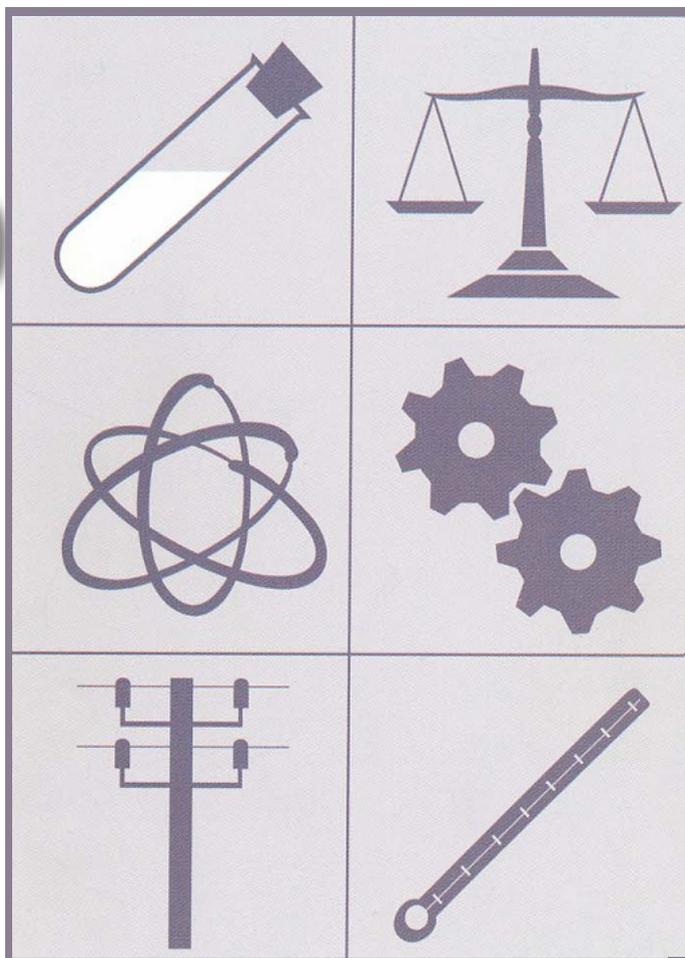


Metrología

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN



PROCEDIMIENTO EL-012 PARA LA CALIBRACIÓN
DE PUNTOS FIJOS DE CAPACIDAD

ñ 14



MINISTERIO
DE INDUSTRIA, ENERGÍA
Y TURISMO

CEM
CENTRO ESPAÑOL
DE METROLOGÍA

La presente edición de este procedimiento se emite exclusivamente en formato digital y puede descargarse gratuitamente de nuestra página web (www.cem.es).

El procedimiento ha sido revisado, corregido y actualizado, respecto a la edición anterior en papel.

Este procedimiento de calibración es susceptible de modificación permanente a instancia de cualquier persona o entidad. Las propuestas de modificación se dirigirán por escrito, justificando su necesidad, a cualquiera de las siguientes direcciones:

Correo postal:

Centro Español de Metrología
C/ del Alfar, 2,
28760 Tres Cantos, Madrid

Correo electrónico:

cem@cem.es



ÍNDICE

Página

1. OBJETO	4
2. ALCANCE	4
3. DEFINICIONES.....	5
4. GENERALIDADES.....	10
4.1. Características generales	10
4.2. Circuito equivalente.....	12
4.3. Método de calibración aplicado.....	13
5. DESCRIPCIÓN.....	20
5.1. Equipos y materiales	20
5.2. Operaciones previas.....	21
5.3. Proceso de calibración.....	23
5.4. Toma y tratamiento de datos.....	27
6. RESULTADOS.....	29
6.1. Cálculo de incertidumbres.....	29
6.2. Interpretación de resultados.....	44
7. REFERENCIAS	47
7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración.....	47
7.2. Otras referencias para consulta.....	47
8. ANEXOS.....	48
8.1. Anexo I: Formatos utilizados para la toma de datos.....	48
8.2. Anexo II: Aplicación práctica del procedimiento descrito. “Calibración de un condensador de 1 000 pF a 1 kHz”.....	50
8.3. Anexo III: Factor de cobertura.....	67



1. OBJETO

El presente procedimiento tiene por objeto definir los métodos y establecer la sistemática necesaria para realizar la calibración de puntos fijos de capacidad, utilizados posteriormente como referencia en un laboratorio de calibración para la calibración de puentes de medida de capacidad de precisión media baja y condensadores de trabajo por referencia a estos cuando proceda.

2. ALCANCE

Según la clasificación de instrumentos de metrología eléctrica [1], la aplicación básica de este procedimiento es a condensadores fijos, patrones de precisión media alta, con código de identificación EE-03.01.

No obstante lo indicado, este procedimiento es aplicable a la calibración por medida directa de puntos fijos de capacidad, pudiéndose, en este sentido, calibrarse también:

- Cajas de décadas de condensadores (EE-03.02).
- Condensadores variables por pasos (EE-03.05) y de forma continua (EE-03.04).
- Condensadores fijos (EE-03.04).

En adelante se empleará la denominación “condensador” o “capacidad”, según proceda, por ser estas las denominaciones mayoritariamente empleadas, tanto a nivel industrial como en laboratorios, añadiendo otros adjetivos solo cuando proceda establecer alguna diferencia.

NOTA:

Dada la misión de esta serie de procedimientos de calibración, de apoyo a las PYMES, su desarrollo y aplicación es en laboratorios de calibración de aplicación industrial, por lo que no se recomienda la aplicación de este procedimiento, aunque puede ser aplicado, a la calibración de condensadores de referencia de laboratorios de calibración de nivel alto. Dichos condensadores se calibran por comparación con patrones nacionales mediante



un proceso de normalización del puente de medida que no procede su desarrollo en este procedimiento. No obstante en este procedimiento no se hace esta distinción y se considera que el procedimiento es aplicable a todos los valores que posteriormente se indican.

Siempre que se satisfaga el principio básico de que la incertidumbre de calibración no sea mayor de un tercio, y preferiblemente de una décima, del error de utilización permitido para el instrumento a calibrar [2], es aconsejable utilizar el procedimiento de calibración aquí descrito.

3. DEFINICIONES

Son de aplicación las definiciones generales de la referencia [6] que se indican a continuación, además de otras específicas para el presente procedimiento.

Ajuste de un sistema de medida [6] (3.11)

Conjunto de operaciones realizadas sobre un **sistema de medida** para que proporcione **indicaciones** prescritas, correspondientes a **valores** dados de la **magnitud** a medir.

NOTA 1: Diversos tipos de ajuste de un sistema de medida son: **ajuste de cero**, ajuste del *offset* (*desplazamiento*) y ajuste de la amplitud de escala (denominado también ajuste de ganancia).

NOTA 2: No debe confundirse el ajuste de un sistema de medida con su propia calibración, que es un requisito para el ajuste.

NOTA 3: Después de su ajuste, generalmente un sistema de medida debe ser calibrado nuevamente.

Calibración [6] (2.39)

Operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los **valores** y sus **incertidumbres de medida** asociadas obtenidas a partir de los **patrones de medida**, y las correspondientes **indicaciones** con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta



información para establecer una relación que permita obtener un **resultado de medida** a partir de una indicación.

NOTA 1: Una calibración puede expresarse mediante una declaración, una función de calibración, un diagrama de calibración, una curva de calibración o una tabla de calibración. En algunos casos, puede consistir en una corrección aditiva o multiplicativa de la indicación con su incertidumbre correspondiente.

NOTA 2: Conviene no confundir la calibración con el **ajuste de un sistema de medida**, a menudo llamado incorrectamente “autocalibración”, ni con una **verificación** de la calibración.

NOTA 3: Frecuentemente se interpreta que únicamente la primera etapa de esta definición corresponde a la calibración.

Error de medida [6] (2.16)

Diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia.

NOTA 1: El concepto de error de medida puede emplearse:

a) cuando exista un único valor de referencia, como en el caso de realizar una calibración mediante un patrón cuyo valor medido tenga una incertidumbre de medida despreciable, o cuando se toma un valor convencional, en cuyo caso el error es conocido.

b) cuando el mensurado se supone representado por un valor verdadero único o por un conjunto de valores verdaderos, de amplitud despreciable, en cuyo caso el error es desconocido.

NOTA 2: Conviene no confundir el error de medida con un error en la producción o con un error humano.

Factor de disipación “D”:

Parámetro que caracteriza las pérdidas del condensador. Su valor se establece a partir de la relación entre la potencia disipada en los elementos resistivos del condensador y la energía almacenada en el propio condensador, obteniéndose como resultado que:



$$D = X_{C,P} / R_P = 1 / \omega C_P \cdot R_P,$$

siendo:

ω : Frecuencia a la que se realiza la medida

C_P : Capacidad medida con circuito equivalente en paralelo

R_P : Resistencia de pérdidas en paralelo.

Existen puentes que miden de forma directa el valor de D , mientras que otros puentes miden el valor de la conductancia del condensador:

$$G_P = 1 / R_P,$$

pudiéndose deducir un parámetro del otro dado que el valor de C_P es conocido.

Este parámetro se denomina también tangente del ángulo de pérdidas ($\text{tg } \delta$) por ser este el ángulo de pérdidas que introduce la componente resistiva (ver **Figura 2**).

Se establece también un parámetro equivalente, denominado factor de calidad del condensador, definido como:

$$Q = 1 / D = \omega C_P \cdot R_P,$$

formando parte de la calibración de un condensador el establecer el valor de uno de estos dos parámetros. En un condensador de precisión elevada, D puede alcanzar un valor inferior a 10^{-5} a la frecuencia de 1 kHz.

Incertidumbre de medida [6] (2.26)

Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los **valores** atribuidos a un **mensurando**, a partir de la información que se utiliza.

NOTA 1: La incertidumbre de medida incluye componentes procedentes de efectos sistemáticos, tales como componentes asociadas a correcciones y a



valores asignados a patrones, así como la incertidumbre debida a la definición. Algunas veces no se corrigen los efectos sistemáticos estimados y en su lugar se tratan como componentes de incertidumbre.

NOTA 2: El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación típica, en cuyo caso se denomina **incertidumbre típica de medida** (o un múltiplo de ella) , o una semiapertura con una **probabilidad de cobertura** determinada.

NOTA 3 En general, la incertidumbre de medida incluye numerosas componentes. Algunas pueden calcularse mediante una evaluación tipo A de la incertidumbre de medida, a partir de la distribución estadística de los valores que proceden de las series de mediciones y pueden caracterizarse por desviaciones típicas. Las otras componentes, que pueden calcularse mediante una evaluación tipo B de la incertidumbre de medida, pueden caracterizarse también por desviaciones típicas, evaluadas a partir de funciones de densidad de probabilidad basadas en la experiencia u otra información.

NOTA 4 En general, para una información dada, se sobrentiende que la incertidumbre de medida está asociada a un valor determinado atribuido al mensurando. Por tanto, una modificación de este valor supone una modificación de la incertidumbre asociada.

Puente de medida de capacidad:

Instrumento que tiene capacidad para la medida de condensadores dentro de un margen de frecuencias determinado. En la actualidad estos instrumentos tienen la indicación digital y responden a algún tipo particular de puente, efectuando la medida mediante comparación con una caja de décadas de capacidad interna o por cálculo matemático directo. Estos puentes permiten obtener de forma simultánea el valor del condensador medido y su factor de disipación o tangente del ángulo de pérdidas.

Resolución de un dispositivo visualizador [6] (4.15)

Mínima diferencia entre **indicaciones** visualizadas, que puede percibirse de forma significativa.

Trazabilidad metrológica [6] (2. 41)



Propiedad de un **resultado de medida** por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de **calibraciones**, cada una de las cuales contribuye a la **incertidumbre de medida**

NOTA 1: En esta definición, la referencia puede ser la definición de una **unidad de medida**, mediante una realización práctica, un **procedimiento de medida** que incluya la unidad de medida cuando se trate de una **magnitud no ordinal**, o un **patrón**.

