

Cap 2. Medición, Error y Cifras Significativas

De Los Sentidos de la Física

La física es una de las ciencias fundamentales que busca dar una explicación racional del universo, sus cualidades y comportamientos en todas las escalas de tamaño y tiempo, por lo que otras disciplinas encuentran en la física su sustento teórico tanto en sus descubrimientos científicos como en sus desarrollos tecnológicos. En este sentido programas de formación académica como la ingeniería civil, la eléctrica, la mecánica, los sistemas, las telecomunicaciones, la ingeniería en petróleos entre muchas otras, son producto directo de los descubrimientos y avances hechos por la física, pero también disciplinas como la medicina y sus especializaciones tienen en la física un referente teórico conceptual importante, sin olvidar que áreas como la química, la biología, la paleontología, la música, el arte y los deportes también han tenido también grandes desarrollos científicos y tecnológicos al usar los principios físicos como elementos de análisis del comportamiento de sus sistemas particulares.

Aplicaciones como los rayos X, el láser, el radar, las teorías sobre la naturaleza de los campos, la resonancia electromagnética, el comportamiento de la materia y la nanomateria, la metalurgia, la electricidad y la electrónica, son sólo algunos fenómenos estudiados y explicados por la física y que han permitido la comprensión de otros fenómenos naturales más complejos; esto a su vez impulsa el desarrollo científico en áreas del conocimiento con campos tan amplios que sería muy difícil resumirlos en un solo libro; estas nuevas áreas de conocimiento han favorecido la invención de importantes dispositivos, siendo tal vez los de mayor impacto, aquellos relacionados con la electrónica –con los transistores y microchips, estándares de la gran revolución tecnológica y que son los elementos constitutivos fundamentales de cualquier dispositivo electrónico– tal como las computadoras, que han posibilitando los viajes al espacio, develar algunos de los misterios del universo profundo, facilitado igualmente el desarrollo de la industria pero también mejorando el tratamiento de



algunas enfermedades e inclusive curar algunas; es así que la física indiscutiblemente aporta de diversas formas al desarrollo científico de la humanidad. En el campo industrial, la física como disciplina científica de conocimiento ha permitido el desarrollo de diversos equipos tecnológicos como los optoelectores, las cortadoras láser, motores eléctricos y de combustión más eficientes y pequeños, resonadores magnéticos aplicados en la medicina, toda la industria de las comunicaciones, pasando por la tecnología celular y el mismo sistema de posicionamiento global –GPS–, aportes que el cotidiano da por sentado, pero que son producto del esfuerzo de equipos de investigadores que ponen los principios físicos de la materia y la energía al servicio del hombre.

2.1. Medición

Las disciplinas que tienen carácter de ciencia se caracterizan porque sus objetos de conocimiento son obtenidos por medio la indagación, la observación racional y la medición de parámetros, agrupando saberes en leyes generales estructuradas, demostrables y replicables, que se organizan en un sistema lógico secuenciado y confiable; estos principios deben ser verificables en cualquier momento bajo condiciones iniciales pre-establecidas y definidas dentro de las mismas leyes que los explican, por tanto la medición de las **cantidades físicas** de los fenómenos, busca hacer una descripción matemática confiable de los mismos para establecer regularidades, proponer comportamientos o controlar procesos a través de sus variables.

Medir es comparar dos magnitudes una de las cuales es el patrón de medida.

Cuando se mide por ejemplo la altura de una persona, se compara esta cualidad física con otro objeto aceptado y reconocible; no tiene sentido por ejemplo decir que una persona mide 1,8 si no se especifica claramente el elemento de referencia; si es 1,8 metros ya se puede inferir que la persona respecto a un “metro estándar internacional” es 1,8 veces más grande; el problema es entonces escoger inteligentemente un patrón adecuado para medir.

Desde el inicio temprano de la condición humana, se ha intentado definir patrones de medida para varios parámetros físicos como el tiempo, la longitud, la masa con el fin de poder establecer relaciones entre las cantidades presentes en un conjunto de elementos; saber por ejemplo el peso de un vaca, la longitud a la cual se debe cortar el tallo

de trigo, o el tiempo que se gasta la construcción de un obra, son situaciones críticas que tratan sobre las necesidades de medición en las comunidades de la antigüedad; en el caso de la longitud por ejemplo se contaba con el pie inglés en Inglaterra, el metro en Francia, la cuarta en países árabes, la vara en España entre muchos otros; elementos que se basaban en la disponibilidad de recursos en la región y una intención de invariabilidad, pero.... *¿cuál de todos estos elementos para medir longitudes es el mejor?*, realmente ninguno es mejor que otro para medir siempre y cuando se respeten algunas propiedades importantes, estas son:

1. *Fácil de convertir de una unidad a otra o de un sistema a otro cuando se tiene la equivalencia*
2. *Que sea invariable en el tiempo y el espacio, es decir, no se vea afectado por ningún otro parámetro.*
3. *Que se pueda reconstruir a partir de una definición.*

El sistema adoptado no puede cambiar con el paso del tiempo, si por ejemplo se tuviese como patrón de medida para la longitud, la longitud del brazo de una persona adulta –como antiguamente se hacía–, se tendría el problema que este valor depende de la persona, su edad, la raza e inclusive genéticamente, las dimensiones corporales de cualquier individuo pueden variar entre uno y otro, por tanto la longitud de un brazo de una persona adulta no es un patrón de medición confiable; el patrón que se adopte debe cumplir con las tres cualidades anteriormente descritas y debe ser universalmente aceptado pues facilita la comunicación y comercio entre diferentes culturas, facilitando el intercambio de bienes, servicios y conocimiento. Por lo anterior en el año de 1960, la Oficina Internacional de Pesas y Medidas –BIPM por sus siglas en francés– adopta lo que se constituye como el “Sistema Internacional de Medida” –SI– que es una evolución natural del sistema métrico decimal y que tiene como particularidad que casi todos los patrones de medida se obtienen a partir de definiciones de fenómenos físicos.



Imagen tomada de <http://horologyzone.com>

Figura 2.1. Reloj de Sol. Uno de los instrumentos de medida más antiguos construidos por el hombre es el reloj de sol para medir el tiempo y que se basa en el principio del movimiento de las sombras proyectadas por el sol cuando la Tierra gira sobre su propio eje.

Unidades Fundamentales de Medida

En esencia, el sistema de medición se centra en siete unidades básicas y en otras unidades derivadas a partir de las básicas:

Tabla 2.1. Unidades fundamentales de medida

Unidad SI Fundamental		
MAGNITUD	UNIDAD	SIMBOLO
Longitud	metro	m
Masa	kilogramo	kg
Tiempo	segundo	s
Corriente Eléctrica	ampere	A
Temperatura Termodinámica	kelvin	K

Intensidad Luminosa	candela	cd
Cantidad de Sustancia	mol	mol

Cuyas equivalencias se obtiene a partir de una definición de un parámetro físico –exceptuando el kilogramo cuya definición equivale no a un parámetro sino a un modelo de masa prototipo internacional del kilogramo guardado en una bóveda en la Oficina Internacional de Pesos y Medidas–. A continuación se muestran las definiciones de las unidades de medida que actualmente se usan.



Tomado de <http://tecnologia.com>

Figura 2.2 Esfera perfecta.

Investigadores en todo el mundo buscan la manera de reproducir por medios físicos el estándar del patrón de medida para la masa, el kilogramo; la idea es construir de manera muy precisa una esfera de cristal de silicio-28 a la cual se le pueda determinar el número de átomos presentes y así a partir de una constante física–el número de Avogadro–, definir el kilogramo masa.

- ☑ **Longitud (metro – m):** El metro es longitud del trayecto recorrido por la luz en el vacío, durante un intervalo de tiempo de $(1/299\,792\,458)$ de segundo (7ª CGPM, 1983)¹
- ☑ **Tiempo (segundo – s):** El segundo es la duración de 9 192 634 770 periodos de la radiación del átomo de Cesio 133. (13ª CGPM 1967).
- ☑ **Masa (kilogramo – kg):** El kilogramo es la unidad de masa del Prototipo Internacional que es mantenido por la Oficina Internacional de Pesos y Medida BIPM (3ªCGPM, 1901) y depositado en el pabellón de Breteuil de Sévres.
- ☑ **Temperatura (kelvin – K):** Kelvin es la unidad de temperatura correspondiente a la fracción $(1/273,16)$ de la temperatura termodinámica del punto triple del agua. (13ª CGPM, 1967).
- ☑ **Intensidad Luminosa (candela – cd):** La candela es la intensidad luminosa en una dirección dada de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} hertz y de la cual la intensidad radiada en esa dirección es $(1/683)$ watt por esteroradián. (16ªCGPM, 1979).
- ☑ **Corriente Eléctrica (ampere – A):** El ampere es la intensidad de corriente constante que mantenida entre dos conductores paralelos, rectilíneos de longitud infinita, de sección rectangular despreciable y colocados a una distancia de un metro uno del otro en el vacío, produce entre estos conductores una fuerza igual a 2×10^{-7} newton por metro de longitud (9ª CGPM, 1948).
- ☑ **Cantidad de Sustancia (mol – mol):** Cantidad de sustancia de un sistema, el cual contiene tantas entidades elementales como átomos hay en 0,012 kilogramos de carbono 12 (14ª CGPM, 1971).

