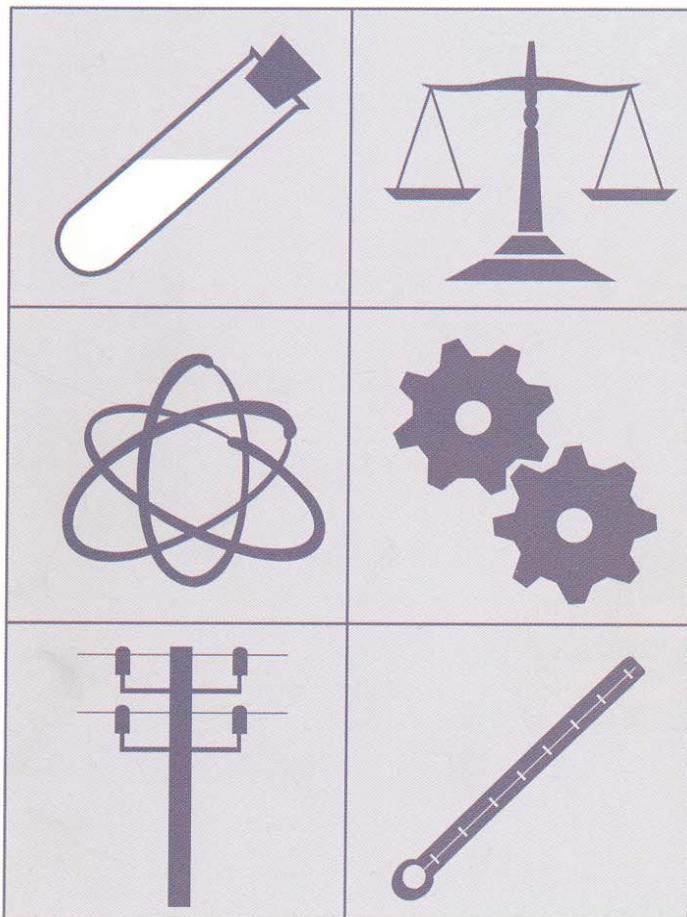


Metrología

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN



PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE REGISTRADORES / INDICADORES

m 08



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE INDUSTRIA, TURISMO
Y COMERCIO

CEM

CENTRO ESPAÑOL
DE METROLOGÍA

Este procedimiento ha sido revisado, corregido y actualizado, si ha sido necesario.

La presente edición se emite en formato digital. Hay disponible una edición en papel que se puede adquirir en nuestro departamento de publicaciones.

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	9
5. DESCRIPCIÓN.....	11
5.1. Equipos y materiales	11
5.2. Operaciones previas.....	12
5.3. Proceso de calibración	15
5.4. Toma y tratamiento de datos	22
6. RESULTADOS	23
6.1. Cálculo de incertidumbres	23
6.2. Interpretación de resultados	37
7. REFERENCIAS	38
8. ANEXOS.....	38



1. OBJETO

El presente procedimiento tiene por objeto dar a conocer los métodos y la sistemática necesaria para realizar la calibración de registradores /indicadores.

Según la Clasificación de instrumentos de Metrología Eléctrica [1], este instrumento se denomina técnicamente “Registrador gráfico”, y su código de identificación es el EE-20.03, no obstante se empleará la denominación de registrador a lo largo de este procedimiento, por ser esta última mayoritariamente empleada tanto en empresas como en laboratorios.

2. ALCANCE

El ámbito de aplicación del presente procedimiento se limita a la calibración de registradores mediante el uso de calibradores eléctricos multifunción.

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], será aconsejable utilizar el procedimiento de calibración aquí descrito.

Este procedimiento es aplicable a la calibración de registradores, un ejemplo de características pueden ser las siguientes:

Factores de deflexión (amplificadores X e Y):

1 mV/cm, 5 mV/cm, 10 mV/cm, 50 mV/cm,

0,1 V/cm, 0,5 V/cm, 1 V/cm, 5 V/cm y 10 V/cm.



Velocidad de escritura de la gráfica (base de tiempos):

0,25 s/cm, 0,5 s/cm, 1 s/cm, 2,5 s/cm, 5 s/cm, 10 s/cm, 25 s/cm y 50 s/cm.

Ancho de banda de los amplificadores:

Frecuencia de registro... ≤ 10 Hz.

Impedancia de entrada de los amplificadores: ≥ 100 k Ω .

Los campos de medida descritos pueden variar según el tipo de registrador a calibrar, el calibrador multifunción utilizado y su trazabilidad a patrones nacionales o internacionales.

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 instrumento de medida) [6] (4.30)

Operación destinada a llevar un instrumento de medida a un estado de funcionamiento conveniente para su utilización.

NOTA:

El ajuste puede ser automático, semiautomático o manual.

Calibración [6] (6.11)

Conjunto de operaciones que establecen, en condiciones especificadas, la relación entre los valores de una magnitud indicados por un instrumento de medida o un sistema de medida, o los valores representados por una medida materializada o por un material de



referencia, y los valores correspondientes de esa magnitud realizados por patrones.

NOTAS:

- 1 El resultado de una calibración permite atribuir a las indicaciones los valores correspondientes del mensurando o bien determinar las correcciones a aplicar en las indicaciones.
- 2 Una calibración puede también servir para determinar otras propiedades metrológicas tales como los efectos de las magnitudes de influencia.
- 3 Los resultados de una calibración puede consignarse en un documento denominado, **certificado de calibración** o **informe de calibración**.

Calibrador multifunción:

Instrumento que suministra en sus bornes de salida las magnitudes básicas eléctricas, tensión continua, intensidad continua, tensión alterna, intensidad alterna, y resistencia, en distintos rangos. En sus versiones modernas, estos incluyen un calibrador de osciloscopios necesario para la calibración de los registradores/indicadores, así como otros instrumentos eléctricos de aplicación más específicos. Este instrumento constituye por sus características prácticamente un pequeño laboratorio de calibración.

Desviación estándar experimental [6] (3.8)

Para una serie de n mediciones de un mismo mensurando, la magnitud s que caracteriza la dispersión de los resultados, dada por la fórmula:

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

siendo x_i el resultado de la i -ésima medición y \bar{x} la media aritmética de los n resultados considerados.



NOTAS:

- 1 Considerando la serie de n valores como muestra de una distribución, \bar{x} es un estimador insesgado de la media μ , y s^2 es un estimador insesgado de la varianza σ^2 de dicha distribución.
- 2 La expresión s/\sqrt{n} es una estimación de la desviación estándar de la distribución de \bar{x} y se denomina **desviación estándar experimental de la media**.
- 3 La desviación estándar experimental de la media en ocasiones se denomina, incorrectamente, **error de la media**.

Error (de indicación) de un instrumento de medida [6] (5.20):

Indicación de un instrumento de medida menos un valor verdadero de la magnitud de entrada correspondiente.

NOTAS:

- 1 Dado que un valor verdadero no puede determinarse, en la práctica se utiliza un valor convencionalmente verdadero (en [6] ver 1.19 y 1.20).
- 2 Este concepto se aplica principalmente cuando se compara el instrumento con un patrón de referencia.
- 3 Para una medida materializada, la indicación es el valor que le ha sido asignado.

Factor de deflexión:

Desplazamiento que se produce en la gráfica por unidad de tensión aplicada a la entrada del amplificador de un registrador, se expresa en voltios/división.



Incertidumbre de medida [6] (3.9)

Parámetro, asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían razonablemente ser atribuidos al mensurando.

NOTAS:

- 1 El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación estándar (o un múltiplo de ésta) o la semiamplitud de un intervalo con un nivel de confianza determinado.
- 2 La incertidumbre de medida comprende, en general, varios componentes. Algunos pueden ser evaluados a partir de la distribución estadística de los resultados de series de mediciones y pueden caracterizarse por sus desviaciones estándar experimentales. Los otros componentes, que también pueden ser caracterizados por desviaciones estándar, se evalúan asumiendo distribuciones de probabilidad, basadas en la experiencia adquirida o en otras informaciones.
- 3 Se entiende que el resultado de la medición es la mejor estimación del valor del mensurando, y que todos los componentes de la incertidumbre, comprendidos los que provienen de efectos sistemáticos, tales como los componentes asociados a las correcciones y a los patrones de referencia, contribuyen a la dispersión.

Resolución (de un dispositivo visualizador) [6] (5.12)

La menor diferencia de indicación de un dispositivo visualizador que puede percibirse de forma significativa.

NOTAS:

- 1 Para un dispositivo visualizador digital, diferencia de la indicación que corresponde al cambio de una unidad en la cifra menos significativa.
- 2 Este concepto se aplica también a un dispositivo registrador.



Trazabilidad [6] (6.10)

Propiedad del resultado de una medición o de un patrón tal que pueda relacionarse con referencias determinadas, generalmente a patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones teniendo todas las incertidumbres determinadas.

NOTAS:

- 1 A menudo, este concepto se expresa por el adjetivo **trazable**.
- 2 La cadena ininterrumpida de comparación se denomina **cadena de trazabilidad**.

4. GENERALIDADES

El registrador es un instrumento con capacidad para presentar en una gráfica, normalmente en papel milimetrado, las variaciones de la tensión eléctrica aplicada a la entrada del eje Y, bien en función del tiempo, bien en función de otra señal aplicada en el canal de eje X. Generalmente disponen de dos amplificadores iguales, uno para el eje X y otro para el eje Y, con diversos factores de deflexión, y de una base de tiempos como alternativa para el eje X. En el caso de utilizarse en la función YT, la gráfica obtenida es la variación de la señal de entrada al amplificador Y en función del tiempo. La velocidad de la base de tiempos puede variarse en márgenes muy amplios, teniendo en cuenta que este instrumento se utiliza para la visualización de variaciones de señales eléctricas de baja frecuencia

La Figura 1 muestra el diagrama de bloques de un registrador XYT. En él puede observarse que el sistema consta básicamente de dos amplificadores, uno para el eje X y otro para el eje Y. La salida de los amplificadores se aplica a sus respectivos servomotores que son los encargados de producir el desplazamiento del sistema de escritura del registrador. En el mismo esquema de bloques se puede observar un generador de base de tiempos que sustituyendo al amplificador del eje X permite obtener una gráfica de la señal aplicada al eje Y en función del tiempo.



Los dos amplificadores de entrada, X e Y, son idénticos y tienen por misión adaptar las diferentes señales de entrada al servomotor. Por medio de un conmutador y su correspondiente atenuador, es posible variar el coeficiente de deflexión de modo que la señal que se desea observar quede siempre dentro del espacio de la gráfica.

Los dos servomotores son los encargados del desplazamiento del sistema de escritura en todo el área de la gráfica, reciben la señal de sus respectivos amplificadores. En el caso del servomotor del eje X también puede recibir la señal de desplazamiento del generador de la base de tiempos.