NOTA 2: La trazabilidad metrológica requiere una **jerarquía de calibración** establecida.

NOTA 3: La especificación de la referencia debe incluir la fecha en la cual se utilizó dicha referencia, junto con cualquier otra información metrológica relevante sobre la referencia, tal como la fecha en que se haya realizado la primera calibración en la jerarquía.

NOTA 4: Para **mediciones** con más de una **magnitud de entrada** en el **modelo de medición**, cada **valor** de entrada debiera ser metrológicamente trazable y la jerarquía de calibración puede tener forma de estructura ramificada o de red. El esfuerzo realizado para establecer la trazabilidad metrológica de cada valor de entrada debería ser en proporción a su contribución relativa al resultado de la medición.

NOTA 5: La trazabilidad metrológica de un resultado de medida no garantiza por sí misma la adecuación de la incertidumbre de medida a un fin dado, o la ausencia de errores humanos.

NOTA 6: La comparación entre dos patrones de medida puede considerarse como una calibración si esta se utiliza para comprobar, y si procede, corregir el valor y la incertidumbre atribuidos a uno de los patrones.

NOTA 7: La ILAC considera que los elementos necesarios para confirmar la trazabilidad metrológica son: una **cadena de trazabilidad** metrológica ininterrumpida a un **patrón internacional** o a un **patrón nacional**, una incertidumbre de medida documentada, un procedimiento de medida documentado, una competencia técnica reconocida, la trazabilidad metrológica al **SI** y los intervalos entre calibraciones (véase ILAC P-10:2002).

NOTA 8: Algunas veces el término abreviado “trazabilidad” se utiliza en lugar de “trazabilidad metrológica” así como para otros conceptos, como trazabilidad



de una muestra, de un documento, de un instrumento, de un material, etc., cuando interviene el historial (“traza”) del elemento en cuestión. Por tanto, es preferible utilizar el término completo “trazabilidad metroológica” para evitar confusión.

4. GENERALIDADES

4.1. Características generales

Los condensadores objeto de este procedimiento de calibración son normalmente condensadores planos, constituidos por dos placas paralelas de un material muy estable y con un coeficiente bajo de temperatura, tal como el invar, que se alojan en un recinto conductor que sirve de apantallamiento de la capacidad principal. La disposición normal de estos condensadores es a tres terminales, según se muestra en la **Figura 1**, dos unidos directamente al condensador, marcados con “HI” y “LO” y un tercero unido a la caja o pantalla como conector de guarda y marcado normalmente con “GND”. Los conectores externos suelen ser simples, del tipo banana, aunque en condensadores de alta precisión se utilizan conectores del tipo GR-847.

De acuerdo con lo indicado, el condensador puede así medirse a dos o a tres terminales, aunque generalmente la medida de un condensador patrón se realiza siempre a tres terminales. Cuando la medida se realiza a dos terminales, el terminal “GND” se une al terminal “LOW” por medio de una barra cortocircuitadora suministrada por el fabricante con cada condensador, cuando se utilizan conectores tipo banana, o un conector especial que realiza esta unión, cuando se dispone de conectores GR-847.

Es normal que la calibración se realice de forma simultánea a tres y a dos terminales, permitiendo de esta forma su utilización de una u otra forma en función de su aplicación.

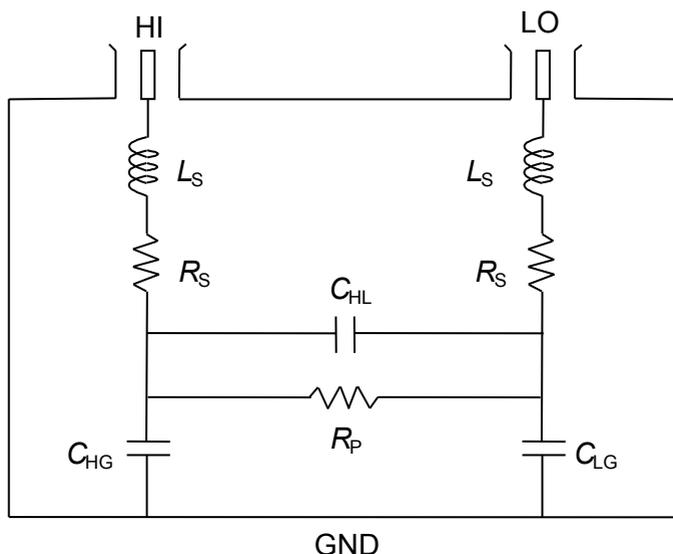


Figura 1. Disposición básica de un condensador patrón

Los valores típicos que existen en el mercado de este tipo de condensadores van desde 10 pF hasta 1 μ F en valores de décadas. Dentro de estos valores, son considerados como patrones de referencia de laboratorios de calibración del más alto nivel, los valores inferiores, habitualmente: 10 pF, 100 pF y 1 000 pF, aunque también puede existir alguno de estos valores en condensadores de menor precisión. Los condensadores de este tipo de precisión alta, tienen un dieléctrico gaseoso, normalmente nitrógeno seco a una presión ligeramente superior a la atmosférica, y constituyen la referencia de más alto nivel, aunque sus valores están limitados por razones de volumen a valores de 1 nF.

Para obtener valores superiores a 1 nF es necesario recurrir a la utilización de dieléctricos sólidos tales como mica o poliestireno, dispuestos y alojados en una estructura de sujeción que evita su movimiento y le proporciona estabilidad mecánica. Aunque estos



condensadores muestran también una alta estabilidad y bajas pérdidas, sus características metrológicas son inferiores a los condensadores de dieléctrico gaseoso.

Las características básicas a considerar son las siguientes:

- Valor nominal.
- Incertidumbre de calibración recomendada.
- Desviación al valor nominal permitida.
- Estabilidad a largo plazo o deriva.
- Factor de disipación o tangente del ángulo de pérdidas.
- Tensión nominal permitida en CC y CA.
- Coeficiente de frecuencia.
- Coeficiente de temperatura.
- Tipos de bornes disponibles.
- Capacidades parásitas.
- Inductancia residual.

4.2. Circuito equivalente

Según se muestra en la **Figura 1**, los condensadores de este tipo se realizan en conexión a tres terminales, pudiéndose calibrar en conexión a dos o tres terminales o en ambas conexiones según se describe en el apartado siguiente. La **Figura 2a** muestra el circuito equivalente de un condensador en conexión a dos terminales, para lo cual, según se ha indicado, uno de los dos terminales del condensador, normalmente el identificado como bajo (low), ha sido unido al tercer terminal disponible, o de guarda, unido a la pantalla.



En el circuito se tiene:

R_S : Resistencia en serie originada por cables y soportes.

L_S : Inductancia en serie originada por cables y soportes.

C_{HL} : Capacidad considerada (entre placas), incluye en este caso una de las dos capacidades parásitas entre una placa y pantalla.

C_{HG} : Capacidad entre el terminales HI y GND.

G_P : Conductancia en paralelo.

Salvo a frecuencias elevadas, para las que R_S y L_S llegan a ser importantes, la frecuencia a la que usualmente se calibran estos condensadores es 1 kHz, y para este valor, las dos componentes que prevalecen son la capacidad efectiva del condensador C_P , como suma de las tres indicadas, y la conductancia en paralelo G_P o su equivalente $1 / R_P$, siendo R_P la resistencia en paralelo.

La **Figura 2b** muestra la representación vectorial básica de la admitancia del circuito equivalente mostrado y que establece los distintos parámetros considerados. El comportamiento a frecuencia elevada de un condensador, debe ser analizado por teoría de circuitos en función de los parámetros característicos de cada condensador y la frecuencia a la que va ser utilizado.

4.3. Método de calibración aplicado

4.3.1. Medida de capacidad

El valor del condensador calibrado (C_x), que es un condensador de precisión media alta utilizado como referencia posteriormente, es la variación de medida que se produce en el puente de medida de capacidad entre el valor medido con los terminales de medida en circuito abierto " C_0 " (sin nada conectado a ellos), y el valor medido

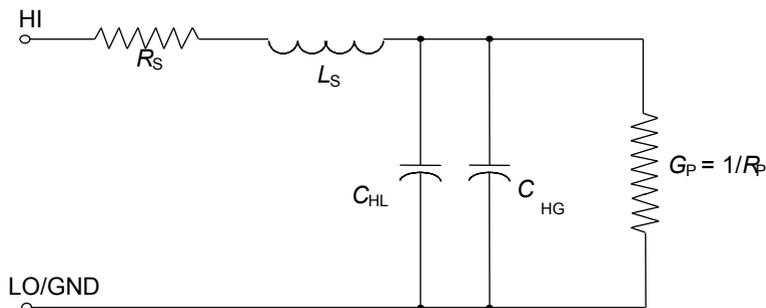


con el condensador conectado a dichos terminales “ C_M ”, de modo que:

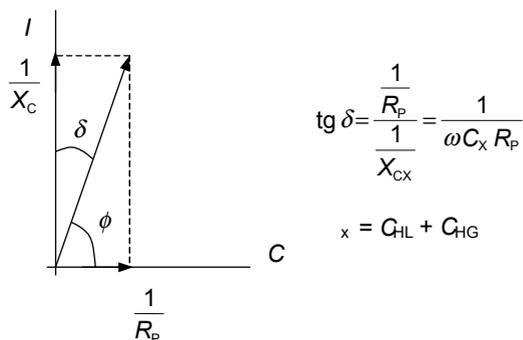
$$C_x = C_M - C_0.$$

Puesto que la capacidad de un condensador varía generalmente con la frecuencia y la tensión de medida, su calibración exige especificar la frecuencia y la tensión a la que se ha medido.

El factor de disipación, como relación entre la reactancia capacitiva del condensador medido y su resistencia de pérdidas en paralelo, o el parámetro equivalente, la tangente del ángulo de pérdidas, se determina en los puentes de medida de capacidad actuales de forma simultánea con el valor medido de capacidad.



a) Circuito equivalente

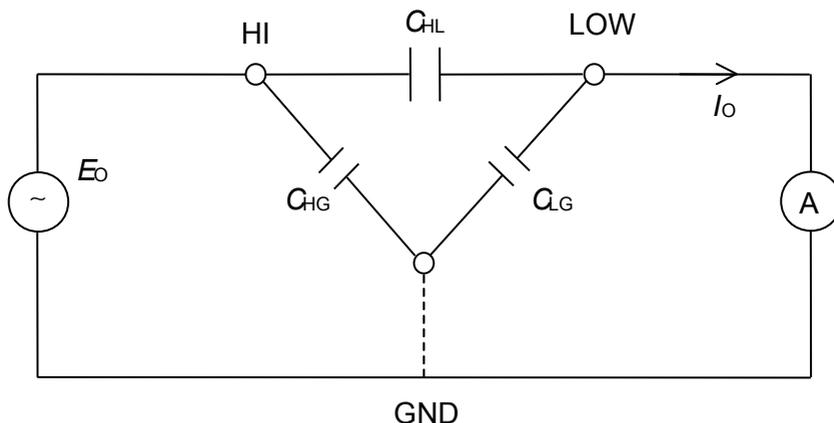


b) Representación vectorial

Figura 2. Circuito equivalente de un condensador

Como ya se ha indicado, la calibración de un condensador puede realizarse a dos o a tres terminales. La calibración a tres terminales, anula, por la forma de realizar el conexionado (**Figura 3**), prácticamente la influencia de las capacidades parásitas mostradas en la **Figura 1** y es esta, la forma usual de certificar un condensador de referencia que posteriormente va a ser utilizado para calibrar otros

instrumentos. La ventaja no es realmente que no se suma el efecto de las capacidades parásitas a la capacidad calibrada, sino que las capacidades parásitas, al estar definidas entre puntos internos y la pantalla, son influenciadas por la presencia de campos eléctricos externos que hacen que varíe su valor, por lo que su precisión es inferior.



