

Introducción al proceso de medición

Mónica B. Agüero

Dpto. de Física, FCEyN, UBA

2^{da} edición, septiembre de 2020

La física es una ciencia experimental que busca entender procesos del mundo físico. Queremos encontrar leyes que nos permitan explicar los fenómenos que observamos y predecir de forma cuantitativa su comportamiento. Al tratarse de una ciencia experimental los fenómenos que vamos a estudiar deben *observarse* y *medirse*.

A través de los experimentos podemos poner a prueba nuevas y viejas teorías. Sin embargo, no alcanza con realizar mediciones, además debemos contar con métodos que nos permitan interpretar los resultados de nuestros experimentos.

En este curso de laboratorio vamos a incluir simulaciones interactivas a nuestros experimentos. También vamos a enseñarles distintas herramientas para analizar datos experimentales y cómo reportar los resultados obtenidos a través de un informe de laboratorio. Parte del material de este apunte lo pueden encontrar en las referencias [1–3].

1. Etapas de un experimento

En general, todo experimento de laboratorio se realiza en diferentes etapas:

- 1- **Objetivo:** es lo que queremos averiguar o investigar y constituye el punto de partida de cualquier experimento. Mientras más claro y más definido esté el objetivo, más fácil será planear el experimento.
- 2- **Plan:** se diseña un plan para la realización del experimento con el fin de alcanzar el objetivo. En esta etapa debemos decidir sobre el equipamiento necesario, las cantidades a medir y el procedimiento experimental.
- 3- **Preparación del experimento:** corresponde al armado del dispositivo experimental. En esta etapa se calibran los instrumentos y el experimentador aprende el funcionamiento y se familiariza con la operación de los mismos.
- 4- **Mediciones preliminares:** nos ayudan a familiarizarnos y adquirir experiencia con la técnica experimental, verificar que todo funciona correctamente y da una idea del rango de valores en que se encuentran las cantidades a medir.
- 5- **Recolección de datos:** las mediciones deben realizarse con cuidado para obtener un conjunto de “buenos” datos experimentales, los cuales podrán ser adquiridos de forma manual o a través de un sistema electrónico de adquisición.
- 6- **Repetitividad:** si es posible, es recomendable repetir el experimento en las “mismas condiciones” con el fin de verificar si el primer conjunto de datos medidos es representativo y puede ser repetido, dentro de las incertidumbres experimentales.

- 7- **Análisis de datos:** en la mayoría de los casos, los datos crudos que se obtienen de las mediciones necesitan ser analizados y procesados para poder llegar a un resultado final y extraer conclusiones.
- 8- **Informe:** una vez finalizadas las etapas anteriores, los resultados obtenidos se deben comunicar de manera clara y concisa, ya sea a través de un informe de laboratorio, artículo científico, poster, presentación oral, etc. En particular, el informe de laboratorio debe incluir un resumen y además describir el objetivo, el procedimiento experimental, las mediciones, el análisis de los datos experimentales, los resultados obtenidos, su discusión y las conclusiones obtenidas.

2. Magnitud física y medición

Una magnitud física es una propiedad de un cuerpo o de un proceso o fenómeno físico que puede ser medida (ejemplos: longitud, masa, temperatura).

Medir es la operación por la que comparamos una magnitud con otra que consideramos patrón de medida o unidad de referencia. Como resultado obtenemos el número de veces que esta unidad de referencia está contenida en nuestra magnitud (así que siempre tenemos que referirnos a la unidad empleada, de lo contrario la medida no tiene sentido).

Medir no representa en la mayoría de los casos una tarea sencilla. Requiere definir y ejecutar correctamente tres pasos: qué es lo que se va a medir, cómo se va a medir y con qué elementos se va a medir.

En un proceso de medición intervienen:

- **El sistema objeto de la medición:** la cantidad a medir (se llama “mesurando”).
- **El sistema de medición:** el instrumento de medición.
- **El sistema de referencia:** las unidades de medición y los respectivos patrones.
- **El operador:** es quién llevará a cabo el método o proceso de medición (importante e ineludible participante del proceso, responsable de decidir si se han cumplido las condiciones experimentales establecidas durante el registro de las mediciones).

