



UNIVERSIDAD DE SAN MARTÍN
INSTITUTO NACIONAL DE CALIDAD INDUSTRIAL
ESPECIALIZACIÓN EN CALIDAD INDUSTRIAL

TRABAJO FINAL INTEGRADOR PARA LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE POSGRADO ESPECIALISTA EN
CALIDAD INDUSTRIAL

**“ESTUDIO DE LA CALIBRACIÓN DEL GENERADOR DE
DESCARGA ELECTROSTÁTICA DE ACUERDO CON LA
NORMA IEC 61000-4-2:2008”**

Alumno
Ing. Janco, Josué Marcelo

Docente
Dr. Valdés, Joaquín

Buenos Aires, República Argentina
Noviembre / 2022

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	1
2 OBJETIVO	2
3 DESARROLLO	2
3.1 Contexto	2
3.1.1 El Instituto de Tecnología Industrial	2
3.1.2 El Departamento de Compatibilidad Electromagnética	5
3.2 Ensayo de Inmunidad a las descargas electrostáticas	13
3.3 Calibración del generador de descargas electrostáticas	16
3.3.1 Medición de la tensión de salida de corriente continua	16
3.3.2 Medición de los parámetros de la forma de onda del pulso de descarga de corriente	17
3.4 Incertidumbre de la medición	21
3.4.1 Evaluación de la incertidumbre para las mediciones de tensión de salida de corriente continua	21
3.4.2 Evaluación de la incertidumbre para las mediciones de corriente	22
3.4.3 Evaluación de la incertidumbre para las mediciones de tiempo de subida	23
4 CONCLUSIÓN	24
5 BIBLIOGRAFÍA	25

1 INTRODUCCIÓN

Cuando se fabrica un producto electrónico, además de verificar que cumpla con las funciones previstas para el cual fue diseñado, se debe verificar que sea seguro desempeñando su funcionamiento durante todo su ciclo de vida.

Garantizar la seguridad funcional del equipo implica la realización de una serie de pruebas o ensayos. Entre todos los ensayos a los que puede ser sometido, un conjunto de ellos es el de que sea compatible electromagnéticamente con su entorno. Esto quiere decir que su funcionamiento esencial no se vea degradado ante la presencia de perturbaciones electromagnéticas y que éste no interfiera con otros equipos que puedan estar próximos a él.

Para asegurar la confiabilidad y repetibilidad de estas pruebas, los organismos de normalización implementaron normas de cumplimiento voluntarias que son requeridas o exigidas por diferentes organismos autorizados según el tipo de equipo en cuestión.

Estas normas contienen requisitos que indican la aplicación de perturbaciones electromagnéticas, con características definidas, al equipo bajo ensayo y además verificar que la cantidad de emisión electromagnética que emana del dispositivo no supere ciertos límites. En ambos casos, dichas características deben verificarse por medio de mediciones adecuadas que aseguren la trazabilidad metrológica de los instrumentos empleados.

El Departamento de Compatibilidad Electromagnética del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) forma parte de esta cadena de aseguramiento que responde al concepto alemán MNPQ (Medir-Normalizar-Ensayar-Asegurar la calidad). Su rol principal es la ejecución de ensayos de compatibilidad electromagnética normalizados.

El ensayo de inmunidad a las descargas electrostáticas integra el conjunto de pruebas necesarias para verificar la compatibilidad electromagnética de un equipo eléctrico y electrónico. Las características eléctricas de dicha descarga deben cumplir con ciertos valores y tolerancias, los cuales deben medirse periódicamente: calibración. Además, estas mediciones deben ser complementadas con la estimación de la incertidumbre de acuerdo con los métodos de medición y el instrumental empleado.

Se abordará en este trabajo final integrador la calibración del instrumental utilizado para el ensayo de descarga electrostática junto con la evaluación de la incertidumbre de medición. Además, se dará contexto a las pruebas explicando las actividades y funciones del laboratorio de ensayo del Departamento de Compatibilidad Electromagnética de INTI.

2 OBJETIVO

Describir los métodos de calibración del instrumental empleado en el ensayo de descarga electrostática, según norma IEC 61000-4-2, teniendo en cuenta la estimación de la incertidumbre de medición.

3 DESARROLLO

3.1 Contexto

3.1.1 El Instituto de Tecnología Industrial

El Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) de la República Argentina, fue creado en el año 1957 por medio del Decreto-Ley N° 17138. Actualmente es un organismo descentralizado de la Secretaría de Industria y Desarrollo Productivo del Ministerio de Economía.

Su misión es contribuir al desarrollo de la industria a través de la generación y la transferencia de tecnología, la certificación de procesos, productos y personas, y el aseguramiento de la calidad de los bienes y servicios producidos en todo el país.

Se compone de diversos centros tecnológicos a lo largo de todo el país (Figura 1), entre centros de investigación y desarrollo, unidades de extensión, oficinas técnicas y oficinas de vinculación tecnológica en parques industriales.



Figura 1: Mapa de centros tecnológicos de INTI en el país

INSTITUTO
DE CALIDAD
INDUSTRIAL

La mayor cantidad de centros se encuentran en el Parque Tecnológico Miguelete (Figura 2), ubicado en Av. General Paz N° 5445, partido de San Martín, Provincia de Buenos Aires.

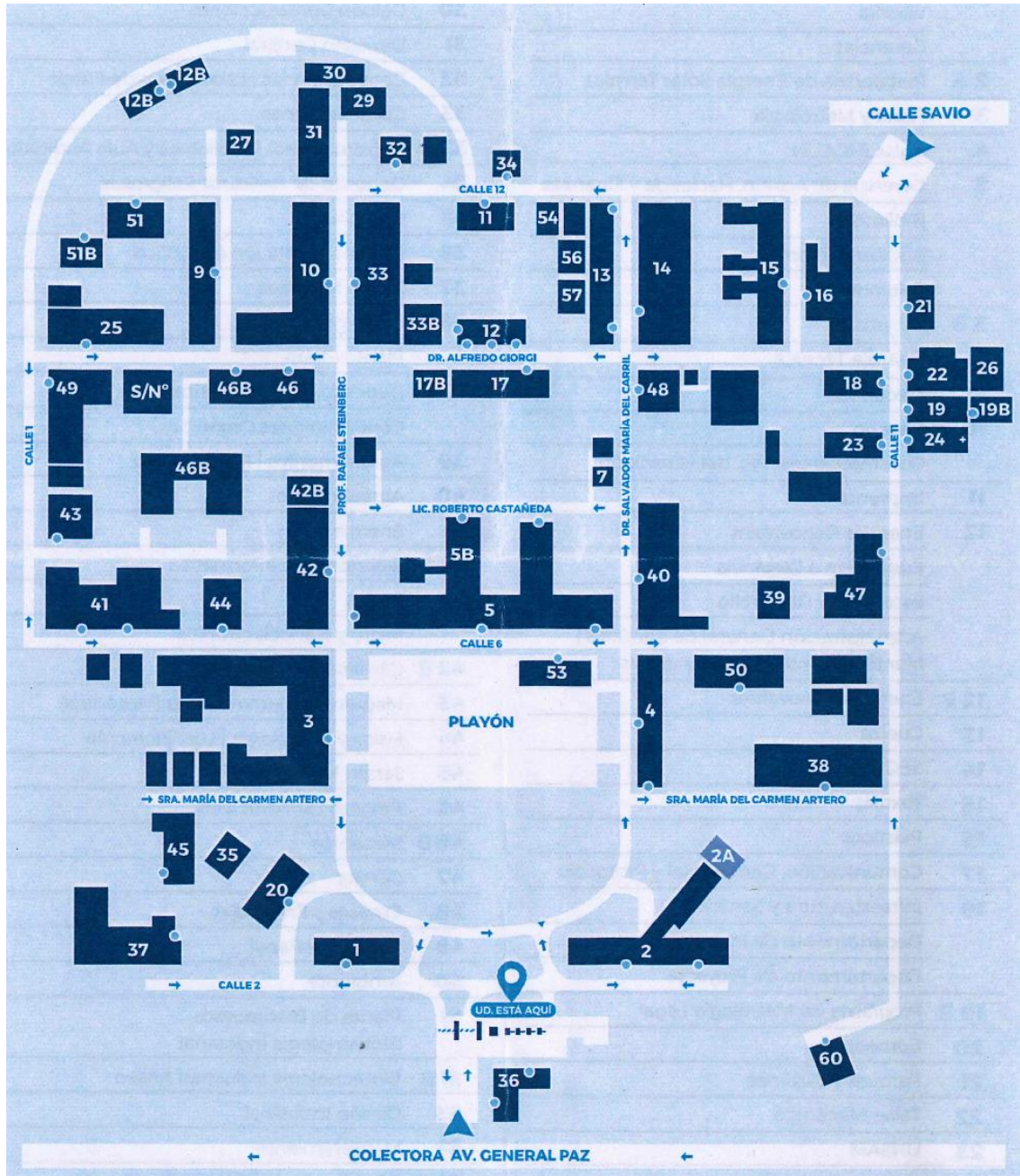


Figura 2: Mapa de edificios en el Parque Tecnológico Miguelete

Su organización estructural primaria se compone de la siguiente manera:

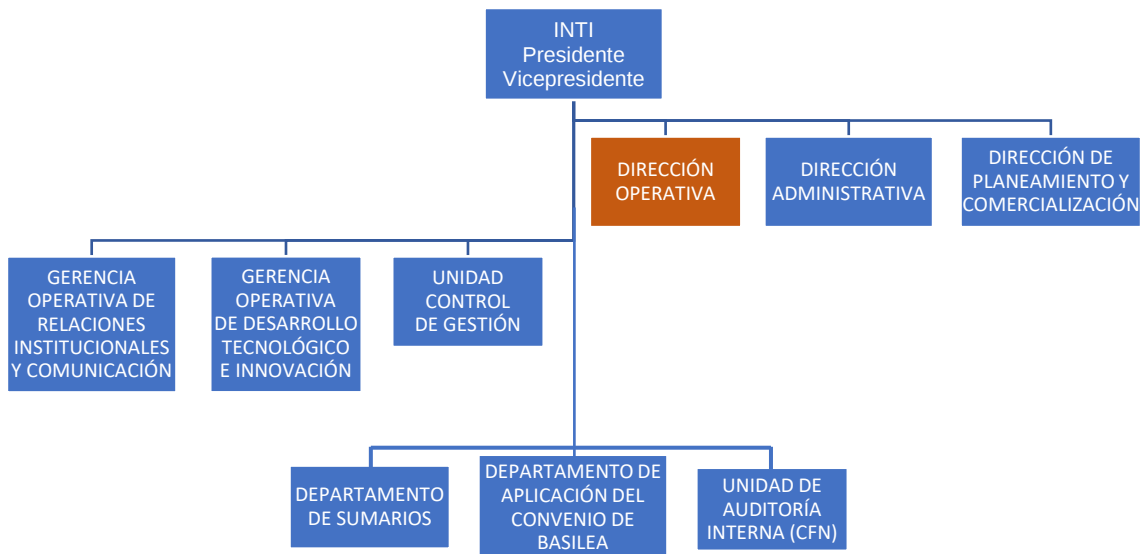


Figura 3: Organización estructural primaria de INTI

En particular la Dirección Operativa se compone de:



Figura 4: Organización estructural de la Dirección Operativa de INTI

De la Gerencia Operativa de Servicios Industriales dependen las siguientes subgerencias:



Figura 5: Organización estructural de la Gerencia Operativa de Servicios Industriales

La Subgerencia de Electrónica y Energía se integra por las siguientes unidades:

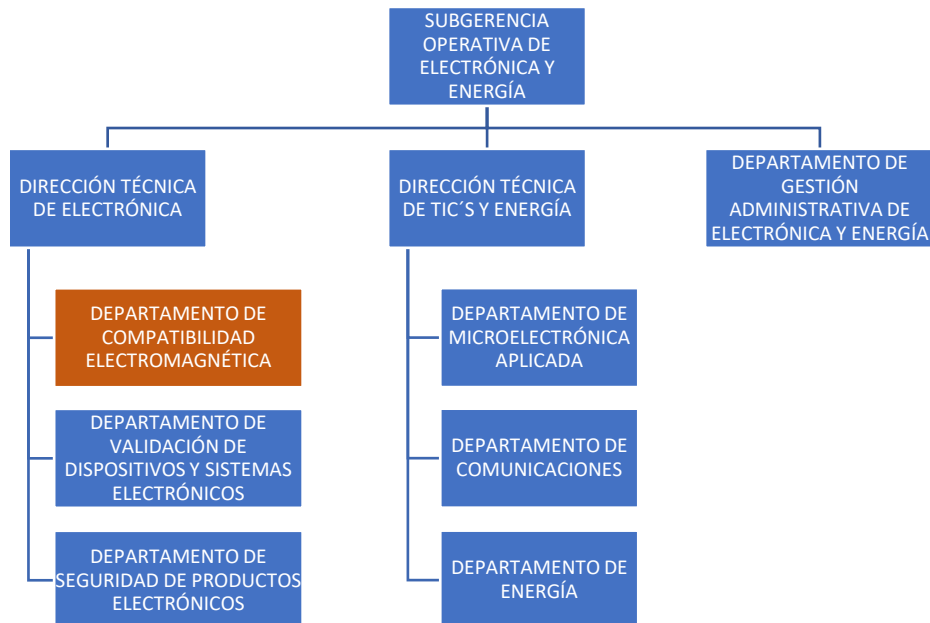


Figura 6: Organización estructural de la Subgerencia de Electrónica y Energía

3.1.2 El Departamento de Compatibilidad Electromagnética

El Departamento de Compatibilidad Electromagnética es un laboratorio dependiente de la Subgerencia de Electrónica y Energía del Instituto Nacional de Tecnología Industrial ubicado en el edificio 42 y 42B del Parque Tecnológico Miguelete.

Las funciones del departamento son:

1. Brindar servicios a la industria nacional de acuerdo con estándares nacionales e internacionales en Compatibilidad Electromagnética.
2. Brindar servicios y asistencia técnica especializada a las gerencias de Desarrollo Tecnológico e Innovación y Metrología en las tareas que ellas encomienden.
3. Ser referente técnico en el área de Compatibilidad Electromagnética (EMC) para el campo regulado por el Estado y el Programa de Metrología Legal.
4. Realizar asistencias técnicas para adecuación de productos de acuerdo a la normativa aplicable de inmunidad y emisión de perturbaciones electromagnéticas.

5. Realizar ensayos de conformidad de inmunidad y emisión de perturbaciones electromagnéticas para acceder al mercado nacional e internacional.
6. Realizar ensayos para el control del impacto ambiental de las Radiaciones No Ionizantes (RNI).
7. Planificar, proyectar y programar las actividades del departamento incluyendo las nuevas demandas integrándose a la planificación de la Dirección. Colaborar con la Dirección en la elaboración del Plan de Trabajo.
8. Hacer cumplir en el departamento los requisitos del sistema de calidad y la competencia técnica de los laboratorios a través de la acreditación de los ensayos, la participación en interlaboratorios, el intercambio con otras instituciones, y la actualización respecto a la industria y la tecnología relacionada.

Para poder llevar a cabo todas estas funciones, el Departamento de Compatibilidad Electromagnética se compone del siguiente recurso humano:

- Jefe de Departamento (1)
- Ingenieros de laboratorio (3)
- Técnicos de laboratorio (5)
- Secretaria (1)

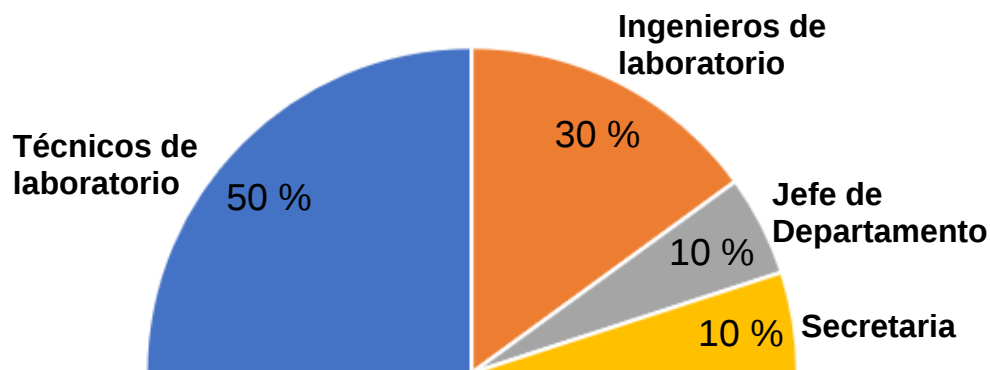


Figura 7: Recurso humano del Departamento de Compatibilidad Electromagnética

Las principales actividades del departamento se describen en el siguiente mapa de procesos:

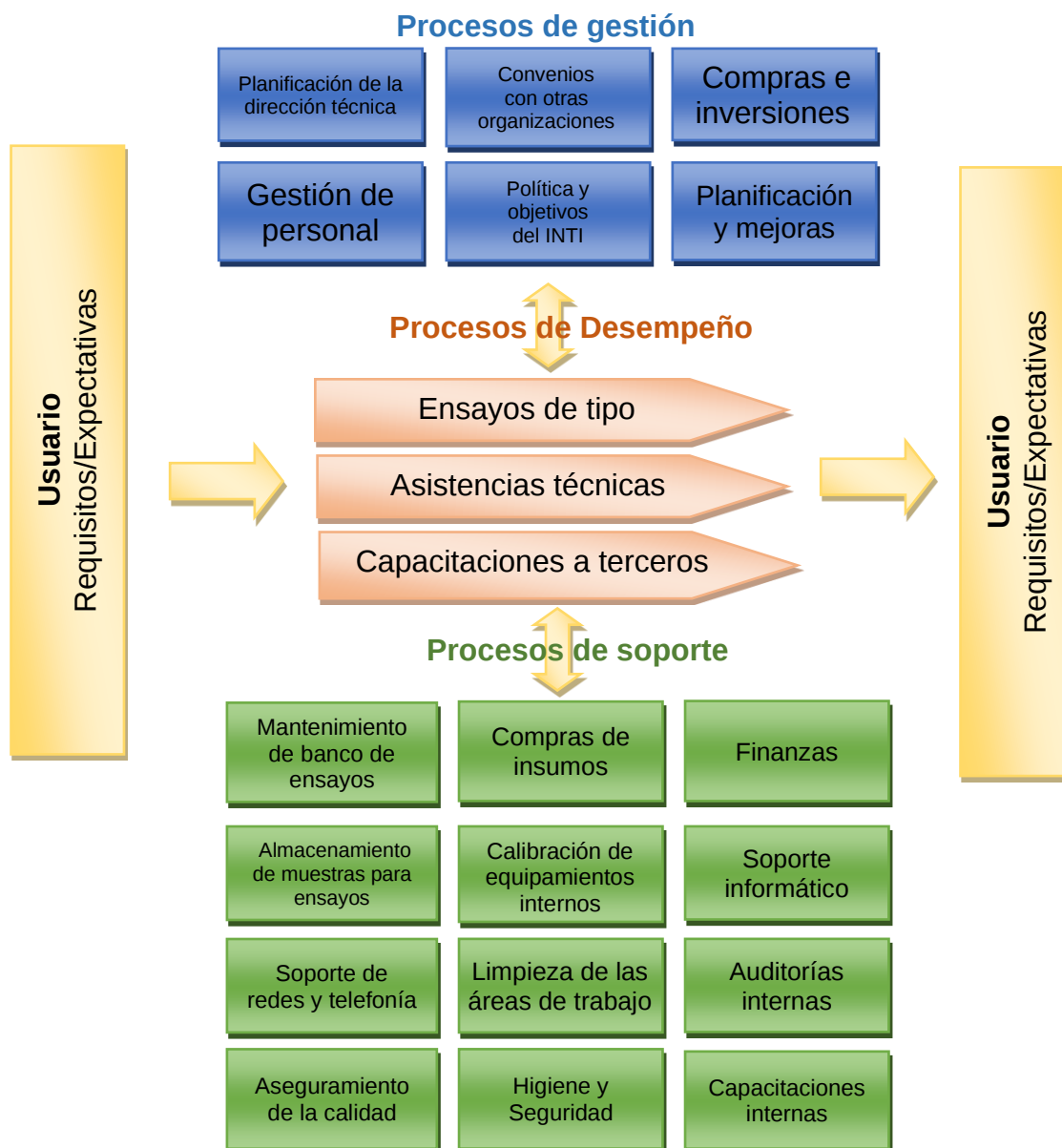


Figura 8: Mapa de procesos del Departamento de Compatibilidad Electromagnética

El proceso de desempeño “Ensayos de tipo” se compone de los siguientes subprocesos:



Figura 9: Subprocesos del proceso “Ensayos de tipo”

Para describir con mayor detalle el proceso de desempeño “Ensayos de tipo”, se presenta a continuación el documento de su Descripción de Proceso:



	SISTEMA DE GESTIÓN DEL DEPARTAMENTO DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA
	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DCEM-DP-01
	TÍTULO: Gestión de ensayos de tipo
	Versión: 1 Fecha de emisión: 15/10/22 Página 1 de 5

1. INFORMACIÓN GENERAL	
Responsable del Proceso:	Participantes:
Responsable del Sistema de Calidad del Departamento de Compatibilidad Electromagnética	Personal del Departamento de Compatibilidad Electromagnética
Objetivo	Definir las actividades generales de gestión para la prestación de servicio de ensayos de tipo de compatibilidad electromagnética.
Alcance	Gestión de ensayos de tipo en el laboratorio de Compatibilidad Electromagnética.
Índice	1. Información general 2. Descripción del proceso 3. Definiciones y abreviaturas 4. Explicaciones sobre el desarrollo 5. Referencias 6. Indicadores 7. Documentos y Registros asociados 8. Anexos 9. Registros de las revisiones

Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:
Ing. Josué Marcelo Janco	-	-
Fecha:	Fecha:	Fecha:

Figura 10: Descripción del proceso DCEM-DP-01, página 1

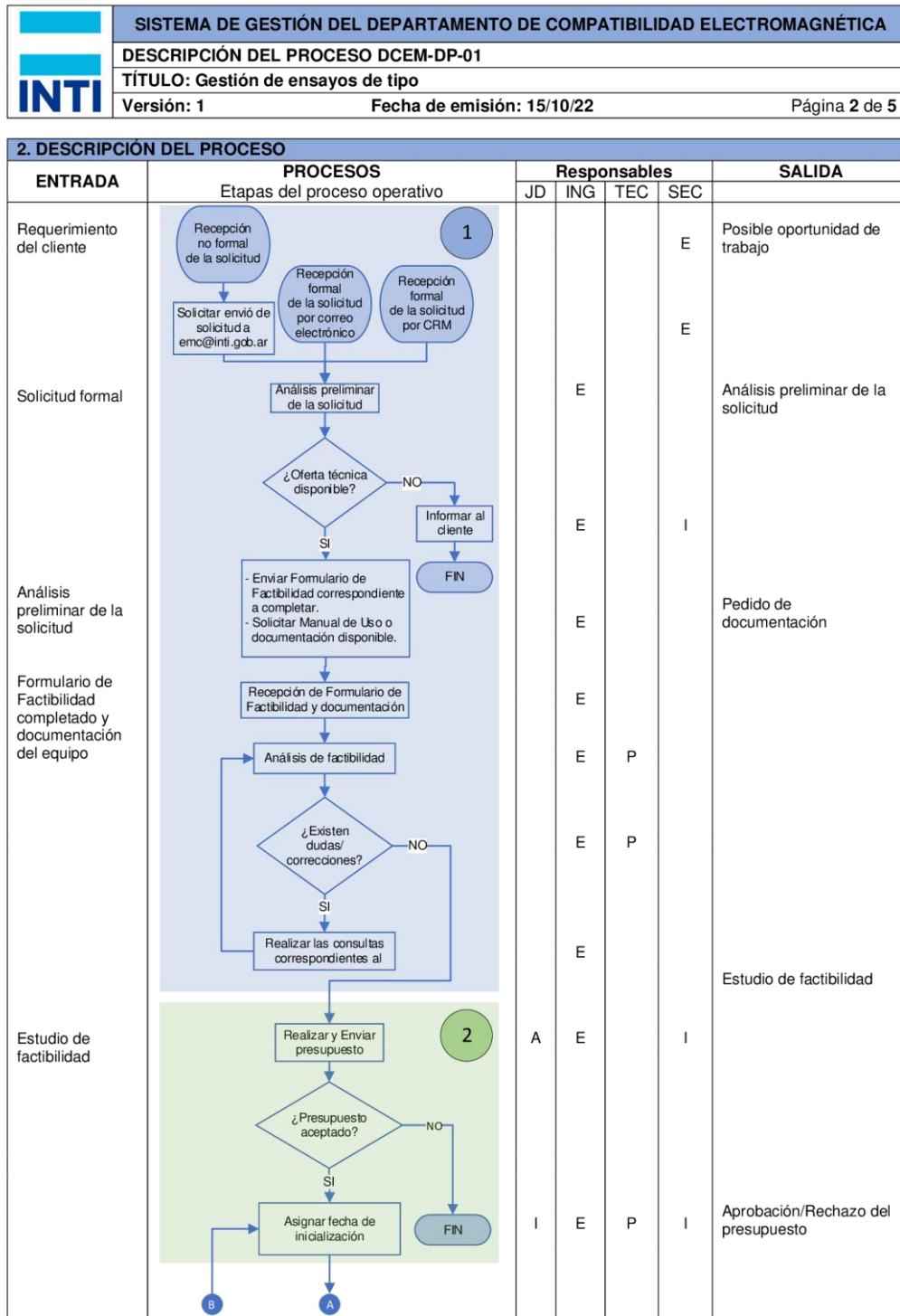


Figura 11: Descripción del proceso DCEM-DP-01, página 2

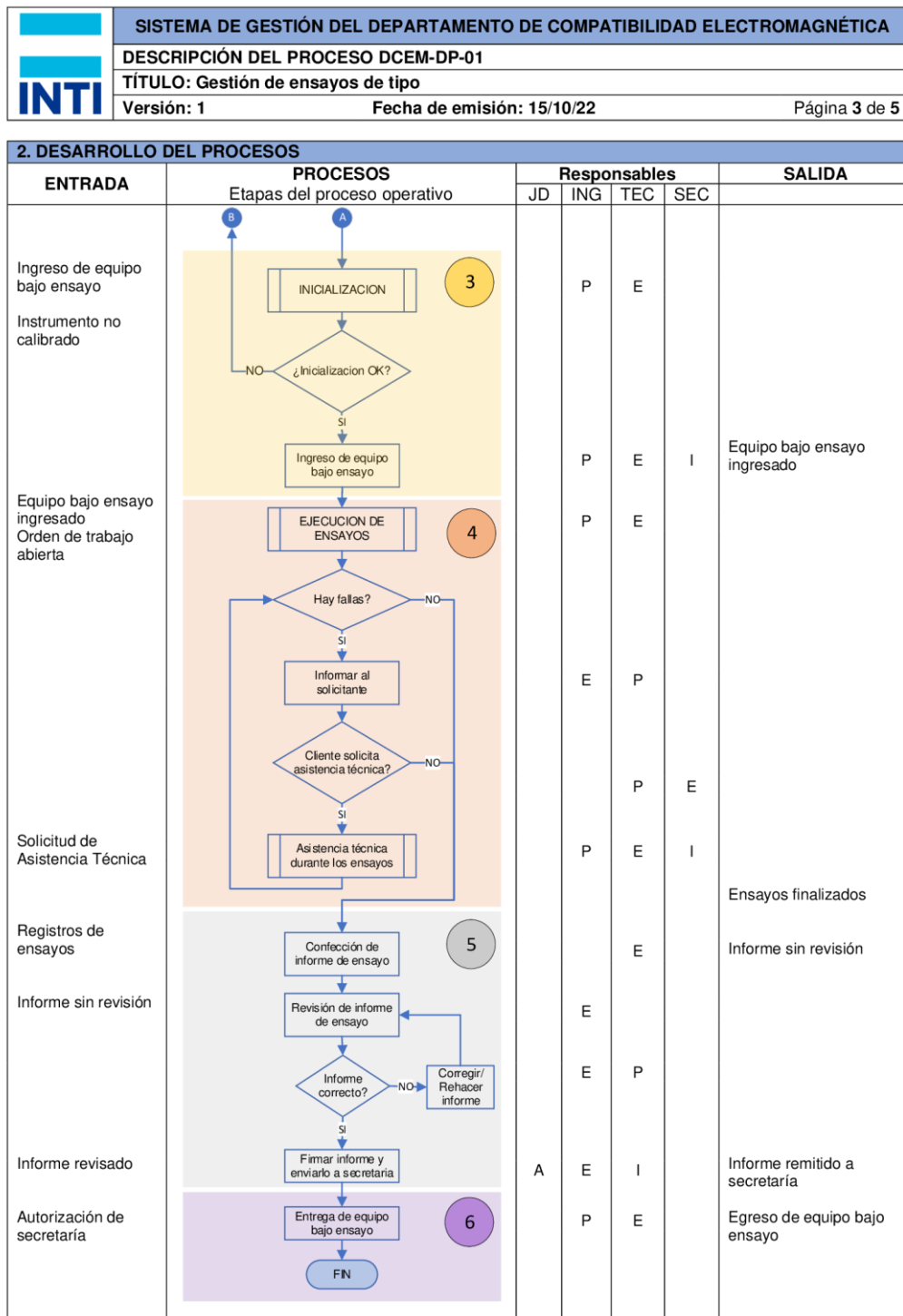


Figura 12: Descripción del proceso DCEM-DP-01, página 3



	SISTEMA DE GESTIÓN DEL DEPARTAMENTO DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA		
	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DCEM-DP-01		
	TÍTULO: Gestión de ensayos de tipo		
	Versión: 1	Fecha de emisión: 15/10/22	Página 4 de 5

3. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

DCEM: Departamento de Compatibilidad Electromagnética de INTI
CRM: Sistema de Gestión de relaciones con el cliente de INTI
EUT: Equipo bajo ensayo
JD: Jefe del Departamento
ING: Ingeniero de laboratorio
TEC: Técnico de laboratorio
SEC: Secretaría
E: Ejecuta
P: Participa
A: Aprueba
I: Es informado

4. EXPLICACIONES SOBRE EL DESARROLLO

1. Recepción de solicitud de ensayos:

Existen tres formas de recibir los requerimientos de los solicitantes:

1. Solicitud no formal: comunicación telefónica o personalmente. Para este caso se solicitará el pedido formal por correo electrónico a emc@inti.gob.ar.
2. Por correo electrónico a emc@inti.gob.ar o correo oficial del personal del DCEM. En este último caso se remitirá el mensaje a emc@inti.gob.ar.
3. Por sistema CRM de INTI.

En primer lugar, se realizará un análisis preliminar de la solicitud del cliente y se detectará si existe una oferta técnica para dicho pedido. Si no existe oferta técnica, se informará por correo electrónico al cliente con copia a secretaria y finaliza el proceso. En caso de que existiera una oferta técnica se enviará el Formulario de Factibilidad correspondiente al tipo de EUT y se solicitará su manual de uso o documentación disponible.

Al recibir el Formulario de Factibilidad completado y documentación adicional, se elaborará un estudio de factibilidad realizando todas las consultas que sean necesarias al solicitante.

2. Presupuesto

Una vez finalizado el estudio de factibilidad, se realizará el presupuesto. El jefe de departamento lo aprobará y se enviará al solicitante. Si el presupuesto es aprobado, se asignará un turno para la inicialización.

Todas estas acciones se realizan a través del sistema informático Tracer.

3. Inicialización

El proceso de inicialización consiste en que el responsable técnico, designado por la firma solicitante, concurra al DCEM en el día y horario previamente acordado, para dar conformidad a:

1. La recepción del EUT verificando las condiciones mínimas de aceptabilidad para poder iniciar los ensayos de tipo.
2. La provisión de elementos/equipos auxiliares, accesorios, periféricos, simuladores, fuentes/cargadores, cables, etc., y el armado y configuración del equipo y todos los elementos requeridos por los distintos ensayos. Los elementos o equipos auxiliares que se deban utilizar para simular el normal funcionamiento del equipo bajo ensayo deberán alejarse al menos 3 metros del área de ensayo. Los dispositivos o sistemas que se deban utilizar contiguos al equipo a ensayar deberán ser de un material No metálico.
3. La provisión de un instructivo para ensayos por escrito con todas las indicaciones necesarias (paso a paso) para que el personal designado pueda operar el equipamiento a utilizar.
4. La realización de la configuraciones, ajustes y modos de funcionamiento a ensayar, utilizando el instructivo previamente entregado.
5. Presentar el formulario de factibilidad impreso, completo y firmado por el responsable técnico.

Figura 13: Descripción del proceso DCEM-DP-01, página 4



	SISTEMA DE GESTIÓN DEL DEPARTAMENTO DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA		
	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DCEM-DP-01		
	TÍTULO: Gestión de ensayos de tipo		
	Versión: 1	Fecha de emisión: 15/10/22	Página 5 de 5

6. Durante la inicialización se tomarán fotos internas al equipo en presencia del responsable técnico para adjuntar al informe de ensayo. Por tal motivo se deberán traer las herramientas necesarias para realizar la apertura del equipo.

Si se cumplieron todos estos requerimientos se puede dar conformidad con la inicialización. Se ingresará el equipo bajo ensayo bajo el documento "Entrada de elementos" y se informará a secretaría para que proceda con la apertura de la Orden de Trabajo.

4. Ejecución de ensayos

Con el equipo bajo ensayo ingresado y la Orden de Trabajo generada se procederá a la ejecución de los ensayos de acuerdo a los procedimientos técnicos correspondientes.