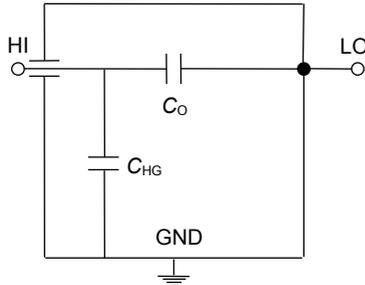
$$X(C_{HL}) = E_0 / I_0$$

Figura 3. Conexión a tres terminales: Principio básico

No obstante, la calibración a dos o a tres terminales es una decisión del usuario del condensador, que depende de como va a usar el condensador posteriormente, y que debe especificar en su petición de calibración. Lo usual en algunos laboratorios de calibración es que la calibración se realice a dos y a tres terminales. La **Figura 4 a, b, y c** muestra las posibles conexiones a dos terminales y la capacidad que, realmente, se mide en función de la conexión realizada, y que en los tres casos es distinta, por lo que debe indicarse, cuando se mida a dos terminales,

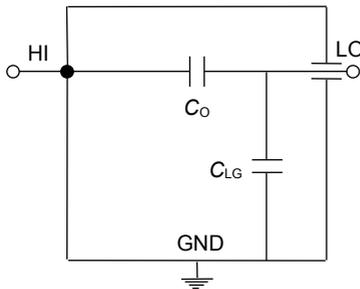


cual de dichas configuraciones es la utilizada. La forma usual es la a) con el terminal bajo (LO) unido al de guarda (GND).



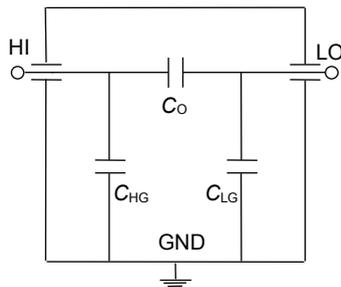
$$C_{HL} = C_O + C_{HG}$$

a) Conexión con LO y GND unidos



$$C_{HL} = C_O + C_{LG}$$

b) Conexión con HI y GND unidos



$$C_{HL} = C_O + \frac{C_{HG} \cdot C_{LG}}{C_{HG} + C_{LG}}$$

c) Conexión con HI y LO libres

Figura 4. Conexión a dos terminales



Básicamente, los pasos necesarios para realizar la calibración son los siguientes:

- a) Preparar el puente para medida de C_x , a la frecuencia y a la tensión de medida deseadas y con la configuración elegida, normalmente paralelo.
- b) Medir la capacidad residual C_0 de los cables de medida antes de conectarlos al condensador a calibrar. Para hacer esta medida, dichos cables deben dejarse abiertos por los extremos donde más tarde se conectará el condensador a calibrar.
- c) Medir la capacidad del condensador calibrado C_M .
- d) Calcular el valor del condensador calibrado, restando al valor medido en el paso "c", el valor medido en el paso "b", es decir:

$$C_x = C_M - C_0$$

- e) Medida directa del factor de disipación del condensador calibrado " D ".

4.3.2. Medida del factor de disipación D

El factor de disipación es un parámetro auxiliar de la medida de capacidad que indica la potencia activa que consume el condensador y que normalmente se disipa en calor. Su valor, aunque se establece con incertidumbre, se puede especificar como un límite superior que no debe ser sobrepasado, dado que este hecho implica que ha perdido sus características, bien por degradación de sus materiales o condiciones en que se encuentran, o por alguna causa externa, tal como humedad excesiva o presencia de suciedad en sus terminales, que debe ser corregida antes de continuar la calibración, dado que este hecho afectará también al valor de C y a su estabilidad a muy corto plazo.



El factor de disipación se obtiene por medida directa con el puente de medida, bien de forma simultánea con el valor de la capacidad calibrada en un indicador adicional, o bien por separado, si el puente no dispone de esta posibilidad.

5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales

Para realizar la calibración descrita en este procedimiento es necesario disponer de un puente de medida de capacidad cuya incertidumbre de uso, para los dos parámetros medidos “C” y “D”, sea al menos tres veces menor que la tolerancia permitida para el condensador a calibrar durante su uso habitual, o especificada por el fabricante para el condensador. Este puente debe tener capacidad para la medida de condensadores en los rangos y frecuencias a los que se desea realizar la calibración.

La instrumentación actualmente existente, permite disponer de puentes de medida de capacidad con incertidumbre de medida relativas a los patrones de calibración en el entorno de $200 \cdot 10^{-6} \cdot C$ a la frecuencia de referencia de 1 kHz en su escala más precisa, o de menor incertidumbre de medida, variando en sentido creciente al separarse de esta escala y de la frecuencia indicada. Se debe tener en cuenta que la incertidumbre de utilización del puente es el resultado de componer este valor y la incertidumbre de calibración, motivo por el cual en el ejemplo práctico se utiliza como incertidumbre de medida del puente un valor superior al indicado como relativo en este párrafo.

NOTA:

En el ejemplo práctico que se incluye en el apartado 8 “Anexos”, se utiliza un puente de medida de indicación digital, con 4 1/2 dígitos de resolución, con unas especificaciones básicas de precisión por medida directa del orden de $200 \cdot 10^{-6} \cdot C$ relativas a los patrones de calibración.



La incertidumbre indicada se disminuye de forma apreciable si previamente se normaliza el puente con respecto a un patrón de referencia del mismo valor nominal del condensador que se va a calibrar. Este método constituye el método por transferencia indicado en el apartado 2, y se aplica a laboratorios de nivel superior que realizan las calibraciones con incertidumbres inferiores y que disponen habitualmente del patrón de referencia mencionado, por lo que no es objeto de este procedimiento. En este supuesto, además de que permite la posibilidad de corregir el valor medido, la incertidumbre de utilización del puente es básicamente la de su calibración.

Para realizar la calibración, el puente de medida de capacidad dispone normalmente, como accesorio, de varios juegos de cables apantallados con diversos tipos de conectores y conexiones que realizan la unión entre el puente de medida de capacidad y el condensador calibrado.

5.2. Operaciones previas

Antes de iniciar la calibración se deben realizar las siguientes operaciones previas:

ADVERTENCIA: Aunque la tensión a la que se calibra un condensador suele ser baja, en ocasiones puede alcanzar valores elevados, por lo que pueden presentarse en los terminales externos del puente de medida de capacidad utilizado o en los conectores del condensador calibrado, tensiones peligrosas para las personas. Para evitar daños irreparables, deben ser observadas las precauciones usuales de trabajos con tensión, siguiendo de forma ordenada la secuencia de operaciones indicadas en el procedimiento. En cualquier caso tomar como referencia las instrucciones facilitadas por el fabricante en el manual técnico, para evitar riesgos al personal que realiza la calibración. Estas consideraciones son aplicables a cualquier trabajo o comprobación que como consecuencia de la calibración se realice en el puente de medida.

- a) Comprobar que el condensador a calibrar está identificado de forma permanente con su marca, modelo y número de serie correspondiente, o con un código interno unívoco establecido



por el propietario del condensador calibrado. En el supuesto de que no se disponga de esta información, el laboratorio le asignará un código de identificación que se adherirá o fijará de forma segura sobre el condensador calibrado.

- b) Estudiar el manual de instrucciones, u hoja de especificaciones, del condensador a calibrar, de forma que la persona que realice la calibración esté familiarizado con sus características técnicas y de utilización.
- c) Comprobar que el estado de sus bornes de conexión es correcto, realizándose, en caso necesario, la limpieza de los mismos. Verificar que existe la barra que permite cortocircuitar los terminales del condensador.
- d) Establecer, cuando sea posible, la tolerancia de uso asignada al condensador. Este valor puede coincidir con las especificaciones del fabricante, o determinarse en función del uso concreto al que se destina el condensador.
- e) Disponer de la información técnica y de uso (manual de servicio, manual de mantenimiento, manual técnico, etc,...) del puente de medida de capacidad, y comprobar que la persona que realiza la calibración está familiarizada con sus características funcionales y técnicas.
- f) Comprobar el estado de calibración del puente de medida de capacidad, si dispone de certificado de calibración en vigor, y si dicho certificado garantiza la trazabilidad e incertidumbre apropiada para la calibración.
- g) Comprobar, mediante medida, que el valor nominal de la tensión de alimentación y su estabilidad son adecuados para el funcionamiento del puente de medida de capacidad.
- h) Comprobar que el puente de medida de capacidad está conectado a una base de enchufe que incluya un conductor de



protección o toma de tierra, como medida elemental de protección frente a contactos indirectos.

- i) Durante la calibración se debe comprobar que la temperatura se mantiene permanentemente dentro de los márgenes establecidos para el laboratorio y a los que se va a certificar la calibración realizada. Mantener un registro que permita detectar cualquier anomalía que se produzca durante la calibración con el fin de establecer las correcciones o componentes de la incertidumbre que procedan.
- j) Comprobar que durante la calibración, la humedad relativa del laboratorio no sobrepasa el 60 %. En algunos casos es posible admitir valores de hasta el 70 % o incluso el 80 %, si se produce este último supuesto, consultar el manual técnico del puente de medida de capacidad y del condensador calibrado.
- k) Conectar a la red de alimentación eléctrica el puente de medida de capacidad, proceder a su encendido y permitir un tiempo previo al inicio de la calibración para conseguir su estabilización térmica según las indicaciones contenidas en sus manuales.
- l) Mantener el condensador a calibrar un tiempo mínimo de 24 horas en el laboratorio donde va a ser calibrado para que se estabilice térmicamente. Comprobar que la instrumentación utilizada en la calibración, que normalmente estará en el laboratorio, cumple igualmente dicha condición.

5.3. Proceso de calibración

5.3.1. Secuencias posibles de calibración

El proceso de calibración, al tratarse de condensadores fijos sin posibilidad de ajuste, consta solamente de la calibración inicial, dado que no es posible el proceso de ajuste y por tanto no procede la calibración final. El resultado obtenido es el valor medio de la serie de “ n ” medidas realizadas, o su equivalente, la desviación al valor

nominal, obtenida para el valor de la capacidad, junto con la incertidumbre asociada.

5.3.2. Conexiones y realización de las medidas

Las conexiones entre el puente de medida de capacidad y el condensador a medir deben de realizarse con cables apantallados. Generalmente los puentes de medida de capacidad de este tipo disponen de varios juegos de cables de medida y conectores que permiten la conexión directa y rápida con el condensador a medir. La **Figura 5** muestra la disposición básica de medida.

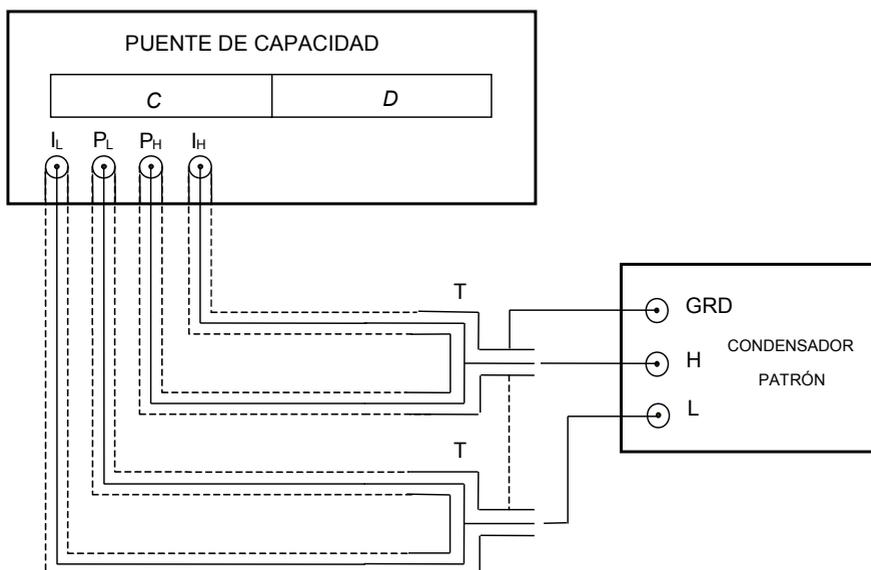


Figura 5: Disposición básica de medida

Los pasos a seguir son los siguientes:



- a) Encender el puente y esperar el tiempo indicado en su manual técnico para que alcance su estabilización térmica.
- b) Seleccionar la medida de capacidad en configuración en paralelo a la frecuencia de 1 kHz.

