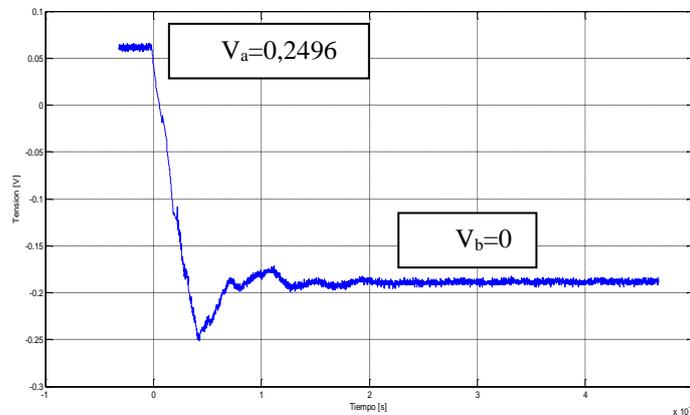


Fig. 6.18. Oscilograma original de la respuesta al escalón medido a la salida del divisor sin ruido.

La respuesta al escalón cumple con los requerimientos para el uso de este método (Clausula C.4 de anexos de Norma IEC 60060-2), puesto que el rise time (tiempo de subida) del escalón aplicado con el generador de 15 ns es menor a 1/5 del tiempo de respuesta parcial  $T_{\alpha}$ .

También se cumple con que la respuesta al escalón dentro del rango de nivel de referencia este dentro del 2 % y respecto a que las diferencias entre los niveles de la respuesta no difieran en 1%, se llegó que para la medición realizada con el osciloscopio Lecroy 9304A, se obtiene una altura del escalón de 0,248V mientras que para la medición con el osciloscopio LeCroy WaveSurfer 104MXs, una de 0,2496 V, registrando una diferencia en la altura de 0,641%, inferior al límite.

El ruido presente en los ensayos y la incertidumbre de los aparatos de medición hace que se encuentre una diferencia entre el factor de escala hallado anteriormente y el que se obtiene al calcular la relación de tensiones del generador de onda cuadrada y la tensión de medición del osciloscopio; el ruido podría

reducirse con un generador de tensión escalón mayor al utilizado de manera de poder mejorar la relación señal/ruido.

Se grabó un oscilograma en formato archivo de datos de MATLAB “DAT” a fin de poder procesar los puntos de la respuesta.

### 6.3.3- Procesamiento de datos

Se abrió el archivo “C1mi6011D.dat” con el programa MATLAB, se eliminaron las primeras filas del encabezamiento que presentaban datos innecesarios, donde no comienza el flanco descendente.

- Se utiliza el programa desarrollado en MATLAB (anexo C) obteniéndose:
- Gráfico con los datos de amplitud y tiempo normalizados: plot (t1\_off, g)

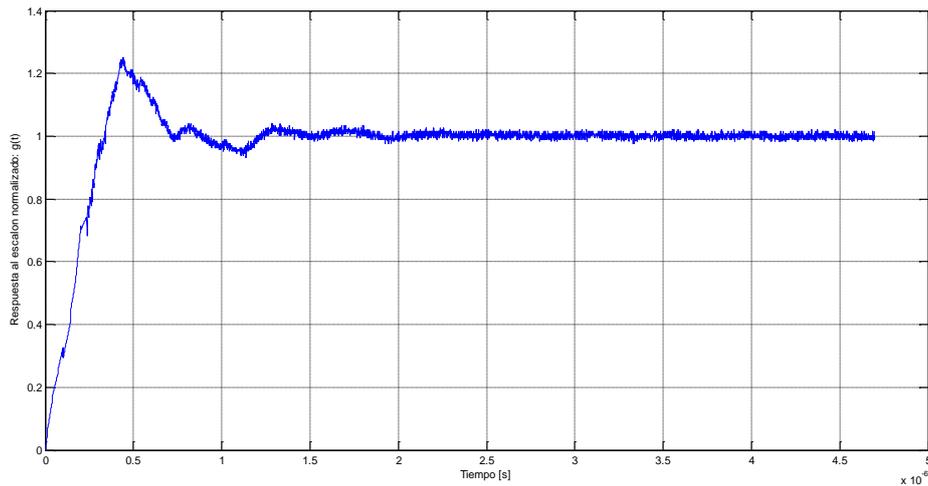


Fig. 6.19. Forma de onda normalizada de la respuesta al escalón a la salida del divisor.

Se observa que, dentro del rango de nivel de referencia, una vez transcurrido el transitorio, se obtiene una variación máxima de la tensión de 0,02 V en la forma de onda normalizada de la respuesta, que corresponde a un 2 %.

- Gráfico de la función T con las rectas positivas y negativas para determinar el tiempo de establecimiento Ts: Plot (t1\_off,T, t1\_off,recta\_positiva, t1\_off, recta\_negativa)

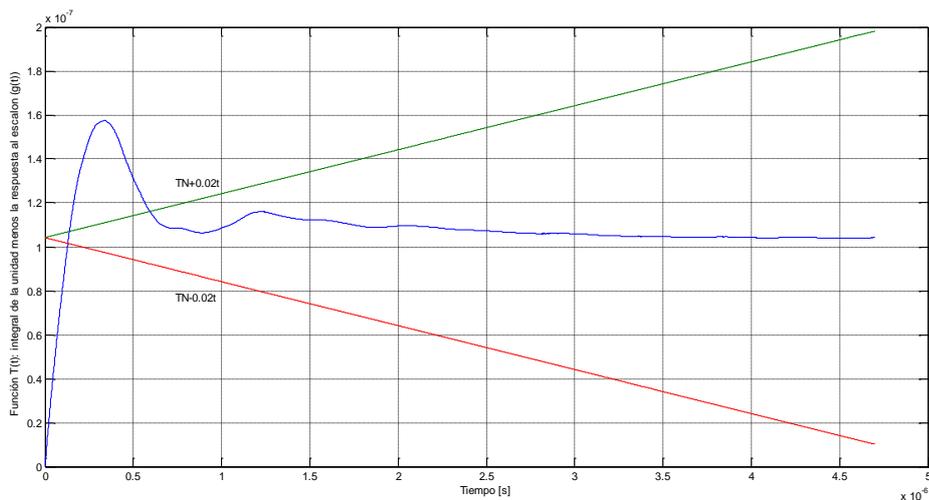


Fig. 6.20. Función integral de la unidad menos la respuesta al escalón.