En caso de presentarse fallas durante los ensayos se informará al solicitante y se dará la posibilidad de solucionar dicha falla mediante la contratación de Asistencias Técnicas.

Cuando el EUT supere (o no) todos los ensayos, se procederá a la confección del Informe de Ensayo.

5. Informe de ensayo

Se confeccionará el informe con los registros de los ensayos y se realizarán tantas revisiones como sean necesarias. Cuando se finalicen las revisiones se remitirá el informe al JD para las firmas correspondientes. Luego se enviará el informe a secretaría para su entrega al solicitante.

6. Entrega del EUT

Cuando se reciba la conformidad de secretaría de que el equipo puede ser retirado, se procederá al egreso del equipo con todos sus elementos mediante el documento "Salida de Elementos".

5. REFERENCIAS
Sistema de gestión de INTI.

6. INDICADORES
No aplicable.

7. DOCUMENTOS Y REGISTROS ASOCIADOS
Formulario de factibilidad (correspondiente al tipo de equipo) Manual de uso del EUT y documentación adicional Estudio de factibilidad de la solicitud Presupuesto Entrada de elementos Orden de trabajo Solicitud de Asistencia Técnica Registros de ensayos Informe de ensayo Salida de elementos

8. ANEXOS
Sin anexos.

9. REGISTROS DE LAS REVISIONES
Sin revisiones.

Figura 14: Descripción del proceso DCEM-DP-01, página 5

Los ensayos de tipo que ofrece el Departamento de Compatibilidad Electromagnética de INTI están normalizados, es decir, responden a normas internacionales. Son los siguientes:

Ensayos de inmunidad

- IEC 61000-4-2: Ensayo de inmunidad a las descargas electrostáticas.
- IEC 61000-4-3: Ensayos de inmunidad a los campos electromagnéticos, radiados y de radiofrecuencia.
- IEC 61000-4-4: Ensayos de inmunidad a los transitorios eléctricos rápidos en ráfagas.
- IEC 61000-4-5: Ensayos de inmunidad a las ondas de choque.
- IEC 61000-4-6: Inmunidad a las perturbaciones conducidas, inducidas por los campos de radiofrecuencia.
- IEC 61000-4-8: Ensayos de inmunidad a los campos magnéticos a frecuencia industrial.
- IEC 61000-4-11: Ensayos de inmunidad a los huecos de tensión, interrupciones breves y variaciones de tensión.
- IEC 61000-4-12: Ensayo de inmunidad a la onda sinusoidal fuertemente amortiguada.
- IEC 61000-4-18: Ensayo de inmunidad a la onda oscilatoria amortiguada.

Ensayos de emisión

- CISPR 11: Equipos industriales, científicos y médicos. Características de las perturbaciones radioeléctricas. Límites y métodos de medición.
- CISPR 32: Compatibilidad electromagnética de equipos multimedia. Requisitos de emisión.
- CISPR 15: Límites y métodos de medida de las características relativas a las perturbaciones radioeléctricas de los equipos de iluminación y similares.

3.2 Ensayo de Inmunidad a las descargas electrostáticas

El ensayo de inmunidad a las descargas electrostáticas simula las descargas de electricidad estática aplicadas a equipos eléctricos y electrónicos producidas directamente por operadores, entre personas y objetos situados en las proximidades.

Al ser un ensayo del tipo normalizado, los requisitos y métodos de ensayos están descritos en la norma IEC 61000-4-2, en su versión vigente del 2008.

La perturbación se aplica a través de un generador de descargas electrostáticas cuyo esquema simplificado se muestra en la figura 15 y equipo real, marca EMTEST se muestra en la figura 16. El dispositivo EMTEST se compone de dos unidades: unidad base ESD 30N y la unidad de descarga (pistola) P30N. La primera contiene la fuente de alimentación de alta tensión y la segunda los circuitos de carga y descarga.

La forma de onda ideal de corriente de salida se muestra en la figura 17.

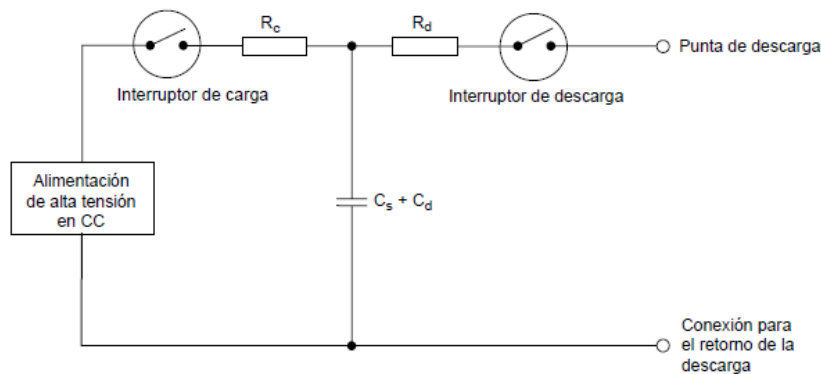


Figura 15: Esquema simplificado del generador de descarga electrostática

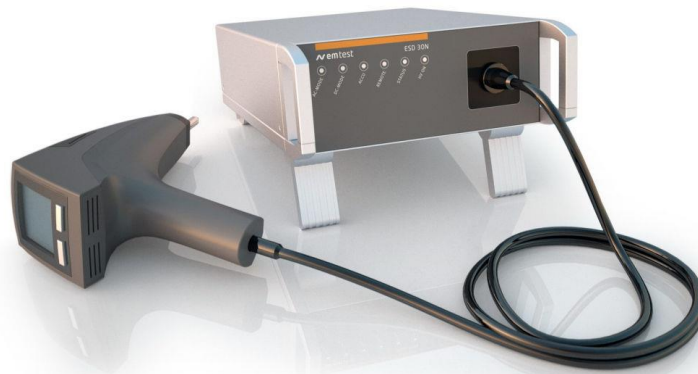


Figura 16: Unidad base y pistola de descarga electrostática EMTEST

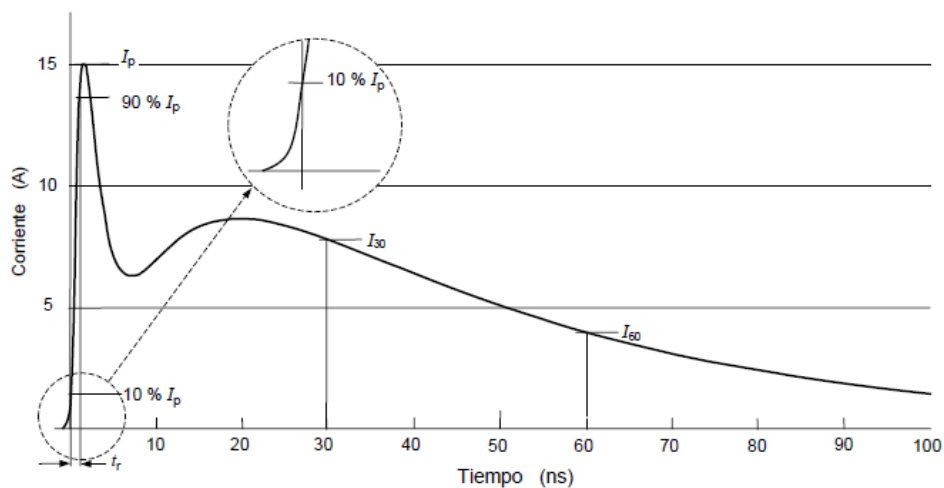


Figura 17: Forma de onda ideal de la corriente de descarga por contacto a 4 kV

Las características y funcionamiento del generador, también especificadas en la norma de referencia, debe cumplir con los requisitos indicados en la tabla 1 y 2.

Parámetros	Valores
Tensión de salida, modo de descarga por contacto (ver NOTA 1)	Al menos 1 kV a 8 kV, nominal
Tensión de salida, modo de descarga en el aire (ver NOTA 1)	Al menos de 2 kV a 15 kV, nominal (ver NOTA 3)
Tolerancia de la tensión de salida	$\pm 5 \%$
Polaridad de la tensión de salida	Positiva y negativa
Tiempo de mantenimiento	$\geq 5 \text{ s}$
Modo de funcionamiento de descarga	Descargas simples (ver NOTA 2)
NOTA 1: Tensión en circuito abierto medida en el electrodo de descarga del generador de ESD.	
NOTA 2: El generador debería poder generar a una tasa de repetición de al menos 20 descargas por segundo para fines exploratorios.	
NOTA 3: No es necesario usar un generador con una capacidad de descarga en el aire de 15 kV si la tensión de ensayo máxima usada es menor.	