NOTA:

También se podría realizar la calibración a otras frecuencias en función del uso y características del condensador a calibrar.

- c) Seleccionar la tensión de medida de acuerdo con las características del condensador y las indicaciones del propietario contenidas en la solicitud de calibración, si procede.
- d) Mantener los cables en circuito abierto y realizar la medida de la capacidad que presentan los cables y circuito de entrada del puente, siguiendo las instrucciones contenidas en su manual técnico. Anotar el valor medido “ C_0 ”.

NOTA:

Es muy importante que la posición relativa de los cables de medida no varíe durante todo el proceso de medida, así como que el condensador a medir esté separado de cualquier objeto metálico al menos 40 cm.

- e) Conectar el condensador a calibrar al puente de medida de capacidad (**Figura 5b**), y una vez estabilizada la medida, anotar los valores de “ C_M ” y “ D_M ” indicados.
- f) Calcular el valor del condensador medido aplicando la expresión:

$$C_x = C_M - C_0$$



5.3.3. Definición de los puntos de medida

Los condensadores patrón utilizados en los laboratorios están certificados en un punto de frecuencia, generalmente 1 kHz y la configuración utilizada es en paralelo a tres terminales, para lo que el terminal “L0” del condensador debe estar separado del terminal “GND” del mismo.

Es posible realizar medidas en otros puntos de frecuencia, tanto inferiores, por ejemplo 100 Hz, como superiores, pudiéndose alcanzar frecuencias de varios MHz. El método de medida es básicamente el mismo aunque se incrementa apreciablemente la incertidumbre de calibración debido al hecho de una mayor influencia de los elementos parásitos.

Con el fin de establecer la componente de Tipo A o de repetibilidad de las medidas, repetir el proceso indicado un número “*n*” de veces, se recomienda que:

$$10 \geq n \geq 5$$

Igualmente se recomienda permitir un tiempo entre cada dos medidas realizadas que permita que las variaciones ambientales del laboratorio y de todo tipo que afectan a la capacidad calibrada, puedan ser adecuadamente controladas. El tiempo entre cada dos medidas debe ser establecido por el responsable del laboratorio en función de la información y experiencia disponible, siendo normal periodos entre 30 minutos y 120 minutos.

También es recomendable que las medidas no se realicen en un solo día.

NOTA:

Existen puentes de medida de capacidad que la corrección por efecto de C_0 la realizan internamente, ajustando un cero para el



valor medido. En este caso la medida de C_x es directa y no se aplica la corrección mencionada.

La Tabla 1 incluida en el Anexo 1, muestra un formato de recogida de datos de calibración adaptada a lo indicado anteriormente y la Tabla 2 del mismo anexo, muestra un formato para el balance de incertidumbre para la magnitud medida.

Si el instrumento corrige el cero internamente, de forma previa a la medida, la columna 2 de la Tabla 1 puede ser suprimida.

5.4. Toma y tratamiento de datos

5.4.1. Recogida de datos y criterios de aceptación aplicados

Para cada punto de calibración se anotan, según se muestra en la Tabla 1 indicada, los siguientes datos:

- Valor de la frecuencia de medida.
- Valor de la tensión de medida.
- Condiciones ambientales disponibles.
- Procedimiento de calibración aplicado.
- Configuración de medida (a dos o a tres terminales).
- Identificación del calibrando.

La tabla contiene los valores medidos de $C_{M,i}$, $C_{0,i}$ si procede, y D_i , junto con el valor calculado $C_{x,i}$.

La toma de datos se podrá realizar de forma manual, utilizando un formato como el mostrado en la Tabla 1, o sí el puente de medida de capacidad lo permite, de forma automática, por ejemplo, mediante ordenador y un bus de



comunicación IEEE. En el último caso, se debe validar el programa utilizado antes de realizar la calibración, y se conservarán los ficheros de datos primarios que permitan reconstruir la calibración automática realizada.

La validación del programa informático se puede obtener mediante la comparación para una misma calibración entre los cálculos realizados manualmente y los obtenidos por medio del programa aplicado, utilizando en ambos cálculos la misma información, así como aplicando, sí procede, los mismos supuestos y simplificaciones.

Deben conservarse los cálculos obtenidos por los dos métodos, así como los registros obtenidos, indicando en ellos todas las condiciones de medida: frecuencia y tensión de medida, condiciones ambientales, etc.,..., indicadas.

La aceptación o rechazo de cada uno de los valores medidos y anotados en la Tabla 1 se puede realizar aplicando el criterio de Chauvenet, aunque en ocasiones la lógica permite rechazar ciertas medidas, consiguiéndose de esta forma eliminar del resultado de la calibración posibles anomalías no controladas ni sistemáticas.

La Tabla 1 indicada, así como cualquier registro de resultados o cálculos realizados, debe incluir la fecha de su realización y la firma del responsable de su realización.

El tratamiento dado a las desviaciones al valor nominal resultantes de la calibración, en relación con el cálculo de la incertidumbre de calibración, es objeto del apartado 6 de este procedimiento.

5.4.2. Cálculos a realizar

Los datos básicos obtenidos de las medidas realizadas son el valor medio de la serie de medidas realizadas, " $C_{x,i}$ " y " $D_{x,i}$ ":



$$\bar{C}_x = \sum_{i=1}^n C_{x,i} / n \quad (1)$$

$$\bar{D}_x = \sum_{i=1}^n D_{x,i} / n, \quad (2)$$

junto con la desviación típica muestral de la serie de medidas realizadas:

$$s(C_{x,i}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (C_{x,i} - \bar{C}_x)^2 / (n-1)} \quad (3)$$

$$s(D_{x,i}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (D_{x,i} - \bar{D}_x)^2 / (n-1)} \quad (4)$$

El valor medio constituye el valor certificado de la calibración. Los valores obtenidos de \bar{C}_x y \bar{D}_x se anotan en la Fila 12 de la Tabla 1 (Anexo 1).

La desviación típica obtenida permite obtener la incertidumbre típica de dicho valor o componente de Tipo A derivada de la falta de repetibilidad de las medidas. El tratamiento dado a esta información es objeto del apartado 6 de este procedimiento. Los valores obtenidos de $s(C_{x,i})$ y $s(D_{x,i})$ se anotan en la Fila 13 de la Tabla 1 indicada.

NOTA:

Observar que aunque el proceso de medida implica el obtener el valor medido de C_x mediante la diferencia entre los valores obtenidos en las medidas realizadas con el condensador sin conectar y los cables en circuito abierto, C_0 , y los valores medidos con el condensador conectado, C_M , la correlación existentes entre ambas medidas, permite establecer el valor medio y las distintas componentes de la incertidumbre sobre la diferencia obtenida, C_x .



6. RESULTADOS

6.1. Cálculo de incertidumbres

6.1.1. Introducción

El resultado de la calibración viene establecido por el valor certificado de los parámetros “C” y “D” calibrados, establecidos, bien en valor absoluto, como:

$$C_{x,c} = \bar{C}_x \quad (5)$$

$$D_{x,c} = \bar{D}_x \quad (6)$$

o como diferencia al nominal, en el caso de la capacidad:

$$\Delta C_{x,c} = \Delta \bar{C}_x, \quad (7)$$

calculados en el apartado 5.4.2 anterior, junto con la incertidumbre de dichos valores.

La asignación y expresión de incertidumbres se obtiene, considerando las distintas componentes divididas en Tipo A y B y efectuando su cálculo siguiendo los criterios establecidos en la guía para la expresión de la incertidumbre de medida, 3ª ed. en español, referencia [5], aplicados según se indica en la guía de la referencia [3].

6.1.2. Fuentes de incertidumbre: Definición

6.1.2.1. Medida de capacidad

En función de lo establecido en el apartado 4.3.1 para el método de calibración, la relación que permite obtener el valor de la capacidad calibrada es:

$$C_{x,c} = C_{x,M} + \delta C_{x,M} - C_{0,M} - \delta C_{0,M} \quad (8)$$



o bien, si se establece la diferencia al valor nominal $C_{x,n}$:

$$\Delta C_{x,c} = C_{x,M} + \delta C_{x,M} - C_{0,M} - \delta C_{0,M} - C_{x,n}, \quad (9)$$

en donde:

$C_{x,M}$ y $C_{0,M}$:

Son los valores medios de las indicaciones del puente de medida de capacidad para la serie de medidas realizadas. Como se ha indicado en el apartado 5.4.2, se obtiene el valor medio de la serie de medidas resultante de calcular la diferencia entre ambos valores y la incertidumbre resultante de esta medida, se establece igualmente para este valor.

$\delta C_{x,M}$ y $\delta C_{0,M}$:

Son las correcciones aplicadas a las capacidades medidas debidas a múltiples efectos. Además de las correcciones debidas a la calibración del puente de medida y su propia resolución, se consideran aquí correcciones por efecto de:

- 1) Deriva desde la última calibración.
- 2) Variaciones de las condiciones ambientales.
- 3) Variaciones en la tensión de red.
- 4) Efecto en la medida de las resistencias de aislamiento de cables y conectores.
- 5) Efectos de ajustes de cero y circuito abierto realizados.



- 6) Efectos de ganancia y no linealidad del puente.
- 7) Desviación al nominal, o curva de calibración del puente de medida obtenida durante la calibración.

Aplicables todas ellas al puente de medida de capacidad utilizado.

Se considera adicionalmente la influencia que tiene la variación de la temperatura del laboratorio sobre el condensador medido $(\delta C_{x,m})_T$, por realizar las medidas en un periodo corto de tiempo y no considerarse su influencia contenida en la repetibilidad de las medidas observada.

Según lo indicado las incertidumbres resultantes de estas correcciones se aplican a la diferencia obtenida.

$C_{x,n}$:

Valor nominal fijo del condensador calibrado.

La descripción de las distintas componentes indicadas y su tratamiento, es objeto de los apartados que siguen.

6.1.2.2. Medida del factor de disipación

En función de lo establecido en el apartado 4.3.2 para el método de calibración, la relación que permite obtener el valor de “ D ” es:

$$D_{x,c} = D_{x,m} + \delta D_{x,m}, \quad (10)$$

en donde:



$D_{x,M}$:

Es el valor medio de las indicaciones del puente de medida de capacidad para la serie de medidas realizadas.

$\delta D_{x,M}$:

De forma similar que para la medida de C ($\delta C_{x,M}$), se considera la corrección del valor medido por múltiples efectos y su propia resolución.

6.1.3. Componentes de la incertidumbre

6.1.3.1. Componentes de tipo A: Medida de capacidad y factor de disipación

- a) La componente derivada de la repetibilidad de las medidas, se obtiene a partir de las desviaciones típicas " $s(C_{x,i})$ " y " $s(D_{x,i})$ " de la serie de " n " valores calculados a partir de las series de medidas realizadas.
- b) Calcular la desviación típica muestral indicada aplicando la expresión:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2}{n - 1}}, \quad (11)$$

para cada serie de medidas realizadas en función de las distintas frecuencias a las que se calibre el condensador.

Anotar los valores obtenidos en las casillas que correspondan de la fila 13 de la Tabla 1 de resultados (Formato N° 1 del Anexo 1).