La idea de definir los patrones de medida a partir de fenómenos físicos naturales radica en el hecho de la invariabilidad e imparcialidad del fenómeno mismo, de tal forma que si por alguna razón se necesitara ajustar y recalcular los patrones de medida, cualquier Nación o persona

¹ Este código se refiere al número de la reunión y año en el cual la Conferencia General de Pesos y Medidas –CGPM– adopta la definición.



podría hacerlo sin el concurso de elementos diferentes a los requeridos en la definición e independiente del momento histórico.

Unidades Derivadas de Medida

Existen otro conjunto de unidades que son las unidades derivadas; estas se obtienen por la combinación algebraica o funcional de las unidades fundamentales de medida y describen dimensionalmente muchos otros fenómenos físicos; entre las unidades derivadas están las dadas en la velocidad, el volumen, la fuerza, la presión entre muchas otras; a manera de ejemplo de tratan algunas de estas unidades derivadas.

- ☑ **Área:** La unidad es el metro cuadrado, que corresponde a un cuadrado de un metro [1m] de lado.
- ☑ **Volumen:** La unidad es el metro cúbico, que es el volumen de un cubo de un metro [1m] de arista.
- ☑ **Rapidez:** La unidad es el metro por segundo, que corresponde a la rapidez con que un cuerpo recorre un metro en un segundo [m/s].
- ☑ **Aceleración:** Tiene por unidad el metro por cada segundo al cuadrado, que corresponde al cambio de rapidez por cada unidad de tiempo [m/s²].
- ☑ **Densidad volumétrica:** La unidad es el kilogramo por metro cúbico, que corresponde a la masa contenida por unidad de volumen [kg/m³] de un cuerpo homogéneo

Tabla 2.3. Algunas unidades derivadas

Parámetro	Unidad	Símbolo
Área	metro cuadrado	m ²
Volumen	metro cúbico	m ³
Velocidad	metro por segundo	m/s
Aceleración	metro por segundo cuadrado	m/s ²
Densidad	kilogramo por metro cúbico	kg/m ³

La unidad internacional de velocidad es el metro por cada segundo $\frac{m}{s}$, note que es el cociente entre una unidad de longitud y una unidad de tiempo; la unidad de aceleración es la razón existente entre el cambio de velocidad por cada segundo recorrido, dimensionalmente corresponde a $\frac{m/s}{s} = \frac{m}{s^2}$ para este ejemplo la unidad de aceleración es el cociente entre una unidad de longitud y el cuadrado de la unidad de tiempo; la unidad de fuerza, el newton es el producto entre una unidad de masa por una unidad de aceleración (N=kg·m/s²), siendo esta unidad el ejemplo de la existencia de algunas unidades derivadas que históricamente se les ha dado nombres especiales, por lo general nombres de científicos notables de considerable influencia que han aportado significativamente al desarrollo de la física, pero también de otras disciplinas como la química y la ingeniería. La tabla 2.4., muestran

Tabla 2.2. Prefijos del Sistema Internacional de Medidas

PREFIJOS DEL SI		
Nombre	Símbolo	Factor
Exa	E	10 ¹⁸
Peta	P	10 ¹⁵
Tera	T	10 ¹²
Giga	G	10 ⁹
Mega	M	10 ⁶
Kilo	k	10 ³
Hecto	h	10 ²
Deca	da	10 ¹
Deci	d	10 ⁻¹
Centi	c	10 ⁻²
Mili	m	10 ⁻³
Micro	μ	10 ⁻⁶
Nano	n	10 ⁻⁹
Pico	p	10 ⁻¹²
Femto	f	10 ⁻¹⁵
atto	a	10 ⁻¹⁸

algunos de estos parámetros especiales, las unidades que lo conforman y el nombre común que se les ha dado.