Tabla 1: Especificaciones generales del generador de descarga electrostática

Nivel	Tensión indicada kV	Primera cresta de la corriente de descarga $I_p (\pm 15 \%)$ A	Tiempo de subida $t_r (\pm 25 \%)$ ns	Corriente a 30 ns $I_{30} (\pm 30 \%)$ A	Corriente a 60 ns $I_{60} (\pm 30 \%)$ A
1	2	7,5	0,8	4	2
2	4	15	0,8	8	4
3	6	22,5	0,8	12	6
4	8	30	0,8	16	8
El punto de referencia para el momento de medir la corriente a 30 ns y 60 ns es el instante donde la corriente alcanza por primera vez el 10 % de la primera cresta de la corriente de descarga.					
NOTA: El tiempo de subida t_r es el intervalo de tiempo entre el 10 % y el 90 % del valor de la primera cresta de corriente					

Tabla 2: Parámetros de la forma de onda de la corriente de descarga por contacto

De acuerdo con la norma *ISO/IEC 17025 - Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración*, los ensayos de inmunidad a las descargas electrostáticas se realizan según un Procedimiento de Ensayo y los resultados de los mismo se registran en los Registros de Ensayos correspondientes. Además de estos documentos es importante contar con los documentos de calibración de los instrumentos. En la siguiente sección se estudian los aspectos a tener en cuenta para la calibración y evaluación de la incertidumbre del generador de descarga electrostática.

3.3 Calibración del generador de descargas electrostáticas

Los métodos de calibración que dan conformidad a las especificaciones anteriores se verifican a través de una serie de mediciones.

De acuerdo con las tablas 1 y 2, las especificaciones que debemos verificar son:

- Tensión de salida en alta tensión y corriente continua (CC).
- Los parámetros de forma de onda del pulso de descarga de corriente (I_p , t_r , I_{30} y I_{60}).

Es decir, se realizan dos tipos de mediciones: en corriente continua y corriente alterna, a los diferentes valores de tensión nominal.

La calibración completa se realizará de forma periódica.

3.3.1 Medición de la tensión de salida de corriente continua

Para medir la tensión de salida de CC de alta tensión se utiliza un voltímetro electrostático. La punta de la pistola de descarga se conecta a la entrada del voltímetro y el cable de tierra de retorno de la descarga se conecta a la entrada baja del voltímetro. Se realizan 5 mediciones en cada polaridad con el nivel de tensión nominal correspondiente y con cada punta de descarga, de contacto y por aire. Estas mediciones se registran en las tablas 3 y 4.

DESCARGA POR CONTACTO - TENSION DE ENSAYO - V_{cc} ($\pm 5\%$)									
ESPECIFICACIONES			MEDICIONES (V_{cci})					CALCULOS	
Mínimo [kV]	Nominal [kV]	Máximo [kV]	# 1 [kV]	# 2 [kV]	# 3 [kV]	# 4 [kV]	# 5 [kV]	$\bar{x}$ [kV]	s [kV]
0,95	1,00	1,05							
1,90	2,00	2,10							
3,80	4,00	4,20							
5,70	6,00	6,30							
7,60	8,00	8,40							
-0,95	-1,00	-1,05							
-1,90	-2,00	-2,10							
-3,80	-4,00	-4,20							
-5,70	-6,00	-6,30							
-7,60	-8,00	-8,40							

Tabla 3: Tabla de registro de mediciones de tensión de salida de CC – Descargas por contacto

DESCARGA POR AIRE - TENSION DE ENSAYO - $V_{cc} (\pm 5 \%)$									
ESPECIFICACIONES			MEDICIONES (V_{c_i})					CALCULOS	
Mínimo [kV]	Nominal [kV]	Máximo [kV]	# 1 [kV]	# 2 [kV]	# 3 [kV]	# 4 [kV]	# 5 [kV]	$\bar{x}$ [kV]	s [kV]
1,90	2,00	2,10							
3,80	4,00	4,20							
7,60	8,00	8,40							
14,25	15,00	15,75							
-1,90	-2,00	-2,10							
-3,80	-4,00	-4,20							
-7,60	-8,00	-8,40							
-14,25	-15,00	-15,75							

Tabla 4: Tabla de registro de mediciones de tensión de salida de CC – Descarga por aire

3.3.2 Medición de los parámetros de la forma de onda del pulso de descarga de corriente

Para medir los parámetros de la forma de onda del pulso de descarga de corriente (I_p , t_r , I_{30} y I_{60}) se requiere de un dispositivo para convertir la corriente en tensión, llamada Cadena de Medida, y un osciloscopio con un ancho de banda superior a 2 GHz.

La Cadena de Medida se compone de tres elementos bien caracterizados:

- Dispositivo de corriente: es una resistencia pequeña de 2Ω , por donde se aplicará la descarga.
- Atenuador: de 20 dB, con una capacidad de potencia suficiente.
- Cable: cable coaxial tipo RG400.

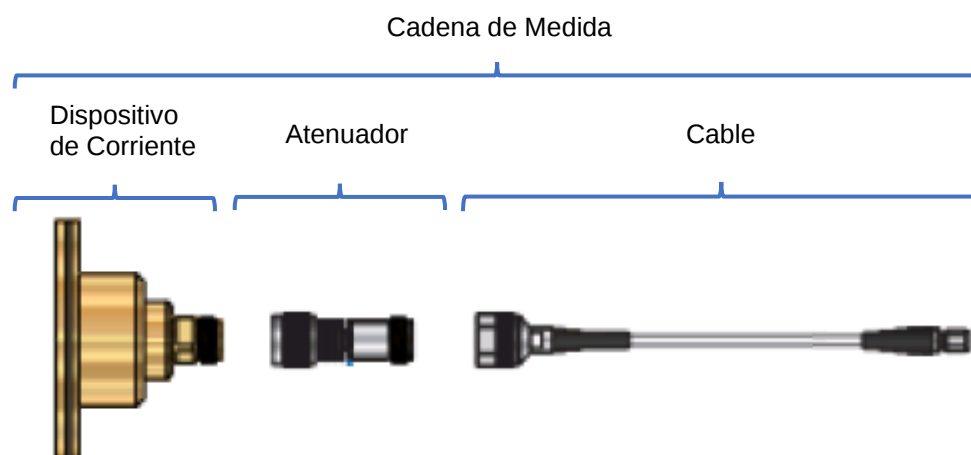


Figura 18: Cadena de medida

Estos elementos se montan en un plano vertical de tal manera que haya al menos 0,6 m entre el dispositivo de corriente y cualquier borde del plano. La disposición física de cada elemento se puede ver en la figura 19.

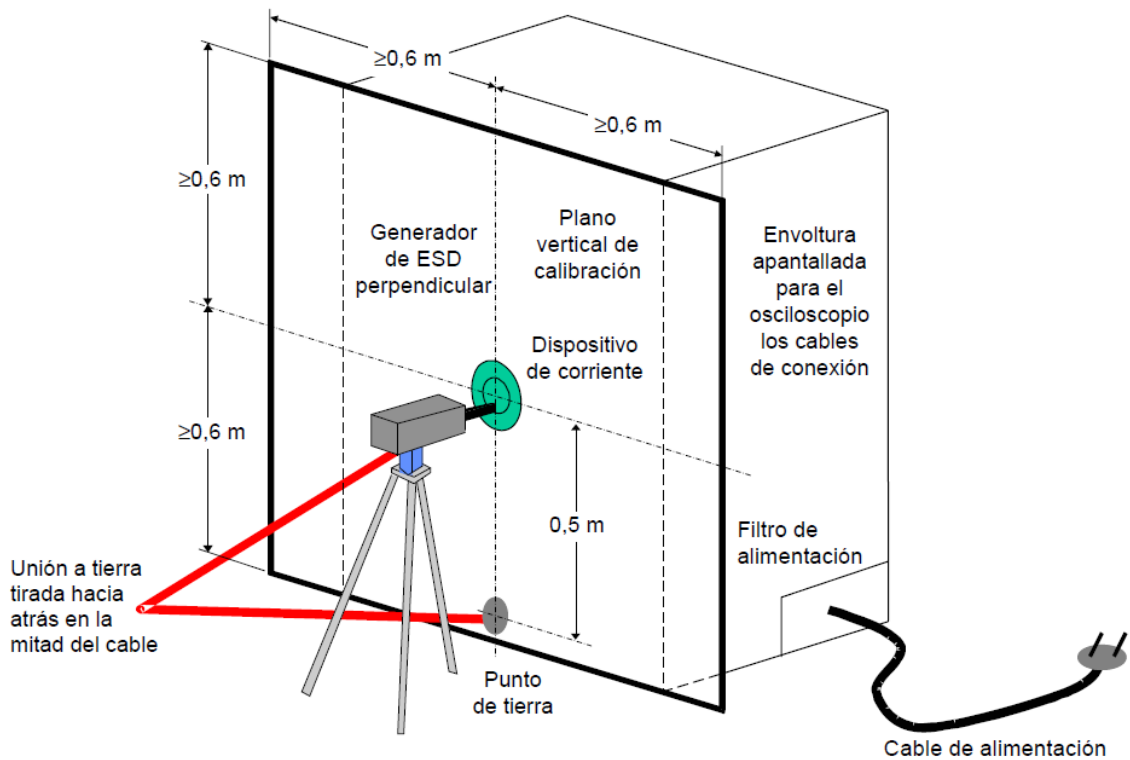


Figura 19: Configuración típica para la calibración de las características del generador de descarga electrostática

La configuración de medición de la calibración se muestra en la Figura 20.

