

TIP #1

 visual factory



CALIBRE

Visual Factory Calibre 25

La incertidumbre metrológica con Visual
Factory Calibre: metodología GUM aplicada en la
industria

Juan Rodríguez

ELECSOFT S.L.

Mayo 2025

Introducción: la incertidumbre en la medición según GUM

En metrología, **incertidumbre de medición** se define como el parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos a un mensurando. En otras palabras, incluso tras realizar una medición calibrada, existe un margen de duda acerca del valor real debido a múltiples fuentes de variación. La **Guía para la Expresión de la Incertidumbre en las Medidas (GUM)** de ISO/BIPM establece la metodología estándar para evaluar y expresar esta incertidumbre, distinguiendo entre componentes evaluadas por **método tipo A** (evaluación estadística a partir de repeticiones) y **método tipo B** (evaluación mediante otros medios, por ejemplo, datos de calibración, especificaciones, experiencia previa). El objetivo es obtener una incertidumbre típica combinada, generalmente expresada como desviación estándar (*incertidumbre típica*) que agrupa todas las contribuciones de incertidumbre, y luego expandirla para un nivel de confianza deseado (por ejemplo ~95%). Esta práctica es fundamental en sectores industriales exigentes – automoción, aeroespacial, ferroviario, farmacéutico, etc. – donde garantizar mediciones trazables y fiables resulta crítico para la calidad y la seguridad.

Visual Factory Calibre implementa estas directrices de la GUM para el cálculo de incertidumbres en la calibración y control metrológico de equipos de medida. Los cálculos de incertidumbre se basan en las recomendaciones de la guía GUM de ISO, siguiendo también guías nacionales como la de ENAC (por ejemplo, el resumen CEA-ENAC-LC/02). A continuación, exploraremos detalladamente el algoritmo que emplea Visual Factory Calibre para estimar la incertidumbre metrológica de distintos tipos de equipos, los procedimientos para obtener la **incertidumbre expandida** y los **grados de libertad efectivos**, y compararemos este enfoque con otras metodologías reconocidas. También se discutirán casos prácticos y beneficios de aplicar este enfoque en entornos productivos, incluyendo ejemplos ilustrativos de cálculo.

Cálculo de la incertidumbre en Visual Factory Calibre

Visual Factory Calibre gestiona la conformidad metrológica de los equipos de medida de una empresa integrando el cálculo de incertidumbre en sus procesos. El software clasifica los instrumentos en distintas categorías o *formatos* según su naturaleza metrológica, lo que determina el modelo de cálculo de la incertidumbre asociado. Las dos categorías principales son: **equipos con escala** (formato denominado "Normal") y **equipos sin escala** (formato "Útil"). Existe además una categoría para **otros tipos de equipos** (p. ej. calibres tipo pasa/no pasa, verificadores) que se tratan de forma particular. A continuación, se detalla el algoritmo de cálculo para cada caso, incluyendo todas las contribuciones de incertidumbre consideradas.

Equipos con escala (formato *Normal*)

Los *equipos con escala* son aquellos instrumentos que poseen un rango de medición continuo con divisiones de escala (por ejemplo, calibres pie de rey, micrómetros, termómetros, balanzas analógicas o digitales, etc.). Para estos equipos, Visual Factory Calibre evalúa un conjunto de contribuciones de incertidumbre típicas, reflejando un **presupuesto de incertidumbre** completo conforme a GUM. La incertidumbre típica combinada u_c (desviación típica combinada) del equipo con escala se calcula mediante la raíz cuadrática de la suma de variancias de cada contribución relevante:

$$u_c = \sqrt{(c_1 \cdot u_{pat})^2 + (c_2 \cdot u_{repet})^2 + (c_3 \cdot u_{res})^2 + (c_4 \cdot u_{err\ ind})^2 + (c_5 \cdot u_{excent})^2 + (c_6 \cdot u_{hist})^2 + u_{otros}^2}$$

donde cada término corresponde a una fuente de incertidumbre específica:

- **Incetidumbre del patrón (u_{pat})** – Es una contribución *tipo B* debida al patrón de referencia utilizado en la calibración. Por ejemplo, si para calibrar un termómetro se usa otro termómetro patrón con certificado de calibración, la incertidumbre (típica) de ese patrón se incorpora aquí.

Usualmente proviene de la incertidumbre indicada en el certificado del patrón (p. ej. incertidumbre expandida $U_{patrón}$ dividida por el factor de cobertura k correspondiente para obtener la desviación típica del patrón).

- Incertidumbre por repetibilidad (u_{repet})** – Es la componente *tipo A* evaluada estadísticamente por mediciones repetidas. Se determina típicamente realizando n mediciones repetidas del instrumento en condiciones constantes y calculando la desviación estándar experimental. Representa la variabilidad aleatoria intrínseca al equipo cuando mide la misma magnitud varias veces. Por ejemplo, al calibrar un manómetro, se podría repetir la lectura de una misma presión varias veces; la dispersión de esas lecturas (desviación típica) es u_{repet} . Si la calibración promedia varias lecturas, u_{repet} podría ajustarse dividiendo la desviación estándar por $\sqrt{n}$ (incertidumbre de la media).
- Incertidumbre de resolución (u_{res})** – Es una contribución *tipo B* asociada a la *división de escala o resolución* del instrumento. Representa la incapacidad del instrumento de distinguir pequeñas diferencias por el límite de su pantalla o escala. Por lo general se modela con una distribución rectangular entre $\pm \frac{1}{2}$ del valor de la mínima división. Así, si la resolución es d , típicamente $u_{res} = \frac{d}{2\sqrt{3}}$. Por ejemplo, en un calibre digital con resolución 0,01 mm, se asume una incertidumbre estándar $0,01 \frac{mm}{(2\sqrt{3})} \approx 0,0029mm$ debido a la granularidad de lectura.
- Incertidumbre por error de indicación ($u_{err\ ind}$)** – Es otra contribución *tipo B* debida al *error de indicación* del equipo. El **error de indicación** es la diferencia sistemática entre el valor indicado por el instrumento y el valor verdadero de la magnitud medida. En una calibración, este error se estima comparando con el patrón. Si tras la calibración **no se corrige** dicho error en el uso posterior del instrumento, entonces este sesgo se considera como una fuente de incertidumbre residual
- Incertidumbre por excentricidad (u_{excent})** – Contribución *tipo B* relevante principalmente en instrumentos como balanzas o básculas, donde la posición del objeto puede afectar la medida. La *excentricidad* se evalúa colocando el peso patrón en distintas posiciones. Por ejemplo, en una balanza se pesa una misma masa colocándola en el centro y cerca de cada esquina del plato (suele hacerse a aproximadamente 1/3 o mitad del rango máximo). A partir de esas mediciones, se determina la variación máxima debida a la posición. Visual Factory sugiere tomar los valores máximo y mínimo registrados y emplearlos para estimar la incertidumbre de excentricidad: $u_{excent} = (Máx - Mín)/\sqrt{12}$. Esta contribución garantiza que cualquier efecto de posición del objeto medido quede cubierto en la incertidumbre.
- Incertidumbre por histéresis (u_{hist})** – Contribución *tipo B* relevante cuando el instrumento puede presentar diferente indicación según se alcance un valor por aumento o por disminución de la magnitud. Un ejemplo típico es nuevamente el de una balanza: al calibrarla, se puede cargar primero un peso medio del rango partiendo de cero (lectura en aumento) y luego, tras cargarla hasta el máximo, descargar hasta ese peso medio y leer nuevamente (lectura en disminución). La diferencia entre la lectura creciente y decreciente es la *histéresis*. Visual Factory obtiene la incertidumbre de histéresis a partir de esa diferencia, por ejemplo, considerando la mitad de la diferencia máxima (si no se corrige) como semiamplitud de una distribución rectangular. Así, $u_{hist} = |Creciente - Decreciente|/\sqrt{12}$
- Otras incertidumbres ($\sum u_{otros}$)** – Cualquier otra contribución adicional que afecte la medición, según el caso particular, puede añadirse directamente al cálculo. Esto incluye factores como variaciones ambientales (p.ej. efecto de temperatura si el instrumento no está a 20 °C), variaciones geométricas (planitud o paralelismo de superficies de medición, desgaste, etc.), deriva temporal del instrumento entre calibraciones, entre otras. Visual Factory Calibre permite al usuario introducir

estas contribuciones adicionales manualmente en el presupuesto de incertidumbre cuando sean pertinentes para un instrumento específico. Por ejemplo, en la calibración de un calibre pie de rey de precisión extrema, el procedimiento del Centro Español de Metrología (CEM) incluye componentes por falta de planitud y paralelismo de las caras de medida, dilatación térmica por desviaciones de temperatura, etc., que se podrían añadir en "Otras incertidumbres". En Visual Factory Calibre estas incertidumbres se introducen directamente.

Todas estas componentes se combinan mediante la fórmula antes mencionada para obtener la **incertidumbre típica combinada** u_c del instrumento. La flexibilidad del software permite *incluir o excluir ciertas componentes* según aplique. Por ejemplo, si en una calibración se decide **ajustar** el instrumento para eliminar el error de indicación (dejándolo prácticamente en cero), el usuario podría indicar un coeficiente que elimine esa contribución del cálculo (estableciendo el coeficiente correspondiente a la corrección en 1, sabiendo que la corrección aplicada es 0). En Visual Factory, esto se maneja mediante coeficientes que multiplican o anulan algunas contribuciones (denominados c_1 , c_2 , c_4 en la documentación). Sin entrar en detalles de software, conceptualmente esto significa que, si cierta contribución está corregida o no es aplicable, puede omitirse del cálculo poniéndola a cero.

Equipos sin escala (formato *Útil*)

Los *equipos sin escala* son aquellos que **no tienen un rango de medición continuo** ni divisiones de escala propias. Suelen ser útiles de medición o instrumentos que proporcionan una comparación o posición fija, por ejemplo: calibres *pasa/no pasa*, galgas lisas o anillos patrón, bloques patrón de longitud (cuando se calibran entre sí), herramientas de ajuste con dimensiones fijas, etc. En Visual Factory se clasifican con el formato "Útil". A diferencia de los equipos con escala, aquí no existe un error de indicación variable a lo largo de una escala, sino que se evalúan posibilidades discretas o posiciones fijas.

Para estos equipos, la fórmula de la incertidumbre típica combinada es análoga, combinando las contribuciones pertinentes:

$$u_c = \sqrt{(c_1 \cdot u_{pat})^2 + (c_2 \cdot u_{repet})^2 + (c_4 \cdot u_{err\ ind})^2 + u_{otros}^2}$$

donde en condiciones normales los coeficientes c_1 y c_2 valen 1 y c_4 vale 0. Veamos las contribuciones en este caso:

- **Incertidumbre del patrón (u_{pat})** – Igual que antes, proviene de la incertidumbre del patrón o estándar con el cual se calibra/verifica el útil. Por ejemplo, si calibramos un bloque patrón desconocido comparándolo contra otro bloque patrón de referencia (de longitud conocida con incertidumbre), la incertidumbre del patrón de referencia es la principal componente.
- **Incertidumbre por repetibilidad (u_{repet})** – Obtenida de múltiples mediciones repetidas del útil contra el patrón, si es posible repetir la medición varias veces. En muchos casos de útiles, puede ser muy pequeña (p.ej. encajar varias veces un anillo en un cilindro patrón y ver variabilidad de la comprobación de holgura).
- **Incertidumbre por desviación de la medida ($u_{err\ ind}$)** – Es la análoga al "error de indicación" pero para un útil sin escala. Representa la diferencia observada entre el valor nominal esperado y el valor medido o comparado. Por ejemplo, si un calibre *pasa/no pasa* se calibra con bloques patrón, se determinará cuánto *desvía* de la condición ideal (quizá el útil "pasa" realmente hasta 10,02 mm en lugar de 10,00 mm, etc.). Esa desviación, si no se corrige, se toma como incertidumbre (generalmente con distribución rectangular como un sesgo no corregido). En Visual Factory, esta contribución puede modularse con un coeficiente c_4 , que típicamente es 0, ya que normalmente estamos dando la corrección del equipo.

- **Otras incertidumbres** – Cualquier efecto adicional (temperatura, desgaste, etc.) que afecte al útil, de modo similar a lo descrito para equipos con escala, se puede incluir en el sumatorio.

Tras calcular la incertidumbre típica combinada u_c para el útil sin escala, la incertidumbre expandida se obtendrá de igual forma que en el caso anterior (descrita en la siguiente sección).

Incertidumbre expandida y grados de libertad efectivos

Una vez obtenida la incertidumbre típica combinada u_c (también llamada incertidumbre estándar combinada) para el equipo, el paso siguiente es calcular la **incertidumbre expandida U**, que es el valor final que se suele reportar en los certificados de calibración. La incertidumbre expandida se obtiene multiplicando u_c por un **factor de cobertura k** apropiado, elegido para lograr una probabilidad de cobertura deseada (usualmente aproximadamente el 95%). En notación:

$$U = k \cdot u_c$$

En Visual Factory Calibre, al igual que en la práctica metrológica común, se sigue la convención de usar $k=2$ para un nivel de confianza del ~95%, **siempre y cuando** el número de grados de libertad efectivos asociados a u_c sea suficientemente grande. En muchos casos habituales de calibración, con múltiples observaciones o con contribuciones tipo B bien caracterizadas, los grados de libertad tienden a ser altos (a menudo > 10), justificando $k=2$ como aproximación de la cobertura normal (distribución normal estándar).

No obstante, cuando el número de **grados de libertad efectivos** v_{eff} es limitado (especialmente $v_{eff} \leq 10$), el software aplica la corrección pertinente: en lugar de asumir $K=2$, calcula un factor k más grande basado en la **distribución t de Student** para lograr ~95% de nivel de confianza. Esto sigue la recomendación de la GUM de emplear la *distribución t* cuando la incertidumbre tiene contribuciones significativas con pocos datos (p.ej. una repetibilidad con muy pocas repeticiones, o un factor dominante con grados de libertad bajo). En esencia, Visual Factory determina k tal que $P(t(v_{eff}) \leq k) \approx 95\%$ donde $t(v_{eff})$ es la variable t de Student con v grados de libertad. Por ejemplo, si $v_{eff} = 3$, el software buscará $k \approx 3,18$ (ya que, con 3 grados de libertad, un $k=2$ cubriría solo ~80% de confianza, por lo que hace falta ~3,18 para llegar al 95%). Si $v_{eff} = 10$, $k \approx 2,23$. A medida que v_{eff} aumenta, k tiende a 1,96...2,0, convergiendo al caso de incertidumbre normal con varianza bien conocida.

El cálculo de los **grados de libertad efectivos** (v_{eff}) sigue el método de Welch-Satterthwaite, tal como indica la GUM. Dado que u_c es una combinación de varias fuentes, algunas con grados de libertad propios (por ejemplo, la repetibilidad con $v=n-1$ si n repeticiones; un patrón externo puede tener asociado un v eficaz dado por el laboratorio que lo calibró, etc.), la fórmula general para combinar grados de libertad es:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_i \frac{u_i^4}{v_i}}$$

donde la suma recorre cada componente u_i de incertidumbre típica y v_i son sus grados de libertad asociados (se considera $v_i \rightarrow \infty$ para componentes tipo B basadas en distribuciones asumidas o certificaciones con incertidumbres sin especificar v). Visual Factory Calibre implementa esta fórmula, con algunas simplificaciones cuando procede. Por ejemplo, si todos los componentes *tipo B* principales (patrón, resolución, etc.) se suponen con incertidumbres provenientes de distribuciones bien caracterizadas (rectangular, etc.), se suele asignar $v_i = \infty$ a ellas, con lo cual la ecuación se reduce a considerar principalmente el v de la repetibilidad tipo A:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{(c_s \cdot u_{repet})^4}$$

En la práctica, el software facilita al metrologo este paso crítico, indicando automáticamente si el $k=2$ es válido o si ha aplicado un factor de cobertura distinto. Así, se asegura que la **incertidumbre expandida** reportada corresponda a ~95% de confianza real. Es importante señalar que, en los informes, además de U (incertidumbre expandida), suele documentarse el valor de k utilizado y, cuando $k \neq 2$, a menudo también los grados de libertad efectivos considerados, para transparencia según ISO/IEC 17025. Visual Factory permite extraer estos datos para incluirlos en certificados o informes de calibración.

Inclusión de la corrección en la incertidumbre: opciones y fundamentos

En metrología, al calibrar un instrumento, es común identificar un **error de indicación** o **corrección** en los puntos de control. Si no se puede aplicar esta corrección directamente en el equipo o en el proceso de medición, es necesario decidir cómo gestionar dicha información para garantizar mediciones confiables y comprensibles para el personal de producción.

Desafío en entornos productivos

Proporcionar al operario una tabla detallada con correcciones y sus incertidumbres asociadas puede resultar complejo y propenso a errores. Para simplificar, se puede optar por **no aplicar la corrección** y, en su lugar, **aumentar la incertidumbre declarada**, manteniendo así la trazabilidad y la fiabilidad de las mediciones.

Opciones según la GUM

La **Guía para la Expresión de la Incertidumbre en las Mediciones (GUM)** permite dos enfoques principales para abordar esta situación:

1. Incluir la corrección como una componente de incertidumbre de tipo B

Si se conoce una corrección significativa pero no se aplica, su incertidumbre asociada puede incorporarse como una componente de tipo B en el presupuesto de incertidumbre. Esto implica considerar la **incertidumbre de la corrección no aplicada** como una fuente adicional de incertidumbre en la medición.

Nota: La GUM establece que, si no se aplica una corrección conocida para un efecto sistemático significativo, se debe tener en cuenta ampliando la incertidumbre asignada al resultado.

2. Ajustar la incertidumbre expandida para reflejar la corrección no aplicada

Otra opción es **aumentar la incertidumbre expandida** sumando en valor absoluto el **máximo de las correcciones no aplicadas**. Esto proporciona un intervalo de incertidumbre más amplio que cubre las posibles desviaciones debido a la corrección omitida, sin necesidad de aplicar la corrección explícitamente.

Nota: Este enfoque es útil cuando se desea simplificar la información proporcionada al usuario final, evitando la necesidad de aplicar correcciones específicas en cada medición.

Implementación en Visual Factory Calibre

Visual Factory Calibre ofrece flexibilidad para aplicar ambos enfoques:

- **Incorporación como componente de tipo B:** Permite añadir la incertidumbre asociada a la corrección no aplicada directamente en el presupuesto de incertidumbre, facilitando su trazabilidad y documentación.
- **Ajuste de la incertidumbre expandida:** Ofrece la opción de aumentar la incertidumbre expandida sumando el valor máximo de las correcciones no aplicadas, simplificando así la información presentada al operario sin comprometer la fiabilidad de las mediciones.

Esta flexibilidad permite adaptar el enfoque según las necesidades específicas de cada proceso productivo, equilibrando la precisión metrológica con la operatividad en planta.

Comparativa con otras metodologías y herramientas de cálculo de incertidumbre

El método implementado en Visual Factory Calibre se alinea con las mejores prácticas reconocidas internacionalmente para la evaluación de la incertidumbre en calibración, siguiendo las recomendaciones de la GUM (Guía para la Expresión de la Incertidumbre en las Medidas) y guías derivadas. En esencia, aplica el enfoque de propagación de varianzas, considerando contribuciones tipo A (estadísticas) y tipo B (evaluadas por otros medios).

A diferencia de otras soluciones que pueden requerir configuraciones complejas o cálculos manuales en hojas de cálculo, Visual Factory Calibre ofrece un enfoque automatizado y estandarizado, integrando la gestión de equipos, la programación de calibraciones y el cálculo de incertidumbres en una sola plataforma. Esto garantiza que las evaluaciones sean consistentes y trazables, reduciendo errores y optimizando el tiempo de los técnicos de metrología.

La metodología de Visual Factory Calibre es compatible con los criterios de acreditación reconocidos, lo que permite a las organizaciones cumplir con las normativas internacionales y garantizar la calidad de sus procesos de medición.

Aplicación práctica: beneficios en entornos productivos

Implementar un cálculo riguroso de incertidumbre metrológica con herramientas como Visual Factory Calibre aporta numerosos beneficios prácticos en entornos industriales de producción:

- **Garantía de calidad y cumplimiento normativo:** En sectores como automoción o aeroespacial, las normas de calidad (ISO 9001, IATF 16949, AS9100, etc.) y requisitos de clientes exigen calibraciones trazables de los equipos de medición. Incluir la incertidumbre de medición en los certificados asegura que las mediciones realizadas con esos equipos son confiables dentro de límites cuantificados. Por ejemplo, en farmacéutica, conocer la incertidumbre de un termohigrómetro que monitoriza una cámara climática es crucial para cumplir con Buenas Prácticas de Manufactura (GMP).
- **Mejora en la toma de decisiones sobre conformidad:** Conocer la incertidumbre asociada permite aplicar criterios de decisión más sólidos al evaluar si un producto cumple especificaciones. Un caso común en automoción es el ajuste de criterios de aceptación/rechazo considerando la incertidumbre (regla de desenfoque o guard banding). Si un eje medido está justo al límite de tolerancia, la incertidumbre de medición podría inclinar la decisión sobre aceptar la pieza o rechazarla. Tener estos valores calculados facilita implementar reglas como la de ILAC G8 (decisión con incertidumbre) para evitar tanto rechazos indebidos de producto bueno como aceptar producto fuera de especificación.
- **Eficiencia y reducción de errores humanos:** Automatizar el cálculo con una herramienta validada minimiza errores de cálculo manual o interpretaciones incorrectas. La gestión centralizada en Visual Factory evita tener múltiples hojas Excel dispersas, reduce duplicación de trabajo y estandariza el reporte. En entornos productivos con cientos o miles de equipos (típico en sectores como ferrocarril o automoción), esto se traduce en **ahorro de tiempo** y en mantener siempre actualizados los datos de incertidumbre tras cada calibración, sin depender de cálculos externos.
- **Trazabilidad y auditorías:** Durante auditorías internas o externas (por ejemplo, de un cliente aeroespacial, o un organismo regulador), disponer de un sistema que documenta claramente cómo se calculó cada incertidumbre aporta confianza. Visual Factory permite mostrar el “presupuesto de incertidumbre” detallado para cada equipo, con datos de origen (p.ej. valores de repetibilidad obtenidos, incertidumbre de patrones usados, etc.), lo cual es evidencia objetiva del control metrológico. Esto cumple con el principio de trazabilidad metrológica: no solo el valor medido es

trazable, sino también la incertidumbre asociada está respaldada por referencias y cálculos consistentes con estándares internacionales.

Conclusiones

La correcta estimación de la incertidumbre metrológica es fundamental para la calidad industrial. Visual Factory Calibre proporciona una solución integral que, basada en la metodología GUM, permite a técnicos de metrología en sectores como automoción, aeroespacial, ferroviario y farmacéutico calcular de manera precisa y confiable las incertidumbres de sus equipos.

El software desglosa todas las contribuciones de incertidumbre (patrón, repetibilidad, excentricidad, histéresis, resolución) y las combina para obtener una incertidumbre expandida ajustada según los grados de libertad efectivos. Esto asegura que incluso con datos limitados, la estimación es conservadora y segura.

Además, Visual Factory Calibre se diferencia por su integración en la gestión metrológica, lo que garantiza eficiencia y coherencia en el cálculo de incertidumbre, minimizando errores y optimizando el tiempo. Esto permite a las empresas tomar mejores decisiones, mejorar sus procesos y asegurar la calidad de sus productos.

Referencias Bibliográficas:

1. Guía ISO/BIPM "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" (GUM), JCGM 100:2008.
2. Centro Español de Metrología (CEM) – *Procedimiento DI-008: Calibración de calibres pie de rey*, Rev. 2, 2024 (ejemplo de aplicación de cálculo de incertidumbre en instrumentación dimensional).
3. ENAC – CEA-ENAC-LC/02: Criterios de Expresión de la Incertidumbre de Medida (basado en EA-4/02).
4. Documentación *Visual Factory Calibre*.

Nota del Autor

Este artículo fue redactado con la asistencia de un sistema de inteligencia artificial. La IA fue utilizada para apoyar la redacción, edición y revisión del contenido técnico, garantizando precisión y claridad en las explicaciones. No obstante, el contenido técnico y las conclusiones son responsabilidad del equipo del autor.