Siendo:

$$T = \int_{0_1}^{\infty} [1 - g(t)] dt$$

La incertidumbre en el cálculo de los parámetros temporales se considera menor a 10 %, siendo que se utilizó el osciloscopio de mayor exactitud disponible para obtener datos, una fuente de tensión de alta estabilidad, y todos los dígitos disponibles en los programas.

Los valores obtenidos no están dentro de los límites establecidos para un sistema de referencia, lo cual se esperaba debido al uso que tuvo durante muchos años y su falta de mantenimiento. Se descarta su uso como divisor de medición de referencia.

Valores	Tiempo de respuesta experimental $T_N$	Tiempo de respuesta parcial $T_\alpha$	Sobreimpulso $\beta(\%)$	Tiempo de establecimiento $t_s$
Obtenidos	104,17 ns	157,461 ns	25	594,2 ns
Recomendados para sistema de referencia	15 ns	30 ns		200 ns

Tabla 6.4. Valores calculados de parámetros correspondientes al comportamiento dinámico y los recomendados por norma.

#### 6.4- Incertidumbre en el cálculo del factor de escala

La incertidumbre en el cálculo del factor de escala se obtiene basándose en los lineamientos de la norma IEC 60060-2. Siendo:

$$F = \frac{U_{AT}}{U_{BT}} = \frac{C_{22}}{C_{11}} + 1$$

En las ecuaciones se calculan los coeficientes de sensibilidad  $c_1$  y  $c_2$  para las incertidumbres en las mediciones de las capacidades.

$$c_1 = \frac{\partial F}{\partial C_{11}} = -\frac{C_{22}}{C_{11}^2} = 583,66$$

$$c_2 = \frac{\partial F}{\partial C_{22}} = \frac{1}{C_{11}} = 0,74$$

Las incertidumbres de las mediciones de capacidad son:

$$E_C = \pm 0,1\% C$$

Respecto a la temperatura, se tiene una variación de la capacidad del capacitor de alta tensión ( $C_{11}$ ) con un coeficiente de temperatura de  $-140.10^{-6} C/^\circ C$ , y para el de baja tensión ( $C_{22}$ ) de  $30 \text{ PPM}/^\circ C$ .

$$\frac{\partial F}{\partial T} = \frac{\partial C_{22}}{\partial T} \frac{1}{C_{11}} \Delta T + \frac{C_{22}}{C_{11}^2} \frac{\partial C_{11}}{\partial T} \Delta T$$

$$\frac{\partial F}{\partial T} = \frac{30.1059 \text{ nF}}{1000000 \text{ }^\circ C} \frac{1 \text{ }^\circ C}{1,347 \text{ nF}} + \frac{1059 \text{ nF}}{(1,347 \text{ nF})^2} 140.10^{-6} \cdot 1,347 \cdot \frac{\text{nF}}{^\circ C} 1^\circ C = 0,1337$$

#### 6.4.1- Estabilidad a largo plazo

Para la estabilidad a largo plazo se tiene que la incertidumbre es (acorde a la cláusula 5.6):

$$u_{LP} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{F_2}{F_1} - 1 \right| \frac{T_{use}}{T_2 - T_1}$$

En el que el término " $T_2 - T_1$ " representa el intervalo de tiempo entre los que se calcularon los factores de escala  $F_1$  y  $F_2$ . Siendo  $F_1=794,1034$  y  $F_2=787,1915$ :

$$u_{LP} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{787,1915}{794,1034} - 1 \right| = 0,0051$$

De manera que se tiene una incertidumbre de estabilidad a largo plazo de 0,5145 % respecto al factor adoptado como de referencia.

#### 6.4.2- Incertidumbre por comportamiento dinámico

Para el estudio del comportamiento dinámico, según recomienda la norma, se deberá utilizar el método de la convolución en las mediciones de la respuesta escalón.

El método de convolución se usa para evaluar el comportamiento dinámico de un divisor de tensión impulso o un sistema de medición de tensión de impulso completo; utiliza la respuesta escalón del sistema de medición para calcular las formas de onda de otros impulsos de salida. Los parámetros de la onda de impulso de salida en relación con la forma de onda de entrada se pueden utilizar para evaluar la calidad del sistema de medición para una forma de onda particular a ser medida.

El método asume que la respuesta al escalón del sistema de medición está correctamente medida y la onda de entrada utilizada en el cálculo es representativa de la verdadera onda de impulso.

Si la onda de impulso de entrada y la respuesta escalón unitaria (normalizada) de un sistema de medición de impulsos son  $V_{in}(t)$  y  $g(t)$ , respectivamente, la salida,  $V_{out}(t)$ , se puede expresar por la siguiente integral de convolución:

$$V_{out}(t) = \int_0^t V_{in}'(\tau) \cdot g(t - \tau) d\tau$$

Y para  $V_{in}(t)$  y  $g(t)$  muestreados con el mismo intervalo de muestreo y el número de muestras de  $g(t)$ , la integral de convolución continua se reduce a suma de convoluciones discretas:

$$V_{out}(i) = \sum_{k=0}^i V_{in}'(k) \cdot g(i - k) \cdot \Delta t \quad i = 0,1,2,3 \dots, n - 1$$

Donde:

$V_{out}(i)$  corresponde a la tensión discreta de salida  $i$ .

$V_{in}'(i)$  es la derivada de la tensión de entrada correspondiente a la discretización  $i$ .

$g(i)$  es la respuesta escalon unitaria correspondiente a la discretización  $i$ .

$n$  es el numero de discretiones en el rango de trabajo, o muestras.

$\Delta t$  es el intervalo de muestreo.

A fin de poder simular la onda de tensión impulso atmosférico para diferentes tiempos de frente, se puede usar la siguiente función denominada doble exponencial:

$$U(t) = A \left( e^{-(t-t_d)/\tau_1} - e^{-(t-t_d)/\tau_2} \right)$$

Partiendo de esta base se itera variando las constantes de tiempo para obtener ondas de impulso atmosférico de distintos tiempos de frente.

Para:

- $A$  : amplitud de la onda 515.
- $\tau_1$  : constante de tiempo de 70  $\mu s$ .
- $\tau_2$  : constante de tiempo de 0,4 [ $\mu s$ ].
- $t_d$  : origen real o virtual de la curva.