La base de tiempos genera los diferentes barridos para que el eje X de la gráfica pueda desplazarse a velocidades predeterminadas, lo más generalizado en registradores es que estas velocidades sean muy lentas, siendo la más rápida del orden de 1 s/div.

Básicamente el principio de calibración consiste en :

- a) Calibración de la ganancia de los amplificadores verticales, se realiza por medida directa aplicando la salida de tensión continua del calibrador.
- b) Verificación de la respuesta en frecuencia de los amplificadores verticales, se realiza por medida directa de la salida de tensión alterna del calibrador.
- c) Calibración de la velocidad de desplazamiento (base de tiempos), se realiza por medida directa de la frecuencia de salida del calibrador.

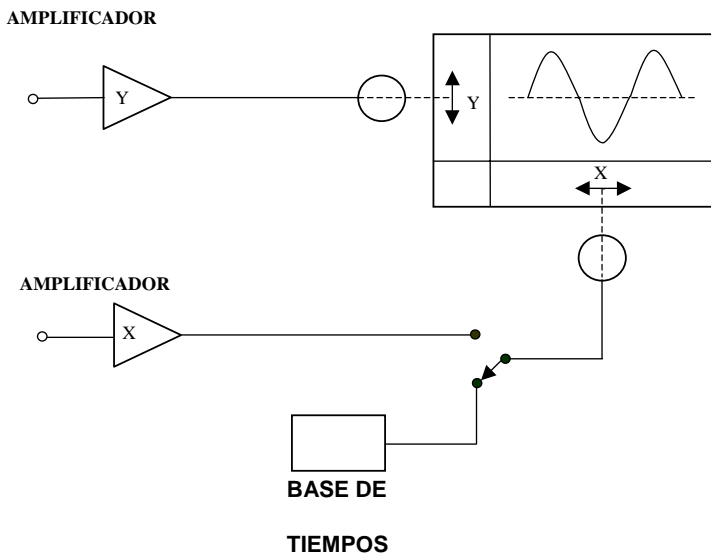


Figura 1: Diagrama de bloques de un registrador XYT

5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales

Para realizar la calibración descrita en este procedimiento es necesario disponer de un calibrador eléctrico multifunción con el que se pueda conseguir preferentemente una incertidumbre de calibración al menos tres veces más pequeña que la tolerancia permitida para el registrador que se desea calibrar durante su uso habitual. Este calibrador debe tener capacidad de generar las magnitudes y campos de medida para los que se vaya a aplicar el procedimiento dentro de los indicados en el apartado 2, es decir tensiones de corriente continua y de corriente alterna a frecuencias precisas.

Como regla general se puede admitir que calibradores multifunción cuyas especificaciones absolutas a un año (o exactitud a un año



incluyendo la incertidumbre de calibración del calibrador) facilitadas por el fabricante sean iguales o mejores del 0,05% de la lectura en tensión continua, son adecuados para realizar las calibraciones descritas en este procedimiento.

Como materiales necesarios para la calibración se incluyen dos juegos de cables apantallados para hacer las conexiones entre la salida del calibrador y la entrada del registrador.

5.2. Operaciones previas

Antes de iniciar la calibración se realizarán las siguientes operaciones previas:

ADVERTENCIA: Tanto en el instrumento a calibrar como en la instrumentación utilizada para la calibración, están presentes, bien en los terminales externos o internamente, durante la realización de la calibración o de los ajustes y comprobaciones que fuera necesario realizar, tensiones peligrosas para las personas. Para evitar daños irreparables, deben ser observadas todas las precauciones 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.

- a) Se comprobará que el registrador está identificado de forma permanente con su marca, modelo y número de serie correspondiente, o con un código interno del propietario del registrador unívoco. Si no fuera así se le asignará un código de identificación que se adherirá o fijará de forma segura sobre el registrador.
- b) Se estudiará el manual de operación del registrador a calibrar, de forma que la persona que realice la calibración esté familiarizada con su manejo. Se dispondrá también de las instrucciones de ajuste del fabricante por si en el transcurso de



la calibración se determinara la necesidad de realizar ajustes al registrador.

- c) Se comprobará que el registrador no tiene fundidos ninguno de los fusibles internos de protección, y que sus calibres y curvas de fusión son los indicados por el fabricante.
- d) En caso de existir, se comprobará el estado de la batería (algunos registradores van equipados de una batería que les permite funcionar sin conexión a la red eléctrica), siguiendo las instrucciones del manual del registrador, y en caso necesario se procederá a su sustitución.
- e) Se fijará cuál es la tolerancia de uso asignada al registrador, pudiendo coincidir con las especificaciones del fabricante, o estar calculada en función del uso concreto al que se destina el registrador. Los errores obtenidos en la calibración se compararán con esta tolerancia permitida de forma que siguiendo los criterios del apartado 5.3.1 se determinará la necesidad o no de realizar ajustes en el registrador.
- f) Se dispondrá del manual de usuario del calibrador multifunción, y la persona que realice la calibración estará familiarizada con su manejo.
- g) Se comprobará el estado de calibración del calibrador multifunción, si dispone de un certificado de calibración en vigor, y si dicho certificado garantiza la trazabilidad e incertidumbre apropiadas a las medidas que se van a realizar en el transcurso de la calibración.
- h) Se comprobará que el valor nominal de la tensión de alimentación y las posibles variaciones son adecuadas para el funcionamiento del calibrador y del registrador a calibrar. Normalmente una tensión de 230 voltios $\pm 10 \%$ es adecuada para el funcionamiento de la mayoría de los calibradores. En cualquier caso consultar el manual de instrucciones del



- calibrador multifunción, y del registrador si éste tiene conexión a red.
- i) Se conectarán a la red de alimentación eléctrica el calibrador multifunción y el registrador a calibrar en los casos en que éste último disponga de conexión a red, durante un tiempo previo al inicio de la calibración para conseguir la estabilización térmica. El tiempo de estabilización térmica cambia de un instrumento a otro, por lo que se deben consultar los manuales técnicos correspondientes.
 - j) La calibración se realizará manteniendo una temperatura ambiente comprendida entre 18 °C, y 28 °C que es el margen normal en el que los calibradores multifunción mantienen sus especificaciones. Es posible realizar la calibración a temperaturas distintas de las anteriormente indicadas, pero en este caso será necesario tener en cuenta este hecho en la asignación de incertidumbres de calibración.
 - k) La humedad relativa no sobrepasará el 70%, aunque en algunos casos es posible admitir valores de hasta el 80 % (consultar para ello los manuales del calibrador y del registrador a calibrar).
 - l) Se comprobará que el calibrador multifunción y el registrador a calibrar (cuando disponga de conexión a red) están conectados a una base de enchufe que incluya un conductor de protección o toma de tierra como medida elemental de protección frente a contactos indirectos.
 - m) Se comprobará mediante medida o mediante consulta de las especificaciones o certificados de calibración del calibrador que la distorsión armónica total de las señales de tensión e intensidad alterna aplicadas con el calibrador sea inferior al 1%, y en caso contrario se tendrá en cuenta su influencia.
 - n) Se realizarán las pruebas iniciales descritas en el manual técnico del registrador a calibrar, encaminadas a comprobar el estado general de funcionamiento del registrador (por ejemplo,



“autocomprobación de encendido”, comprobación de la pantalla de visualización, etc). Igualmente se hará una comprobación del sistema de escritura: plumillas, cartuchos de tinta, etc.

ñ) Como medidas elementales de seguridad se señalan las siguientes:

ADVERTENCIA: Tanto en el instrumento a calibrar como en la instrumentación utilizada para la calibración, están presentes, bien en los terminales externos o internamente, durante la realización de la calibración o de los ajustes y comprobaciones que fuera necesario realizar, tensiones peligrosas para las personas. Para evitar daños irreparables, deben ser observadas todas las precauciones de trabajos con riesgo eléctrico, 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.

Como medidas elementales de seguridad se señalan las siguientes:

- No realizar ninguna conexión a las bornas de salida del calibrador si hay tensión presente en esas bornas. Por lo tanto antes de realizar cualquier conexión eléctrica a las bornas del calibrador, presionar la tecla de borrado del calibrador (RESET o similar), y comprobar que la señalización que indica que no hay señal en bornas del calibrador está activa (señalización STANDBY o similar).
- Utilizar cables con el nivel de aislamiento adecuado para evitar la perforación de su aislamiento (usar cables que soporten como mínimo 2000 voltios a 50Hz).
- Utilizar cables con terminales o bananas que una vez introducidas en las bornas correspondientes del calibrador o multímetro a calibrar no presenten partes activas accesibles.

5.3. Proceso de calibración



5.3.1.- Secuencias posibles de calibración

El proceso de calibración seguirá una de las tres secuencias descritas a continuación:

- 1) Calibración inicial.
Ajustes.
Calibración final.
- 2) Calibración sin ajustes.
- 3) Ajuste.
Calibración final.

La secuencia 1), es la secuencia normal: primero se realiza una calibración inicial, y si como consecuencia de esta primera calibración el equipo requiere ajuste, previa autorización del usuario del equipo, se realiza dicho ajuste seguido de una calibración final. De esta forma la primera calibración nos proporciona información del estado del instrumento durante el período de tiempo transcurrido desde la última calibración. La calibración final comprueba que los ajustes realizados son correctos y nos asegura la trazabilidad. En este caso se conservarán registros tanto de la calibración inicial como final.

La secuencia 2) se puede considerar como una variante de la secuencia 1), aplicable cuando los errores encontrados en la calibración sean inferiores a unos límites establecidos. Es muy utilizada en patrones de referencia, para poder obtener una gráfica de su variación en función del tiempo sin influencia de ajustes.

La secuencia 3) solamente se debe aplicar cuando el estado del registrador antes de la calibración no sea importante, por ejemplo porque se acaba de reparar, porque es nuevo, porque estaba previamente fuera de uso, etc.



Se deberán establecer en función del uso previsto para el registrador, unos límites de tolerancia a partir de los cuales se podrá realizar el ajuste del instrumento, si se dispone de la autorización del usuario, o se limitará el uso del registrador. Se procederá al ajuste cuando la desviación obtenida sea mayor que el límite de tolerancia establecido disminuido en la incertidumbre de calibración. Algunas guías establecen como criterio de ajuste, para una relación entre tolerancia e incertidumbre comprendida entre 3 y 10, unos límites del 70% de la tolerancia de uso a partir de los cuales se procede al ajuste (que habitualmente coincide con la especificación del fabricante a un año).

Es aconsejable que los ajustes se realicen siguiendo el manual del fabricante del registrador, en el orden y en los puntos indicados.

5.3.2.- Definición de los puntos de medida.

En la tabla 1 que sigue, se indican los puntos de medida recomendados para realizar una calibración completa de un registrador; en primer lugar se calibran los factores de deflexión de los amplificadores X e Y, seguido de la calibración del ancho de banda para los dos amplificadores y por último la velocidad de escritura (base de tiempos). Si el registrador se va a usar para una aplicación con un campo de medida específico es posible y recomendable definir otros puntos de medida.

Las siguientes observaciones sirven para interpretar la tabla:

Los puntos de calibración están indicados en tanto por ciento del fondo de escala.



El valor del 10% indica un punto arbitrario situado al principio de la escala, en torno al valor mínimo que se vaya a medir con el registrador.

El valor del 90% indica un punto arbitrario situado próximo del fondo de escala, el valor real puede variar del 80% al 100 % del fondo de escala, en el apartado 8 “Anexos” se incluyen tablas con los puntos de calibración a modo de ilustración. Cuando se trata de un rango en el que se está comprobando la linealidad (midiendo cinco puntos en el mismo rango), el valor del 90% se debe entender en sentido estricto del fondo de escala.

En la verificación de la respuesta en frecuencia de los amplificadores (ancho de banda), se toma como referencia el 25% del límite del ancho de banda especificado por el fabricante, tomándose lecturas en los tres puntos de frecuencia restantes para la misma tensión de referencia a la entrada y verificándose que la amplitud de la señal registrada no cae por debajo del 30 % de la amplitud de referencia.

La base de tiempos se calibra en todos sus rangos, verificándose que la velocidad de desplazamiento de la escritura es la correcta.



Tabla 1: Puntos de calibración para los registradores

RANGOS	NÚMERO DE PUNTOS	VALORES DE PRUEBA (% FONDO DE ESCALA)
COEFICIENTE DE DEFLEXIÓN (TENSIÓN CONTINUA)		
TODOS	3	10%, + 90%, - 90%
UN RANGO INTERMEDIO	5	10%, + 50%, + 90 %, - 50%, - 90%
ANCHO DE BANDA		
UN RANGO INTERMEDIO	4	25%, 50%, 75%, 100% (% DEL ANCHO DE BANDA)
VELOCIDAD DE ESCRITURA (BASE DE TIEMPOS)		
TODOS	1	100%

El número de medidas a realizar, por cada punto, que se aconseja es de cinco para el coeficiente de deflexión, diez para la velocidad de escritura (base de tiempos) y una para la verificación del ancho de banda. Siendo el jefe del laboratorio, quien debe determinar en cada caso el número de medidas a realizar por cada punto.



5.3.3.- Conexiones y realización de las medidas.

Las conexiones entre el calibrador multifunción y el registrador deben de realizarse con cable apantallado, para evitar que en la escritura de la gráfica aparezcan ruidos indeseables, especialmente en los rangos de mayor sensibilidad.

En cada uno de los puntos de calibración definidos se aplicará la tensión especificada y a continuación se activará el registrador para que realice un barrido sobre el papel de la gráfica, anotando el resultado obtenido de la lectura gráfica en la hoja de datos preparada al efecto.

Si es posible configurar el registrador en varias formas de medida (cambiando la resolución o la velocidad de escritura), elegir para la calibración la que presente, según el manual del fabricante, mejores especificaciones (que es usualmente la más lenta y con mejor resolución). Anotar siempre en la hoja de toma de datos las configuraciones seleccionadas en los registradores a calibrar, e indicarlas igualmente en el informe de calibración.

NOTA:

Para evitar lazos de tierra y ruido que distorsionen los resultados de la calibración, solamente debe existir un único punto de conexión a tierra. Esta conexión a tierra se puede realizar en el terminal bajo (LO) del registrador a calibrar, asegurándose entonces de que el terminal bajo (LO) del calibrador está aislado de tierra. Cuando el registrador a calibrar funciona con batería o está completamente aislado de tierra en sus bornes de medida, también es posible realizar esta conexión a tierra en el terminal bajo del calibrador.

Factor de deflexión de los amplificadores X e Y

Antes de iniciar la calibración de cada rango en tensión continua, se debe realizar un ajuste de cero en el registrador, para ello se procederá a cortocircuitar la



entrada del amplificador a calibrar, y con una velocidad de barrido lenta, ajustar el cero para que la línea de escritura en la gráfica ocurra sobre el cero de la misma. En cualquier caso seguir siempre el manual de instrucciones donde se describe la forma de realizar estos ajustes.

Para realizar la calibración, se conectará la salida de tensión del calibrador (HI, LO), a los bornes de entrada del amplificador del registrador (ver figura 2). Para evitar errores inducidos por fuerzas electromotrices de origen térmico, especialmente importantes en las medidas de pequeñas tensiones en continua, es necesario usar conductores y conectores de cobre u otros materiales que generen bajas fuerzas termo electromotrices en su unión con el cobre.

Al ser alta la impedancia de entrada de los amplificadores X e Y, del orden de 100 k Ω , no es necesario utilizar la configuración de cuatro terminales en el calibrador.

Para cada uno de los factores de deflexión, una vez ajustado el cero, ajustar la salida del calibrador multifunción al valor de tensión continua que produzca una deflexión que se corresponda con el % indicado en la Tabla 1. Una vez definida la salida del calibrador, activar su salida y accionar la base de tiempos del registrador para que se produzca un barrido. En el caso que el registrador sea de papel continuo activar la base de tiempos durante el tiempo suficiente para que permita leer el registro producido. Anotar en el propio registro la configuración utilizada.

Repetir el procedimiento hasta obtener cinco registros por cada factor de deflexión del registrador.

Anotar en cada una de las gráficas obtenidas el valor medio indicado. Este valor medio se obtiene como la media entre el valor máximo y el valor mínimo indicado en cada uno de los registros.

Ancho de banda (X e Y).



Se conectará la salida del calibrador (HI, LO), a los bornes de entrada del registrador, ver figura 2. No activar su salida.

En el amplificador del registrador (X o Y) seleccionar un factor de deflexión situado en la zona central de las que dispone el registrador.

En el calibrador seleccionar salida de tensión alterna y ajustarla para que la amplitud observada en el registrador sea de diez divisiones mayores (100% del rango seleccionado). Ajustar la frecuencia de la tensión alterna a un valor lo suficientemente bajo de modo que no le afecte el límite superior del ancho de banda del amplificador, aproximadamente el 25% de este límite. Realizar un barrido en estas condiciones.

Sin variar la amplitud de salida del calibrador, ir aumentando la frecuencia de la tensión alterna del calibrador al 50%, 75% y 100% del límite del ancho de banda, hacer un barrido sobre la gráfica para cada frecuencia, verificando que la amplitud observada en la gráfica del registrador es $\geq 7,1$ divisiones mayores ($\geq 71\%$ del rango seleccionado), punto de -3dB .

La frecuencia a la que la amplitud observada en la gráfica es de 7,1 divisiones mayores corresponde con el ancho de banda del amplificador y debe ser igual o superior a la indicada en las especificaciones dadas por el fabricante del registrador. Esta prueba es una verificación de que el amplificador responde al ancho de banda especificado por el fabricante.

Velocidad de escritura (Base de tiempos T).

En el registrador seleccionar:

- * modo YT.
- * coeficiente de deflexión en un rango intermedio.
- * base de tiempos en su velocidad más lenta.

Realizar un barrido de la base de tiempos, a lo largo de la gráfica debe aparecer un ciclo por cada división mayor, la desviación observada debe ser menor que la indicada en las especificaciones.

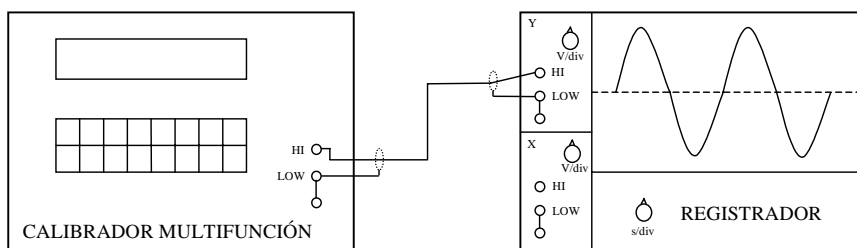


Figura 2: Conexión del calibrador multifunción al registrador

5.4. Toma y tratamiento de datos

Para cada punto de calibración se anotarán los siguientes datos:

Valor de la tensión aplicada con el calibrador.

Lecturas obtenidas en la gráfica del registrador a calibrar. Si existe variación en la indicación del registrador se tomará como lectura el valor medio del valor máximo y mínimo obtenido en la gráfica.

Error asociado a la calibración en cada punto (diferencia entre la lectura del registrador y el valor aplicado por el calibrador).

A continuación se compararán, en su caso, los errores obtenidos con las tolerancias asignadas al registrador para determinar o no la necesidad de realizar ajustes, según los criterios del apartado 5.3.1.



En el caso de que una vez determinados los errores, existiera duda sobre alguno de los valores obtenidos, por tratarse por ejemplo, de errores muy superiores a las tolerancias asignadas al registrador en calibración (p.e. \geq doble de la tolerancia asignada), se repetirá la calibración en esos puntos para confirmar la bondad de los resultados obtenidos.

Asimismo se deberá dejar registro de las condiciones ambientales significativas, temperatura ambiente y humedad relativa.

La toma de datos se podrá realizar de forma manual o, si el registrador lo permite, mediante ordenador y un bus de comunicación IEEE, que controle al registrador a calibrar. En el último caso se deberá validar el programa informático 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 consiste en realizar los cálculos manualmente, partiendo de los mismos datos que ha utilizado el programa informático, y comprobando que los resultados obtenidos son los mismos que se obtuvieron utilizando el programa. Deben conservarse los cálculos obtenidos por los dos métodos así como los registros gráficos obtenidos, indicando en ellos todas las condiciones de medida: coeficiente de deflexión, velocidad de escritura, tensión aplicada a la entrada etc.

6. RESULTADOS

6.1. Cálculo de incertidumbres

La asignación y expresión de incertidumbres se realizará siguiendo los criterios de la guía EA-4/02 [3]. En primer lugar se determinará la expresión de la magnitud de salida (que es el error del registrador a calibrar en cada punto de calibración), en función de las distintas magnitudes de entrada.



6.1.1.- Factor de deflexión

La determinación del error, e_x , de la indicación obtenida con el registrador a calibrar para tensión continua requiere que se realicen dos medidas, una primera con la señal aplicada y una segunda con un cortocircuito en bornes del registrador.

$$e_x = \bar{V}_{iX} + \delta V_{iX} - (V_{iX0} + \delta V_{iX0}) - (V_S + \delta V_S)$$

donde:

V_{iX} : indicación media del registrador cuando se aplica la tensión con el calibrador.

V_{iX0} : indicación del registrador cuando se aplica un cortocircuito en su entrada.

δV_{iX} : corrección debida a la resolución finita del registrador cuando se aplica la señal.

δV_{iX0} : corrección debida a la resolución finita del registrador cuando se aplica el cortocircuito.

V_S : valor de la señal de tensión aplicada con el calibrador.

δV_S : corrección del valor de la señal aplicada por el calibrador debida a múltiples efectos.

$$\delta V_S = \delta V_{SD} + \delta V_{SC} + \delta V_{ST} + \delta V_{SP} + \delta V_{SL} + \delta V_{SB} + \delta V_{SE} + \delta V_{SR}$$

donde:

δV_{SD} : corrección de la señal del calibrador debida a su deriva desde su última calibración.

δV_{SC} : corrección de la señal del calibrador debida a su falta de linealidad.

δV_{ST} : corrección de la señal del calibrador debida a la temperatura de funcionamiento.



- δV_{SP} : corrección de la señal del calibrador debida a variaciones en la tensión de alimentación.
- δV_{SL} : corrección de la señal del calibrador debida a los efectos de carga del registrador.
- δV_{SB} : corrección debida a la estabilidad del calibrador.
- δV_{SE} : corrección de la señal aplicada por el calibrador debida a su error de calibración.
- δV_{SR} : corrección de la señal aplicada por el calibrador debida a su resolución finita.

a) Asignación de las componentes de la incertidumbre.

a.1.- Incertidumbre debido a la falta de repetibilidad del registrador, (V_{ix}).

Se tomarán cinco lecturas en las mismas condiciones de medida, siempre que existan variaciones en la indicación del registrador. En caso contrario esta contribución no se considerará, por tener un valor nulo. Se calcularán los estimadores estadísticos que caracterizan la dispersión de los resultados obtenidos, (ver capítulo 3 de definiciones). En particular se calcularán la media aritmética de los valores de V_{ix} , la desviación estándar experimental, $s(V_{ix})$, y la desviación estándar experimental de la media que coincide con la incertidumbre típica de V_{ix} .

Desviación estándar experimental de la media:

$$u(V_{ix}) = s(V_{ix}) / \sqrt{5}$$

NOTA:

Las indicaciones obtenidas al realizar el cortocircuito en bornes del registrador a calibrar para tensión continua, se considera que no presentan variación alguna, tal y como sucede normalmente en la práctica.



a.2.- Incertidumbre de calibración del patrón. (V_s).

La incertidumbre de calibración del calibrador será la reflejada en el correspondiente certificado de calibración, para el punto considerado. Puesto que en los certificados se indican incertidumbres expandidas (U_{certi} , con $k=2$), para hallar la incertidumbre típica será necesario dividir el valor indicado por el valor de k_{certi} (normalmente 2).

En el caso de que el punto en el que se va a realizar la calibración del registrador no coincida con un valor certificado del calibrador, se incluirá como componente de incertidumbre la mayor incertidumbre de calibración del calibrador de entre todos los puntos calibrados del rango en el que se usa. La expresión queda:

$$u(V_s) = \frac{U_{\text{certi}}}{k_{\text{certi}}}$$

a.3.- Resolución del registrador a calibrar. (δV_{iX} , δV_{iX0}).

En ambos casos, se considera el máximo error posible que se puede cometer debido a la resolución del registrador como $\pm 0,5$ divisiones pequeñas en las que está dividida la gráfica, la incertidumbre típica se hallará suponiendo una distribución rectangular y dividiendo por tanto por $\sqrt{3}$. El valor de esta contribución se expresará en unidades homogéneas con el resto de contribuciones. Se entiende por división pequeña, a cada una de las divisiones en que se divide una división mayor. Si la división mayor es un centímetro, y éste a su vez está dividido en milímetros, la división pequeña es el milímetro. La expresión queda como sigue:

$$\delta V_{iX} = \delta V_{iX0} = (\text{Resolución})/\sqrt{3}$$



a.4.- Correcciones en la salida del calibrador, (δV_{SD} ,
 δV_{SC} , δV_{ST} , δV_{SP} , δV_{SL} , δV_{SB} , δV_{SR}).

Debido a que no es posible conocer normalmente cada una de las correcciones anteriores, las componentes de incertidumbre asociadas a estos factores se pueden derivar de las especificaciones facilitadas por el fabricante para el calibrador multifunción.

Estas especificaciones garantizan que si el calibrador funciona en un margen de temperatura determinado, (por ejemplo, entre 18°C, y 28°C), con una tensión de alimentación determinada, (por ejemplo: 230 V \pm 10 %), y habiendo transcurrido un período de tiempo determinado, (por ejemplo menor a un año) desde la última calibración, las señales generadas coincidirán con las indicadas en la pantalla del calibrador dentro de un margen máximo de diferencias, que denominaremos especificaciones (espec.). Para hallar la incertidumbre típica se supondrá una distribución rectangular dividiendo por tanto (espec.) por $\sqrt{3}$.

Es posible realizar un estudio detallado de alguna de las contribuciones anteriores (por ejemplo la deriva), y considerar esta contribución de forma independiente, pero sus contribuciones serían despreciables frente a las especificaciones del equipo que se está calibrando.

a.5.- Corrección de la señal aplicada por el calibrador debida al error durante la calibración del mismo, (δV_{SE}).

Existen dos posibles planteamientos a la hora de considerar las correcciones de las tensiones generadas por el calibrador indicadas en el certificado de calibración del mismo. El primero, aconsejado por la referencia [5], consiste en aplicar en cada punto las correcciones correspondientes iguales a los errores indicados en el certificado de calibración, pero con signo contrario, con lo



cual no se incrementa la incertidumbre; este planteamiento es el seguido en la tabla adjunta que expresa el balance de las componentes de la incertidumbre (tabla apartado a.6). Un segundo planteamiento consiste en realizar el cálculo y asignación de incertidumbres sin considerar esta corrección, y sumar aritméticamente el valor absoluto de esta corrección para obtener un límite superior de la incertidumbre.

a.6.- Balance de las componentes:

Magnitud , X_i	Mejor valor estimado de la magnitud , x_i	Incertidumbre típica, ($k=1$) $u(x_i)$	Distribución de probabilidad considerada	Coficiente de sensibilidad , c_i	Contribución a la incertidumbre $u_i (y)$
$V_{ix} - V_{ix0}$	media de los valores de ($V_{ix} - V_{ix0}$)	$s(V_{ix}) / \sqrt{5}$	normal	$c_1 = 1,0$	$u_1 (y) = s(V_{ix}) / \sqrt{5}$
V_s	V_s	$U_{certi.} / k_{certi.}$	normal	$c_2 = -1,0$	$u_2 (y) = - U_{certi.} / k_{certi.}$
δV_{ix}	0	$Res. / \sqrt{3}$	rectangular	$c_3 = 1,0$	$u_3(y) = Res. / \sqrt{3}$
δV_{ix0}	0	$Res. / \sqrt{3}$	rectangular	$c_4 = -1,0$	$u_4(y) = - Res. / \sqrt{3}$
δV_s	corrección certificada según certificado del calibrador	$espec. / \sqrt{3} V$	rectangular	$c_5 = -1,0$	$u_5(y) = - espec. / \sqrt{3}$
e_x	Ver expresión en 6.1.1	--	--	--	$u(e_x) = \sqrt{\sum u_i^2 (y)}$



NOTA:

Los coeficientes de sensibilidad se calculan como las derivadas parciales de e_x , respecto de cada una de las magnitudes evaluadas en el punto de calibración considerado y supuesta la independencia entre las diferentes contribuciones como ya se manifestó anteriormente. 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:

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

Estimación de los grados efectivos de libertad.

De acuerdo con el documento EA-4/02, anexo E [3], y utilizando la fórmula de Welch-Satterthwaite, los grados de efectivos libertad vienen dados por :

$$v_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}}$$

Para la incertidumbre típica $u_1(y)$ obtenida mediante una evaluación de tipo A, el grado de libertad viene dado por $v_i = n - 1$, siendo n el número de medidas realizadas por punto de calibración. El resto de las contribuciones son del tipo B puesto que se toman límites superiores e inferiores, siendo por tanto los grados efectivos de libertad de la contribución a la incertidumbre típica $u_i(y)$ $v_i \rightarrow \infty$. Aplicando la fórmula a los datos obtenidos en el balance de componentes anterior se obtienen los grados efectivos de libertad.



Entrando en la tabla del anexo E, del documento citado anteriormente, se obtiene el factor de cobertura k que corresponde al un grado de libertad efectivo determinado.

Cálculo de la incertidumbre expandida final (con factor de cobertura k).

Considerando que todas las variables de entrada son independientes, que por tanto no es necesario tener en cuenta los coeficientes de correlación, y aplicando la expresión de propagación de varianzas de la referencia [3], y teniendo en cuenta que se han realizado las correcciones debidas a efectos sistemáticos conocidos (en este caso corrección del error del calibrador indicado en su certificado de calibración), la incertidumbre expandida tiene la siguiente expresión:

$$U = k \cdot u(e_x) = k \sqrt{u_1^2(y) + u_2^2(y) + u_3^2(y) + u_4^2(y) + u_5^2(y)}$$

Expresión del resultado de la calibración

El error de indicación del registrador calibrado para un tiempo de prueba t es el siguiente:

$$e_x = (e_x \pm U) \text{ s} \qquad (k = x)$$

La incertidumbre de calibración indicada corresponde a una incertidumbre típica multiplicada por un factor de cobertura de $k=x$, que para una distribución normal corresponde a un nivel de confianza del XX % aproximadamente.

NOTA:

Si no se realiza la corrección debida al certificado de calibración, un límite superior de la incertidumbre de calibración se hallaría



sumando aritméticamente el valor absoluto del error no corregido debido al certificado con la incertidumbre indicada anteriormente:

$$U' = U + |\delta V_S|$$

En este caso para calcular el error de indicación del registrador a calibrar se consideraría como cero el valor de la corrección δV_S .

6.1.2.- Cálculo de incertidumbres en la velocidad de escritura (base de tiempos) del registrador.

Se está realizando la calibración de la velocidad de escritura (base de tiempos) de un registrador. La calibración se realiza a una temperatura de 23 ± 5 °C en la sala de metrología de una empresa de fabricación de componentes electrónicos. La tensión de alimentación de red se mantiene dentro de los límites de $230 \text{ V} \pm 10 \%$, durante toda la calibración.

Inicialmente se realiza el ajuste del cero del registrador aplicando un cortocircuito en los bornes de entrada del amplificador del registrador. Este ajuste es solo a efectos de que la forma de onda aparezca centrada en la gráfica, pero no tiene influencia en la medida de tiempo.

El registrador está situado, por ejemplo, en el rango de $0,1 \text{ V/división}$ y su base de tiempos en 1 s/división (mayores), la gráfica horizontalmente está dividida en divisiones mayores, y cada división mayor está dividida a su vez en diez divisiones pequeñas, siendo su resolución de $0,5$ divisiones pequeñas, que con la base de tiempos situada en 1 s/división equivalen a $0,05 \text{ s}$. Igualmente el registrador está trabajando dentro de los límites de temperatura en los cuales mantiene las especificaciones dadas por su fabricante.

Se aplicó a continuación, por ejemplo, una tensión alterna de $0,5 \text{ V}$ eficaces y frecuencia de 1 Hz con el calibrador



multifunción, usando cables de conexión adecuados. Se activa la base de tiempos del registrador, parándola después de pasados 100 s. La indicación en la gráfica del registrador ocupará más de 100 divisiones mayores, a partir de esta gráfica se obtienen diez medidas como sigue:

Contar el número de divisiones mayores horizontales que hay entre el máximo nº 1 y nº 11 de la senoide, por ejemplo 10,15 divisiones, como la base de tiempos está en 1 s/división este intervalo supone 10,15 s.

Contar igualmente para los nueve grupos siguientes de diez máximos de la senoide.

El certificado de calibración del calibrador indica que la frecuencia generada coincide con el valor seleccionado en pantalla, siendo la incertidumbre de calibración en frecuencia del calibrador $\pm(0,004\%$ de la frecuencia seleccionada) sin que haya ningún error de corrección y con un factor de cobertura $k=2$. La resolución del calibrador para la salida de 1 Hz es de 0,000001 Hz, y se está utilizando dentro de los márgenes de temperatura permitidos por el fabricante. La resolución es de 10^{-6} Hz, que para la salida de 1 Hz supone en tiempo un error de 10^{-6} s.

La determinación del error, e_x , de la indicación en tiempo obtenida en la gráfica del registrador a calibrar se obtiene como:

$$e_x = \bar{t}_{ix1} + \delta t_{ix1} - (t_{s1} + \delta t_s)$$

donde:

t_{ix} : indicación del periodo medio del registrador cuando se aplica una frecuencia con el calibrador.

δt_{ix} : corrección debida a la resolución finita del registrador.

t_s : periodo aplicado por el calibrador cuando se selecciona una determinada frecuencia.



δt_S : corrección del periodo aplicado por el calibrador debida a múltiples efectos.

$$\delta t_S = \delta t_{SD} + \delta t_{SC} + \delta t_{ST} + \delta t_{SP} + \delta t_{SL} + \delta t_{SB} + \delta t_S + \delta t_{SR}$$

donde:

δt_{SD} : corrección en la frecuencia del calibrador debida a su deriva desde su última calibración.

δt_{SC} : corrección en la frecuencia del calibrador debida a su falta de linealidad.

δt_{ST} : corrección en la frecuencia del calibrador debida a la temperatura de funcionamiento.

δt_{SP} : corrección en la frecuencia del calibrador por variaciones en la tensión de alimentación.

δt_{SB} : corrección debida a la estabilidad en frecuencia del calibrador.

δt_S : corrección de la frecuencia aplicada por el calibrador debida a su error de calibración.

δt_{SR} : corrección debida a la resolución finita del calibrador.

a) Asignación de las componentes de la incertidumbre.

a.1.- Incertidumbre por no repetibilidad del registrador, (t_{iX}).

Las lecturas están tomadas en las mismas condiciones de medida. Se calcularán los estimadores estadísticos que caracterizan la dispersión de los resultados obtenidos, (ver capítulo 3 de definiciones).

Media aritmética de los valores de \bar{t}_{iX}

Desviación estándar experimental $s(t_{iX})$

Desviación estándar experimental de la media = $u(t_{iX}) = s(t_{iX}) / \sqrt{n}$, siendo n el número de medidas realizadas.



a.2.- Incertidumbre de calibración del patrón en el punto de frecuencia que se está utilizando (t_s).

La incertidumbre de calibración del calibrador es de 0,004% de la frecuencia seleccionada (con $k=2$). Por ejemplo, para la frecuencia de 1 Hz, $T = 1$ s, supone un error de $40 \cdot 10^{-6}$ s. Si durante la medida se toman diez ciclos, que corresponden a 10 s, su error es de $40 \cdot 10^{-5}$ s, por lo tanto la incertidumbre típica será de $20 \cdot 10^{-5}$ s (con $k=1$).

$$u(t_s) = U_{\text{certif.}}/k_{\text{certif.}}$$

a.3.- Resolución del registrador a calibrar con la base de tiempos en 1 s/división (δt_{ix}).

Considerando el máximo error posible que se puede cometer debido a la resolución del registrador como $\pm 0,5$ divisiones pequeñas en las que está dividida horizontalmente la gráfica, supuesto que la gráfica está dividida en diez divisiones mayores y que a su vez estas están divididas en diez divisiones pequeñas, se tendrá que la resolución es $\pm 0,05$ s. Asumiendo una hipótesis de distribución rectangular resulta:

$$u(\delta t_{ix}) = \frac{\text{resol.}}{\sqrt{3}}$$

a.4.- Correcciones en la salida del calibrador, (δV_{SD} , δV_{SC} , δV_{ST} , δV_{SP} , δV_{SL} , δV_{SB} , δV_{SR}).

Las componentes de incertidumbre asociadas a estos factores se encuentran incluidas dentro de las especificaciones facilitadas por el fabricante para el calibrador multifunción. Estas especificaciones garantizan que si el calibrador funciona dentro de las condiciones ambientales, de alimentación etc., y

habiendo transcurrido un período de tiempo determinado, por ejemplo menor a un año desde la última calibración, las frecuencias generadas coincidirán con las indicadas en la pantalla del calibrador con la incertidumbre dada en el certificado de calibración. Por todo lo cual se considera, para este caso, que estas correcciones se consideran ya incluidas en el término t_{S1} .

a.5.- Balance de las componentes:

Magnitud, X_i	Mejor valor estimado de la magnitud, x_i	Incertidumbre típica, $(k=1) u(x_i)$	Distribución de probabilidad considerada	Coefficiente de sensibilidad, c_i	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
t_{ix}	Media de los valores de t_{ix}	$s(t_{ix})/\sqrt{n}$	normal	$c_1 = 1,0$	$u_1(y) = s(t_{ix})/\sqrt{n}$
t_s	t_s	$U_{\text{certif}}/k_{\text{certif}}$	normal	$c_2 = -1,0$	$u_2(y) = - U_{\text{certif}}/k_{\text{certif}}$
δt_{ix}	δt_{ix}	Resol./ $\sqrt{3}$	rectangular	$c_3 = 1,0$	$u_3(y) = \text{Resol.}/\sqrt{3}$
e_x	Ver apartado 6.1.2 b)	---	---	---	$u(e_x) = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$

Estimación de los grados efectivos de libertad ν_{ef} .

De acuerdo con el documento EA-4/02, anexo E [3], y utilizando la fórmula de Welch-Satterthwaite, los grados efectivos de libertad vienen dados por :

$$\nu_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}}$$



Para la incertidumbre típica $u_1(y)$ obtenida mediante una evaluación de tipo A, el grado de libertad viene dado por $\nu_i = n - 1$, siendo n el número de medidas realizadas por punto de calibración. El resto de las contribuciones son del tipo B puesto que se toman límites superiores e inferiores, siendo por tanto los grados efectivos de libertad de la contribución a la incertidumbre típica $u_i(y)$ $\nu_i \rightarrow \infty$. Aplicando la fórmula a los datos obtenidos en el balance de componentes anterior se obtienen los grados efectivos de libertad

Entrando en la tabla del anexo E, del documento citado anteriormente, se obtiene el factor de cobertura k que corresponde al grado de libertad efectivo calculado.

Cálculo de la incertidumbre expandida final (con factor de cobertura k).

Considerando que todas las variables de entrada son independientes, que por tanto no es necesario tener en cuenta los coeficientes de correlación, y aplicando la expresión de propagación de varianzas de la referencia [3], se tiene para la incertidumbre expandida:

$$U = k u(e_x) = k \sqrt{u_1^2(y) + u_2^2(y) + u_3^2(y)}$$

Expresión del resultado de la calibración.

El error de indicación del registrador calibrado para un tiempo de prueba t es el siguiente:

$$e_x = (e_x \pm U) \text{ s} \quad (k = x)$$

La incertidumbre de calibración indicada corresponde a una incertidumbre típica multiplicada por un factor de cobertura de $k=x$, que para una distribución normal corresponde a un nivel de confianza del XX % aproximadamente.



6.2. Interpretación de resultados

Se deberán establecer, en función del uso previsto para el registrador, unos límites de tolerancia a partir de los cuales se realizará el ajuste del instrumento o se limitará el uso del registrador. Si el laboratorio de calibración no dispone de estos datos ni se los suministre el usuario, se utilizarán como límites de tolerancia las especificaciones dadas por el fabricante. Se procederá al ajuste cuando la desviación obtenida sea mayor que el límite de tolerancia establecido disminuido en la incertidumbre de calibración.

Caso de que sea necesario realizar este ajuste, con la autorización del usuario, se procederá a una nueva calibración completa, y se indicará que en el certificado de calibración figuren los resultados de la calibración antes y después de los ajustes realizados.

Una vez terminada la calibración, incluyendo en su caso los ajustes necesarios, se determinarán los errores asociados a la calibración final en cada uno de los puntos, se determinará si dichos errores son inferiores al límite de tolerancia disminuido en la incertidumbre de calibración, y si es así el registrador se destinará de nuevo a su uso planificado. En caso contrario se reparará o se estudiará la posibilidad de su empleo en una nueva aplicación que admita una tolerancia de uso mayor.

Un período de tiempo razonable para la recalibración de estos instrumentos puede oscilar entre 6 y 12 meses, aunque el intervalo de tiempo a asignar dependerá fundamentalmente de las características técnicas comprobadas del registrador (por ejemplo su estabilidad), del uso que se realice del mismo, y de su tolerancia asignada. El usuario del equipo será siempre el responsable de asignar el período de recalibración, y de revisarlo cuando sea preciso, considerando, por ejemplo, los resultados obtenidos con respecto a las calibraciones anteriores y a las tolerancias consideradas.



7. REFERENCIAS

7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración

Manual de funcionamiento del registrador a calibrar.
Manual de funcionamiento del calibrador multifunción.

7.2. Otras referencias para consulta

- [1] Clasificación de instrumentos de Metrología Eléctrica. 2ª Edición. SCI-Ministerio de Industria y Energía. Diciembre 1994.
- [2] Norma UNE-EN 30012-1. Requisitos de aseguramiento de la calidad de los equipos de medida. Parte 1: Sistemas de Confirmación Metrológica de los Equipos de Medida. Octubre 1994.
- [3] Guía EA-4/02 (rev.00)R2. Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration..Diciembre 1999.
- [4] Procedimiento para la elaboración de procedimientos de calibración. MINER-CEM. Edición 1. 1998.
- [5] Guide to the expression of uncertainty in measurement. ISO 1993. (ISBN92-67-10188-9).
- [6] International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM). JCGM 200:2008
- [7] Quantities and units. ISO 31 1992



8. ANEXOS

8.1. Ejemplo numérico para el cálculo de incertidumbre del factor de deflexión

Para explicar el cálculo a realizar se tomarán dos ejemplos numéricos para el factor de deflexión, un primer ejemplo en el que no existe variación en la indicación del registrador a calibrar, y un segundo en el que sí existe una variación. En la práctica la variación de las lecturas no se presenta en la calibración de registradores.

8.1.1. Cálculo de incertidumbres cuando no existe variación en la indicación del registrador.

a) Datos de partida

Se está realizando la calibración en tensión continua de un registrador. La calibración se realiza a una temperatura de 23 ± 5 °C en la sala de metrología de una empresa de fabricación de componentes electrónicos. La tensión de alimentación de red se mantiene dentro de los límites de $230 \text{ V} \pm 10 \%$, durante toda la calibración.

Inicialmente se realizó el ajuste del cero del registrador aplicando un cortocircuito en los bornes de entrada del amplificador del registrador y se obtuvo en todas las medidas una lectura de 0,0 V, siendo por tanto $V_{ix0} = 0$.

Se aplicó a continuación una tensión de 100 V con el calibrador multifunción, usando cables de conexión adecuados. La indicación en la gráfica del registrador (situado en 10 V/división) fue de 100,1 V, sin existir ninguna variación en el valor de la lectura una vez transcurrido el breve transitorio de conexión del calibrador.



El certificado de calibración del calibrador indica que la tensión generada coincide con el valor seleccionado en pantalla, con una desviación o error de + 0,003 V, siendo la incertidumbre de calibración del calibrador $\pm (0,001\%$ de la lectura + 0,001% de la escala), con un factor de cobertura $k=2$. La resolución del calibrador, en la escala de 100 V, es de 0,0001 V, y se está utilizando dentro de los márgenes de temperatura permitidos por el fabricante.

El registrador está situado en el rango de 10 V/división, el rango se expresa en divisiones mayores, y cada división mayor está dividida a su vez en diez divisiones pequeñas, siendo su resolución de 0,5 divisiones pequeñas equivalentes a 0,5 V. Igualmente el registrador está trabajando dentro de los límites de temperatura en los cuales mantiene las especificaciones dadas por su fabricante.

b) Determinación del error asociado a la calibración

El error, e_x , de la indicación obtenida en la gráfica del registrador a calibrar se obtiene como:

$$e_x = \bar{V}_{ix100} + \delta V_{ix100} - (V_{ix0} + \delta V_{ix0}) - (V_{s100} + \delta V_s)$$

donde:

V_{ix100} : indicación media del registrador cuando se aplican 100 V con el calibrador.

V_{ix0} : indicación del registrador cuando se aplica un cortocircuito en su entrada.

δV_{ix100} : corrección debida a la resolución finita del registrador en 100 V.

δV_{ix0} : corrección debida a la resolución finita del registrador en 0 V.



V_{S100} : tensión aplicada por el calibrador cuando se seleccionan 100 V.

δV_S : corrección de la tensión aplicada por el calibrador debida a múltiples efectos.

$$\delta V_S = \delta V_{SD} + \delta V_{SC} + \delta V_{ST} + \delta V_{SP} + \delta V_{SL} + \delta V_{SB} + \delta V_{S100} + \delta V_{SR}$$

donde:

δV_{SD} : corrección en la tensión del calibrador debida a su deriva desde su última calibración.

δV_{SC} : corrección en la tensión del calibrador debida a su falta de linealidad.

δV_{ST} : corrección en la tensión del calibrador debida a la temperatura de funcionamiento.

δV_{SP} : corrección en la tensión del calibrador por variaciones en la tensión de alimentación.

δV_{SL} : corrección en la tensión del calibrador debida a los efectos de carga del registrador.

δV_{SB} : corrección debida a la estabilidad del calibrador.

δV_{S100} : corrección de la tensión aplicada por el calibrador debida a su error de calibración.

δV_{SR} : corrección debida a la resolución finita del calibrador.

c) Asignación de las componentes de la incertidumbre.

c.1.- Incertidumbre de calibración del patrón en el punto de 100V, (V_{S100}).

La incertidumbre de calibración del calibrador, para una salida de 100 V y en la escala de 100 V, es de 0,002V con $k=2$. Por lo tanto la incertidumbre típica será de 0,001 V, (con $k=1$).



c.2.- Resolución del registrador a calibrar en 100 V, y en 0 V (δV_{iX100} , δV_{iX0}).

En ambos casos, considerando el máximo error posible que se puede cometer debido a la resolución del registrador como $\pm 0,5$ divisiones pequeñas en las que está dividida la gráfica, supuesto que la gráfica está dividida en diez divisiones mayores y que a su vez estas están divididas en diez divisiones pequeñas, se tendrá un valor de $\pm 0,5$ V, y puesto que se ha asociado a una distribución rectangular su valor queda como $0,5/\sqrt{3}$.

c.3.- Correcciones en la salida del calibrador, (δV_{SD} , δV_{SC} , δV_{ST} , δV_{SP} , δV_{SL} , δV_{SB} , δV_{SR}).

Las componentes de incertidumbre asociadas a estos factores se encuentran incluidas dentro de las especificaciones facilitadas por el fabricante para el calibrador multifunción. Estas especificaciones garantizan que si el calibrador funciona dentro de las condiciones ambientales, de alimentación etc., y habiendo transcurrido un período de tiempo determinado, por ejemplo menor a un año desde la última calibración, las tensiones generadas coincidirán con las indicadas en la pantalla del calibrador con la incertidumbre dada en el certificado de calibración. Por todo lo cual se considera, para este caso, que estas correcciones se consideran ya incluidas en el término V_{S100} .

c.4.- Corrección de la tensión aplicada por el calibrador debida al error durante la calibración, (δV_{S100}).

El error de corrección, obtenido del certificado de calibración, para la salida de 100 V es de + 0,003 V. Al no realizar esta corrección, se toma como una contribución a la incertidumbre. Para una distribución rectangular esta contribución queda:

$$\delta V_{S100} = 0,003/\sqrt{3} \text{ V}$$

c.5.- Balance de las componentes:

Magnitud, X_i	Mejor valor estimado de la magnitud, x_i	Incertidumbre típica, ($k=1$) $u(x_i)$	Distribución de probabilidad considerada	Coefficiente de sensibilidad, c_i	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
$V_{ix100} - V_{ix0}$	100,1 V	--	--	--	
V_{S100}	100,0 V	0,002 /2 V	normal	$c_1 = -1,0$	$u_1(y) = - 0,001V$
δV_{ix100}	0,0 V	0,5/ $\sqrt{3}$ V	rectangular	$c_2 = 1,0$	$u_2(y) = 0,29V$
δV_{ix0}	0,0 V	0,5/ $\sqrt{3}$ V	rectangular	$c_3 = -1,0$	$u_3(y) = - 0,29V$
δV_{S100}	-0,003 V	0,003/ $\sqrt{3}$ V	rectangular	$c_4 = -1,0$	$u_4(y) = - 0,0058V$
e_x	+ 0,103 V	--	--	--	$u(e_x) = 0,410V$

Estimación de los grados efectivos de libertad ν_{ef} .

De acuerdo con el documento EA-4/02, anexo E [3], y utilizando la fórmula de Welch-Satterthwaite, los grados efectivos de libertad vienen dados por :

$$\nu_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}}$$

como en este caso todas las contribuciones son del tipo B, habiéndose tomado en todas las contribuciones límites superiores e inferiores, siendo por tanto los grados efectivos de libertad de la contribución a la incertidumbre típica $u_i(y)$ $\nu_i \rightarrow \infty$. Aplicando la fórmula a los datos obtenidos en el balance de componentes anterior se tiene:



$$V_{ef} = \frac{0,410^4}{\frac{0,001^4}{\infty} + \frac{0,29^4}{\infty} + \frac{0,29^4}{\infty} + \frac{0,0058^4}{\infty}} = \infty$$

Entrando en la tabla del anexo E, del documento citado anteriormente, el factor de cobertura que corresponde a un grado de libertad efectivo ∞ es $k = 2$.

Cálculo de la incertidumbre expandida final (con factor de cobertura , $k=2$).

Considerando que todas las variables de entrada son independientes, que por tanto no es necesario tener en cuenta los coeficientes de correlación, y aplicando la expresión de propagación de varianzas de la referencia [3], y teniendo en cuenta que se han realizado las correcciones debidas a efectos sistemáticos conocidos (error del calibrador indicado en su certificado de calibración), la incertidumbre expandida sigue la siguiente expresión:

$$U = k u(e_x) = k \sqrt{u_1^2(y) + u_2^2(y) + u_3^2(y) + u_4^2(y)}$$

$$U = k u(e_x) = 2 \cdot 0,410 \text{ V} = 0,820 \text{ V.}$$

d) Expresión del resultado de la calibración:

El error de indicación del registrador calibrado para un valor de prueba de 100 V en corriente continua es el siguiente:

$$e_x = (0,103 \pm 0,820) \text{ V} \quad (k=2)$$



La incertidumbre de calibración indicada corresponde a una incertidumbre típica multiplicada por un factor de cobertura de $k=2$, que para una distribución normal corresponde a un nivel de confianza del 95% aproximadamente.

8.1.2.- Cálculo de incertidumbres cuando sí existe variación en la indicación del registrador.

a) Datos de partida.

Se está realizando la calibración en tensión continua del factor de deflexión de 10 V/div de un registrador. La calibración se realiza a una temperatura de 23 ± 5 °C en la sala de metrología de una empresa de fabricación de componentes electrónicos. La tensión de alimentación de red se mantiene dentro de los límites de $230 \text{ V} \pm 10 \%$, durante toda la calibración.

Inicialmente se realizó el ajuste del cero del registrador aplicando un cortocircuito en los bornes de entrada del amplificador del registrador y se obtuvo en todas las medidas una lectura de 0,0 V, siendo por tanto $V_{iX0} = 0$.

Para la calibración se aplicó una tensión de 100 V, con el calibrador multifunción, usando cables de conexión adecuados. Las medidas se obtienen a partir de las cinco gráficas realizadas para este punto durante la calibración del registrador, para ello se cuentan el número de divisiones que se ha desplazado verticalmente el sistema de escritura, por ejemplo 10,10 divisiones mayores, y se multiplica por el coeficiente de deflexión, en este caso 10 V/división, la medida a anotar en el caso del ejemplo es de 101,0 V. Las medidas que así se obtuvieron fueron las siguientes:



101,0 V
100,5 V
100,0 V
99,5 V
100,5 V

El certificado de calibración del calibrador indica que la tensión generada coincide con el valor seleccionado en pantalla, con una desviación o error de + 0,003 V, siendo la incertidumbre de calibración del calibrador $\pm (0,001\%$ de la lectura + 0,001% de la escala), con un factor de cobertura $k=2$. La resolución del calibrador, en la escala de 100 V, es de 0,0001 V, y se está utilizando dentro de los márgenes de temperatura permitidos por el fabricante.

El registrador está situado en el rango de 10 V/división, el rango se expresa en divisiones mayores, y cada división mayor está dividida a su vez en diez divisiones pequeñas, siendo su resolución de 0,5 divisiones pequeñas equivalentes a 0,5 V. Igualmente el registrador está trabajando dentro de los límites de temperatura en los cuales mantiene las especificaciones dadas por su fabricante.

b) Determinación del error asociado a la calibración.

El error, e_x , de la indicación obtenida en el registrador a calibrar se obtiene como:

$$e_x = \bar{V}_{ix100} + \delta V_{ix100} - (V_{ix0} + \delta V_{ix0}) - (V_{S100} + \delta V_S)$$

donde:

V_{ix100} : indicación media del registrador cuando se aplican 100 V con el calibrador.



- V_{iX0} : indicación del registrador cuando se aplica un cortocircuito en su entrada.
- δV_{iX100} : corrección debida a la resolución finita del registrador en 100 V.
- δV_{iX0} : corrección debida a la resolución finita del registrador en 0 V.
- V_{S100} : tensión aplicada por el calibrador cuando se seleccionan 100 V
- δV_S : corrección de la tensión aplicada por el calibrador debida a múltiples efectos.

$$\delta V_S = \delta V_{SD} + \delta V_{SC} + \delta V_{ST} + \delta V_{SP} + \delta V_{SL} + \delta V_{SB} + \delta V_{S100} + \delta V_{SR}$$

donde:

- δV_{SD} : corrección en la tensión del calibrador debida a su deriva desde su última calibración.
- δV_{SC} : corrección en la tensión del calibrador debida a su falta de linealidad.
- δV_{ST} : corrección en la tensión del calibrador debida a la temperatura de funcionamiento.
- δV_{SP} : corrección en la tensión del calibrador por variaciones en la tensión de alimentación.
- δV_{SL} : corrección en la tensión del calibrador debida a los efectos de carga del registrador.
- δV_{SB} : corrección debida a la estabilidad del calibrador.
- δV_{S100} : corrección de la tensión aplicada por el calibrador debida a su error de calibración.
- δV_{SR} : corrección debida a la resolución finita del calibrador.

c) Asignación de las componentes de la incertidumbre.

c.1.- Incertidumbre por no repetibilidad del registrador, (V_{iX100}).



Las lecturas están tomadas en las mismas condiciones de medida. Se calcularán los estimadores estadísticos que caracterizan la dispersión de los resultados obtenidos, (ver capítulo 3 de definiciones).

Media aritmética de los valores de $V_{iX100} = 100,30 \text{ V}$

Desviación estándar experimental: $s(V_{iX100}) = 0,57 \text{ V}$

Desviación estándar experimental de la media =
 $= u(V_{iX100}) = s(V_{iX100}) / \sqrt{5} = 0,25 \text{ V}$

c.2.- Incertidumbre de calibración del patrón en el punto de 100V (V_{S100}).

La incertidumbre de calibración del calibrador es de 0,002 V (con $k=2$). Por lo tanto la incertidumbre típica será de 0,001 V (con $k=1$).

c.3.- Incertidumbre de calibración del patrón en el punto de 0 V (V_{S0}).

Al realizar el cero del registrador se coloca un cortocircuito en sus terminales de entrada por lo que esta incertidumbre es despreciable, siendo por tanto $V_{S0} = 0 \text{ V}$.

c.4.- Resolución del registrador a calibrar en 100 V, y en 0 V (δV_{iX100} , δV_{iX0}).

En ambos casos, considerando el máximo error posible que se puede cometer debido a la resolución del registrador como $\pm 0,5$ divisiones pequeñas en las que está dividida la gráfica, supuesto que la gráfica está dividida en diez divisiones mayores y que a su vez estas están divididas en diez divisiones pequeñas, se tendrá un valor de $\pm 0,5 \text{ V}$. Asumiendo una hipótesis de distribución rectangular resulta:



$$u(\delta V_{ix0}) = u(\delta V_{ix100}) = \frac{0,5}{\sqrt{3}}$$

c.5.- Correcciones en la salida del calibrador, (δV_{SD} , δV_{SC} , δV_{ST} , δV_{SP} , δV_{SL} , δV_{SB} , δV_{SR}).

Las componentes de incertidumbre asociadas a estos factores se encuentran incluidas dentro de las especificaciones facilitadas por el fabricante para el calibrador multifunción. Estas especificaciones garantizan que si el calibrador funciona dentro de las condiciones ambientales, de alimentación etc., y habiendo transcurrido un período de tiempo determinado, por ejemplo menor a un año desde la última calibración, las tensiones generadas coincidirán con las indicadas en la pantalla del calibrador con la incertidumbre dada en el certificado de calibración. Por todo lo cual se considera, para este caso, que estas correcciones se consideran ya incluidas en el término V_{S100} .

c.6.- Corrección de la tensión aplicada por el calibrador debida al error durante la calibración, (δV_{SE}). El error de corrección, obtenido del certificado de calibración, para la salida de 100 V es de + 0,003 V. Al no realizar esta corrección, se toma como una contribución a la incertidumbre. Para una distribución rectangular esta contribución queda:

$$\delta V_{S100} = 0,003/\sqrt{3} \text{ V}$$



c.7.- Balance de las componentes:

Magnitud , X_i	Mejor valor estimado de la magnitud , x_i	Incertidumbre típica, (k=1) $u(x_i)$	Distribución de probabilidad considerada	Coefficiente de sensibilidad, c_i	Contribución a la incertidumbre u_i (y)
V_{iX100}	100,30 V	0,25 V	normal	$c_1 = 1,0$	$u_1(y) = 0,25 V$
V_{S100}	100,00 V	0,002 /2 V	normal	$c_2 = -1,0$	$u_2(y) = -0,001 V$
δV_{iX100}	0,0 V	$0,5/\sqrt{3} V$	rectangular	$c_3 = 1,0$	$u_3(y) = 0,29 V$
δV_{iX0}	0,0 V	$0,5/\sqrt{3} V$	rectangular	$c_4 = 1,0$	$u_4(y) = 0,29 V$
δV_{S100}	0,003 V	$0,003/\sqrt{3} V$	rectangular	$c_5 = -1,0$	$u_5(y) = -0,0058 V$
e_x	+0,303 V	--	--	--	$u(e_x) = 0,592 V$

Estimación de los grados efectivos de libertad v_{ef} .

De acuerdo con el documento EA-4/02, anexo E [3], y utilizando la fórmula de Welch-Satterthwaite, los grados efectivos de libertad vienen dados por :

$$v_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}}$$

Para la incertidumbre típica $u_1(y)$ obtenida mediante una evaluación de tipo A, el grado de libertad viene dado por $v_1 = n - 1$, siendo n el número de medidas realizadas por punto de calibración, en este cálculo $n = 5$. El resto de las contribuciones son del tipo B puesto que se toman límites superiores e inferiores, siendo por tanto los grados efectivos



de libertad de la contribución a la incertidumbre típica $u_i(y)$ $v_i \rightarrow \infty$. Aplicando la fórmula a los datos obtenidos en el balance de componentes anterior se tiene:

$$V_{ef} = \frac{0,410^4}{\frac{0,25^4}{4} + \frac{0,001^4}{\infty} + \frac{0,29^4}{\infty} + \frac{0,29^4}{\infty} + \frac{0,0058^4}{\infty}} = 28,9$$

Entrando en la tabla del anexo E, del documento citado anteriormente, el factor de cobertura que corresponde a un grado de libertad efectivo 28,9 es $k = 2,13$, tomado por exceso de modo conservador.

Cálculo de la incertidumbre expandida final (con factor de cobertura , $k=2,13$)

Considerando que todas las variables de entrada son independientes, que por tanto no es necesario tener en cuenta los coeficientes de correlación, y aplicando la expresión de propagación de varianzas de la referencia [3], se tiene para la incertidumbre expandida:

$$U = ku(e_x) = k\sqrt{u_1^2(y) + u_2^2(y) + u_3^2(y) + u_4^2(y) + u_5^2(y)}$$

$$U = ku(e_x) = 2,13 \cdot 0,592 \text{ V} = 1,261 \text{ V.} \quad (k=2,13)$$

d) Expresión del resultado de la calibración:

El error de indicación del registrador calibrado para un valor de prueba de 100 V es el siguiente:

$$e_x = (0,30 \pm 1,261) \text{ V} \quad (k=2,13)$$



La incertidumbre de calibración indicada corresponde a una incertidumbre típica multiplicada por un factor de cobertura de $k=2,13$, que para una distribución normal corresponde a un nivel de confianza del 95% aproximadamente.

8.2. Ejemplo numérico para el cálculo de incertidumbre de la velocidad de escritura (base de tiempos)

8.2.1.- Cálculo de incertidumbres de la velocidad de escritura (base de tiempos) del registrador.

a) Datos de partida

Se está realizando la calibración de la base de tiempos de un registrador. La calibración se realiza a una temperatura de 23 ± 5 °C en la sala de metrología de una empresa de fabricación de componentes electrónicos. La tensión de alimentación de red se mantiene dentro de los límites de $230 \text{ V} \pm 10 \%$, durante toda la calibración.

Inicialmente se realizó el ajuste del cero del registrador aplicando un cortocircuito en los bornes de entrada del amplificador del registrador. Este ajuste es solo a efectos de que la forma de onda aparezca centrada en la gráfica, pero no tiene influencia en la medida de tiempo.

El registrador está situado en el rango de $0,1 \text{ V/división}$ y su base de tiempos en 1 s/división (mayores), la gráfica horizontalmente está dividida en divisiones mayores, y cada división mayor está dividida a su vez en diez divisiones pequeñas, siendo su resolución de $0,5$ divisiones pequeñas, que con la base de tiempos situada en 1 s/división equivalen a $0,05 \text{ s}$. Igualmente el registrador está trabajando dentro de los límites de temperatura en los cuales mantiene las especificaciones dadas por su fabricante.



Se aplicó a continuación una tensión alterna de 0,5 V eficaces y frecuencia de 1 Hz con el calibrador multifunción, usando cables de conexión adecuados. Se activa la base de tiempos del registrador, parándola después de pasados 100 s. La indicación en la gráfica del registrador ocupará más de 100 divisiones mayores, a partir de esta gráfica se obtienen diez medidas como sigue:

Contar el número de divisiones mayores horizontales que hay entre el máximo nº 1 y nº 11 de la sinusoide, por ejemplo 10,15 divisiones, como la base de tiempos está en 1 s/división este intervalo supone 10,15 s.

Contar igualmente para los nueve grupos siguientes de diez máximos de la sinusoide. Para este ejemplo numérico se supone que los diez resultados obtenidos son los que siguen:

10,15 s
10,10 s
10,05 s
10,15 s
10,20 s
10,20 s
10,15 s
10,15 s
10,10 s
10,15 s

El certificado de calibración del calibrador indica que la frecuencia generada coincide con el valor seleccionado en pantalla, siendo la incertidumbre de calibración en frecuencia del calibrador $\pm (0,004 \%$ de la frecuencia seleccionada) sin que haya ningún error de corrección y con un factor de cobertura $k=2$. La resolución del calibrador para la salida de 1 Hz es de 0,000001 Hz, y se



está utilizando dentro de los márgenes de temperatura permitidos por el fabricante. Los cálculos se realizarán expresándolos en tiempo, de modo que $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}$, y que la resolución de 10^{-6} Hz para la salida de 1 Hz supone en tiempo 10^{-6} s .

b) Determinación del error asociado a la calibración.

El error, e_x , de la indicación en tiempo obtenida en la gráfica del registrador a calibrar se obtiene como:

$$e_x = \bar{t}_{iX1} + \delta t_{iX1} - (t_{S1} + \delta t_S)$$

donde:

- t_{iX1} : indicación del periodo medio del registrador cuando se aplica 1 Hz con el calibrador.
- δt_{iX1} : corrección debida a la resolución finita del registrador.
- t_{S1} : periodo aplicado por el calibrador cuando se selecciona 1 Hz .
- δt_S : corrección del periodo aplicado por el calibrador debida a múltiples efectos.

$$\delta t_S = \delta t_{SD} + \delta t_{SC} + \delta t_{ST} + \delta t_{SP} + \delta t_{SL} + \delta t_{SB} + \delta t_{S100} + \delta t_{SR}$$

donde:

- δt_{SD} : corrección en la frecuencia del calibrador debida a su deriva desde su última calibración.
- δt_{SC} : corrección en la frecuencia del calibrador debida a su falta de linealidad.
- δt_{ST} : corrección en la frecuencia del calibrador debida a la temperatura de funcionamiento.
- δt_{SP} : corrección en la frecuencia del calibrador por variaciones en la tensión de alimentación.



- δt_{SB} : corrección debida a la estabilidad en frecuencia del calibrador.
- δt_{S100} : corrección de la frecuencia aplicada por el calibrador debida a su error de calibración.
- δt_{SR} : corrección debida a la resolución finita del calibrador.

c) Asignación de las componentes de la incertidumbre

c.1.- Incertidumbre por no repetibilidad del registrador, (t_{iX1}).

Las lecturas están tomadas en las mismas condiciones de medida. Se calcularán los estimadores estadísticos que caracterizan la dispersión de los resultados obtenidos, (ver capítulo 3 de definiciones).

Media aritmética de los valores de $t_{iX1} = 10,14$ s

Desviación estándar experimental: $s(t_{iX1}) = 0,046$ s

Desviación estándar experimental de la media = $u(t_{iX1}) = s(t_{iX1}) / \sqrt{10} = 0,015$ s

c.2.- Incertidumbre de calibración del patrón en el punto de 1Hz (t_{S1}).

La incertidumbre de calibración del calibrador es de 0,004% de la frecuencia seleccionada (con $k=2$). Para la frecuencia de 1 Hz, $T = 1$ s, supone un error de $40 \cdot 10^{-6}$ s. Como durante la medida se toman diez ciclos, que corresponden a 10 s, su error es de $40 \cdot 10^{-5}$ s, por lo tanto la incertidumbre típica será de $20 \cdot 10^{-5}$ s (con $k=1$).

c.3.- Resolución del registrador a calibrar con al base de tiempos en 1 s/división(δt_{iX1}).



Considerando el máximo error posible que se puede cometer debido a la resolución del registrador como $\pm 0,5$ divisiones pequeñas en las que está dividida horizontalmente la gráfica, supuesto que la gráfica está dividida en diez divisiones mayores y que a su vez estas están divididas en diez divisiones pequeñas, se tendrá un valor de $\pm 0,05$ s. Asumiendo una hipótesis de distribución rectangular resulta:

$$u(\delta t_{ix1}) = \frac{0,05}{\sqrt{3}}$$

c.4.- Correcciones en la salida del calibrador, (δV_{SD} , δV_{SC} , δV_{ST} , δV_{SP} , δV_{SL} , δV_{SB} , δV_{SR}).

Las componentes de incertidumbre asociadas a estos factores se encuentran incluidas dentro de las especificaciones facilitadas por el fabricante para el calibrador multifunción. Estas especificaciones garantizan que si el calibrador funciona dentro de las condiciones ambientales, de alimentación etc., y habiendo transcurrido un período de tiempo determinado, por ejemplo menor a un año desde la última calibración, las frecuencias generadas coincidirán con las indicadas en la pantalla del calibrador con la incertidumbre dada en el certificado de calibración. Por todo lo cual se considera, para este caso, que estas correcciones se consideran ya incluidas en el término t_{S1} .

c.5.- Balance de las componentes:

Magnitud , X_i	Mejor valor estimado de la magnitud , x_i	Incertidumbre típica, (k=1) $u(x_i)$	Distribución de probabilidad considerada	Coefficiente de sensibilidad, c_i	Contribución a la incertidumbre $u_i (y)$
t_{ix1}	10,14 s	0,015 s	normal	$c_1 = 1,0$	$u_1 (y) = 0,015$ s
t_{s1}	10,000 s	0,0004 /2 s	normal	$c_2 = -1,0$	$u_2 (y) = -0,0002$ s
δt_{ix1}	0,00 s	0,05/ $\sqrt{3}$ s	rectangular	$c_3 = 1,0$	$u_3(y) = 0,029$ s
e_x	+0,14 s	--	--	--	$u(e_x) = 0,032$ s

Estimación de los grados efectivos de libertad ν_{ef} .

De acuerdo con el documento EA-4/02, anexo E [3], y utilizando la fórmula de Welch-Satterthwaite, los grados efectivos de libertad vienen dados por:

$$\nu_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}}$$

Para la incertidumbre típica $u_1(y)$ obtenida mediante una evaluación de tipo A, el grado de libertad viene dado por $\nu_i = n - 1$, siendo n el número de medidas realizadas por punto de calibración, en este cálculo $n = 10$. El resto de las contribuciones son del tipo B puesto que se toman límites superiores e inferiores, siendo por tanto los grados efectivos de libertad de la contribución a la incertidumbre típica $u_i(y)$ $\nu_i \rightarrow \infty$. Aplicando la fórmula a los datos obtenidos en el balance de componentes anterior se tiene:



$$V_{ef} = \frac{0,032^4}{\frac{0,015^4}{9} + \frac{0,0002^4}{\infty} + \frac{0,029^4}{\infty}} = 186,4$$

Entrando en la tabla del anexo E, del documento citado anteriormente, el factor de cobertura que corresponde a un grado de libertad efectivo 186,4 es $k = 2$.

Cálculo de la incertidumbre expandida final (con factor de cobertura , $k=2$)

Considerando que todas las variables de entrada son independientes, que por tanto no es necesario tener en cuenta los coeficientes de correlación, y aplicando la expresión de propagación de varianzas de la referencia [3], se tiene para la incertidumbre expandida:

$$U = ku(e_x) = k \sqrt{u_1^2(y) + u_2^2(y) + u_3^2(y)}$$

$$U = ku(e_x) = 2 \cdot 0,032 V = 0,064 \text{ s.} \quad (k=2)$$

d) Expresión del resultado de la calibración:

El error de indicación del registrador calibrado para un tiempo de prueba de 10 s es el siguiente:

$$e_x = (0,14 \pm 0,064) \text{ s} \quad (k=2)$$

La incertidumbre de calibración indicada corresponde a una incertidumbre típica multiplicada por un factor de cobertura de $k=2,13$, que para una distribución normal corresponde a un nivel de confianza del 95% aproximadamente.



EJEMPLOS DE TABLAS CON LOS PUNTOS DE CALIBRACIÓN

En este anexo se indican los puntos en los que es necesario realizar la calibración de un registrador comercial, tomando como información de partida los rangos de medida indicados en el manual de funcionamiento. Los puntos de medida se han seleccionado con el objeto de ilustrar los criterios indicados en el apartado 5.3.2.

La gráfica del registrador se ha supuesto que tiene el cero en el centro y con diez divisiones mayores positivas (hacia arriba) y diez negativas.

Tabla 2: Calibración en tensión continua

RANGO	RESOLUCIÓN	VALORES DE PRUEBA				
1 mV/div	0,05 mV	1,0 mV	10,0 mV	- 10,0 mV		
5 mV/div	0,25 mV	5,0 mV	50,0 mV	-50,0 mV		
10 mV/div	0,5 mV	10,0 mV	100 mV	- 100 mV		
50 mV/div	2,5 mV	50,0 mV	500 mV	- 500 mV		
0,1 V/div	5 mV	0,100 V	1.00 V	- 1.00 V		
0,5 V/div	25 mV	0,500 V	5,00 V	- 5,00 V		
1 V/div	0,05 V	1,00 V	5,00 V	10,00 V	- 5,00 V	- 10,00 V
5 V/div	0,25 V	5,00 V	50,0 V	- 50,0 V		
10 V/div	0,5 V	10,0 V	100 V	- 100 V		



Tabla 3: Calibración del ancho de banda

RANGO	TENSIÓN APLICADA	FRECUENCIAS			
		REF. 25%	50%	75%	100%
0,1 v/div	1,00 V	2,5 Hz	5 Hz	7,5 Hz	10 Hz

Tabla 4: Calibración de la base de tiempos

CALIBRADOR		REGISTRADOR(RANGO EN 0,1 V/div)	
TENSIÓN DE SALIDA	FRECUENCIA	BASE DE TIEMPOS	DISTANCIA ENTRE 1° Y 11° PICO
0,5 V	4 Hz	0,25 s/cm	100 mm
	2 Hz	0,5 s/cm	100 mm
	1 Hz	1 s/cm	100 mm
	0,4 Hz	2,5 s/cm	100 mm
	0,2 Hz	5 s/cm	100 mm
	0,1 Hz	10 s/cm	100 mm
	0,04 Hz	25 s/cm	100 mm
	0,02 Hz	50 s/cm	100 mm