3. Tipos de medición

- **Mediciones directas:** son aquéllas en las cuales el resultado es obtenido directamente del instrumento que se está utilizando. Por ejemplo, para medir el largo de una tiza podemos usar una regla y leer directamente el valor de la medición.
- **Mediciones indirectas:** No siempre se cuenta con un instrumento para medir en forma directa la magnitud requerida, sino que ésta se tiene que derivar de algunas otras magnitudes medidas en forma directa. Es decir, que existirá alguna relación funcional

entre las magnitudes medidas en forma directa y la que se desea obtener, dependiendo del experimento que se realice.

4. Errores como incertidumbres

Cuando realizamos una **medición** e informamos el resultado siempre debemos tener en cuenta que la medida no es un número exacto, **sólo podemos determinar un intervalo dentro del cual es probable que esté el valor verdadero de la magnitud**.

El error en la medición científica significa la inevitable incertidumbre asociada a todas las mediciones. En este contexto, los errores no son equivocaciones, no se pueden eliminar por más cuidadosos que seamos. En todo proceso de medición existen limitaciones dadas por los instrumentos usados, el método de medición y/o el operador que realiza la medición. Estas limitaciones generan una diferencia entre el valor real o verdadero de la magnitud y la cantidad medida.

Lo máximo que podemos aspirar es asegurarnos de que los errores sean tan pequeños como sea razonablemente posible y tener una estimación fiable de su magnitud. Entonces, **no hay mediciones reales con error nulo**.

Determinar la incertidumbre de una medida puede ser bastante complicado. Sin embargo, en algunas mediciones simples las estimaciones de la incertidumbre son fáciles de hacer, y a menudo no usan más que el sentido común.

4.1. Error instrumental

El error instrumental o error de apreciación está asociado a la resolución del instrumento de medición (proviene de estimar las incertidumbres al realizar la lectura de la medición).

La figura 1 ilustra el concepto de precisión de un instrumento de medida analógico. Si se quiere medir con la regla el largo del objeto, y suponiendo que se puede apreciar de modo fiable una división pequeña (1 mm), podríamos razonablemente decir que la medida estará comprendida entre 13 mm y 14 mm, pero que no es posible una lectura más precisa. En este caso, diríamos nuestra conclusión como

Mejor estimación de la longitud $\rightarrow l = 13,5 \text{ mm}$

Rango probable: 13 a 14 mm $\rightarrow 13 \text{ mm} < l < 14 \text{ mm}$

Por lo tanto, en este ejemplo se considera que el error instrumental es la mitad de la división más pequeña apreciable (en este caso $\pm 0,5 \text{ mm}$). Estos comentarios sobre el instrumento “regla” se aplican de modo similar a los *instrumentos analógicos* en general.

En el caso de *instrumentos digitales* las mediciones se presentan en una pantalla (las mediciones solo pueden tomar valores discretos). El papel de las pequeñas divisiones analógicas lo desempeña el último dígito significativo. Así que el error instrumental estará dado por el último dígito significativo.

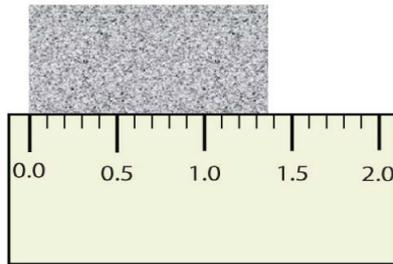


Figura 1: Medida de una longitud con una regla. Mínima división: 1 mm.

4.2. Errores sistemáticos

Los errores sistemáticos pueden ser causados por imperfecciones en los instrumentos de medida – por ej. error de calibración, reloj que atrasa o adelanta – o por deficiencia en el método experimental – paralaje. Tienden a desviar el valor de una medida en una sola dirección, esto es, dan valores siempre mayores o siempre menores que el valor verdadero.

Los errores sistemáticos en principio pueden minimizarse calibrando lo mejor posible los instrumentos de medición y corrigiendo adecuadamente el método empleado para medir cada cantidad física.