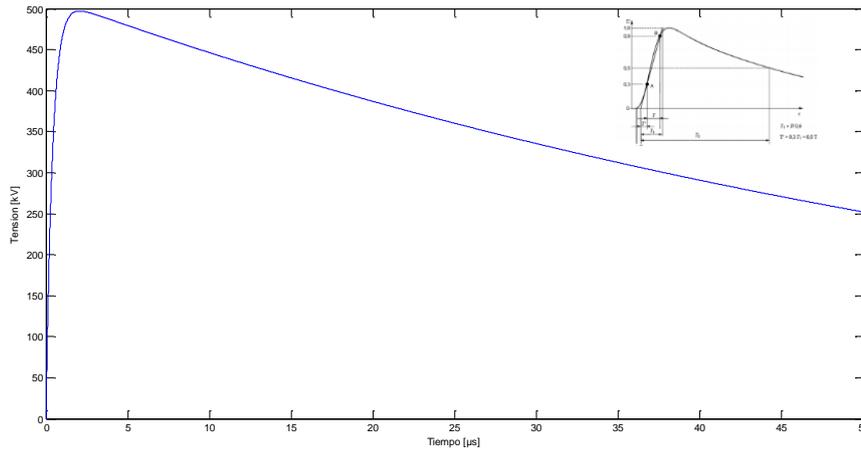


Fig. 6.21. Simulación de onda de tensión impulso atmosférico.

Resultando que para un tiempo de frente de 1,1818 se tiene un error de 0,4296%, calculado como la diferencia entre  $V_{out}(i).F$  y  $V_{in}(i)$  adoptando una distribución rectangular.

### 6.5- Conclusión

Las incertidumbres calculadas se resumen en la siguiente Tabla 6.5:

Fuente de incertidumbre	Valor	Incertidumbre típica ( $u_i$ )	Grados de libertad	Coefficiente de sensibilidad $c_i$	$(c_i \cdot u_i)^2$	
Medición de $C_{11}$ [nF]	1,347	0,001347	nF	$\infty$	583,66	0,618094748
Medición de $C_{22}$ [nF]	1059	1,059	nF	$\infty$	0,74	0,614122996
Temperatura	23	1	°C	$\infty$	0,1337	0,01787569
Comportamiento dinámico		0,4296	%	$\infty$	787,1915	11,43640001
Estabilización a largo plazo		0,5145	%	$\infty$	787,1915	16,40331218

Tabla 6.5. Resumen de las incertidumbres calculadas en la calibración del divisor en estudio.

Siendo de la expresión 2.39:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2}$$

De la misma se obtiene que la incertidumbre combinada del factor de escala es de 5,3935, con una incertidumbre expandida de 10,8 ( $k=2$ ), que representa una incertidumbre relativa porcentual de 1,38 % logrando ser un sistema de medición aprobado, pero no de referencia, ya que no respeta las recomendaciones de la norma IEC 60060-2 sobre los valores de los parámetros propios del estudio del comportamiento dinámico.

Se concluye que el divisor en estudio presenta un factor de escala de:

$$F = 787 \pm 11$$

## VII – Calibración de divisor capacitivo a tensión alterna

Esta calibración es demostrativa y se muestra el proceso que se realiza en el laboratorio para calibrar un divisor de tensión capacitivo de relación 1000:1, compuesto por un capacitor de AT H&B 300 kV 102 pF y capacitores de BT de 99,9 nF, para lo mismo se hará uso de un motogenerador a 50 Hz.

### 7.1- Cálculos iniciales en el divisor de referencia

Para la determinación de la relación del divisor de referencia Micafil, se dispone de un medidor RLC HP 4263 utilizado en los ensayos del divisor de impulso, para la medición de la capacidad en la rama de baja tensión “ $C_{BT}$  y  $C_{cable}$ ”, y para la medición de la capacidad en la rama de AT “ $C_{AT}$ ”, se utiliza un puente Schering (ver anexo) con capacitor patrón Micafil, obteniéndose así la relación del divisor de referencia  $K$ :

<u>Medición de la capacidad en la rama de baja tensión <math>C_{BT}</math></u>	
Instrumento utilizado:	Multímetro HP 4263A
Frecuencia de medición:	100 Hz
$C_{BT}$ [nF]	81,827
$C_{BT} + C_{cable}$ [nF]	82,840

*Tabla 7.1. Medición de  $C_{BT}$  del divisor de referencia.*

<u>Medición de la capacidad en la rama de Alta tensión <math>C_{AT}</math></u>		
Instrumento utilizado:	Puente SCHERING	
Capacitor de Referencia $C_n$	49,978 pF	$C_{patrón}$ MICAFIL
Valor configurado $R_4$	Se realizan ajustes de manera de configurar la elipse en el detector de cero a una línea horizontal centrada.	
Valor $R_3$ de balance		
Valor $tg \delta$ de balance	$C_x = \frac{C_n \cdot R_4}{R_3} = \frac{49,978 \text{ pF} \cdot \frac{1000}{\pi}}{1553,31}, \text{ tg } \delta \approx 0$	
Valor determinado de $C_X$	10,2416 pF	

*Tabla 7.2. Medición de  $C_{AT}$  del divisor de referencia.*

La relación del divisor de referencia se calcula como:

$$K = \frac{C_{BT} + C_{cable}}{C_{AT}} + 1 = \frac{82840 \text{ pF}}{10,2416 \text{ pF}} + 1 = 8089,6$$

En la Fig. 7.1 siguiente se encuentra el esquema de conexión del puente Schering.

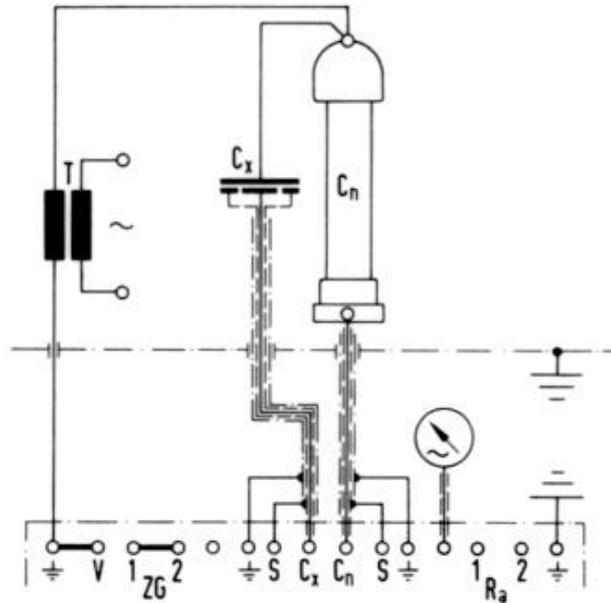


Fig. 7.1. Esquema de medición de  $C_{AT}$  del divisor de referencia.

Se concluye que la relación del divisor de referencia es 8089,6.