Tabla 2.4. Nombres especiales para algunos parámetros físicos

Parámetro	Nombre	Símbolo	Equivalencia	Unidades
Fuerza	newton	N	–	m.Kg.s ⁻²
Presión	pascal	Pa	N.m ⁻²	m ⁻¹ .Kg.s ⁻²
Energía	joule	J	N.m	m ² .Kg.s ⁻²
Potencia	watt	W	J.s ⁻¹	m ² .Kg.s ⁻³
Carga eléctrica	coulomb	C	–	s.A
Frecuencia	hertz	Hz	–	s ⁻¹

Como ya fue enunciado, el Sistema Internacional de Medidas se fundamenta en el sistema métrico decimal, debido entre otras razones a la comodidad y facilidad para conversión de un factor de unidad a otro, lo que se hace con una sencilla multiplicación de una potencia de diez, igualmente muchos países ya lo utilizaban para medir, acaciendo pocos cambios desde el momento de su invención y que simplificó bastante la adopción por parte de la gran mayoría de países.

Conversión de Unidades

Infortunadamente el Sistema Internacional de Medida no es universalmente aceptado por todos los países, entre ellos los de mayor oposición son Estados Unidos y el Reino Unido² que utilizan el sistema inglés o anglosajón de medida, algunos de cuyos factores se ilustran en la tabla 2.5.; razón por lo cual se hace necesario tener un mecanismo para la conversión de un sistema al otro cuando así se demande, este mecanismo de conversión se conoce como el factor de conversión.

Tabla 2.5. Unidades de medida en el Sistema Anglosajón

Unidad	Símbolo	Equivalencia Inglés	Equivalencia SI
1 pulgada	in	–	2,54 cm
1 yarda	yd	12 in	91,44 cm
1 milla	mi	1760 yd	1609,3 m
1 legua	–	5280 yd	4828 m
1 braza	–	6 ft	183 cm
1 onza	oz	–	29,6 ml
1 pinta	pt	16 oz	473,2 ml
1 cuarto	qt	2 pt	946,4 ml
1 galón	gal	4 qt	3,79 litros

² Sin embargo por la presión de la Comunidad Europea, Inglaterra adopta el Sistema Internacional de Medida aunque en el común del país se maneja el sistema anglosajón.



Quando se tiene un parámetro cualquiera expresado en cierta unidad de medida, se debe también tener la equivalencia a la unidad que se quiere transformar. Esa equivalencia se escribe como una razón o cociente, de tal manera que la unidad del parámetro, se cancele con la unidad de la equivalencia; se pueden emplear simultáneamente varias equivalencias sobre el mismo parámetro, lo que reduce significativamente las operaciones necesarias para la conversión. Tómese como ejercicio para esta operación el ejemplo 2.1., y 2.2.

Ejemplo 2.1. Expresar 144 km/h en m/s.

Solución: Al tener las equivalencias

$$1\text{km} = 1000\text{m} \quad 1\text{h} = 60\text{min} \quad 1\text{min} = 60\text{s}$$

Se puede escribir:

$$144 \frac{\text{km}}{\text{h}} \times \frac{1000\text{m}}{\text{km}} \times \frac{1\text{h}}{60\text{min}} \times \frac{1\text{min}}{60\text{s}} = 40\text{m/s}$$

Por tanto 144 km/h es igual a 40 m/s

Ejemplo 2.2. Expresar 200 yardas en metros:

Solución: Con la equivalencia

$$1\text{yd} = 91,44\text{cm} \quad \text{y} \quad 1\text{m} = 100\text{cm}$$

Se obtiene

$$200\text{yd} \times \frac{91,44\text{cm}}{1\text{yd}} \frac{1\text{m}}{100\text{cm}} = 182,88\text{m}$$

La clave del proceso son los factores lineales y la posición que deben ocupar en el numerador o en el denominador lo cual depende de la posición de la unidad que se pretende transformar, en el ejemplo anterior, yarda está como numerador, por tanto en el factor de conversión yarda debe aparecer como denominador; como se debe pasar centímetro a metro y la unidad está en el numerador, el factor de conversión debe organizarse de tal forma que en el denominador quede la cantidad expresada en centímetros –1m = 100 cm–.

2.2. Error

La exactitud es un término cualitativo que puede convertirse en cuantitativo y que se refiere a la capacidad de establecer qué tan cerca está un valor medido con respecto a un valor esperado o a un valor real; por otro lado la precisión o repetitividad es un término que cuantifica la cercanía que tienen un conjunto de mediciones o datos entre sí; esta cuantificación por lo general se basa en las medidas de tendencia central y que deben venir asociadas con una desviación.