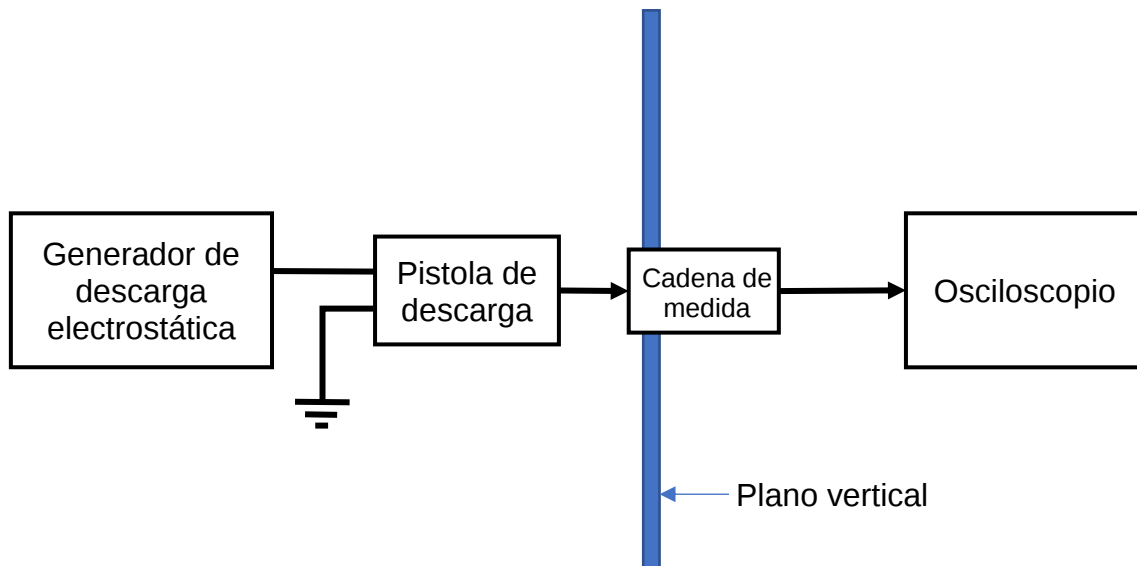


Figura 20: Configuración de medición para la calibración de las características del generador de descarga electrostática

Con esta configuración se deberá capturar con el osciloscopio cinco formas de ondas para tensiones de salida con polaridad positiva y negativa y en los niveles de tensión indicados en la Tabla 2. El osciloscopio mostrará un pulso de tensión cuando se inyecta un pulso de corriente a través de la cadena de medida. De acuerdo con el Anexo B de IEC 61000-4-2, para calcular las corrientes de descarga, las tensiones medidas en la primera cresta, en 30 ns y en 60 ns deben dividirse por la impedancia de transferencia Z_{sys} de la cadena de medida, es decir:

$$I = \frac{V}{Z_{sys}}$$

donde

I : es el valor de la corriente en la primera cresta, en 30 ns ó 60 ns

V : es la lectura de tensión con el osciloscopio en la primera cresta, en 30 ns ó 60 ns

Z_{sys} : impedancia de transferencia de la cadena de medida

El tiempo de subida de la corriente de descarga (t_r) se determina teniendo en cuenta que:

$$t_r = t_{90} - t_{10}$$

dónde

t_r : es el tiempo de subida.

t_{10} : es el tiempo medido por el marcador de inicio correspondiente al 10 % de la primera cresta de corriente.

t_{90} : es el tiempo medido por el marcador de final correspondiente al 90 % de la primera cresta de corriente.

Ejemplos de las formas de ondas capturadas por el osciloscopio se pueden ver en las figuras 21 y 22.

Los valores medidos se registran en las siguientes tablas.

PRIMER PICO DE LA CORRIENTE DE DESCARGA - I_p ($\pm 15\%$)										
Tensión nominal [kV]	ESPECIFICACIONES			MEDICIONES					CALCULOS	
	Mínimo [A]	Nominal [A]	Máximo [A]	# 1 [A]	# 2 [A]	# 3 [A]	# 4 [A]	# 5 [A]	$\bar{x}$ [kV]	s [kV]
2,00	6,38	7,50	8,63							
4,00	12,75	15,00	17,25							
6,00	19,13	22,50	25,88							
8,00	25,50	30,00	34,50							
-2,00	-6,38	-7,50	-8,63							
-4,00	-12,75	-15,00	-17,25							
-6,00	-19,13	-22,50	-25,88							
-8,00	-25,50	-30,00	-34,50							

Tabla 5: Tabla de registro de mediciones de primera cresta de corriente de descarga

	TIEMPO DE SUBIDA - tr (± 25 %)									
	ESPECIFICACIONES			MEDICIONES					CALCULOS	
Tension nominal [kV]	Mínimo [ns]	Nominal [ns]	Máximo [ns]	# 1 [ns]	# 2 [ns]	# 3 [ns]	# 4 [ns]	# 5 [ns]	$\bar{x}$ [ns]	s [ns]
2,00	0,60	0,80	1,00							
4,00	0,60	0,80	1,00							
6,00	0,60	0,80	1,00							
8,00	0,60	0,80	1,00							
-2,00	0,60	0,80	1,00							
-4,00	0,60	0,80	1,00							
-6,00	0,60	0,80	1,00							
-8,00	0,60	0,80	1,00							

Tabla 6: Tabla de registro de mediciones de tiempo de subida de la corriente de descarga

	CORRIENTE A 30 ns - I ₃₀ (± 30 %)									
	ESPECIFICACIONES			MEDICIONES					CALCULOS	
Tension nominal [kV]	Mínimo [A]	Nominal [A]	Máximo [A]	# 1 [A]	# 2 [A]	# 3 [A]	# 4 [A]	# 5 [A]	$\bar{x}$ [A]	s [A]
2,00	2,80	4,00	5,20							
4,00	5,60	8,00	10,40							
6,00	8,40	12,00	15,60							
8,00	11,20	16,00	20,80							
-2,00	-2,80	-4,00	-5,20							
-4,00	-5,60	-8,00	-10,40							
-6,00	-8,40	-12,00	-15,60							
-8,00	-11,20	-16,00	-20,80							

Tabla 7: Tabla de registro de mediciones de la corriente de descarga a 30 ns

	CORRIENTE A 60 ns - I ₆₀ (± 30 %)									
	ESPECIFICACIONES			MEDICIONES					CALCULOS	
Tension nominal [kV]	Mínimo [A]	Nominal [A]	Máximo [A]	# 1 [A]	# 2 [A]	# 3 [A]	# 4 [A]	# 5 [A]	$\bar{x}$ [A]	s [A]
2,00	1,40	2,00	2,60							
4,00	2,80	4,00	5,20							
6,00	4,20	6,00	7,80							
8,00	5,60	8,00	10,40							
-2,00	-1,40	-2,00	-2,60							
-4,00	-2,80	-4,00	-5,20							
-6,00	-4,20	-6,00	-7,80							
-8,00	-5,60	-8,00	-10,40							

Tabla 8: Tabla de registro de mediciones de la corriente de descarga a 60 ns

Positive 12kV

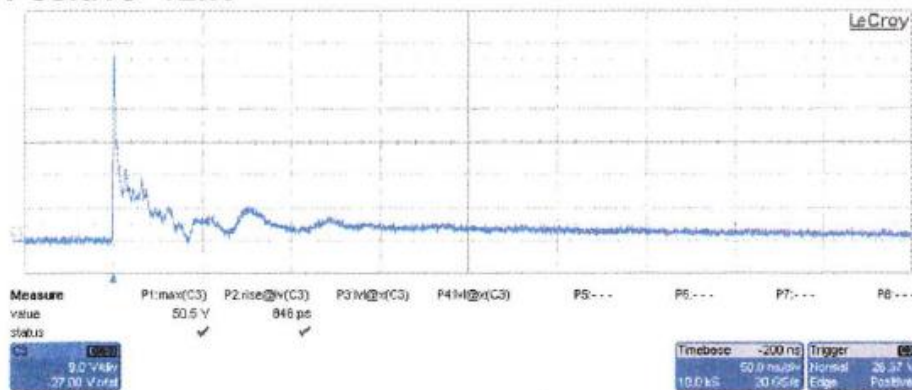


Figura 21: Ejemplo de forma de onda de la corriente de descarga capturada por el osciloscopio (+12 kV)