## 7.2- Calculo del factor de escala del divisor en estudio

Para la relación 1000-1 del divisor a ensayar, se utilizó un Multímetro Hewlett-Packard, modelo 34401A, #serie US 36102526 (resolución  $6 \frac{1}{2}$  dígitos y hasta 1 kV de tensión de entrada).

Se registró los valores tomados con el equipo a ensayar y el de referencia y se calcula el desvío, tal como se muestra en la Tabla 7.3, siendo la Tensión de referencia:

$$U_{ATReferencia} = U_{DMM} \cdot K_{Referencia}$$

Valores de referencia		Muestra	Desvío %
U [V] DMM	$U_{AT}$ [kV]	$U_{AT}$ [kV]	
0,63	05,11	5,149	0,7
1,26	10,17	10,244	0,7
1,89	15,32	15,44	0,8
2,53	20,43	20,57	0,7
3,16	25,56	25,75	0,7
3,79	30,68	30,9	0,7
5,07	40,98	41,27	0,7
6,31	51,05	51,41	0,7
7,58	61,32	61,77	0,7
10,10	81,70	82,31	0,7
12,65	102,32	103,07	0,7
15,18	122,82	123,8	0,8
17,71	143,25	144,3	0,7
20,25	163,80	165	0,7
22,77	184,19	185,5	0,7

25,31	204,72	206,2	0,7
27,81	224,97	226,6	0,7
30,36	245,56	247,2	0,7
32,91	266,19	268,1	0,7
35,43	286,61	288,5	0,7
37,98	307,20	306,3	-0,3

Tabla 7.3. Registro de tensión en los divisores de referencia y de estudio.

El desvío relativo porcentual:

$$s \% = \frac{UAT_{Muestra} - UAT_{Referencia}}{UAT_{Referencia}} \times 100$$

Las relaciones calculadas del divisor en estudio se encuentran en la Tabla 7.4:

U <sub>AT</sub> [kV]	Relación $k = \frac{U_{ATReferencia}}{U_{BTMuestra}}$
5,11	992,9
10,17	992,6
15,32	992,3
20,43	993,0
25,56	992,7
30,68	992,7
40,98	993,0
51,05	992,9
61,32	992,7
81,70	992,6
102,32	992,7
122,82	992,1
143,25	992,7
163,80	992,7
184,19	992,9
204,72	992,8
224,97	992,8
245,56	993,4
266,19	992,9
286,61	993,4
307,20	1002,9
<b>Promedio</b>	<b>993,3</b>

Tabla 7.4. Cálculo del factor de escala del divisor de referencia.

Luego se procedió al cálculo de la capacidad en la rama de alta tensión del divisor. Para lo cual se utilizó el puente Schering con capacitor patrón Micafil obteniéndose valores de  $tg \delta$ ,  $R_{3medida}$ ,  $R_{4config.Puente}$ ,  $C_n Referencia$ ,  $C_x Medido$  que figuran en la Tabla 7.5.

Tensión aplicada [kV]	tg $\delta$ medida	R <sub>3</sub> medida	R <sub>4</sub> config. Puente	C <sub>n</sub> [pF] Referencia	C <sub>x</sub> [pF] medido
50	< 10E-5	154,62	1000/pi	49,978	102,89
100					
150					
200					
250					
300					

Tabla 7.5. Cálculo de C<sub>AT</sub> del divisor en estudio.

Siendo:

$$C_{xMedido} = \frac{C_{nReferencia} \cdot R_4}{R_{3medida}} = 102,89 \text{ pF}$$

Para determinar las capacidades en las ramas de baja tensión, se hará uso del medidor HP4263A #serie 3145001937. En la Tabla 7.6, se registran los valores de C<sub>BT</sub> [nF], C<sub>BT</sub> + C<sub>cable</sub> [nF].

Relación	C <sub>BT</sub> [nF] en bornes	C <sub>BT</sub> + C <sub>CABLE</sub> [nF]
1000 a 1	100,03	102,1

Tabla 7.6. Cálculo de C<sub>BT</sub> del divisor en estudio.

En la Tabla 7.7 se resumen los valores de los parámetros del divisor a ensayar:

Relación de división			
Relación nominal	C <sub>AT</sub> [pF]	C <sub>BT</sub> + C <sub>CABLE</sub> [nF]	K = (C <sub>BT</sub> + C <sub>CABLE</sub> )/C <sub>AT</sub> + 1
1000	102,89	102,1	993,32

Tabla 7.7. Parámetros del divisor 1000:1 en estudio.

### 7.3- Incertidumbre del factor de escala

La incertidumbre en el cálculo del factor de escala se obtiene basándose en los lineamientos de la norma IEC 60060-2, y dado que:

$$F = \frac{U_{AT}}{U_{BT}} = \frac{C_{BT}}{C_{AT}} + 1$$

En las ecuaciones siguientes se calculan los coeficientes de sensibilidad  $c_1$  y  $c_2$  para las incertidumbres en las mediciones de las capacidades.

$$c_1 = \frac{\partial F}{\partial C_{AT}} = -\frac{C_{BT}}{C_{AT}^2} = 9,64 \text{ pF}^{-1}$$

$$c_2 = \frac{\partial F}{\partial C_{BT}} = \frac{1}{C_{AT}} = 0,0097 \text{ pF}^{-1}$$

Las incertidumbres en las mediciones de capacidades son:

- Incertidumbre en la medición de la capacidad  $C_{AT}$ : 0,02 pF.
- Incertidumbre en la medición de la capacidad  $C_{BT}$ : 0,1 %.

Con una incertidumbre tipo A de:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{2,23}{\sqrt{21}} = 0,49$$

La incertidumbre tipo A correspondiente es de 0,049 % respecto al factor de escala obtenido.

En la Tabla 7.8 a continuación se resumen las contribuciones de las incertidumbres.

Fuente de Incertidumbre	Valor de medición	Incertidumbre estándar "u"	Incertidumbre relativa "u%"	Coficiente de sensibilidad "c"	Grados de libertad	Contribución a la $u_c$ "( $c_i \cdot u_i$ ) <sup>2</sup> "
$C_{alta}$	102,89 pF	0,02 pF	0,019%	9,64	50	0,04
$C_{baja}$	102100 pF	102,1 pF	0,100%	0,0097	50	0,98
<b>Tipo A</b>		0,49	0,049%	1	20	0,24

Tabla 7.8. Incertidumbres en el cálculo del factor de escala.

Resultando una incertidumbre combinada en el cálculo del factor de escala de 1,12.