4.3. Errores casuales o estadísticos

Muchas mediciones tienen asociadas incertidumbres que son mucho más difíciles de estimar que las relacionadas con la lectura directa en un instrumento de medición. En particular, los errores casuales presentan las siguientes características:

- Son los que se producen al azar, por causas no controladas o desconocidas.
- Al repetir una medición varias veces (con el mismo instrumento y en las mismas condiciones) los resultados no siempre se repiten.
- Pueden cometerse con igual probabilidad por defecto como por exceso (esto es, se puede medir de más o de menos).
- Los errores casuales obedecen a leyes de carácter estadístico.

Causas:

- factores no previsibles como pequeñas variaciones en las condiciones ambiente (temperatura, presión, movimiento de los soportes, etc.).
- Otros provienen de los instrumentos y del observador. Por ejemplo la destreza de las manos para efectuar una medida (cuando un observador prende y/o apaga un cronómetro para medir un lapso temporal).

Midiendo varias veces y promediando el resultado (para obtener el valor más representativo), es posible reducirlos considerablemente. En la Guía 1 vamos a implementar métodos estadísticos para estimar esta incertidumbre.

5. ¿Cómo se escribe el resultado de una medición?

Vimos que todas las cantidades físicas se miden con algún grado de incertidumbre o error, generada por imperfecciones de los instrumentos de medida, por fluctuaciones que no se pueden controlar en el proceso de medición, o simplemente por la resolución del instrumento de medición o por las limitaciones de nuestros sentidos. Su estimación es muy importante a la hora de establecer conclusiones experimentales: **las cantidades físicas no se pueden expresar como un número real sino como un intervalo.**

La forma correcta de expresar el resultado de una medida es dar la mejor estimación de la cantidad y el intervalo o rango dentro del cual se tiene la convicción en que se halla dicha cantidad. En general, el resultado de cualquier medición de una magnitud x se expresa como

$$x = (x_0 \pm \epsilon) \text{ unidad,}$$

donde x_0 se suele llamar *valor más probable* o *valor representativo* y ϵ es el *error absoluto*. Esta afirmación significa que el experimentador está razonablemente seguro de que el resultado de la medición se encuentra en el intervalo $[x_0 - \epsilon, x_0 + \epsilon]$.

En el ejemplo de la Sección 4.1 el resultado de la longitud se escribe como $l = (13,5 \pm 0,5) \text{ mm}$.

En general, en un dado experimento, todas las fuentes de incertidumbre estarán presentes, de modo que resulta útil definir el error absoluto de la medición ϵ como:

$$\epsilon^2 = \epsilon_{inst}^2 + \epsilon_{est}^2 + \epsilon_{sist}^2 \quad (1)$$

Observación: El procedimiento de sumar los cuadrados de los errores es un resultado de la estadística y proviene de suponer que todas las distintas fuentes de error son independientes entre sí.

5.1. El número de cifras de una lectura

La aritmética nos dice $9 \text{ mm} = 9,0 \text{ mm}$.

Pero la Física nos dice que en el laboratorio $9 \text{ mm} \neq 9,0 \text{ mm}$.

¿Cómo entender estas afirmaciones? A partir del concepto de estimación de una lectura.

Cuando un observador escribe: $x_0 = 9,0 \text{ mm}$ con una incerteza de $\epsilon = 0,1 \text{ mm}$. Simbólicamente se expresa así: $x = (9,0 \pm 0,1) \text{ mm}$.

El cero tiene información sobre la cifra de las décimas. Otro observador, trabajando con otro instrumento de medición puede informar sólo hasta 1 mm ; entonces, su lectura de la misma cantidad será $x = (9 \pm 1) \text{ mm}$.

Aritméticamente las dos lecturas son iguales pero físicamente no lo son: la primera informa sobre las décimas y la segunda, no.

5.2. Cifras significativas

Para que los datos experimentales no digan más de lo que pueden decir (“asegurar”) según las condiciones de medida en que fueron obtenidos, es importante tener cuidado en el número

de cifras que se utilizan para expresar el resultado de una medición. El objetivo es **incluir sólo aquellas que tienen algún significado experimental**. Tales cifras se conocen con el nombre de *cifras significativas*.