- c) La incertidumbre típica de Tipo A, o de repetibilidad de las medidas de C y D , se obtiene aplicando la expresión:

$$U_A = s / \sqrt{n}. \quad (12)$$

6.1.3.2. Componentes de tipo B: Medida de capacidad

De conformidad con lo indicado en el apartado 6.1.2, referente al método de calibración aplicado, la relación funcional que lo define, y las componentes de la incertidumbre en él presentes, y dado que esta relación funcional es una suma, la incertidumbre típica de Tipo B resultante, expresada en valores absolutos, tanto si el resultado se expresa en valor absoluto o como diferencia al valor nominal, viene dada por la expresión:

$$u^2(C_{x,c}) = u^2(\Delta C_{x,c}) = u^2(C_{x,M}) + u^2(\delta C_{x,M}) - u^2(C_{0,M}) - u^2(\delta C_{0,M}) - u^2(C_{x,n}) + u^2(\delta C_{x,M})_T, \quad (13)$$

en donde:

$u(C_{x,M})$ y $u(C_{0,M})$:

Incertidumbres típicas de calibración del puente de medida de capacidad, obtenidas de su certificado de calibración.

Como se ha indicado en el apartado 5.4.2, esta componente se establece para la diferencia obtenida entre $C_{x,M}$ y $C_{0,M}$.

$u(\delta C_{x,M})$ y $u(\delta C_{0,M})$:

Incertidumbres típicas por correcciones de la indicación del puente de medida de capacidad.



Según los criterios expuestos en la referencia [3] para un instrumento multifunción, la aplicación de correcciones y las incertidumbres de ellas derivadas es compleja, incluso en ocasiones no se dispone de los datos individuales de cada corrección, recomendándose, en estos casos de aplicación industrial, eliminar la corrección como tal, o la componente de la incertidumbre que la sustituye, y aplicar las especificaciones del fabricante en función del periodo de calibración establecido, manteniendo únicamente la resolución del propio instrumento calibrado.

De acuerdo con este criterio de tipo práctico, aplicable en su totalidad a este procedimiento de calibración, esta componente se divide en dos para su tratamiento posterior, la derivada de las especificaciones relativas a patrones dadas por el fabricante:

$$u(\delta C_{x,M})_{\text{esp}} \text{ y } u(\delta C_{0,M})_{\text{esp}}, \quad (14)$$

que engloban todos los factores de influencia mencionados, y los derivados de la propia resolución del puente de medida de capacidad:

$$u(\delta C_{x,M})_{\text{res}} \text{ y } u(\delta C_{0,M})_{\text{res}}. \quad (15)$$

De igual forma que para las componentes anteriores, esta componente se establece también para la diferencia obtenida.

$$\underline{u(\delta C_{x,M})_T}:$$

Incertidumbre típica por variación de la capacidad del condensador medido por variación de la temperatura.

$$\underline{u(C_{x,n})}:$$



Al corresponder al valor nominal del calibrando, no tiene incertidumbre.

6.1.3.3. Componentes de tipo B: Medida del factor de disipación

De conformidad con lo indicado en el apartado 6.1.2, y de forma similar que para la medida de capacidad, la incertidumbre típica de Tipo B resultante, expresada en valor absoluto, viene dada por la expresión:

$$u^2(D_{x,c}) = u^2(D_{x,M}) + u^2(\delta D_{x,M}), \quad (16)$$

en donde:

$u(D_{x,M})$:

Incertidumbres típicas de calibración del puente de medida de capacidad, obtenidas de su certificado de calibración.

$u(\delta D_{x,M})$:

Incertidumbres típicas por correcciones de la indicación del puente de medida de capacidad.

De igual forma que para la medida de capacidad, esta componente se divide en dos para su tratamiento posterior, la derivada de las especificaciones relativas a patrones dadas por el fabricante:

$$u(\delta D_{x,M})_{\text{esp}},$$

que engloban todos los factores de influencia mencionados, y la derivada de la propia



resolución del puente de medida de capacidad para la medida de D :

$$u(\delta D_{x,M})_{\text{res.}}$$

6.1.4. Componentes de la incertidumbre: Estimación

6.1.4.1. Incertidumbre de Tipo A

La incertidumbre típica de Tipo A, o de repetibilidad de las medidas, viene establecida por la desviación típica del valor medio de la serie de valores obtenidos. Su valor se obtiene como cociente entre la desviación típica muestral, indicada en el apartado 6.1.3 anterior, y la raíz cuadrada del número de medidas realizadas:

$$u_1(C_{x,c}) = u_1(\bar{C}_x) = s(C_{x,i}) / \sqrt{n}, \quad (17)$$

para la medida de capacidad, y:

$$u_1(D_{x,c}) = u_1(\bar{D}_x) = s(D_{x,i}) / \sqrt{n}, \quad (18)$$

para la medida del factor de disipación.

Anotar ambos valores en fila 2 y columna 3 de incertidumbres típicas de las Tablas 1 y 2 que se muestran a continuación.

6.1.4.2. Incertidumbre de Tipo B

Según lo indicado en el apartado 6.1.3, las componentes consideradas para cada parámetro medido, aplicadas siempre a los valores calculados de C y los valores medidos de D , son:

- a) Incertidumbre de calibración del puente de medida de capacidad.



Se supone distribución normal para el factor de cobertura k indicado en el certificado, normalmente $k = 2$, luego:

$$u_2(C_{x,c}) = U_0(C_x) / k, \quad (19)$$

para la medida de capacidad, siendo $U_0(C_x)$, la incertidumbre certificada del puente de medida de capacidad para cada valor medido en las condiciones de calibración.

Para la medida del factor de disipación, se tiene de forma similar que:

$$u_2(D_{x,c}) = U_0(D_x) / k. \quad (20)$$

Siendo igualmente $U_0(D_x)$, la incertidumbre certificada del puente para esta magnitud.

Anotar ambos valores en fila 3 y columna 3 de incertidumbres típicas de las Tablas 1 y 2 indicadas.

- b) Incertidumbre por corrección de la indicación del puente de medida de capacidad.

Se aplican las especificaciones del puente para una distribución rectangular, con lo que se tiene para la medida de capacidad:

$$u_3(\delta C_{x,c})_{\text{esp}} = U_{\text{esp}}(C_x) / \sqrt{3}, \quad (21)$$

siendo $U_{\text{esp}}(C_x)$ la incertidumbre, relativa a la calibración realizada, que se especifica en el manual técnico del puente.

Para la medida del factor de disipación, se tiene igualmente que:

$$u_3(\delta D_{x,c})_{\text{esp}} = U_{\text{esp}}(D_x) / \sqrt{3}. \quad (22)$$

Anotar ambos valores en fila 4 y columna 3 de incertidumbres típicas de las Tablas 1 y 2 indicadas.

- c) Incertidumbre por resolución del instrumento de medida.

Se considera el máximo error posible debido a esta magnitud de influencia como $\pm 0,5$ veces el último dígito. La incertidumbre típica se obtiene aplicando una distribución rectangular, luego:

$$u_4(\delta C_{x,c})_{\text{res}} = \pm 0,5 \cdot \text{res} / \sqrt{3}, \quad (23)$$

$$u_4(\delta D_{x,c})_{\text{res}} = \pm 0,5 \cdot \text{res} / \sqrt{3}, \quad (24)$$

en las escalas que correspondan para cada magnitud medida.

Anotar ambos valores en fila 5 y columna 3 de incertidumbres típicas de las Tablas 1 y 2.

- d) Incertidumbre típica por variación de la capacidad del condensador medido por variación de la temperatura.

Suponiendo que el coeficiente de temperatura del condensador medido es:

$$\alpha_T(C_x) \cdot 10^{-6} \cdot C_x / ^\circ\text{C},$$

y que el margen de temperatura permitido en el laboratorio es:

$$\pm \Delta T ^\circ\text{C},$$

se cumple que:

$$U(\delta C_{x,c})_T = \pm \Delta T \cdot \alpha_T(C_x) \cdot 10^{-6} \cdot C_{x,c}. \quad (25)$$

Si aplicamos una distribución triangular, por considerar más probables los puntos próximos al de consigna del laboratorio que los extremos, la incertidumbre típica de esta componente, resulta ser:

$$u_5(\delta C_{x,c})_T = U(\delta C_{x,c})_T / \sqrt{6}. \quad (26)$$

Anotar este valor en fila 6 y columna 3 de incertidumbres típicas de la Tabla 1.

6.1.5. Cálculo de la incertidumbre de calibración

6.1.5.1. Incertidumbre típica combinada

Se calcula por aplicación de la ley de propagación cuadrática de las incertidumbres que al ser la función de salida la suma lineal de las distintas componentes presentes, según se ha indicado en el apartado 6.1.4, su valor en unidades absolutas se obtiene de la raíz cuadrada de la composición cuadrática de todas las componentes presentes, es decir:

$$u^2(C_{x,c}) = u^2(\Delta C_{x,c}) = [u_1(C_{x,c})]^2 + [u_2(C_{x,c})]^2 + [u_3(\delta C_{x,c})_{\text{esp}}]^2 + [u_4(\delta C_{x,c})_{\text{res}}]^2 + [u_5(\delta C_{x,c})_T]^2, \quad (27)$$

para la medida de capacidad, y teniendo en cuenta que $u(C_{x,n})$ no genera componente alguna de la incertidumbre, y:

$$u^2(D_{x,c}) = [u_1(D_{x,c})]^2 + [u_2(D_{x,c})]^2 + [u_3(\delta D_{x,c})_{\text{esp}}]^2 + [u_4(\delta D_{x,c})_{\text{res}}]^2, \quad (28)$$

para la medida del factor de disipación.

La Tablas 1 y 2 adjuntas, obtenidas del formato N° 2 contenido en el Anexo 1, muestran el balance de componentes de la incertidumbre realizado para obtener la incertidumbre típica de calibración de los dos parámetros medidos C y D .

Magnitud X_i	Valor estimado x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad (k)	Coficiente de sensibilidad c_i	Componente de la incertidumbre $u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$
C_x	$C_{x,c} = \bar{C}_x$	$u_1(C_{x,c})$	Normal ($k = 2$)	$c_1 = 1,0$	$u_1(y)$
		$u_2(C_{x,c})$	Normal ($k = 2$)	$c_2 = 1,0$	$u_2(y)$
$(\delta C_{x,c})_{\text{esp}}$	0	$u_3(\delta C_{x,c})_{\text{esp}}$	Rectangular ($k = \sqrt{3}$)	$c_3 = 1,0$	$u_3(y)$
$(\delta C_{x,c})_{\text{res}}$	0	$u_4(\delta C_{x,c})_{\text{res}}$	Rectangular ($k = \sqrt{3}$)	$c_4 = 1,0$	$u_4(y)$
$(\delta C_{x,c})_T$	0	$u_5(\delta C_{x,c})_T$	Triangular ($k = \sqrt{6}$)	$c_5 = -1,0$	$u_5(y)$
$C_{x,n}$	$C_{x,n}$				
$C_{x,c}$	\bar{C}_x				$u(C_{x,c}) =$
$\Delta C_{x,c}$	$\Delta C_{x,c} = \bar{C}_x - C_{x,n}$				$u(\Delta C_{x,c}) = \sqrt{\sum (u_i)^2}$

Tabla 1. Medida de capacidad: balance de incertidumbre

Magnitud X_i	Valor estimado x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad (k)	Coefficiente de sensibilidad c_i	Componente de la incertidumbre $u_i(y)=c_i \cdot u(x_i)$
D_x	$D_{x,c} = \bar{D}_x$	$u_1(D_{x,c})$	Normal ($k = 2$)	$c_1 = 1,0$	$u_1(y)$
		$u_2(D_{x,c})$	Normal ($k = 2$)	$c_2 = 1,0$	$u_2(y)$
$(\delta D_{x,c})_{\text{esp}}$	0	$u_3(\delta D_{x,c})_{\text{esp}}$	Rectangular ($k = \sqrt{3}$)	$c_3 = 1,0$	$u_3(y)$
$(\delta D_{x,c})_{\text{res}}$	0	$u_4(\delta D_{x,c})_{\text{res}}$	Rectangular ($k = \sqrt{3}$)	$c_4 = 1,0$	$u_4(y)$
$D_{x,c}$	\bar{D}_x				$u(D_{x,c}) = \sqrt{\sum(u_i)^2}$

Tabla 2. Medida del factor de disipación: balance de incertidumbre

NOTAS (Tablas 1 y 2):

1) Los coeficientes de sensibilidad se calculan como las derivadas parciales de las funciones de " $C_{x,c}$ " y de " $D_{x,c}$ " respecto de cada una de las magnitudes evaluadas en el punto de calibración considerado. Siempre que se utilice el procedimiento de calibración descrito, estos coeficientes tomarán los valores indicados en el cuadro y no intervienen en la estimación de incertidumbres, al tomar valores de + 1 y - 1.