Para el cálculo de la incertidumbre expandida, se calculó los grados efectivos correspondientes siendo:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$$

Obteniéndose  $v_{eff} = 549,82$ , por lo que la incertidumbre de medición expandida fue calculada multiplicando la incertidumbre estándar combinada por un factor de cubrimiento  $k=2$ , lo cual corresponde a un nivel aproximado de confianza del 95% para una distribución normal.

Dado que la incertidumbre expandida fue de 2,24 que representa una relativa de  $U\% = 0,22\% < 1\%$  por lo que el divisor en estudio es de referencia, aunque se podrían realizar estudios para corroborar su comportamiento y calcular incertidumbres tales como de estabilidad, de variación con la temperatura, entre otros.

De esta manera se obtuvo un factor de escala:

$$F = 993,3 \pm 2,2$$

## **Conclusión Final**

Los ensayos realizados fueron los posibles en el momento de la ejecución, se podrían hacer estudios sobre el comportamiento a distintas temperaturas para lo cual se necesitaría de un ambiente de temperatura controlada o hacer estudios de comportamiento dinámico en CA y ver la respuesta Amplitud-Frecuencia. De todas formas, se llevaron a cabo para los distintos divisores diversos tipos de ensayos a fin de estudiar su comportamiento, estimar su contribución a la incertidumbre en el cálculo del factor de escala de los mismos, y conocer los tipos de ensayos que se realizan en una caracterización.

Respecto al divisor resistivo, se realizaron varios ensayos y se pudo afirmar que se trata de un divisor de referencia para hasta 40 kVcc y en lo pronto se piensa comparar con otro divisor de otro laboratorio. Además, se está analizando la idea del uso del electrómetro de Kelvin o balanza de Kelvin.

Para mejorar su rango nominal, se podría mejorar el anillo o electrodo de protección en la parte superior a fin de lograr un campo uniforme cerca de la columna resistiva disminuyendo así las pérdidas a tierra. Cabe destacar que las resistencias utilizadas no fueron diseñadas en particular para este divisor de tensión.

Por otra parte, el divisor capacitivo para tensiones impulso resulto ser un divisor aprobado, pero no de referencia, ya que no cumplió con los requisitos respecto al comportamiento dinámico. Esto era de esperar respecto a la experiencia de sus operarios y debido al uso del mismo.

Y, respecto al divisor capacitivo a tensión alterna, los resultados, por comparación con el divisor capacitivo de referencia del laboratorio de AT, nos permitió concluir que el divisor ensayado es de referencia si solo se considera los datos adquiridos del mismo, ya que su estudio fue solo demostrativo.



Anexo A

Onda de Impulso Atmosférico Normalizada

Impulso atmosférico que presenta un tiempo de frente de 1,2  $\mu\text{s}$  y un tiempo hasta un valor igual a la mitad de 50  $\mu\text{s}$ , denominado 1,2/50.

Para los valores especificados para el impulso normalizado y los medidos realmente, se tendrán las siguientes discrepancias:

- Valor de la tensión de ensayo  $\pm 3\%$ .
- Tiempo hasta el valor mitad  $\pm 20\%$ .
- Tiempo de frente  $\pm 30\%$ .

En el caso de que aparezcan oscilaciones o sobretensión cuya amplitud no supere el 5 % del valor de la máxima amplitud del impulso, se deberá considerar la frecuencia de las oscilaciones o la duración de la sobretensión. En concreto, según la norma, si la frecuencia de las oscilaciones es menor a 0,5 MHz, o la duración de la sobretensión es mayor de 1  $\mu\text{s}$ , la tensión de ensayo será el valor de la máxima amplitud del impulso. En los casos excluidos anteriormente (frecuencia  $\geq 0.5$  MHz, o duración de sobretensión  $\leq 1\mu\text{s}$ ) será necesario trazar una curva media, de forma que la tensión de ensayo será el valor de la máxima amplitud de la curva media, como se muestra en la Fig. A.1.

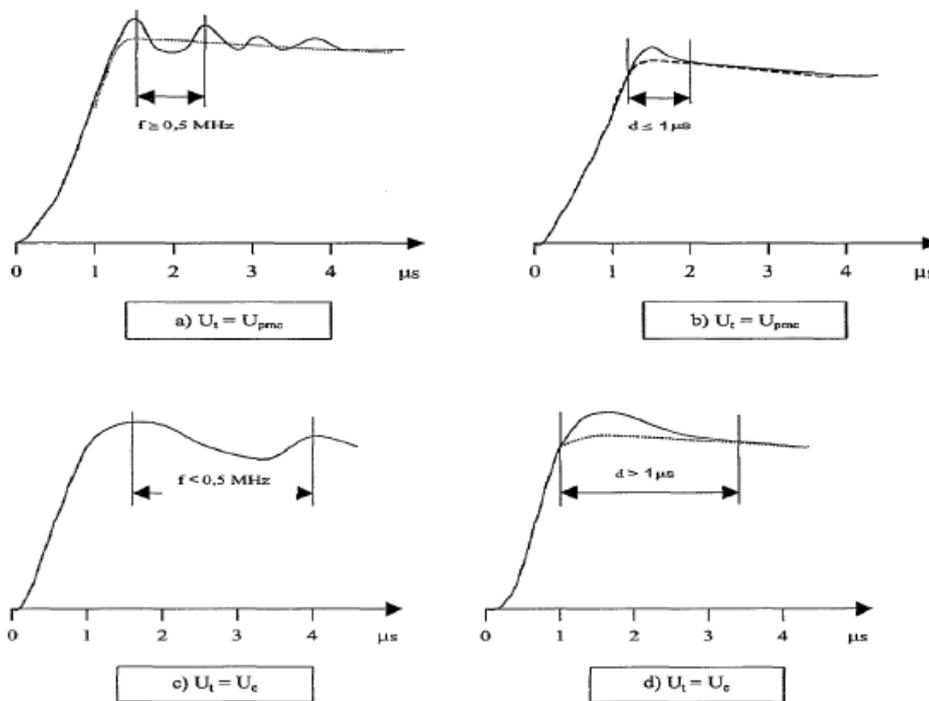


Fig. A.1. Reglas de evaluación de impulsos tipo rayo con oscilaciones o sobretensión, según la norma IEC 60060-1.

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

$$f = \frac{1}{2d}$$

Siendo:

$f$ : Frecuencia equivalente de la sobretensión.

$d$ : Duración de la sobretensión.

La norma de evaluación anterior se puede resumir mediante la expresión:

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

Donde:

$U_t$ : Tensión de ensayo.

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

$k$ : Factor de la tensión de ensayo (valiendo 1 para frecuencias menores de 0,5 MHz y 0 para frecuencias igual o mayor)

$U_e$ : Máxima amplitud del impulso registrado.

Existen diversas formas de onda para las cuales no es posible calcular los parámetros característicos, ni efectuar por tanto los correspondientes ensayos. En estos casos será necesario revisar el circuito de ensayo y el generador hasta conseguir la forma de onda adecuada.

En la Fig. A.12 se puede apreciar cuatro formas de onda no normalizadas, en la que la “e” y la “g” corresponden a formas de onda muy distorsionadas que no consiguen la evolución del impulso; la onda “f” tiene un tiempo de cola muy inferior a los valores normalizados, mientras que la onda “h” tiene un tiempo de frente muy inferior a los valores normalizados.

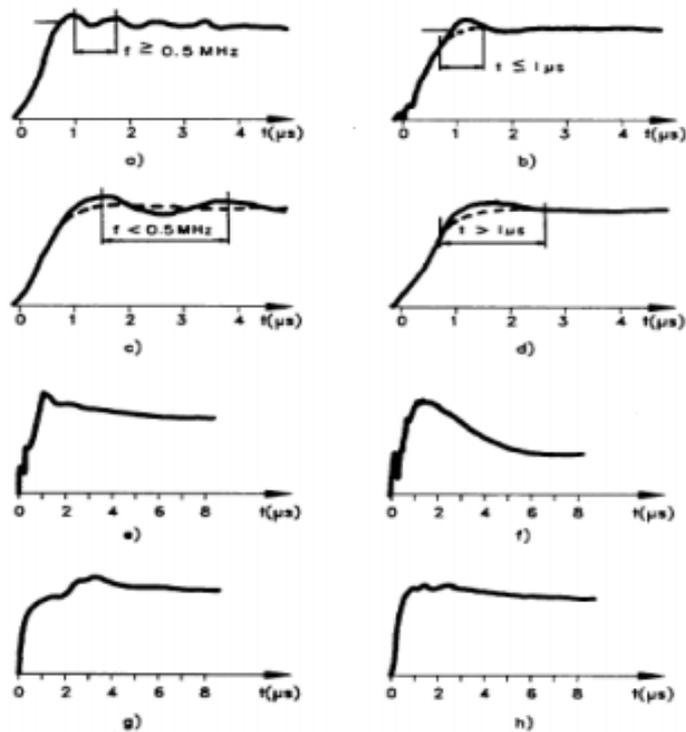


Fig. A.2. Ejemplos de impulsos atmosféricos con oscilaciones.

**Anexo B**

**B.1- El puente de Schering**

El puente de Schering se emplea para la medida de la capacidad, permitiendo además la medición de algunas propiedades de aislamiento ( $tg \delta$ ).

Se debe notar que la rama patrón solo contiene un capacitor. Por lo general, el capacitor patrón puede ser de mica de alta calidad para mediciones generales de capacidad o de aire para mediciones de aislamiento.

Los de mica de buena calidad, poseen perdidas muy bajas y por ende un ángulo aproximado de  $90^\circ$ , en cambio un capacitor de aire tiene un valor muy estable y un muy pequeño campo eléctrico, por lo que el material aislante se puede conservar fuera de cualquier campo fuerte.

Puesto que el capacitor patrón está en la rama 1, las sumas de los ángulos de fase de las ramas 3 y 1 será  $0^\circ + 90^\circ = 90^\circ$ . La conexión en paralelo del capacitor  $C_2$  con el resistor  $R_2$  proporciona a la rama 2 un ángulo de fase pequeño, ya que en general la medición desconocida de  $Z_x$  posee un ángulo de fase menor de  $90^\circ$ .

La ecuación de equilibrio del puente de Schering es:

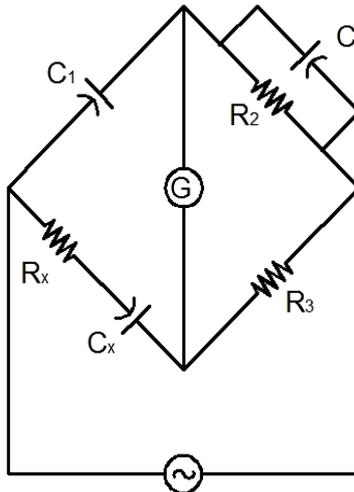


Fig. B.1. Diagrama de puente Schering.

El puente de Schering permite la medida precisa del factor de disipación,  $w. C_x. R_x$ .

También se emplea para la medida de los angulos de pérdida de aislantes y cables de alta tensión.

Para realizar esta medida, el nudo que une las ramas donde se encuentran las resistencias  $R_2$  y  $R_3$  se conecta a tierra.

La deducción de la ecuación de equilibrio del puente de Schering se lleva acabo aplicando la ecuación de equilibrio del puente de impedancias, es decir:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_x}{Z_3}$$

con:

$$Z_1 = \frac{1}{j. w. C_1}$$

$$Z_2 = \frac{R_2}{1 + j. w. R_2. C_2}$$

La impedancia equivalente en paralelo de la resistencia  $R_2$  y el capacitor  $C_2$ .

$$Z_3 = R_3$$

$$Z_x = R_x + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_x}$$

Sustituyendo:

$$\frac{\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_1}}{\frac{R_2}{1 + j \cdot \omega \cdot R_2 \cdot C_2}} = \frac{R_x + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_x}}{R_3}$$

Reordenando:

$$\frac{1 + j \cdot \omega \cdot R_2 \cdot C_2}{j \cdot \omega \cdot R_2 \cdot C_1} \cdot R_3 = R_x + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_x}$$

Igualando partes reales e imaginarias se obtiene el valor de  $R_x$  y  $C_x$ :

$$R_x = \frac{R_3 \cdot C_2}{C_1}$$

$$C_x = \frac{R_2 \cdot C_1}{R_3}$$

## B.2- Generador de tensión continua utilizado

La tensión de entrada para el transformador de alta tensión es suministrada por un amplificador de potencia transistorizada que operan a una frecuencia de 14,5 kHz. Los amplificadores de potencia clase B se estiman a una potencia de salida de 1,5 kW. La tensión de CA es rectificadora y multiplicada en el módulo rectificador. La tensión de salida de CC es medida con ayuda de un divisor de medición externo conectado al rectificador de alta tensión mediante un resistor amortiguado.

La tensión de referencia es controlada por el ajuste de dos potenciómetros de control en la unidad de control, rotulado “grueso” y “fino”.

Los módulos rectificadores llenos de aceite están equipados con orificios de llenado que durante su desplazamiento deben ser tapados. Para la operación, sin embargo, el tornillo de ajuste de los orificios de llenado superiores (en función de la polaridad de la unidad) deberá ser reemplazado por un tornillo especial con un orificio que es suministrado junto con la unidad. Esto es necesario para prevenir una acumulación de sobrepresión durante la operación.

Respecto a la polaridad, el modulo presenta en el exterior una señal de arriba o abajo.

Los contactos entre el modulo y el transformador de alta tensión son realizados automáticamente por contactos activados a resorte.

El divisor de medición modular contiene un resistor y un capacitor ubicados en un mismo cilindro y se conecta al rectificador mediante un resistor de amortiguamiento formado por dos resistores de 84,25 kΩ instalado horizontalmente como se observa en la Fig. B.2.



Fig. B.2. Resistencia de amortiguamiento entre modulo rectificador y divisor de medición.

Antes de comenzar la instalación, todos los cables de interconexión deber estar equipados con conectores que posibilitan un rápido y fácil set-up del sistema.

- 1- Conectar a tierra la baja y alta tensión del módulo rectificador y del divisor de medición como así también el tornillo de conexión a tierra de la unidad de control. Tanto como sea posible, todos los otros cables de conexión deberán ser puestos en paralelo con el cable a tierra.
- 2- Los cables de red eléctrica deberán ser conectadas a los terminales TB 1/R, TB 1/S, TB 1/T. Tensión de red 3x380 V, 50 Hz  $\pm 5\%$ , 2,5 kVA.
- 3- Conectar los cables coaxiales de frecuencia media entre el transformador de alta tensión y los sockets B3, B4, B5 en la parte trasera de la unidad de control.
- 4- Conectar el cable para la medición de tensión entre la parte inferior del divisor de medición y la parte trasera de la unidad de control (socket B6).
- 5- Conectar el cable para la corriente de medición entre la parte inferior del rectificador de alta tensión y la parte trasera de la unidad de control (socket B2).
- 6- Socket B1 de la parte trasera de la unidad de control está destinado a un eventual circuito de enclavamiento, para habilitar o no un accionamiento. La instalación solo puede activarse si los dos contactos de ese socket son conectados.

Para la operación del sistema se deberá verificar que:

- 1- El transformador de alta tensión y la unidad de control deberán ser puestas a tierra.
- 2- Acceso prohibido al rectificador de alta tensión.
- 3- Las luces de las lámparas de señal se encenderán al accionar el interruptor.
- 4- La lámpara “High Voltage On” se encenderá.
- 5- Presionar el botón “High Voltage On” y girar el potenciómetro en ajuste grueso o fino hasta que la tensión deseada sea indicada.
- 6- La instalación deberá apagarse automáticamente en caso de sobretensión o sobrecorriente y se encenderá una señal de “<U” o “<I” respectivamente.  
Para llevar nuevamente la instalación a alta tensión la alarma “<U” o “<I” deberá ser borrada, para lo cual con el potenciómetro se lo setea a cero y se presionara el botón “High Voltage On”.

Especificaciones del equipo generador:

- Tensión de salida, 150 kV.
- Rango de corriente 10 mA.
- Rango de tensión a corriente nominal 145 kV.
- Polaridad, positiva o negativa.
- Ripple en rango de carga  $\pm 50$  V.
- Estabilidad:

- Respecto a una lenta variación de carga de 0 a 100%,  $\leq 0,01\%$ .
- Respecto a fluctuaciones de la tensión principal de  $\pm 10\%$ ,  $\leq 0,01\%$ .
- Estabilidad a largo plazo (8 h) con fluctuaciones de la temperatura ambiente menores a  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\leq 0,15\%$ .



Fig. B.3. Equipo generador de  $AT_{cc}$ .

En la Fig. B.4 se presenta el esquema de conexión del generador para su uso:

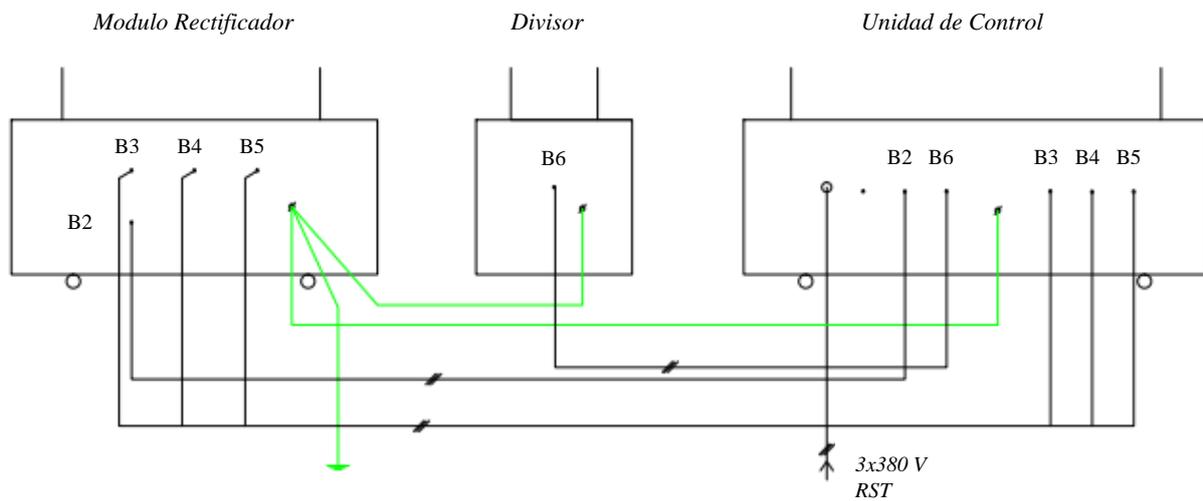


Fig. B.4. Esquema de conexión de generador de  $AT_{cc}$ .

Anexo C

C.1- Programación utilizada en el comportamiento dinámico del divisor de impulso atmosférico.

Se abre el archivo “C1mi6011D.DAT” y se importan los datos estando en la columna 1 los datos de tiempo, y en la columna 2 los valores de amplitud de tensión. Luego se procede a la eliminación del ruido.	
a = VarName2; t = VarName1;	Se crea los vectores <b>a</b> y <b>t</b> que contienen los datos de amplitud y tiempo respectivamente. Ambas variables se crean asignándose la matriz completa y luego borrando las columnas que no corresponden.
size(a) ans = 5002	Se determina la longitud del vector original.
plot(a);	Se grafica la curva de amplitud para poder determinar el número de muestra que corresponde al inicio de la curva, es decir el momento cuando comienza el flanco descendente teniendo en cuenta posible perturbaciones anteriores al flanco que no correspondan a ruido. En nuestro caso la curva comenzaba en la muestra número 304.
a1=a(304:5002);  t1=t(304:5002); size(a1) ans = 4699	Se crean 2 nuevos vectores de amplitud y tiempo, cuyos elementos iniciales se correspondan con el inicio de la curva.  Se determina la nueva longitud de los vectores.
a1_pos = -1 * a1;	Se invierte el signo del vector de amplitud para convertir el flanco descendente en uno ascendente.
a1_pos(1) ans = -0.0630 a1_off = a1_pos - ans;	Se traslada la curva de amplitud, sumándole un offset a todo el vector, de manera que el elemento 1 adquiera el valor cero. Es decir, la curva “arranca” en cero.
plot(a1_off)	Se grafica para verificar y determinar a partir de que nro. de elemento del vector, podemos considerar que el valor de amplitud se encuentra estabilizado. Esto se puede realizar utilizando la función DATACURSOR del editor de figuras de MATLAB. En nuestro caso, el valor de amplitud se ha estabilizado a partir de la muestra número 4000.
valor_normal=mean(a1_off(4000:4699)) valor_normal = 0.2513	Entre el rango del vector seleccionado se determina el valor medio y se lo asigna a la variable <b>valor_normal</b> .
g=a1_off / valor_normal;	Se crea el vector normalizado <b>g</b> , donde el valor de estabilización de la curva es la unidad.
t1(1) ans = -1.7109e-08 t1_off = t1 + ans * -1;	Se realiza un corrimiento en el vector de tiempos para que el elemento nro. 1 corresponda al tiempo t=0, llegando como máximo a t1_off= 4,698 μs.
T=cumtrapz(t1_off,1-g); plot(T)	Se obtiene el vector <b>T</b> “integral de la respuesta al escalón” (ver punto C.2.4 del Anexo C de la norma IEC 60060-2). Este vector se determina integrando la función “ <b>1 - g</b> ” a lo largo del vector de tiempos <b>t1_off</b> mediante la función CUMTRAPZ de MATLAB.
size(T) ans = 4699 1 TN = T(4699) TN= 1.0417e-07	Se determina el tiempo de respuesta experimental <b>T<sub>N</sub></b> según figura C.1.b del Anexo C de la norma de referencia.

Talfa = max(T);	Determinación del tiempo de respuesta parcial $T_\alpha$ según figura C.1.b del Anexo C de la norma de referencia.
recta_positiva = TN + 0.02 * t1_off; recta_negativa = TN - 0.02 * t1_off;	Se crean dos vectores denominados <b>recta positiva</b> y <b>recta negativa</b> que sirven para determinar el tiempo de establecimiento $T_s$ .
Plot(t1_off,T, t1_off,recta_positiva, t1_off, recta_negativa)	Se determina el tiempo de establecimiento $T_s$ , graficando en forma simultánea el vector <b>T</b> , <b>recta positiva</b> y <b>recta negativa</b> . Según el punto C.2.9 del Anexo C de la norma de referencia, el tiempo de establecimiento es el mínimo tiempo que cumple con: $ T_N - T(t)  < 0,02.t$ Gráficamente este tiempo corresponde al valor del vector <b>t1_off</b> cuya posición en el vector es correspondiente a la posición del vector de la curva <b>T</b> cuando queda confinada dentro de las rectas positivas y negativas antes definidas. En nuestro caso $T_s = 594,2$ ns
BETA = (max(g)-1) * 100	Determinación del factor del sobreimpulso $\beta$ en valor porcentual. En nuestro ejemplo es del 25 %

```
>> t=VarName1;
>>a=VarName2;
>>size(a)

ans =

    5002     1

>> plot(a);

>> plot (a);

>> a=VarName2;

>> plot (a);

>> a1=a(304:5002);

>> t1=t(304:5002);

>> size(a1)

ans =

    4699     1

>> a1_pos = -1 * a1;

>> a1_pos(1)

ans =

    -0.0630

>> a1_off = a1_pos - ans;
```

```
>> plot(a1_off)

>> valor_normal=mean(a1_off(4000:4699))

valor_normal =

    0.2513

>> g=a1_off / valor_normal;

>> t1(1)

ans =

-1.7109e-08

>> t1_off = t1 + ans * -1;
>> T=cumtrapz(t1_off,1-g);

>> plot(T)

>> size(T)

ans =

    4699     1

>> TN = T(4699)

TN =

    1.0417e-07

>> Talfa = max(T);

>> recta_positiva = TN + 0.02 * t1_off;

>> recta_negativa = TN - 0.02 * t1_off;

>> plot(t1_off,T, t1_off,recta_positiva, t1_off, recta_negativa)

>> BETA = (max(g)-1) * 100

BETA =

    25
```

## Referencias

G. Enríquez Harper, "Técnica de las Altas Tensiones", Volumen I Segunda Pre edición, Editorial Limusa, 1978.

Dieter Kind, "High-Voltage experimental technique", Vieweg, 1978.

Adolf J. Schwab, "High-Voltage measurement Techniques", The M.I.T. Press, 1972.

Luis Siegert, "Alta tensión y sistemas de transmisión", Editorial Limusa, 2002.

E. Kuffel, W. Zaeng, J. Kuffel, "High Voltage Engineering", Butterworth - Heinemann, 2000

Wolfgang Hauschild y Eberhard Lemke, "High-Voltage Test and Measuring Techniques", Springer, 2014.

Dieter Kind, "High Voltage Test Techniques", Butterworth-Heinemann Ltd. Londres, March, 1999

M. S. Naidu, V. Kamaraju, "High Voltage Engineering", Second Edition, Mc. Graw Hill, 1996.

C.L. Wadhwa, "High Voltage Engineering", Second Edition, New Age International (P), 2007.

Mazen Abdel-Salam, Hussein Anis, Ahsad El-Morshedy, Roshdy Radwan, "High-Voltage Engineering", Marcel Dekker, Inc., 2000.

Hugh M. Ryan, "High voltage engineering and testing", The Institution of Electrical Engineers, 2001

G.G. Wolzak, "The development of High-Voltage measuring techniques", CIP Gegevens, 1983.

<http://www.haefely-hipotronics.com/>

<http://www.highvolt.de>

Norma IEC 60060-2.