- La incerteza de una medición la expresaremos, en general, con una sola cifra significativa (la primera cifra diferente de cero ubicada más a la izquierda). Existen situaciones en las que es posible determinar el error experimental con mayor precisión. En estos casos es factible expresarlo con dos cifras significativas, pero estas situaciones son poco comunes.
- Esta limitación al número de cifras significativas impone la necesidad de redondear el resultado final, hacia arriba o hacia abajo, dependiendo de cuál sea el número más próximo.
- En las mediciones que efectuemos en este laboratorio el **error absoluto** va a tener una cifra significativa.
- Las cifras del error que tengan como último dígito un 5 o más de 5 se redondearán hacia arriba.

Criterios para establecer el número de cifras significativas de un número

1- Los ceros a la izquierda (del primer dígito distinto de cero) **no son** significativos, indican la colocación del punto decimal. Ejemplos:

0,0056	2 cifras significativas
0,0789	3 cifras significativas
0,000001	1 cifras significativas

2- Los ceros a la derecha (del primer dígito distinto de cero) y después del punto decimal sí son significativos. Ejemplos:

43	2 cifras significativas
3,4120	5 cifras significativas
43,00	4 cifras significativas
0,00200	3 cifras significativas

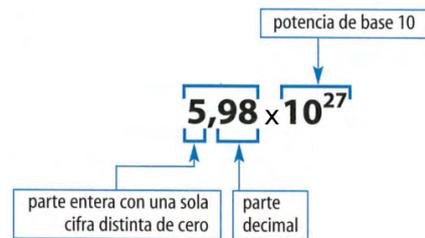
3- Todos los ceros entre dígitos significativos son significativos.

7,053	4 cifras significativas
7053	4 cifras significativas
302	3 cifras significativas

4- En un número que no tiene punto decimal y que termina con uno o más ceros (por ejemplo: 3600), los ceros posteriores a la última cifra distinta de cero pueden o no considerarse significativos. Esta ambigüedad se evita utilizando la notación científica. Cuando están expresados en esta forma, todos los dígitos se interpretan como significativos. Ejemplos:

$3,6 \times 10^5$	2 cifras significativas
$3,60 \times 10^5$	3 cifras significativas
2×10^{-5}	1 cifra significativa
$2,0 \times 10^{-5}$	2 cifras significativas

Notación Científica: Una forma más compacta de escribir un resultado es expresarlo en su equivalente notación científica; esto consiste en reescribirlo respetando el siguiente formato:



Resultado de la medición aplicando el criterio de cifras significativas

Para los propósitos en este laboratorio podemos establecer la siguiente regla: **las incertidumbres experimentales deben redondearse a una cifra significativa.**

Cuando escribimos el resultado de una medición, **primero fijamos el número de cifras significativas sobre la incerteza y luego redondeamos el valor absoluto.**

Ejemplo 1

Sabemos que $x_0 = 321,22356$ m y que $\epsilon = 0,14348$ m.

Para escribir el resultado de la medición de la forma: $x = (x_0 \pm \epsilon)$ unidad, seguimos los siguientes pasos:

- A- Primero acotamos el error absoluto ϵ a una cifra significativa siguiendo los criterios mencionados arriba: $\epsilon = 0,1$ m.
- B- Luego truncamos y redondeamos el valor absoluto x_0 teniendo en cuenta el valor de ϵ : $x_0 = 321,2$ m (como el error es 0,1 nos quedamos hasta el primer decimal del valor absoluto $321,22356$).
- C- Escribimos el resultado de la medición: $x = (321,2 \pm 0,1)$ m.

Importante: Este resultado $x = (321,22356 \pm 0,14348)$ m está mal escrito.

Comentario: En este ejemplo, notar que el valor absoluto tiene 4 cifras significativas y el error 1 cifra significativa. Esto está bien así porque cuando decimos “acotar el resultado a 1 cifra significativa” nos referimos siempre al error.

Ejemplo 2

Ahora $x_0 = 3,217 \times 10^{-2}$ metros y $\epsilon = 2 \times 10^{-4}$ metros.

En el Sistema Internacional de Unidades (SI), el símbolo de metro es m. Pasos para escribir el resultado de la medición:

A- Primero hay que entender qué significa esta notación:

$$x_0 = 3,217 \times 10^{-2} \text{ m} = 0,03217 \text{ m}$$

$$\epsilon = 2 \times 10^{-4} \text{ m} = 0,0002 \text{ m} \rightarrow \text{el error tiene una cifra significativa.}$$

B- Luego truncamos y redondeamos el valor absoluto x_0 teniendo en cuenta el valor de ϵ :

$x_0 = 0,0322 \text{ m}$ (como el error absoluto tiene 4 cifras decimales, debo acotar el valor absoluto a 4 cifras decimales teniendo en cuenta las reglas de redondeo).

C- Escribimos el resultado de la medición: $x = (0,0322 \pm 0,0002) \text{ m}$.

Y en notación científica: $x = (3,22 \pm 0,02) \times 10^{-2} \text{ m}$.

Importante: no confundir “número de cifras decimales” con “número de cifras significativas”.

Comentario: En este ejemplo, el valor absoluto tiene 3 cifras significativas y el error 1 cifra significativa.

Ejemplo 3

En el siguiente ejemplo, $m_0 = 118,683 \text{ kg}$ y $\epsilon = 13,21 \text{ kg}$.

Pasos para escribir el resultado de la medición:

A- Queremos redondear el error a 1 cifra significativa. Según el criterio visto arriba, debemos identificar la primera cifra significativa distinta de cero del error, eso es, el 1 de la decena:

$\epsilon = 13,21 \text{ kg}$. Entonces la incerteza es $\epsilon = 10 \text{ kg}$ (aplicando las reglas de redondeo).

B- Luego truncamos y redondeamos el valor absoluto m_0 teniendo en cuenta el valor de ϵ :

$m_0 = 120 \text{ kg}$ (según la incerteza, debemos considerar hasta la decena de m_0 teniendo en cuenta las reglas de redondeo).

C- Escribimos el resultado de la medición: $m = (120 \pm 10) \text{ kg}$.

Y en notación científica: $m = (1,2 \pm 0,1) \times 10^2 \text{ kg}$.

5.3. Unidades

Utilice las reglas y convenciones aceptadas internacionalmente, como el Sistema Internacional de unidades (SI). Algunos ejemplos se muestran en la Tabla 1. Para acceder a una lista más completa de símbolos estándar para unidades de medida pueden consultar en <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.330-2019>.

TABLA 1: Unidades SI básicas.

Cantidad	Unidad	Símbolo
Longitud	metro	m
Masa	kilogramo	kg
Tiempo	segundo	s
Corriente eléctrica	Ampere	A

Los múltiplos decimales o submúltiplos de unidades se indican mediante el uso de prefijos como se muestra en la Tabla 2.

TABLA 2: Prefijos del Sistema Internacional.

Prefijo	Símbolo	Factor	Prefijo	Símbolo	Factor
deci	d	10^{-1}	deca	da	10^1
centi	c	10^{-2}	hecto	h	10^2
mili	m	10^{-3}	kilo	k	10^3
micro	μ	10^{-6}	mega	M	10^6
nano	n	10^{-9}	giga	G	10^9
pico	p	10^{-12}	tera	T	10^{12}
femto	f	10^{-15}	peta	P	10^{15}
atto	a	10^{-18}	exa	E	10^{18}

- Recuerden contemplar un espacio en blanco entre el valor de la magnitud y la unidad.
- Tengan en cuenta que algunas unidades no están separadas del valor de la magnitud. Ejemplos: 1 %, 1° y 1°C.

Referencias

- [1] D. C. Baird. *Experimentación: Una introducción a la teoría de mediciones y al diseño de experimentos*, Prentice-Hall Hispanoamericana S.A., Mexico (1991).
- [2] J. R. Taylor *An introduction to Error Analysis: the study to uncertainties in physical measurements*, University Science Books, California (1997).
- [3] A. Maiztegui y R. Gleiser. *Introducción a las mediciones de laboratorio*, Kapelusz, Buenos Aires (1980).