2) $u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$.

6.1.5.2. Incertidumbre típica expandida

Se establece para ambas magnitudes como:



$$U(C_{x,c}) = U(\Delta C_{x,c}) = k \cdot u(C_{x,c}) \quad (29)$$

$$U(D_{x,c}) = k \cdot u(D_{x,c}). \quad (30)$$

Aplicando el valor de k que corresponde al nivel de confianza elegido y el número *efectivo* de grados de libertad " v_{eff} " disponible, calculados según se indica a continuación.

El número *efectivo* de grados de libertad, según el procedimiento indicado en el apartado G.6.4 del anexo G la guía para la expresión de la incertidumbre de medida, 3ª ed. en español, referencia [5], se obtiene por aplicación de la fórmula de Welch-Satterthwaite:

$$v_{\text{eff}} = [u_c(y)]^4 / \sum [u_i(y)]^4 / v_i. \quad (31)$$

Entrando con el valor de v_{eff} en la Tabla G.2 del anexo G de la guía en la referencia [5], que se incluye como Anexo 3 de este procedimiento, para el nivel de confianza establecido, nos proporciona el valor de k por el que hay que multiplicar la incertidumbre típica combinada para obtener la incertidumbre expandida.

Este resultado presupone que la distribución de probabilidad resultante de la magnitud de salida, al venir determinada por la convolución de un número dado de distribuciones de probabilidad en la que ninguna es dominante, es una distribución normal. Se debe tener en cuenta que si esta circunstancia no se da, la distribución resultante puede no ser normal y el k que le corresponde para el nivel de confianza indicado es distinto, circunstancia esta que hay que indicar en el correspondiente certificado de calibración.

6.1.6. Expresión del resultado de calibración

El resultado de la calibración se establece bien como el valor absoluto del condensador calibrado y su incertidumbre de calibración asociada, según los criterios establecidos en el apartado 7 de la guía para la expresión de la incertidumbre de medida, 3ª ed. En español, referencia [5], incluidos los requisitos con respecto al redondeo y al número de cifras significativas:

$$C_{x,c} \pm U(C_{x,c}) \quad (32)$$

$$D_{x,c} \pm U(D_{x,c}) \quad (33)$$

o también, para el valor de C , se puede expresar como diferencia al nominal, es decir:

$$\Delta C_{x,c} \pm U(\Delta C_{x,c}). \quad (34)$$

En ambos casos, se debe especificar que la incertidumbre expandida indicada corresponde a una incertidumbre típica multiplicada por un factor de cobertura k , que corresponde a su vez a un nivel de confianza determinado para una distribución de probabilidad dada.

6.2. Interpretación de resultados

6.2.1. Incertidumbre de calibración requerida

Dado que estas calibraciones se realizan sobre puntos fijos, el resultado de la calibración consiste en establecer el valor certificado del mensurando y la incertidumbre asociada a dicho valor, resultado que debe ser acorde con la exactitud del condensador calibrado.

Con la información disponible en el laboratorio del condensador calibrado, tal como:

- Estabilidad a largo plazo o deriva.



- Exactitud con que se establece su valor inicialmente.
- Coeficiente de temperatura.
- Incertidumbre de calibración recomendada.
- Historial de calibración.

Que es indicativa del comportamiento metrológico del condensador y, en función también de su utilización posterior, el responsable del laboratorio debe determinar la exactitud mínima, o incertidumbre máxima admisible de la calibración, y así lo debe indicar en su solicitud de calibración al laboratorio que realice la calibración, si esta se realiza externamente, o la aplicará en su laboratorio, si es interna.

La información indicada, junto con la información resultante de la calibración, debe ser utilizada para establecer la incertidumbre de uso posterior del condensador calibrado.

6.2.2. Utilización de la información de calibración

Los resultados de la calibración son utilizados para determinar si el comportamiento del condensador es correcto y acorde con el uso al que posteriormente se le aplica. Si como consecuencia de los resultados de la calibración, se observa que se cumple alguna de las siguientes características:

- Incertidumbre de calibración superior a la requerida.
- Desviación al nominal obtenida superior a la especificada por el fabricante.
- Deriva entre calibraciones excesiva.

Se puede afirmar que su comportamiento no es correcto y el condensador debe ser separado de su uso normal, y, si



procede, una vez reconsideradas las exigencias necesarias, se podrá destinar a otras aplicaciones de menor nivel metroológico.

En el caso de una caja de décadas de capacidad, aunque es de aplicación todo lo anterior para cada punto disponible, es conveniente aplicar algún criterio al obtener la incertidumbre de utilización que simplifique su utilización posterior y evite que en cada década y paso disponible sea necesario aplicar correcciones e incertidumbres distintas.

6.2.3. Periodo de calibración

El período de calibración recomendado de una forma general para todo condensador es de 12 meses. Este intervalo podrá ser variado principalmente en función de:

- Precisión deseada.
- Uso al que se le destina.
- Deriva a largo plazo observada.

En condensadores de calidad media alta utilizados en un laboratorio para calibrar puentes de medida de capacidad, inicialmente durante las dos o tres primeras calibraciones, se recomienda reducir este tiempo a seis meses, con el fin de disponer información referente a su estabilidad temporal.

Por el contrario en condensadores de precisión media-baja, y en función de los resultados observados en anteriores calibraciones, este periodo puede ampliarse hasta 24 meses.

En cualquier caso, el usuario del condensador es siempre el responsable de asignar el período de recalibración y de revisarlo cuando lo considere necesario, considerando los resultados obtenidos con respecto a las calibraciones



anteriores y los límites de tolerancia establecidos en función de su calidad y el uso al que se le destina.

7. REFERENCIAS

7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración

- Manual de instrucciones del condensador a calibrar.
- Manual de funcionamiento del puente de medida de capacidad utilizado.

7.2. Otras referencias para consulta

- [1] Clasificación de instrumentos de metrología eléctrica. 2ª edición. SCI-Ministerio de Industria y Energía. 1994.
- [2] UNE-EN ISO 10012:2003, Sistemas de gestión de las mediciones. Requisitos para los procesos de medición y los equipos de medición. (ISO 10012:2003).
- [3] Guía CEA-ENAC-LC/02, Expresión de la incertidumbre de medida en las calibraciones, Rev. 1, Enero 1998.
- [4] Procedimiento para la elaboración de procedimientos de calibración. Grupo de trabajo MINER-CEM. Ed. 2, Tres Cantos, Madrid. Año 2000.
- [5] Evaluación de datos de medición. Guía para la expresión de la incertidumbre de medida, 3ª ed. en español (traducción de 1ª ed. 2008 en inglés), Centro Español de Metrología, 2009, NIPO: 706-09-002-6.
- [6] Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales y términos asociados. 3ª ed. en español (traducción de 3ª ed. en inglés), Centro Español de Metrología, 2009, NIPO 706-09-001-0.



8. ANEXOS

8.1. Anexo I: Formatos utilizados para la toma de datos

Medida N° (Fecha)	$C_{0,i}$	$C_{m,i}$	$C_{x,i}$	D_i (tg δ)
1				
2				
3				
.....				
8				
9				
10				
\bar{C}_x / \bar{D}_x				
$s(C_{x,i}) / s(D_{x,i})$				

Identificación del calibrando: (Marca / Modelo / Número de serie)

Procedimiento de calibración aplicado: (Identificación)

Configuración de medida: (a dos terminales/a tres terminales)

<u>Condiciones de medida:</u>	<u>Condiciones ambientales:</u>
$f =$ _____ Hz	$T =$ _____ °C
$V =$ _____ V	$HR =$ _____ %

FECHA (finalización)

FIRMA (responsable de la ejecución)

Tabla 1: Formato para toma de datos



Magnitud X_i	Valor estimado x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad c_i	Componente de la incertidumbre $u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$
$C_{x,c}$					
$(\delta C_{x,c})_{\text{esp}}$					
$(\delta C_{x,c})_{\text{res}}$					
$(\delta C_{x,c})_T$					
$C_{x,n}$					
$C_{x,c}$					
$\Delta C_{x,c}$					

NOTAS:

1) Los coeficientes de sensibilidad se calculan como las derivadas parciales de la función de " $C_{x,c}$ ", respecto de cada una de las magnitudes evaluadas en el punto de calibración considerado. Siempre que se utilice el procedimiento de calibración descrito, estos coeficientes tomarán los valores indicados en el cuadro y no intervienen en la estimación de incertidumbres, al tomar valores de + 1 y - 1.

2) $u(y) = c_i \cdot u(x_i)$.

Identificación del calibrando: (Marca / Modelo / Número de serie)

Procedimiento de calibración aplicado: (Identificación)

Configuración de medida: (a dos terminales/a tres terminales)

Condiciones de medida:	Condiciones ambientales:
$f =$ _____ Hz	$T =$ _____ °C
$V =$ _____ V	$HR =$ _____ %

FECHA (finalización)

FIRMA (responsable de la ejecución)

Tabla 2. Formato para balance de incertidumbre



8.2. Anexo II: Aplicación práctica del procedimiento descrito. “Calibración de un condensador de 1 000 pF a 1 kHz”

8.2.1. Enunciado

Calibrar un condensador fijo de 1 000 pF a la frecuencia de 1 kHz y 1 V por medida directa con un puente de medida de capacidad.

Especificaciones:

- Valor nominal:

1 000 pF

- Factor de disipación:

< 0,001 a 1 kHz

- Exactitud a 1 kHz:

$\pm(0,5 \% + 5 \text{ pF})$

- Coeficiente de temperatura:

$-140 \cdot 10^{-6} \cdot C / ^\circ\text{C}$

- Conexión a dos o a tres terminales:

La calibración se realiza a dos y a tres terminales para *C*, mientras que para *D* se realiza a dos terminales.

8.2.2. Instrumentación utilizada

Puente de medida RLC digital:

- a) Especificaciones:



- Incertidumbre relativa a patrones de calibración:

Capacidad:

$$U_{r,esp}(C) = 200 \cdot 10^{-6} \cdot C.$$

Que para $C = 10^3$ pF se obtiene:

$$U_{r,esp}(C) = 0,2 \text{ pF}.$$

Factor de disipación:

$$U_{r,esp}(G) = 0,1 \% + 1D.$$

La parte fija de la incertidumbre, dado que la indicación del puente es:

$$1,XXX \cdot 10^{-3} \mu\text{S},$$

queda:

$$1 D = 10^{-6} \mu\text{S}.$$

La parte variable (0,1 %), dado que el valor medio medido de G es:

$$G = 1,4 \cdot 10^{-3} \mu\text{S},$$

tiene un valor:

$$x (\mu\text{S}) = 1,4 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-1} / 10^2 \mu\text{S} = 1,4 \cdot 10^{-6} \mu\text{S},$$

luego:

$$U_{r,esp}(G) = 2,4 \cdot 10^{-6} \mu\text{S}.$$

Que en valores relativos se convierte en:

$$U_{r,esp}(G) \% = 2,4 \cdot 10^{-6} \mu\text{S} \cdot 10^2 / 1,4 \cdot 10^{-3} \% = 0,17 \%$$



- Frecuencia de medida:
Variable entre 12 Hz y 100 kHz.
- Tensión de medida:
Variable entre 5 mV y 1,275 V.
- Velocidad de medida:
Baja, media y alta (máxima precisión en velocidad baja).

(Las incertidumbres indicadas en la calibración son para velocidad baja).

- Posibilidades de presentación de la medida:
 - Valor absoluto.
 - Diferencia al nominal o corrección.
 - Tanto por ciento.
- Introducción de correcciones previas a la medida o ajuste de cero:

Circuito abierto:

Elimina capacidades distribuidas y conductancias en paralelo presentes.

Cortocircuito:

Elimina los efectos de inductancias distribuidas y resistencias en serie presentes.

- Resolución:



4 ½ dígitos para C .

3 ½ dígitos para D .

b) Calibración:

La incertidumbre básica de calibración para capacidad, en las condiciones indicadas, es:

$$U_c(C) = \pm 50 \cdot 10^{-6} \cdot C.$$

Que para 1 000 pF se convierte en $\pm 50 \cdot 10^{-3}$ pF.

Este valor incluye la desviación con respecto al nominal o corrección obtenida durante la calibración.

Para el factor de disipación:

$$U_c(D) = \pm 0,000\ 05.$$

8.2.3. Condiciones ambientales del laboratorio

- Temperatura: $23\ ^\circ\text{C} \pm 2\ ^\circ\text{C}$.
- Humedad relativa: $50\ \% \pm 10\ \%$.

8.2.4. Toma de datos y obtención del valor certificado

La Tabla 2.1 adjunta, muestra la serie de 10 medidas realizadas con los resultados obtenidos para medida de C a dos y a tres terminales y medida de D a dos terminales. La serie se ha realizado durante una mañana con intervalos entre medidas de 30 minutos. Dado que no se realiza la medida y corrección mediante cálculo de C_0 , sino que se introduce el valor medido en circuito abierto en el instrumento y se hace el cero con este valor, se ha utilizado su columna para registro de resultados de la medida a dos terminales.



Se debe tener en cuenta que los valores de D se obtienen de los valores medidos de G por aplicación de la expresión:

$$D_x = G_x \cdot X(C_x) = G_x / \omega C_x.$$

La Tabla 2.1 en sus filas 12 y 13 muestra los valores medios obtenidos y las desviaciones típicas muestrales obtenidas para las medidas realizadas. Los valores medios indicados constituyen el valor certificado de la calibración y se anotan en la fila 2 y columna 2 de las Tablas 2.2 (3T) y 2.3 (2T) para capacidad y en la Tabla 2.4 para el factor de disipación.

8.2.5. Cálculo de la incertidumbre típica de calibración

Las Tablas 2.2 (3T) y 2.3 (2T) para capacidad, y la Tabla 2.4 para el factor de disipación, muestran el balance de las diversas componentes de la incertidumbre presentes en la calibración realizada. Se describe a continuación la obtención de los distintos valores en ellas contenidos. Cada valor obtenido, expresado en pF o sin unidades para D , se anota en la columna y fila de las tablas indicadas entre paréntesis (F^*/C^*). La nomenclatura aplicada se corresponde con la indicada en el apartado 6 del procedimiento.

Este puente corrige inicialmente las influencias externas ajenas a la medida por medida de C_0 , luego las componentes de la incertidumbre se establecen directamente sobre los valores medidos de C_x y D_x .

Componente de repetibilidad o de Tipo A:

Su incertidumbre típica la establece la desviación típica de la serie de medidas realizada por aplicación de la fórmula:

$$u(C_{x,c}) = s(C_{x,i}) / \sqrt{n}.$$



De la Tabla 2.1 se obtiene para capacidad:

$$u_1(C_{x,c})_{3T} = 0,0696 / \sqrt{10} = 22 \cdot 10^{-3} \text{ pF},$$

$$u_1(C_{x,c})_{2T} = 0,134 / \sqrt{10} = 42 \cdot 10^{-3} \text{ pF},$$

y de igual forma para el factor de disipación:

$$u_1(D_{x,c})_{2T} = 1,52 \cdot 10^{-5} / \sqrt{10} = 0,48 \cdot 10^{-5}.$$

Anotar los valores obtenidos en (F2 / C3) de las Tablas 2.2, 2.3 y 2.4 respectivamente.



Medida Nº (Fecha)	Medida 3T $C_{x,i}$ (pF)	Medida 2T $C_{x,i}$ (pF)	Medida 2T $D_{x,i}$ (tg δ)
1	999,85	1 013,0	0,000 190
2	999,91	1 013,1	0,000 178
3	999,80	1 012,8	0,000 169
4	999,98	1 013,2	0,000 203
5	999,95	1 013,1	0,000 207
6	999,86	1 012,7	0,000 191
7	999,98	1 013,0	0,000 185
8	999,87	1 012,8	0,000 175
9	999,82	1 012,9	0,000 218
10	999,80	1 012,9	0,000 191
$\bar{C}_{x,c} // \bar{D}_{x,c}$	999,882	1 012,97	0,000 191
$s(C_{x,i}) // s(D_{x,i})$	0,069 6	0,134	$1,52 \cdot 10^{-5}$

Condiciones de medida:

$f = 1$ kHz

$V = 1$ V.

Condiciones ambientales:

$T = (23 \pm 2)$ °C

$HR = (50 \pm 10)$ %.

Tabla 2.1: Toma de datos: resultados obtenidos



Componente por incertidumbre de calibración del puente utilizado:

Según se ha indicado:

$$u_2(C_{x,c})_{3T} = U_0(C_x) / k = 50 \cdot 10^{-6} \cdot C / 2 = 25 \cdot 10^{-3} \text{ pF}$$

$$u_2(C_{x,c})_{2T} = U_0(C_x) / k = 50 \cdot 10^{-6} \cdot C / 2 = 25 \cdot 10^{-3} \text{ pF}$$

$$u_2(D_{x,c})_{2T} = U_0(D_x) / k = 5 \cdot 10^{-5} / 2 = 2,5 \cdot 10^{-5}$$

Anotar los valores obtenidos en (F3 / C3) de las Tablas 2.2, 2.3 y 2.4.

Componente por corrección de la indicación de medida del puente utilizado:

Según se ha indicado se consideran sus especificaciones relativas a patrones:

$$u_3(\delta C_{x,c})_{\text{esp}} = U_{\text{esp}}(C_x) / \sqrt{3} = 200 \cdot 10^{-6} \cdot C / \sqrt{3} = 115,5 \cdot 10^{-3} \text{ pF},$$

tanto para la calibración a tres como a dos terminales. Anotar los valores obtenidos en (F4 / C3) de las Tablas 2.2 y 2.3.

Para el factor de disipación, se demuestra, a partir de la relación funcional entre G , D y C indicada en el apartado 8.2.4, que si las incertidumbres típicas se expresan en unidades relativas (%), se cumple que:

$$u^2(D_x) = u^2(G_x) + u^2(C_x)$$

y sustituyendo los valores disponibles, queda:

$$u^2(D_x) = 0,17^2 / 3 + 0,02^2 / 3 \approx 0,17^2 / 3,$$



es decir:

$$u(D_x) = u(G_x) = (0,17 / \sqrt{3}) \% = 0,1 \%$$

y en unidades absolutas, para el valor medio obtenido en la Tabla 2.1:

$$u_3(\delta D_{x,c})_{\text{esp}} = 0,019 \cdot 10^{-5}.$$

Anotar los valores obtenidos en (F4 / C3) de la Tabla 2.4.

Componente por resolución del instrumento de medida
" $u(\delta R_{x,m})_{\text{res}}$ ".

Según se indica en el apartado 8.2.2 del presente anexo, el puente de medida de capacidad es de 4 ½ dígitos por lo que su resolución para la medida a tres terminales ($C < 1\ 000\ \text{pF}$) es $10 \cdot 10^{-3}\ \text{pF}$ y en la medida a dos terminales ($C > 1\ 000\ \text{pF}$) es $100 \cdot 10^{-3}\ \text{pF}$. De acuerdo con lo indicado en el apartado 6.1.4.2 del procedimiento, se tiene que para calibración a tres terminales:

$$u_4(\delta C_{x,c})_{\text{res}} = 0,5 \cdot \text{res} / \sqrt{3} = 2,9 \cdot 10^{-3}\ \text{pF}$$

y para calibración a dos terminales:

$$u_4(\delta C_{x,c})_{\text{res}} = 0,5 \cdot \text{res} / \sqrt{3} = 29 \cdot 10^{-3}\ \text{pF}.$$

Anotar los valores obtenidos en (F5 / C3) de las Tablas 2.2 y 2.3 respectivamente.

Para el factor de disipación, la resolución, según lo indicado en el apartado 8.2.2, es $10^{-6}\ \mu\text{S}$, y se tiene por tanto que:

$$u_4(\delta D_{x,c})_{\text{res}} = 0,5 \cdot \text{res} / \sqrt{3} = 0,5 \cdot 1 \cdot 10^{-6} / \sqrt{3} = 0,029 \cdot 10^{-5}\ \mu\text{S}.$$

Anotar el valor obtenido en (F5 / C3) de la Tabla 2.4.



Componente por influencia de la temperatura del laboratorio en el condensador calibrado:

Para los valores de temperatura del laboratorio y coeficiente de temperatura del condensador indicados en el apartado 8.2.2, y según lo indicado en el apartado 6.1.4.2 del procedimiento, tanto para calibración a tres terminales como a dos, se tiene que:

$$U(\delta C_{x,c})_T = \pm \Delta T \cdot \alpha_T(C_x) \cdot 10^{-6} \cdot C_{x,m} = \pm 2 \cdot 140 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3 \text{ pF} = 280 \cdot 10^{-3} \text{ pF}$$

y la incertidumbre típica de esta componente, suponiendo una distribución triangular, resulta ser:

$$u_5(\delta C_{x,c})_T = U(\delta C_{x,c})_T / \sqrt{6} = 280 \cdot 10^{-3} / \sqrt{6} = 114 \cdot 10^{-3} \text{ pF.}$$

Anotar los valores obtenidos en (F6 / C3) de las Tablas 2.2 y 2.3.



Magnitud x_i	Valor estimado (pF) x_i	Incertidumbre típica (x 10 ⁻³ pF) $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad c_i	Componente de la incertidumbre (x 10 ⁻³ pF) $u_i(y)=c_i \cdot u(x_i)$
$C_{x,c}$	999,882	22	normal	$c_1 = 1,0$	$u_1(y) = 22$
		25	normal	$c_2 = 1,0$	$u_2(y) = 25$
$(\delta C_{x,c})_{esp}$	0	115,5	rectangular	$c_3 = 1,0$	$u_3(y) = 115,5$
$(\delta C_{x,c})_{res}$	0	2,9	rectangular	$c_4 = 1,0$	$u_4(y) = 2,9$
$(\delta C_{x,c})_T$	0	114	triangular	$c_5 = 1,0$	$u_5(y) = 114$
$C_{x,n}$	1 000				
$\Delta C_{x,c}$	$\Delta C_{x,c} =$ $-118 \cdot 10^{-6}$ $\cdot C_{x,m}$				$u_c(C_{x,c}) =$ 166

Tabla 2.2. Capacidad a tres terminales: balance de incertidumbre

NOTA:

Los coeficientes de sensibilidad se calculan como las derivadas parciales de la función de “ $C_{x,c}$ ” respecto de cada una de las magnitudes evaluadas en el punto de calibración considerado. Siempre que se utilice el procedimiento de calibración descrito, estos coeficientes tomarán los valores indicados en el cuadro y no intervienen en la estimación de incertidumbres, al tomar valores de + 1 y - 1.