Negative 12kV

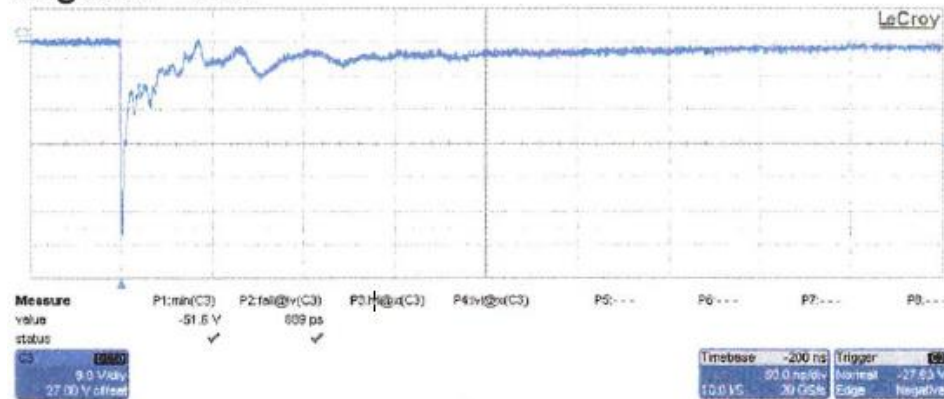


Figura 22: Ejemplo de forma de onda de la corriente de descarga capturada por el osciloscopio (-12 kV)

3.4 Incertidumbre de la medición

Las incertidumbres de medición se evalúan de acuerdo con JCGM 100:2008 – Evaluación de datos de medición - Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida.

Las componentes de incertidumbre se consideran independientes, no correlacionadas, y se informa la incertidumbre expandida U con un nivel de confianza del 95 %.

El valor medio ($\bar{x}$) y la desviación estándar (s) indicados en las Tablas 3 a 8 se determinan de acuerdo con:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

donde

x_i : es el resultado de cada medición en el nivel de tensión correspondiente.

n : cantidad de mediciones ($n = 5$).

3.4.1 Evaluación de la incertidumbre para las mediciones de tensión de salida de corriente continua

• Incertidumbre estándar tipo A

u_n : Se estima como la incertidumbre estándar asociada al promedio de la serie de mediciones realizadas.

$$u_n = s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

• Incertidumbre estándar tipo B

u_{ex} : exactitud de la medición con el voltímetro electrostático.

u_{res} : resolución del voltímetro electrostático.

La incertidumbre estándar combinada será:

$$u_c = \sqrt{u_n^2 + u_{ex}^2 + u_{res}^2}$$

La incertidumbre expandida (para un nivel de confianza del 95 %, $k = 2$) es:

$$U = k \cdot u_c$$

Balance de incertidumbre:

BALANCE DE INCERTIDUMBRE PARA LA CALIBRACIÓN DE LA TENSION DE SALIDA DE CC					
Contribución	Distribución	Valor %	u_i %	u_i^2 %	Comentarios
u_{ex}	Normal $k = 2$				Obtenida del certificado de calibración
u_{res}	Rectangular				Obtenida de las especificaciones
u_n	Divisor = 1				Obtenida de la evaluación de tipo A
		Σ	Suma		-
		u_c	Raíz		-
		U	$k = 2$		-

Tabla 9: Balance de incertidumbre para la calibración de la tensión de salida de corriente continua

3.4.2 Evaluación de la incertidumbre para las mediciones de corriente

• Incertidumbre estándar tipo A

u_n : Se estima como la incertidumbre estándar asociada al promedio de la serie de mediciones realizadas.

$$u_n = s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

• Incertidumbre estándar tipo B

u_{osc} : exactitud de la medición de tensión del osciloscopio.

u_{resV} : resolución vertical del osciloscopio.

u_{zsys} : se evalúa a partir de los resultados de calibración de la cadena de medida.

u_{Rin} : impedancia de transferencia en baja frecuencia.

La incertidumbre estándar combinada será:

$$u_c = \sqrt{u_n^2 + u_{osc}^2 + u_{resV}^2 + u_{zsys}^2 + u_{Rin}^2}$$

La incertidumbre expandida (para un nivel de confianza del 95 %, k = 2) es:

$$U = k \cdot u_c$$

Balance de incertidumbre:

BALANCE DE INCERTIDUMBRE PARA LA CALIBRACIÓN DE LAS CORRIENTES DE DESCARGA					
Contribución	Distribución	Valor %	u_i %	u_i^2 %	Comentarios
u_{osc}	Normal k = 2				Obtenida del certificado de calibración
u_{resV}	Rectangular				Obtenida de las especificaciones
u_{zsys}	Normal k = 2				Obtenida del certificado de calibración
u_{Rin}	Normal k = 2				Calibración interna
u_n	Divisor = 1				Obtenida de la evaluación de tipo A
		Σ	Suma		-
		u_c	Raíz		-
		U	k = 2		-

Tabla 10: Balance de incertidumbre para la calibración de las corrientes de descarga

3.4.3 Evaluación de la incertidumbre para las mediciones de tiempo de subida

• Incertidumbre estándar tipo A

u_n : Se estima como la incertidumbre estándar asociada al promedio de la serie de mediciones realizadas.

$$u_n = s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

• Incertidumbre estándar tipo B

u_{osc} : exactitud de medición de tensión del osciloscopio.

u_{resV} : resolución vertical del osciloscopio.

u_t : incertidumbre debida a la calibración del barrido horizontal del osciloscopio.

u_{resH} : resolución horizontal del osciloscopio.

u_{zsys} : se evalúa a partir de los resultados de calibración de la cadena de medida.

La incertidumbre estándar combinada será:

$$u_c = \sqrt{u_n^2 + u_{osc}^2 + u_{resV}^2 + u_t^2 + u_{resH}^2 + u_{zsys}^2}$$

La incertidumbre expandida (para un nivel de confianza del 95 %, k = 2) es:

$$U = k \cdot u_c$$

Balance de incertidumbre:

BALANCE DE INCERTIDUMBRE PARA LA CALIBRACIÓN DEL TIEMPO DE SUBIDA					
Contribución	Distribución	Valor %	u_i %	u_i^2 %	Comentarios
u_{osc}	Normal k = 2				Obtenida del certificado de calibración
u_{resV}	Rectangular				Obtenida de las especificaciones
u_t	Normal k = 2				Obtenida del certificado de calibración
u_{resH}	Rectangular				Obtenida de las especificaciones
u_{zsys}	Normal k = 2				Obtenida del certificado de calibración
u_n	Divisor = 1				Obtenida de la evaluación de tipo A
		Σ	Suma		-
		u_c	Raíz		-
		U	k = 2		-

Tabla 11: Balance de incertidumbre para la calibración del tiempo de subida de la onda de descarga

4 CONCLUSIÓN

De acuerdo con lo expuesto en este trabajo se puede observar la forma de identificar y cuantificar las componentes de incertidumbre de medida para la calibración del generador de descarga electrostática según la norma IEC 61000-4-2 en el Departamento de Compatibilidad Electromagnética de INTI. Se ha explicado que calibrar estos instrumentos significa verificar a través de una serie de mediciones que las características de los mismos se encuentran en los valores correctos y dentro de las tolerancias indicadas. Esto manifiesta la importancia de realizar calibraciones periódicas para poder asegurar, con un determinado nivel de confianza, la correcta aplicación de las perturbaciones de acuerdo con las especificaciones, contribuyendo a mejorar la repetibilidad de los resultados de ensayos de descarga electrostática sobre un equipo eléctrico-electrónico.

Será objeto de un trabajo futuro la profundización y ejecución del estudio presentado aquí.



5 BIBLIOGRAFÍA

- <https://www.argentina.gob.ar/inti/>
- IEC 61000-4-2:2008 - Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-2: Técnicas de ensayo y de medida. Ensayo de inmunidad a las descargas electrostáticas.
- ISO/IEC 17025:2017 - Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración.
- JCGM 100:2008 – Evaluación de datos de medición - Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida.