

# Indeterminación e incertidumbre

Rafael Aparicio Sánchez<sup>1</sup>

Usualmente se han hecho varias distinciones bastante radicales entre la mecánica clásica y la mecánica cuántica. Una de ellas, consiste en considerar que en la escala macroscópica, los “errores” derivados de la medición son descartables por ser prácticamente nulos o debidos únicamente a cuestiones tecnológicas, mientras que a escalas cuánticas, dichos “errores” no son descartables por ser del orden de magnitud de los objetos que se están midiendo. Pero no es más que una interpretación desde el punto de la *teoría pura*, que es ideal y encierra algunas cuestiones paradójicas si tratamos ambas escalas desde el punto de vista que se encarga de las mediciones: la *metrología dimensional*.

En la física clásica admitimos que cualquier variable dinámica de un sistema pueda ser especificada y medida con precisión arbitraria. Esto no significa que efectivamente podamos hacerlo en la práctica; significa más bien que no admitimos la existencia *en principio* de un límite, cualquiera que sea, para la precisión. El conjunto de las variables dinámicas de la física clásica incluye variables tales como las coordenadas de posición, las componentes del impulso, las componentes del momento cinético, etc., para un sistema de partículas o una sola partícula, igual que variables tales como las componentes de los vectores de los campos eléctrico y magnético en un punto dado del espacio y en un instante dado.

Un análisis cuidadoso del comportamiento real de los sistemas microfísicos prueba, sin embargo, que existe un *límite fundamental* para la precisión con la que tales variables pueden especificarse y medirse. El análisis, muy penetrante y elegante, mediante el cual se estableció este límite fue llevado a cabo por W. Heisenberg en 1927. Nos referimos a la existencia de tales límites cuando hablamos del *principio de indeterminación*; una expresión específica cuantitativa de este principio en un caso particular cualquiera se conoce con el nombre de *relación de indeterminación*.

(...)

Si ahora analizamos los procedimientos de medición que realmente se siguen en microfísica, resulta que una medición siempre *perturbará* al sistema; existe una interacción característica inevitable entre el sistema y el aparato de medida.

Física Cuántica. Berkeley Physics Course, vol. IV. Eywind H. Wichmann.

El "*principio de incertidumbre*" ha sido denominado de este modo debido a una mala traducción de los términos utilizados originalmente por Heisenberg (*unbestimmtheit / unsicherheit*) al inglés "*uncertainty*". Aunque en el marco de la mecánica cuántica ambos términos, indeterminación e incertidumbre, son equivalentes, tenemos que observar que uno de ellos desvía dicho matiz a cuestiones filosóficas (*indeterminación*) mientras que el otro hace referencia a cuestiones técnicas (*incertidumbre*). Centrándonos en esta, en la incertidumbre, tal y como se había dicho, en mecánica clásica intervención observacional se supone y considera que la perturbación no tiene un límite inferior, y que además *toda magnitud sería calculable si se le resultaba la perturbación al resultado, pudiendo separar objeto y sujeto*. Dicha perturbación “despreciable” lo es en la teoría en la que el mundo está formado por objetos perfectos, pero en el mundo real, en el de los objetos reales, el *estudio de la incertidumbre de medida es objeto de la metrología*, ciencia que tiene por objeto *el estudio de los sistemas de pesas y medidas*. En esta, **la incertidumbre no es un mínimo reductible**

---

<sup>1</sup> Ingeniero Técnico Industrial por la EUITIV.  
Especialista Profesional Superior en Metrología por IMPIVA.

(en el mundo macroscópico) **ni separable, no siendo calculables todas las magnitudes medidas** y no siendo un problema de “precisión”.

Para terminar de complicar las cosas, Heisenberg indica que en una conversación con Albert Einstein, este le indicó que en la medida era necesaria la conciencia, que sería la que interpreta los resultados. Tanto a nivel cuántico como a nivel macroscópico, la medida necesita del observador. Pero lo que interfiere es el *observador*, no su *conciencia*. No es necesario llegar tan lejos, como no llega tan lejos la metrología cuando atribuye al *observador* parte de responsabilidad en la incertidumbre de medida. Por ejemplo, si una barra está en el suelo y le cae por azar una regla de medida, y uno de los bordes cae exactamente en el cero, y el otro borde exactamente en el valor de 1 metro, y NADIE está allí para observar el fenómeno, no se produce medición. Pero no es preciso apelar a la conciencia, sino simplemente a un observador que pueda interpretar la medida, y poco más. Si la mecánica clásica utilizara los mismos criterios que la mecánica cuántica cuando habla del observador y la conciencia de este, las paradojas también serían objeto de lo macroscópico.

Solo la teoría decide sobre lo que se puede observar. Mire, la observación es, en general, un proceso, sin duda alguna, muy complicado. El proceso que debe ser objeto de observación provoca determinados incidentes en nuestro aparato de medición. Como consecuencia de este hecho se desarrollan luego en el aparato ulteriores procesos, los cuales finalmente, por medio de rodeos, graban la impresión sensible y la fijación del resultado en nuestra conciencia. A lo largo de todo el camino desde el proceso hasta la fijación de nuestra conciencia, debemos saber cómo funciona la naturaleza; debemos conocer, al menos en la práctica, las leyes de la naturaleza, si pretendemos afirmar que hemos observado algo. Sólo la teoría, esto es, el conocimiento de las leyes naturales, nos permite, en consecuencia, argumentar, a partir de la impresión sensible, sobre el proceso subyacente en el fondo. Si se afirma que algo puede observarse, debería decirse para mayor exactitud “aunque nos dispongamos a formular nuevas leyes naturales que no concuerdan con las actuales, suponemos sin embargo que las presentes leyes naturales, en la vía que va desde el proceso que hay que observar hasta nuestra conciencia, **funcionan con tanta exactitud** que nos podemos con razón fiar de ellas y, por tanto, podemos hablar de observaciones”. (Einstein, citado por Heisenberg). *Heisenberg, Bohr, Schrödinger. Mecánica Cuántica*. (El remarcado es mío).

Según la metrología, la **incertidumbre de medida** es “*el valor estimado de la extensión que cubren todos aquellos valores que pudieran ser el verdadero valor de una magnitud*”. También puede definirse como “*la cota superior de la corrección residual*”, que será un valor mínimo. Según el Vocabulario Internacional de Metrología (VIM), la incertidumbre de medida es “*un parámetro, asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que razonablemente podrían ser atribuidos al mensurando*”. De este modo, se puede concebir que una medida pueda quedar sin corrección, o no recibir una corrección nula. Decir que no hay medida sin incertidumbre es renunciar al concepto de *valor verdadero*. **Dicho valor verdadero, si es que existe en el mundo macroscópico, no puede ser conocido por medio de una o de muchas medidas**. A lo máximo que se puede llegar con una serie de medidas es al establecimiento de *indicios razonables de su presencia dentro de un intervalo más o menos amplio de valores de su magnitud*. Sea cual sea la magnitud a medir, **SIEMPRE existirá un intervalo de incertidumbre, y por tanto un valor mínimo para la interacción entre los instrumentos de medida (y el propio proceso de medida)**, exactamente igual que se enuncia en la mecánica cuántica. Esto es como indicar que da lo mismo que se hable del mundo cuántico que del mundo macroscópico: *SIEMPRE existirá interferencia entre el objeto a medir y la medida*. Si bien no viene derivado por el principio de continuidad que la mecánica cuántica niega, también existe dicho valor mínimo, y nos va a servir para esclarecer un poco más los problemas de la medición comunes tanto a escalas macroscópicas como cuánticas. De hecho, admitir que la

precisión es infinita y el intervalo de incertidumbre es nulo, conlleva evidentemente a percibir un mundo ideal en el que no existiría la cuantización, y por tanto, e independientemente del intervalo de Indeterminación de Heisenberg, a la negación de la mecánica cuántica. Así, **cuando en mecánica cuántica indicamos que la “perturbación no es despreciable”, tenemos que tener en cuenta que en la mecánica “clásica” TAMPOCO lo es.**

La incertidumbre en mecánica clásica vendría derivada de muchos componentes, siendo algunos de ellos estimables partiendo de la distribución estadística de los resultados de series de mediciones y que pueden expresarse mediante la desviación típica muestral. La estimación de otros componentes solo puede realizarse en base a la experiencia o en informaciones de otros tipos. De hecho, lo que sí que puede eliminarse y que no hay que confundir, es el “*error*” del equipo de medida. *La incertidumbre de medida, omnipresente, no.*

La cámara de niebla es un aparato de medición, o sea, podemos concluir unívocamente por esta fotografía que una partícula con carga positiva (que tiene además las propiedades de un electrón) ha pasado a través de la cámara. Hemos de apoyarnos para esta deducción en que el aparato de medida estaba construido correctamente; que estaba atornillado con firmeza a la mesa; que además, la cámara fotográfica estaba tan firmemente montada que no pudieron producirse desplazamientos durante la toma de fotografías; que la lente tenía el enfoque adecuado, etc.; es decir, **hemos de estar seguros de que se cumplían todas las condiciones que, según la física clásica, tienen que cumplirse para una medición exacta**. Pertenece a los presupuestos fundamentales de nuestra ciencia hablar sobre nuestras mediciones con un lenguaje que en lo esencial tiene igual estructura que el que utilizamos para expresar las experiencias de la vida diaria. Hemos. (Niels Bohr, citado por Heisenberg). *Heisenberg, Bohr, Schrödinger. Mecánica Cuántica.*

El remarcado y subrayado es mío. Se pueden realizar mediciones con un *instrumento defectuoso*, si el defecto es conocido y corregido. Si el instrumento da una medida **errónea**, y se conoce dicha corrección, realizada esta, la medida está libre del error. La cuestión importante es que **todo instrumento de medida REAL es defectuoso, es decir, en el mismo instante en que se piensa en un equipo de medida no ideal, tiene asociada una incertidumbre**. Por ejemplo, NO EXISTEN metros de 1000.0000... milímetros, donde “...” representaría una serie INFINITA de ceros. Si existieran, la materia sería continua y se eliminaría incluso el carácter atómico de la materia anunciado por Demócrito. De modo simple, **TODA medida, necesita de alguna corrección**. Siguiendo este razonamiento hasta sus últimas consecuencias, surge de modo simple el concepto de incertidumbre. **En el momento dejamos de corregir, bien sea por cuestiones técnicas, o por cuestiones tan simples como que el mundo está compuesto por elementos no perfectos, aparece la incertidumbre**. De este modo, la corrección que se aplicaría a cualquier medida necesitaría de una corrección a su vez, y esta a su vez otra corrección... y el único modo de abandonar el bucle es cortar donde más nos convenga, o donde nos permita la realidad. Esto, supone dejar de considerar, bien sea a través de cálculo o de medida, una “*corrección residual*” desconocida pero acotada hasta cierto punto. La incertidumbre sería pues, *la medida a una cota superior del valor de dicha corrección residual*. Así, *la corrección es un valor desconocido* y para considerarlo acotado deberíamos de apoyarnos en la intuición, de tal modo que la suma total de la lectura inicial más todas sus correcciones con sus signos, convergería hacia un valor ideal que podríamos introducir en nuestros conceptos como el “*valor verdadero*” de la magnitud medida. Pero ojo: incluso la mejor estimación del intervalo de incertidumbre está afectado por el cálculo estadístico, y aunque sea improbable, la medida podría estar incluso fuera del intervalo de incertidumbre, eso sí, con una baja

probabilidad (del orden de 0,01% o inferior en los cálculos habituales del intervalo de incertidumbre de medida).

Por la forma en la que se define y obtiene, dicho valor verdadero, *si es que existe* –y no olvidemos que estamos hablando de mecánica clásica– es como si no existiera, puesto que no podríamos identificarlo. Sin embargo, es un valor muy importante puesto que su entidad física sería equivalente a la de un instrumento de medida perfecto.

Con todo lo anterior, **la definición de la Incertidumbre de medida –en la mecánica clásica– sería el valor de la semi-amplitud de un intervalo del mejor valor disponible (el valor mejor corregido) para el resultado de la medida.** Dicho resultado representaría una estimación plausible (ni demasiado arriesgada ni demasiado prudente) de una zona de valores del mensurando, entre los cuales es “casi seguro” que se encontraría el valor verdadero.

En principio, parecería que depende solo del metrologo elegir el momento de detención del proceso de correcciones sucesivas y dejar que la corrección residual se convierta en la incertidumbre de medida, pero no es así, puesto que en la práctica **es muy frecuente que el proceso se agote a causa de la imposibilidad de calcular nuevos valores para la corrección, por falta de datos suficientemente fiables.**

Usualmente, el criterio de *detención voluntaria* es económico: cada corrección supone un gasto de tiempo y un coste monetario que puede no estar justificado según la magnitud de la medida. En ese caso se equilibran los parámetros de calidad y el riesgo. Cabe incluso la posibilidad de detener el proceso en el primer paso, es decir, no corregir la lectura bruta del equipo de medida, si bien esto no indicará que no existe incertidumbre de medida, sino que no se tiene en cuenta, con los “riesgos” derivados de la medición con intervalos de incertidumbre desconocidos. Así, *el valor de la incertidumbre de medida sería un primer índice de la “bondad” de una medida, que sería tanto mayor cuanto menor sería aquella.* Este primer índice no es definitivo en principio.

En la práctica, en la industria, el factor determinante es el *intervalo de tolerancia* impuesto. Igual que la incertidumbre, la tolerancia es un intervalo de valores del mensurando que no debe ser confundido con el anterior. Así, *la tolerancia sería intervalo de una magnitud establecida mediante criterios objetivos, entre los cuales debe encontrarse el verdadero valor de la magnitud para que el producto pueda ser aceptado como válido.* El valor verdadero, como se ha dicho, *se encontraría con un porcentaje de seguridad elevado en algún lugar del intervalo de incertidumbre, de modo que habrá un mayor grado de certeza cuando este intervalo se encuentre DENTRO del intervalo de tolerancia.* Por el mismo motivo, lo que nos indicará que el valor verdadero no estará dentro de la tolerancia exigible es que ambos intervalos carezcan de parte común. Y por último, cuando los intervalos de tolerancia y de incertidumbre se solapan en parte, y en otra parte no, no se podrá afirmar ni negar la validez del producto, en cuyo caso estaríamos hablando de probabilidades sin tener reglas de actuación, por lo que sería un camino desechable.

Las causas de la incertidumbre pueden representarse con una experiencia sencilla: medidas repetidas con un equipo, en condiciones aparentemente idénticas, darían un conjunto de resultados diferentes. En los equipos digitales, si la resolución (o el número

de dígitos legibles de este) es menor, no se apreciará dicha variación. En los equipos analógicos o aquellos que tengan una mayor resolución, se verificaría sencillamente este hecho. Si mediciones idénticas repetidas arrojan resultados diferentes, incluso aunque se hicieran las correcciones que se consideren necesarias, nos dan el primer indicio de la *inutilidad práctica de llamar “resultado” o “valor verdadero” a alguno de los obtenidos*. Intuitivamente, se puede apreciar que el valor verdadero citado se encontraría en el centro de las fluctuaciones de las mediciones, por lo que **se suele buscar algún indicador de tendencia central del conjunto de resultados**. Pero estudios posteriores han dado como resultado *tener que desechar ningún valor como el verdadero y reconocer el índice que se exija para la tendencia central, simplemente como “el mejor valor” del mensurando*, si bien es cierto que dicho valor verdadero se encontraría bastante próximo al obtenido. Así, cuanto menor sea la dispersión de los resultados, más motivos habrá para aceptar la deseable proximidad entre el mejor valor y el valor verdadero, si bien no tendremos NUNCA la seguridad de que sea así.. De este modo podemos deducir (intuitivamente aún) que primero se elige algún tipo de promedio de resultados como *el mejor valor*, y se le asocia con *el valor verdadero*, y luego se elige un *índice de la dispersión de las medidas* que merezca identificarse con la incertidumbre de medida (usualmente denotada como I), para lo cual es necesario que se trate de un intervalo de valores del mismo carácter que el mensurando y que a todos los efectos representaría un margen que cubriera TODAS las posibilidades de error que se nos puedan ocurrir, eso sí, con un grado de seguridad estadística. Así habría un valor verdadero o similar que se parecería lo suficiente a este, y que sería “*casi seguro*” que estuviera entre el intervalo del valor medio sumándole el intervalo de incertidumbre I y el valor medio restándole dicho intervalo (valor medio  $\pm$  I)

Hasta aquí, todo resulta relativamente sencillo. Ahora solo faltaría establecer la forma matemática adecuada que expresara lo que se acaba de comentar. Pero dichas formas matemáticas están afectadas por *la probabilidad*. De todas las distribuciones posibles de probabilidad, si pudiéramos hacer infinitas mediciones, obtendríamos diferentes funciones de probabilidad. La usualmente utilizada es la curva de gauss, si bien *no es absolutamente necesario que así sea*. También la tendencia central es lógico pensar que podría ser la media aritmética. Pero como podemos comprobar, estamos entrando en el terreno de la estadística y la probabilidad, y no tan alejados de la mecánica cuántica en su supuesto de que la medida puede ser siempre medida (valga la redundancia) con exactitud. Se da el caso de que UNA SOLA MEDIDA está afectada de efectos estadísticos si tratamos con objetos del mundo real y por tanto no perfectos. Los resultados de una medida puede ser que fluctúen por causas **imposibles de predecir**, explicar o controlar (que son las más), y que no pueden ser corregidas, no atribuibles todas ellas a aspectos puramente técnicos.

El proceso por medio del cual se estima estadísticamente la incertidumbre de un equipo de medida, se denomina *calibración*. Supongamos un instrumento de medida tan sencillo como un metro, con una resolución (valor medible) de 1 milímetro. Para verificar que el metro funciona correctamente, habría que utilizar bloques patrón para cada una de las mediciones (o combinaciones de estos) e ir verificando todos y cada uno de los puntos, desde el 1, 2, 3... hasta el 100. El proceso sería demasiado costoso en tiempo y en medios, por lo cual lo más eficaz sería realizar mediciones en diferentes puntos de la escala de medida del equipo, estableciendo un intervalo de incertidumbre estadístico en base a estos. Pero aún así, *se arrastraría el intervalo de incertidumbre de los bloques patrón, del proceso de medida y de los límites autoimpuestos*. Estos tienen

diferentes clases en función de su “precisión” y su menor intervalo de incertidumbre. Pero tal y como estamos indicando, siempre nos quedaría un “*margen de duda*”. En dicha calibración, se obtienen por ejemplo en uno de dichos métodos, la media y la desviación típica estándar como bases para el cálculo del valor medio y la incertidumbre. Usualmente se le aplica un valor de 3 veces la desviación típica, con lo cual tendríamos una *alta probabilidad de que el valor verdadero estuviera dentro de dicho intervalo (tal y como se dijo anteriormente) pero jamás la certeza absoluta*.

En la industria (en el mundo real), un modo adecuado para comprobar si los resultados son útiles y prácticos, es comprobar la *relación entre la Tolerancia establecida para el producto, la Incertidumbre obtenida a través del proceso de calibración o con la información que se posea, y la División de la escala*. Con la relación de la incertidumbre y la división de escala, se obtendrían valores de medidas sencillas o de precisión. Así,

$\frac{I}{D} \leq 1$ , daría lugar a una medida sencilla y  $\frac{I}{D} > 1$  daría lugar a una medida de precisión.

Si la relación anterior fuera mayor de 10, el instrumento tiene una división de escala exagerada (le sobraría un dígito). Saltando en cierto modo a la mecánica cuántica, nuestra división de escala corresponde a la menor cantidad de energía que sería el cuanto de acción. Y el único modo de medirlo, sería con ese mismo límite. Obtendríamos una medida sencilla, si fuera posible. Pero además tenemos la restricción impuesta por la Indeterminación de Heisenberg.

Existen otras relaciones como por ejemplo la relación entre la *Tolerancia y la Incertidumbre de medida*. En ese caso, la falta de precisión en la medida puede dar lugar a la aceptación de una cierta cantidad de productos que estarían fuera de tolerancia, o el rechazo de una cierta cantidad de productos que se encontrarían dentro del intervalo de tolerancia. En la práctica se opta por un criterio de seguridad que consiste en *rechazar cualquier mensurando en situación dudosa*, lo que resulta adecuado siempre que el intervalo de incertidumbre sea varias veces inferior al de tolerancia. Esto equivale a definir como intervalo de decisión para los valores medidos el correspondiente a:  $T - 2I$  (tolerancia efectiva), limitando el valor del cociente de ambos intervalos (tolerancia e incertidumbre). En medidas dimensionales, suele ser frecuente considerar admisible:

$$3 \leq T / 2I \leq 10$$

Esto, en cuanto a aquellos valores que se pueden controlar.

Si ahora recapitulamos un poco sobre lo dicho, podemos observar que la Escuela de Copenhague nos indicaba en el postulado cuántico en sentido restringido *la indivisibilidad de los procesos atómicos como consecuencia de la aplicación del cuanto de acción*. En sentido general supone el *abandono del principio de continuidad*, según el cual la naturaleza no da saltos. Esto, según dicha Escuela, conllevaría a modificar el concepto de *observación* puesto que la ciencia presuponía que los sistemas físicos evolucionan independientemente del observador, y así es cuando no se interfiere en este. El sujeto **observador** (y no la **conciencia**) podía dar razón de cómo el objeto era en sí mismo en el espacio y en el tiempo. *La ciencia natural moderna es realista*, acepta el

principio de *causalidad*, y debido a ello el principio de *determinación*. Para conocer la evolución de un sistema físico había que presuponer que el sistema estaba *cerrado*, es decir, que la medida no afectaría al estado del sistema. ¿Pero era así? Teóricamente y siempre desde el punto de vista de la Escuela de Copenhague, en mecánica clásica sí, **en cuántica no**. Pero esto, como hemos anotado, no es cierto ni en la mecánica cuántica, ni en la mecánica clásica. Los motivos por los que se indicaba esto, era porque en mecánica clásica, *toda intervención observacional se consideraría infinitamente reductible*, con límite tendiente a cero, no habiendo límite inferior de la cantidad de perturbación observacional (lo cual es incierto) y además toda magnitud sería calculable, pudiendo restar la perturbación del resultado (lo cual también lo es), y por lo tanto habría separación entre objeto y sujeto, separación que solo es posible teóricamente pero jamás prácticamente, como nos muestra la metrología. Además de que **la perturbación sería despreciable** ya que se trabajaría con *objetos grandes*, lo cual es de nuevo, incierto.

Así, cuando se dice que solo en la mecánica cuántica, el postulado cuántico negaría el *principio de continuidad*, y por tanto existiría **un valor mínimo** para la interacción entre instrumentos y propiedades (y el límite no tendería a cero), lo que nos viene a decir es que esta interacción **no es infinitamente reductible porque es discreta**. No es, por tanto, calculable y deducible ni separable del resultado, no se puede conocer ANTES de la medición, lo cual es el verdadero problema de la indeterminación, y **el objeto y el sujeto formarían un todo indivisible**, en cuanto a la medición se refiere. Además, **al tratarse de órdenes de magnitudes equiparables, la perturbación no sería despreciable**. Pero otro tanto ocurre en la mecánica clásica, concretamente en la medición macroscópica: si bien los valores cuánticos pueden ser despreciables, aunque realmente no exista la continuidad, se puede considerar como un todo continuo, pero no se puede considerar que no existe un valor mínimo para la interacción entre los instrumentos.

El centro del **debate Einstein-Bohr** era que *aun cuando hubiera una realidad que la observación perturbara, habría un objeto anterior a los sujetos y a sus observaciones*; además, por lógica se planteaba que: *o había un planteamiento físico que nos permitiera acceder a los objetos con independencia de la medida, o lo que medimos es lo que es*. Este segundo planteamiento era criticado por Einstein y aceptado por la escuela de Copenhague. *Toda descripción objetiva debería incluir la referencia a las condiciones mismas de la observación*. Éstas son puestas en juego por la voluntad de los investigadores. Esto llevaría, según ese razonamiento, a *revisar el concepto de objetividad*. Bohr decía que la interacción fijaría un límite absoluto. Todo esto plantea un problema epistemológico de primera magnitud. ¿Sigue valiendo el aparato categorial clásico? ¿Hay que hacer un nuevo lenguaje conceptual para la física? *Heisenberg consideraba que hay que fijar un límite que restrinja nuestras posibilidades de acceso al conocimiento del estado del sistema con independencia de la medida (principio de indeterminación)*. Habríamos de reconsiderar palabras como: *sistema, estado, observable*. Esta cuestión, que en principio parece una cuestión menor, es muy relevante a la hora de establecer lo que es la medida tanto a niveles macroscópicos como a niveles cuánticos. La cuestión de que, independientemente del intervalo de indeterminación de Heisenberg, el objeto a medir tenga el mismo orden de magnitud que el equipo que va a efectuar la medición, conlleva la imposibilidad de la medida. Es muy importante adquirir conciencia de que la medida tiene los mismos “problemas” a todos los niveles, para posteriormente poder encarar una cuestión más compleja

También, es necesario que se destierre la usual apreciación de la incertidumbre de medida como el “error”, o la precisión como la “exactitud”. Para ello, nada mejor que acudir a los textos del Centro Español de Metrología:

### ¿Hay alguna diferencia entre 'exactitud' y 'precisión'?

SI, existe una gran diferencia.

Aunque en el lenguaje de calle, ambos términos son sinónimos, sin embargo, metrológicamente, los términos exactitud y precisión, aunque relacionados entre sí, no deben intercambiarse, ya que la diferencia entre ambos es significativa.

El *Vocabulario Internacional de términos fundamentales y generales de Metrología* (VIM) define el término **exactitud** como el grado de concordancia entre el resultado de una medición y un valor verdadero del mensurando, haciendo hincapié en que

- a) el término exactitud es cualitativo y
- b) que no se utilice el término exactitud en lugar de precisión.

Sin embargo, este último término no aparece definido en el VIM, por lo que tomamos su definición y ligazón con el término exactitud de la norma UNE 82009-1, equivalente a la ISO 5725-1.

En esta norma, el término exactitud engloba a la veracidad y a la precisión, pudiendo escribirse

EXACTITUD = VERACIDAD + PRECISIÓN

La veracidad, definida como el grado de coincidencia entre el valor medio obtenido de una gran serie de resultados y un valor aceptado como referencia, viene expresada usualmente en términos de sesgo, definiéndose este como la diferencia entre el valor medio obtenido y un valor aceptado como referencia (p. ej., un valor convencionalmente verdadero del mensurando).

El sesgo es pues el error sistemático total, por oposición al error aleatorio, pudiendo existir uno o más errores sistemáticos contribuyendo al sesgo. A mayor error sistemático respecto al valor aceptado como referencia, mayor sesgo, y viceversa.

Por su parte, la precisión se define como el grado de coincidencia existente entre los resultados independientes de una medición, obtenidos en condiciones estipuladas, ya sea de repetibilidad, de reproducibilidad o intermedias.

Así pues, la **precisión** depende **únicamente de la distribución de los resultados, no estando relacionada con el valor verdadero o especificado**. La precisión se expresa generalmente a partir de la desviación típica de los resultados. A mayor desviación típica menor precisión.

Visto lo visto: ¿Sería posible realizar mediciones a escalas cuánticas? ¿Tenemos que incluir dentro del “observador” la “conciencia”, alejándonos de las indicaciones de la ciencia que se dedica a las medidas, o debemos de tenerla en cuenta a efectos de los postulados cuánticos? ¿Se “colapsa” un sistema macroscópico cuando obtiene uno de tantos resultados de los posibles dentro del intervalo de incertidumbre? ¿Existen todas las medidas del intervalo de incertidumbre macroscópico ANTES de realizar una medición? Si no existen ¿por qué no?