NOTA:

$$u_i(y) = c_i \cdot u(x_i).$$



Magnitud X_i	Valor estimado (pF) x_i	Incertidumbre típica (x 10^{-3} pF) $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad c_i	Componente de la incertidumbre (x 10^{-3} pF) $u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$
$C_{x,c}$	1 012,97	42	normal	$c_1 = 1,0$	$u_1(y) = 42$
		25	normal	$c_2 = 1,0$	$u_2(y) = 25$
$(\delta C_{x,c})_{esp}$	0	115,5	rectangular	$c_3 = 1,0$	$u_3(y) = 115,5$
$(\delta C_{x,c})_{res}$	0	29	rectangular	$c_4 = 1,0$	$u_4(y) = 29$
$(\delta C_{x,c})_T$	0	114	triangular	$c_5 = 1,0$	$u_5(y) = 114$
$C_{x,n}$	1 000				
$\Delta C_{x,c}$	$\Delta C_{x,c} = + 12,97$				$u_c(C_{x,c}) = 172$

Tabla 2.3. Capacidad a dos terminales: balance de incertidumbre

NOTA:

Los coeficientes de sensibilidad se calculan como las derivadas parciales de la función de " $C_{x,c}$ ", respecto de cada una de las magnitudes evaluadas en el punto de calibración considerado. Siempre que se utilice el procedimiento de calibración descrito, estos coeficientes tomarán los valores indicados en el cuadro y no intervienen en la estimación de incertidumbres, al tomar valores de +1 y -1.

NOTA:

$$u_i(y) = c_i \cdot u(x_i).$$



Magnitud X_i	Valor estimado x_i	Incertidumbre típica (x 10^{-5}) $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad c_i	Componente de la incertidumbre (x 10^{-5}) $u_i(y)=c_i \cdot u(x_i)$
$D_{x,c}$	0,000 191	0,48	normal	$c_1 = 1,0$	$u_1(y) =$ 0,48
		2,5	normal	$c_2 = 1,0$	$u_2(y) =$ 2,5
$(\delta D_{x,c})_{esp}$	0	0,019	rectangular	$c_3 = 1,0$	$u_3(y) =$ 0,019
$(\delta D_{x,c})_{res}$	0	0,03	Rectangular	$c_4 = 1,0$	$u_4(y) =$ 0,03
$D_{x,c}$	$D_{x,c} =$ 0,000 191				$u_c(D_{x,c}) =$ 2,55

NOTA:

Los coeficientes de sensibilidad se calculan como las derivadas parciales de la función de " $D_{x,c}$ ", respecto de cada una de las magnitudes evaluadas en el punto de calibración considerado. Siempre que se utilice el procedimiento de calibración descrito, estos coeficientes tomarán los valores indicados en el cuadro y no intervienen en la estimación de incertidumbres, al tomar valores de + 1 y - 1.

NOTA:

$$u_i(y) = c_i \cdot u(x_i).$$

Tabla 2.4. Factor de disipación: balance de incertidumbre



8.2.6. Cálculo de la incertidumbre típica de calibración combinada

Para capacidad medida a tres terminales:

$$u_c(C_{x,c}) = \sqrt{[u_1(y)]^2 + [u_2(y)]^2 + [u_3(y)]^2 + [u_4(y)]^2 + [u_5(y)]^2} = \\ = \sqrt{(22^2 + 25^2 + 116^2 + 3^2 + 114^2) \cdot 10^{-6}} = \sqrt{27\,579} \cdot 10^{-6} = 166 \cdot 10^{-3} \text{ pF}$$

y a dos terminales:

$$u_c(C_{x,c}) = \sqrt{[u_1(y)]^2 + [u_2(y)]^2 + [u_3(y)]^2 + [u_4(y)]^2 + [u_5(y)]^2} = \\ = \sqrt{(42^2 + 25^2 + 116^2 + 29^2 + 114^2) \cdot 10^{-6}} = \sqrt{29\,682} \cdot 10^{-6} = 172 \cdot 10^{-3} \text{ pF.}$$

En donde puede observarse que las componentes dominantes son las que corresponden a las especificaciones del puente de medida de capacidad utilizado y la componente derivada de la influencia de la temperatura del laboratorio, aplicándose a ambas componentes una distribución de probabilidad rectangular.

Para la medida del factor de disipación, el valor obtenido es:

$$u_c(D_{x,c}) = \sqrt{[u_1(y)]^2 + [u_2(y)]^2 + [u_3(y)]^2 + [u_4(y)]^2} = \\ = \sqrt{[0,48]^2 + [2,5]^2 + [0,019]^2 + [0,03]^2} \cdot 10^{-5} = \\ = 2,55 \cdot 10^{-5}.$$

8.2.7. Cálculo de la incertidumbre expandida

Se establece para la medida de capacidad, como:

$$U_c(C_{x,c}) = k \cdot u_c(C_{x,c}),$$

para un intervalo de confianza con un nivel de confianza del 95,45 %.

El valor de k para este nivel de confianza se obtiene a partir del cálculo del número *efectivo* de grados de libertad, según el procedimiento indicado en el apartado 6.4 del Anexo G de la guía para la expresión de la incertidumbre de medida, referencia [5]. Según este apartado y aplicando la fórmula de Welch-Satterthwaite:

$$v_{\text{eff}} = [u_c(y)]^4 / \sum [u_i(y)]^4 / v_i,$$

se obtiene, aplicada a la calibración a tres terminales:

$$v_{\text{eff}}[u_c(y)] = 166^4 \cdot 10^{-12} / (22^4/9 + 25^4/9 + 116^4/\infty + 3^4/\infty + 114^4/\infty) \cdot 10^{-12} = 10\,936,$$

siendo el valor para la medida a dos terminales muy similar.

Entrando con este valor en la Tabla G.2 del Anexo G de la guía para la expresión de la incertidumbre de medida, referencia [5], que se incluye como Anexo 3 de este procedimiento, para el nivel de confianza establecido del 95,45 %, nos proporciona un valor de k :

$$k = 2.$$

Luego la incertidumbre expandida de calibración para la medida a tres terminales resulta ser:

$$U_c(C_{x,m}) = k \cdot u_c(C_{x,m}) = 2 \cdot 166 \cdot 10^{-3} \text{ pF} = 0,332 \text{ pF}$$

y para dos terminales:

$$U_c(C_{x,m}) = k \cdot u_c(C_{x,m}) = 2 \cdot 172 \cdot 10^{-3} \text{ pF} = 0,344 \text{ pF}.$$

La incertidumbre resultante puede ser expresada como:

$$U_c(C_{x,m}) = 332 \cdot 10^{-6} \cdot C_{x,c},$$

para la medida a tres terminales, y a dos terminales:

$$U_c(C_{x,m}) = 344 \cdot 10^{-6} \cdot C_{x,c}$$

Para el valor del factor de disipación el resultado obtenido es:

$$\begin{aligned} v_{\text{eff}} &= [u_c(y)]^4 / \sum [u_i(y)]^4 / v_i = \\ &= 2,55^4 \cdot 10^{-10} / (0,48^4/9 + 2,5^4/9 + 0,019^4/\infty + 0,03^4/\infty) \cdot 10^{-10} = \\ &= 9,7. \end{aligned}$$

Entrando con este valor en la Tabla G.2 del Anexo G de la mencionada guía para la expresión de la incertidumbre de medida, referencia [5], para igual nivel de confianza, se obtiene un valor de k :

$$k = 2,28.$$

Luego la incertidumbre de calibración expandida para el factor de disipación resulta ser:

$$U_c(D_{x,m}) = k \cdot u_c(D_{x,m}) = 2,28 \cdot 2,55 \cdot 10^{-5} = 5,8 \cdot 10^{-5}.$$

Estos resultados presuponen que las distribuciones de probabilidad resultantes de la magnitud de salida son una distribución normal, que, en estos casos, puede ser aceptada dado que la convolución de las dos distribuciones rectangulares, conducen a una triangular y la influencia de las tres restantes, dos normales y una triangular, pueden conducir a una normal.

8.2.8. Expresión del resultado de calibración

El resultado de la calibración se establece como el valor absoluto del condensador calibrado y su incertidumbre, según los criterios establecidos en la guía para la expresión de la incertidumbre de medida, referencia [5], con respecto al redondeo y al número de cifras significativas:



Calibración a tres terminales:

$$C_{x,c} = 999,88 \text{ pF} \pm 0,33 \text{ pF}.$$

También se puede expresar como diferencia al nominal, es decir:

$$\Delta C_{x,c} = - 0,12 \text{ pF} \pm 0,33 \text{ pF}.$$

Calibración a dos terminales:

$$C_{x,c} = 1 012,97 \text{ pF} \pm 0,35 \text{ pF}.$$

También se puede expresar como diferencia al nominal, es decir:

$$\Delta C_{x,c} = + 12,97 \text{ pF} \pm 0,35 \text{ pF}.$$

Factor de disipación:

$$D_{x,c} = 0,000 191 \pm 0,000 058.$$

Pudiéndose también en este caso indicar que:

$$D_{x,c} < 0,000 25.$$

En los tres casos se debe especificar que la incertidumbre expandida indicada corresponde a una incertidumbre típica multiplicada por un factor de cobertura $k = 2$ correspondiente a un nivel de confianza del 95,45 % para una distribución normal.

8.3. Anexo III. Factor de cobertura

Tabla G. 2 en referencia [5]: Valor de $t_p(v)$ de la distribución t , para v grados de libertad, que define un intervalo de $-t_p(v)$ a $+t_p(v)$, que comprende la fracción p de la distribución

Grados de libertad v	Fracción p (%)					
	68,27 ^(a)	90	95	95,45 ^(a)	99	99,73 ^(a)
1	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66	235,80
2	1,32	2,92	4,30	4,53	9,92	19,21
3	1,20	2,35	3,18	3,31	5,84	9,22
4	1,14	2,13	2,78	2,87	4,60	6,62
5	1,11	2,02	2,57	2,65	4,03	5,51
6	1,09	1,94	2,45	2,52	3,71	4,90
7	1,08	1,89	2,36	2,43	3,50	4,53
8	1,07	1,86	2,31	2,37	3,36	4,28
9	1,06	1,83	2,26	2,32	3,25	4,09
10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17	3,96
11	1,05	1,80	2,20	2,25	3,11	3,85
12	1,04	1,78	2,18	2,23	3,05	3,76
13	1,04	1,77	2,16	2,21	3,01	3,69
14	1,04	1,76	2,14	2,20	2,98	3,64
15	1,03	1,75	2,13	2,18	2,95	3,59
16	1,03	1,75	2,12	2,17	2,92	3,54
17	1,03	1,74	2,11	2,16	2,90	3,51
18	1,03	1,73	2,10	2,15	2,88	3,48
19	1,03	1,73	2,09	2,14	2,86	3,45
20	1,03	1,72	2,09	2,13	2,85	3,42
25	1,02	1,71	2,06	2,11	2,79	3,33
30	1,02	1,70	2,04	2,09	2,75	3,27
35	1,01	1,70	2,03	2,07	2,72	3,23
40	1,01	1,68	2,02	2,06	2,70	3,20
45	1,01	1,68	2,01	2,06	2,69	3,18
50	1,01	1,68	2,01	2,05	2,68	3,16
100	1,005	1,660	1,984	2,025	2,626	3,077
∞	1,000	1,645	1,960	2,000	2,576	3,000



- (a) Para una magnitud z descrita por una distribución normal de esperanza matemática μ_z y desviación típica σ , el intervalo $\mu_z \pm k\sigma$ comprende respectivamente las fracciones $p = 68,27 \%$; $95,45 \%$ y $99,73 \%$ de la distribución, para los valores $k = 1, 2$ y 3 .

