

ESPECIFICACIONES EN LA INSTRUMENTACIÓN DE MEDIDA

La especificación de un instrumento de medida es la descripción escrita de su comportamiento que objetivamente cuantifica sus posibilidades. Sin embargo, no todos los fabricantes especifican con los mismos criterios o, tan siquiera, con los mismos parámetros. Además, hay fabricantes agresivos que presentan unas especificaciones aparentemente superiores a las reales, mientras que otros más conservadores, prefieren especificar el comportamiento del peor de sus equipos.

Las especificaciones definen el comportamiento no de un equipo en particular, sino de todos los equipos del mismo lote o del mismo modelo. Por ello, es habitual que las especificaciones de un modelo se presenten de tal forma que un gran porcentaje de los equipos de aquel modelo se comporten al menos tan bien como se presenta en sus especificaciones. Dado que las especificaciones de todos los equipos de un mismo modelo tienden a distribuirse de forma normal o gaussiana, nos encontraremos, por una parte, que la mayoría de los equipos se comportan mejor de lo esperado y, por otra, que unos pocos equipos no cumplen con las tolerancias especificadas. En este último caso, la garantía del equipo compromete al fabricante a reajustar el equipo sin cargo alguno de reparación.

Pero, ¿qué parámetros definen el comportamiento de un equipo de medida, y cómo los cuantificamos de forma objetiva? Términos como error, tolerancia, precisión, exactitud o incertidumbre se utilizan a menudo con este propósito, pero no siempre se emplean de forma correcta.

1. Error en la medida

En metrología se asume que toda cantidad a medir tiene un valor verdadero. Este valor verdadero es el que se obtendría con un instrumento de medida perfecto. Sin embargo, en metrología también se reconoce que tal instrumento ideal no existe, por lo que el verdadero valor de una medida no se conocerá (si bien nos podremos acercar al mismo tanto como la tecnología y nuestro procedimiento de medida nos permita). Para soslayar esta limitación se recurre al concepto de *valor convencionalmente verdadero*, es decir, el valor de la medida que, a efectos prácticos, se considera como suficientemente próximo al verdadero.

El valor convencionalmente verdadero, o valor nominal, se materializa físicamente en *patrones*. Así, se define como *error de medida* de un instrumento a la diferencia entre la medida obtenida por el mismo y el valor nominal. Por ejemplo, si empleamos como patrón de medida una pesa de 1 Kg de valor nominal, y una balanza indica que su peso es de 0,9 Kg, su error de medida es de 0,1 Kg. Este valor lo podemos expresar en porcentaje relativo al valor nominal, definiéndose así el *error relativo*. En el ejemplo anterior, el error relativo es del 10% $\left(\frac{0,1 \text{ Kg}}{1 \text{ Kg}} \cdot 100 \right)$. En los instrumentos electrónicos de precisión es habitual expresar los errores relativos en *ppm* ó *partes por millón* (1 ppm = 0,0001%).

2. Exactitud y Precisión

Una forma de mejorar la información dada por un instrumento de medida es repetir muchas veces la misma medida en las mismas condiciones. Si el equipo de medida tiene resolución suficiente, nos podemos encontrar que las distintas realizaciones de la medida dan resultados diferentes. La distribución típica de estas medidas recibe el nombre de normal o gaussiana (ver fig. 1). Esta distribución indica que el resultado más probable de la medida es el central (valor medio de todas las repeticiones), si bien existe cierta dispersión

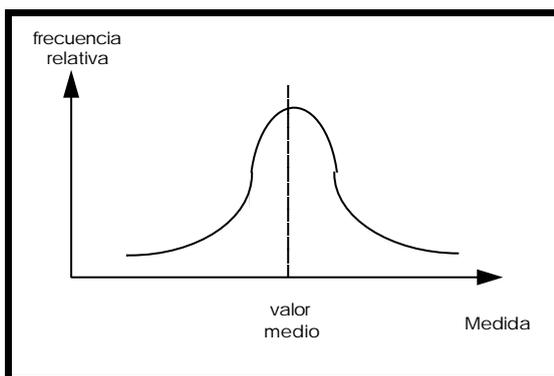


Figura 1

de las medidas en torno a este valor medio; cuanto más alta sea esta dispersión, mayor probabilidad tendremos de obtener un error elevado en una única realización de la medida. En definitiva, el comportamiento de un equipo de medida se define en términos de su *exactitud* y su *precisión*. Un instrumento de medida es tanto más exacto cuanto más próximo está el valor medio de las n medidas al *valor convencionalmente verdadero*. Y el mismo instrumento será más preciso cuanto menor sea la dispersión de estas medidas.

Así, por ejemplo, el lanzador de dardos de la fig. 2 es muy preciso en el caso A, pues es capaz de lanzar los dardos prácticamente al mismo punto. Sin embargo es poco exacto,

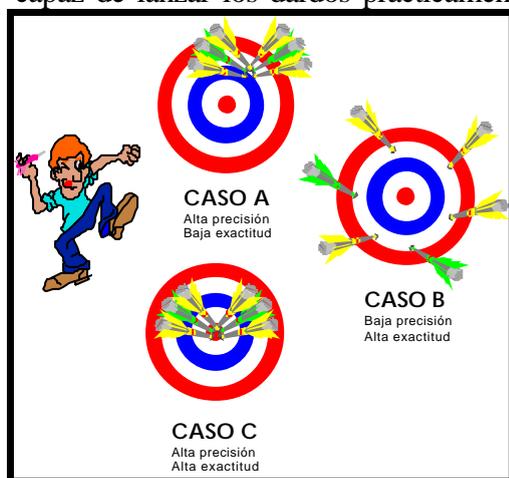


Figura 2

pues este punto está alejado del blanco. En el caso B sucede justo lo contrario: el lanzador está siendo poco preciso (los dardos están muy dispersos) pero, sin embargo, lanza con exactitud pues el punto medio de todos los impactos es justo el blanco. Evidentemente, el caso C es el más interesante, pues reúne precisión con exactitud.

Los instrumentos de medida se diseñan para que sean precisos, y se reajustan periódicamente para que además sean exactos. Cuanto más exacto sea un instrumento preciso, más próximo estará el

resultado de cada medida individual al valor convencionalmente verdadero.

Para finalizar con estos dos conceptos, consideremos los voltímetros de la Fig. 3 cuando

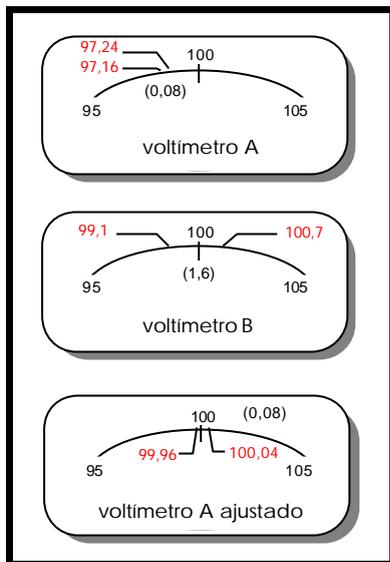


Figura 3

se les aplican 100 V nominales. Las lecturas obtenidas con el voltímetro A se distribuyen entre 97,16 V y 97,24 V, siendo su valor medio 97,2 V. La precisión absoluta del voltímetro A para esta medida es, por lo tanto, de 0,08 V mientras que su exactitud referida al valor nominal es del 97,2% $\left(\frac{97,2}{100} \cdot 100\right)$. Por otra parte, las lecturas

del voltímetro B oscilan entre 99,1 V y 100,7 V, siendo su valor medio 99,9 V. La precisión absoluta del voltímetro B es, por lo tanto, de 1,6 V, y su exactitud del 99,9%. Aunque el voltímetro B sea más exacto, el voltímetro A es mucho más preciso (20 veces más). Ajustando el voltímetro A, o considerando su error sistemático de -2,8 V en la medida de 100 V, obtendremos un instrumento muy preciso y además exacto.

3. Tolerancia

La precisión y exactitud de un equipo determinan perfectamente sus posibilidades de medida. Sin embargo, no todos los equipos de un mismo modelo tienen idénticas precisiones y exactitudes. Además, éstas no se mantienen constantes en el tiempo; lo más normal es que los equipos degraden paulatinamente sus prestaciones (es lo que se conoce como *deriva* de especificaciones en el tiempo). Por ello, se emplea la *tolerancia* como una especificación límite global para todos los instrumentos de un mismo modelo. Así, la tolerancia es el error de medida máximo que se puede esperar dentro de un conjunto de instrumentos con el mismo modelo y durante un periodo de tiempo determinado (típicamente un año). Por ejemplo, una tolerancia del 2% en la medida de 1 A para un modelo de amperímetro, significa que cualquier amperímetro de dicho modelo al que se le aplique 1A nominal en un tiempo no superior al año de ser reajustado, debe presentar una lectura entre 0,98 A y 1,02 A. La Fig. 4 presenta la deriva en el tiempo de dos de estos amperímetros que se reajustan anualmente.

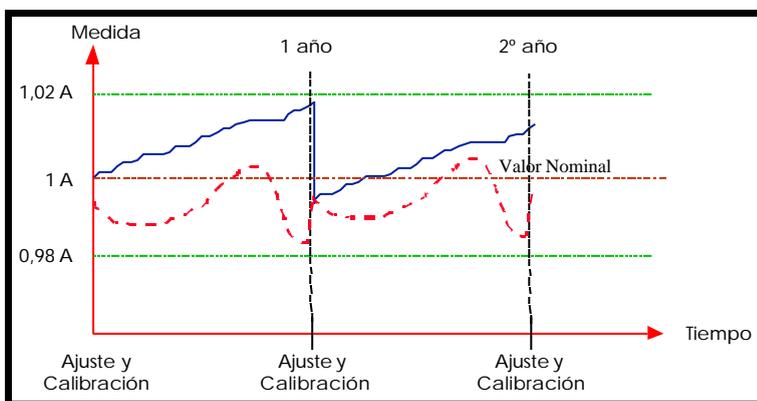


Figura 4

Los fabricantes más prestigiosos prevén que el 99% de los equipos de un mismo lote o modelo cumplirán con la tolerancia que especifican.

Otros fabricantes, para presentar tolerancias más estrechas (especificaciones más vistas) reducen el *nivel de confianza* al 95%.

4. Expresión de la tolerancia en los multímetros digitales

Consideremos a continuación la expresión de la tolerancia en el instrumento más universal para la medida eléctrica: el multímetro digital. Pero para ello, previamente debemos conocer las dos especificaciones técnicas típicas de estos equipos, como son su *resolución* (expresada en *número de cuentas* o *número de dígitos*) y su *rango*. Para

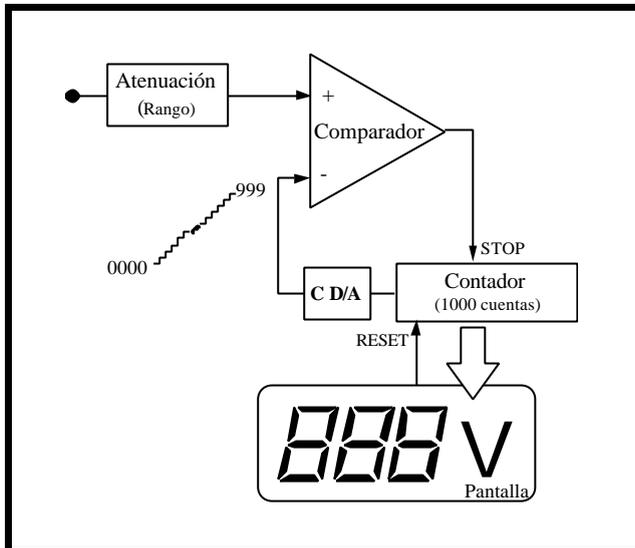


Figura 5

comprender lo que es el número de cuentas y el rango en un multímetro digital conviene recurrir al funcionamiento básico del multímetro, que se resume en la Fig. 5. La tensión de salida del convertidor digital-analógico, CD/A, aumenta a medida que el contador incrementa su cuenta (paso a paso desde 0 hasta un valor final, que define la resolución del multímetro). El contador no se detiene hasta que la tensión de salida del CDA supere a la tensión de la señal a medir (lo que provocará el cambio de estado del comparador. En este momento se detiene la cuenta del contador y su

valor se transfiere a la pantalla. Finalizada la transferencia se comienza una nueva cuenta. Si se llega a la cuenta máxima (por ejemplo, 999) y el comparador no ha conmutado, el circuito de control del multímetro actúa sobre la etapa de atenuación de la señal para acomodarla dentro de los límites de tensión de salida del CDA. Esta etapa inicial tiene varios divisores de tensión que definen los diferentes rangos del multímetro (por ejemplo, el divisor 1:1 para el rango de 100 mV, el divisor 10:1 para el rango de 1 V, el divisor 100:1 para el rango de 10 V, etc.).

La resolución de un multímetro digital es la tensión mínima que puede detectar, y depende de la tensión que asigna el CDA a cada una de las cuentas del contador así como



Figura 6

del rango que se seleccione (ya sea manual o automáticamente). La resolución se obtiene sin más que dividir dicho rango por el número total de cuentas. Por ejemplo, un multímetro digital de 1000 cuentas tiene una resolución de 1 mV en el rango de 1 V. Además del número de cuentas, otra forma muy típica de especificar la resolución de un multímetro digital es a partir de su número de dígitos (ver Fig. 6). Así, un multímetro de 3 dígitos tiene un contador de 1000 cuentas pues con 3

dígitos se puede contar desde 000 hasta 999. Un multímetro de 4 dígitos dispone de un contador de 10000 cuentas (0000 hasta 9999). Un multímetro de 2000 cuentas (0000 a

1999) tiene un contador de 3 ½ dígitos, pues el dígito más significativo (el que está a la izquierda) sólo puede valer 0 ó 1. En la fracción m/n de este convenio, m expresa el máximo alcance del dígito más significativo, y n su número de estados diferentes. Por ejemplo, en un multímetro de 3 ¾ dígitos (4000 cuentas) el dígito más significativo puede llegar a valer como máximo 3 y puede tener 4 estados distintos (0, 1, 2, y 3).

Conociendo el significado del rango y la resolución de un multímetro, se está en condiciones de entender la expresión de sus especificaciones.

Las *especificaciones primarias* de un multímetro digital se refieren al comportamiento básico del equipo, y pueden constar de hasta tres componentes:

- Un término proporcional a la señal a medir
- Un término proporcional al rango (también llamado *escala o alcance*)
- Un término fijo o *suelo*. Equivale al ruido presente en todo equipo de medida.

Así, por ejemplo, se puede especificar la tolerancia primaria de un modelo de multímetro de 4 ½ dígitos (20.000 cuentas) de la siguiente forma:

Rango	Resolución	% de la lectura	% del rango	Ruido
1 V	50 µV	± 0,05	± 0,02	
10 V	500 µV	± 0,07	± 0,05	±100 µV
100 V	5 mV	± 0,1	± 0,05	

Tabla 1

De tal forma que el error primario máximo en estos multímetros para la medida de 4 V (rango de 10 V) se calcula como:

$$\text{error primario} = \pm (0,07/100 \cdot 4V + 0,05/100 \cdot 10V + 100 \mu V) = \pm 7,9 \text{ mV}$$

Las *especificaciones secundarias* modifican a las primarias estableciendo, por una parte, el intervalo de validez temporal de éstas últimas (o bien, su deriva con el tiempo) y, por otra, definiendo el comportamiento del equipo con la temperatura. Así, en el caso del multímetro del ejemplo, la especificación secundaria para la temperatura podría ser:

Margen de temperatura: 18 °C a 28 °C
 Coeficiente de temperatura: 0,005% de la lectura/ °C

que indica que las especificaciones primarias son válidas siempre que la medida se realice en el margen de temperaturas de 18°C a 28 °C, de tal forma que si la medida de 4V se realiza a 38°C, al error primario de ± 7,9 mV habría que añadirle el error secundario

$$\text{error secundario} = 0,005/100 \cdot 4V \cdot (38 -28) = 2 \text{ mV}$$

Por último, las *especificaciones terciarias* corresponden al entorno de medida más que al propio equipo de medida. Son ejemplos de especificaciones terciarias las que definen el comportamiento del equipo con la carga a medir, la tensión de alimentación, la altitud, humedad, etc. Un ejemplo de especificación terciaria sería el siguiente:

Tensión de alimentación: 6 V a 12 V
 Coeficiente de corrección: 0,3% de la lectura/ V entre 4 V-15 V

que indica que las especificaciones primarias del multímetro son validas para tensiones de alimentación entre 6 y 12 V. Si el multímetro se alimenta a 4 V, hay que considerar un error terciario adicional en la medida de $0,3 \cdot (6-4) \% = 0,6\%$ de la lectura.

En la Fig. 7 se presentan las gráficas de tolerancias primarias, secundarias y terciarias vistas en este ejemplo (Para una mayor claridad se ha exagerado la contribución de cada error)

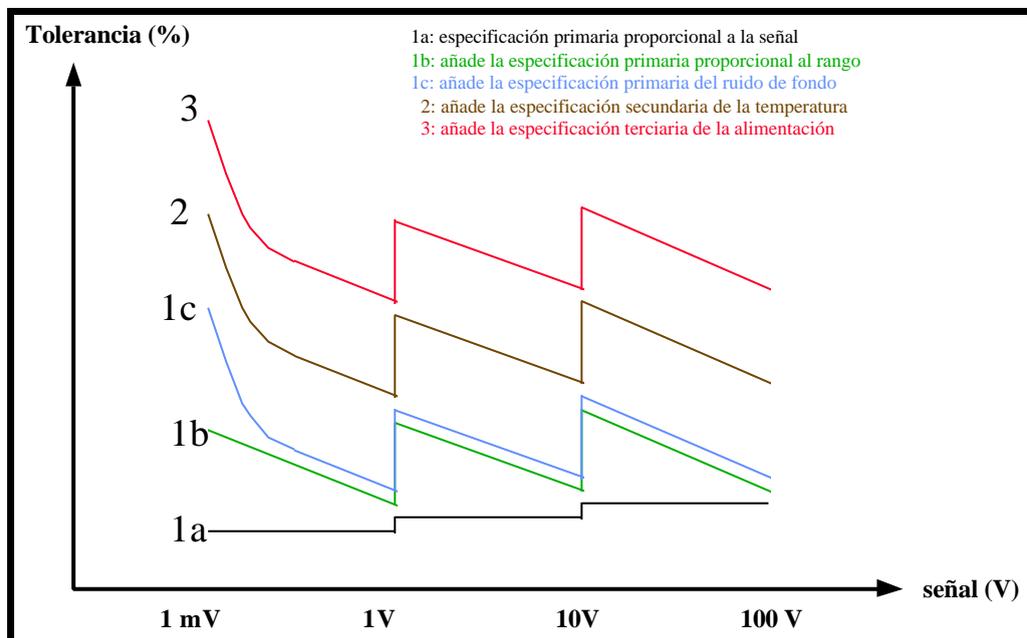


Figura 7

Como se puede ver, la contribución del rango (gráfica 1b) hace que el error de medida sea menor cuanto más próxima esté la señal a medir al fondo de escala. Por otra parte, el error de suelo (gráfica 1c) sólo es apreciable para las medidas de muy baja tensión. Los errores secundarios y terciarios (gráficas 2 y 3) deben considerarse siempre, pues en ocasiones pueden ser incluso más importantes que los primarios.

4. Incertidumbre de una medida

Según el *Vocabulario Internacional de Metrología*, VIM, la incertidumbre de una medida es *una estimación que caracteriza el rango de valores en el cual se sitúa el verdadero valor de una magnitud de medida (VIM 3.9, 1984)*

Dado que los instrumentos de medida no son perfectos, siempre habrá incertidumbre sobre la veracidad de las medidas que proporcionan. Cuando una balanza indica que el peso de una persona es de 75 Kg, sabemos que no tenemos la certeza de que éste sea el peso real de la persona. Dependiendo de la precisión y exactitud de la balanza podemos *estimar* que el peso real está en un entorno más o menos próximo a 75 Kg.

Es por esto que los metrologos recomiendan expresar una medida no sólo por un único valor, sino por el intervalo de valores que con una alta probabilidad contiene el valor verdadero de la magnitud. En el caso del ejemplo anterior, el verdadero peso de la persona se encontrará probablemente dentro del intervalo [73 - 77] Kg. La notación que se recomienda emplear para presentar este intervalo es (75 ± 2) Kg, es decir, $(C \pm i)$ donde C es el valor central del intervalo e i la incertidumbre de la medida.

Para calcular con precisión la incertidumbre de una medida se debe tener en cuenta todos los factores que afecten al proceso de medida. Generalmente, los factores más importantes a considerar son:

- 1- Especificaciones del instrumento de medida
- 2- Método de medida. Por ejemplo, en la medida a dos hilos de una resistencia de $0,5 \Omega$, se deberá tener en cuenta la propia resistencia de los dos hilos (ver figura 8). Esta resistencia se puede medir (y ser, por ejemplo, de $0,1 \Omega$ por hilo), pero la incertidumbre en su medida afectará a la incertidumbre final en la medida de la resistencia de $0,5 \Omega$.
- 3- Condiciones ambientales. Que influyen en las prestaciones del equipo de medida
- 4- Operador. La contribución del operador a la incertidumbre de la medida es especialmente significativa cuando debe realizar lecturas en equipos analógicos (voltímetros de agujas, lecturas sobre tubos de rayos catódicos, etc.)

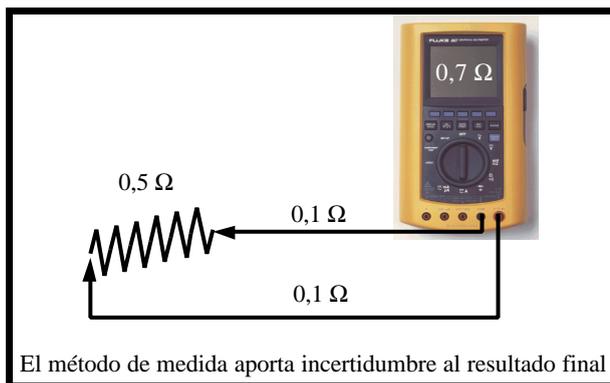


Figura 8

El efecto de todos estos factores se puede cuantificar y minimizar en un Laboratorio de Metrología. Allí se mantiene controlado y prácticamente constante el entorno ambiental, se cuenta con equipos muy precisos y periódicamente calibrados y, además, si existe variabilidad en la medida, se puede repetir n veces la misma para hacer un análisis estadístico de los resultados obtenidos.

Sin embargo, cuando se trabaja en campo la situación es muy diferente. En campo no es posible, o no es práctico, cuantificar con tanto rigor el efecto de cada uno de estos factores. En este caso lo aconsejable es considerar sólo aquellos factores que aportan la mayor parte

de la incertidumbre al resultado final de la medida. En efecto, si los factores que aportan incertidumbre en una medida son independientes, la incertidumbre final de dicha medida se calcula a partir de una suma cuadrática (raíz cuadrada de las componentes al cuadrado), y los términos más pequeños (aquellos que están en una proporción 1:4 con respecto al mayor de los factores) son despreciables. Por ejemplo, si para medir una resistencia eléctrica empleamos un multímetro cuya tolerancia es de $\pm 0,4 \Omega$, y el método de medida aporta una incertidumbre de $\pm 0,1 \Omega$, este último factor es despreciable a efectos de cálculo de incertidumbre, que podríamos aproximar a $\pm 0,4 \Omega$.

5. Calibración de la instrumentación de medida. T.U.R.

Calibrar un instrumento de medida supone comparar sus mediciones con las de otro instrumento de referencia o *patrón*, estableciendo la validez de las indicaciones del instrumento en calibración frente al de referencia. Para que la calibración sea efectiva, es

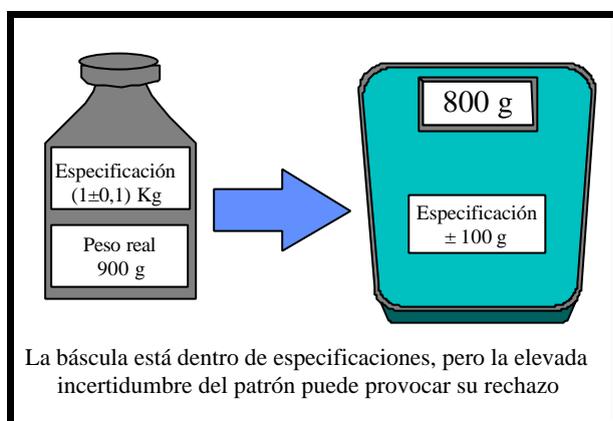


Figura 9

necesario que la incertidumbre del patrón sea menor que la incertidumbre del instrumento que se pretende calibrar. Si se quiere calibrar una báscula de la que se especifica una incertidumbre de ± 100 g, con una pesa patrón de 1 Kg que tiene también una incertidumbre de ± 100 g, podría suceder que aunque la báscula esté dentro de especificaciones, su lectura fuera de 800 g. Esta desviación de 200 g con respecto a la lectura esperada de 1 Kg, nos haría rechazar el báscula por defectuosa (ver figura 9). La relación entre la incertidumbre del equipo a calibrar y la incertidumbre del patrón, calculadas ambas para el mismo nivel de confianza, recibe el nombre de *T.U.R.* (Test Uncertainty Ratio).

$$T.U.R. = \frac{\text{incertidumbre del equipo a calibrar}}{\text{incertidumbre del patrón}}$$

Para garantizar una calibración certera, el T.U.R. debe ser por lo menos de 4, aunque este valor puede variar dependiendo de los requerimientos de fiabilidad. En efecto, estadísticamente se puede demostrar que con un T.U.R. de 4, la probabilidad de dar por válido un equipo que realmente está fuera de especificaciones es tan solo del 0,15%.

La relación T.U.R. proporciona un buen criterio de partida a la hora de seleccionar el instrumento adecuado para una medida.

6. Conclusiones

Las especificaciones de los equipos de instrumentación pueden presentarse de muy diferentes formas pero, en cualquier caso deberán ser, por una parte, lo suficientemente completas para poder anticipar la aptitud del instrumento en las diferentes condiciones de uso y, por otra, fáciles de usar e interpretar.

La *precisión* y *exactitud* de un instrumento de medida determinan cuantitativamente su comportamiento, aunque estas especificaciones sólo se detallan en los equipos de medida de más altas prestaciones. El comportamiento global de un conjunto de equipos se presenta en términos de *tolerancia*. El fabricante puede expresar la tolerancia como el error máximo posible en cualquiera de los instrumentos de un mismo lote o modelo, aunque habitualmente especifica la tolerancia en términos del comportamiento estadístico de las muestras seleccionadas durante el control de calidad de su producción.

El resultado de una medida se debe expresar mediante un intervalo que a priori pueda contener su verdadero valor con una cierta probabilidad. El intervalo se define en términos de *incertidumbre* de la medida, siendo esta incertidumbre un valor que se puede acotar tanto más cuanto mejor se cuantifiquen todos los factores que intervienen en el proceso de medida. En este sentido se han promulgado recomendaciones y normativas (INC-1 1980, WECC-19, etc.) que sirven de guía para la expresión de la incertidumbre. Estas normativas son aplicables tanto al entorno controlado de un laboratorio, donde se puede incluso repetir una medida para realizar un análisis estadístico de los datos obtenidos, como al entorno mucho más variable de una planta industrial, donde generalmente contaremos sólo con una medida y las especificaciones del instrumento para estimar la incertidumbre. En este último caso es conveniente contar con equipos especialmente diseñados para medir en campo, con especificaciones válidas para diferentes condiciones ambientales y de medida.

A la hora de calibrar o verificar un instrumento de medida es necesario emplear un *patrón* con al menos una incertidumbre cuatro veces inferior a la propia del equipo a calibrar ($T.U.R. = 4$). De esta forma prácticamente evitaremos que equipos que estén fuera de especificaciones sean dados como buenos. Esta proporción es especialmente recomendable en las calibraciones hechas en campo a partir de una sola medida.