Cuando se tienen un conjunto de datos que representan un parámetro y esto es especialmente cierto para la física, tienden a acumularse en ciertas regiones del espacio de soluciones; aplicando herramientas de análisis de la probabilidad se sabe que los datos obtenidos de fenómenos naturales, se pueden también asociar a una función de probabilidad la cual en la gran mayoría de situaciones puede ser representada por una distribución normal o distribución gaussiana. Como un primer ejemplo, considérese dos grupos de estudiantes que realizan una misma práctica de laboratorio, “Determinación de la gravedad a nivel del mar”, y cada grupo obtuvo un conjunto de datos, con los cuales se realizaron histogramas, obteniendo las siguientes funciones de probabilidad.

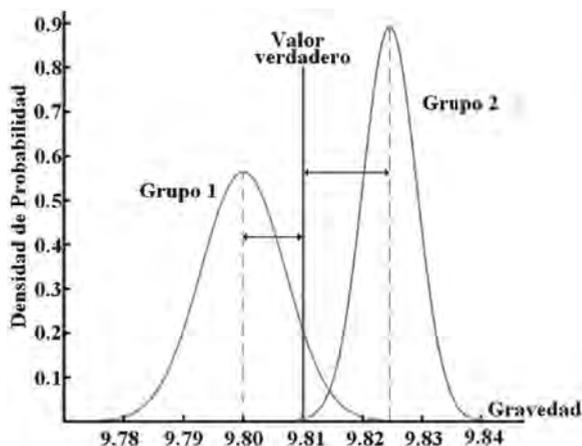


Figura 2.3. Distribución normal de un conjunto de datos. Fuente Propia.

En los datos del grupo 1, las gravedades que se encontraron estuvieron en el rango $9,78\text{m/s}^2$ a $9,82\text{m/s}^2$, es decir tuvieron una variación de 0,04; por otro lado los datos del grupo 2 estuvieron en el rango de

9,81m/s² a 9,84m/s², con una variación de 0,03 lo cual indica que en el grupo 2 fueron más precisas las medidas que el grupo 1. En cuanto a la exactitud el mayor valor de densidad de probabilidad del grupo 1, está más cerca del mejor valor conocido para la gravedad a nivel del mar; el grupo 2 por otro lado está más distante a este valor. Lo anterior claramente establece que un conjunto de datos pueden ser precisos pero no tan exactos como otro conjunto de datos más dispersos. Para explicar mejor la diferencia entre exactitud y precisión, considere la siguiente figura.

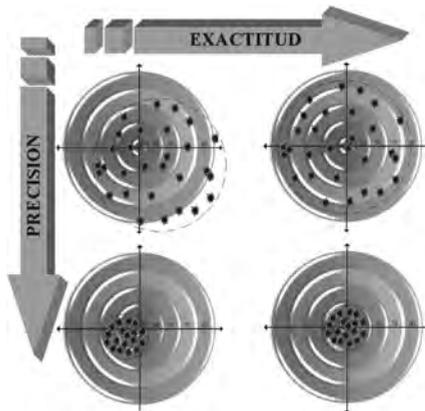


Figura 2.4. Disposición de los impactos sobre dianas. Figura Propia

En las dos dianas superiores se nota que los impactos están igualmente espaciados unos con respecto a los otros, sin embargo en la diana superior derecha estos impactos están mejor centrados, lo que indica que aunque su nivel de precisión es el mismo, el nivel de exactitud es mejor en las figuras de la derecha. Por otro lado, las dianas de la vertical izquierda muestran que existen impactos sobre el centro, pero en la diana inferior izquierda estos están menos separados y en conclusión los impactos son muy precisos pero poco exactos. Finalmente se tiene la diana inferior derecha, en ésta los impactos son muy precisos y en adición todos están muy cerca del centro por lo cual estos impactos son precisos y a la vez exactos.

Ahora, otro concepto asociado con la medición es la *incertidumbre* y esta se entiende como el espacio bidireccional en torno a un valor específico que caracteriza la dispersión de los datos y que de forma razonable son aceptados como característicos de la medición; esta incertidumbre depende de muchos factores pero especialmente de dos, la exactitud que puede manejar el equipo y la habilidad y precisión que tenga el operador para leer, interpretar y manipular los valores que le proporcione el instrumento.

Una de las dificultades de la medición radica en el hecho que no es posible en muchas situaciones determinar el valor exacto de un parámetro, por ejemplo si se necesita encontrar la longitud del lápiz usando como instrumento de medición una regla común, se podría establecer el valor aproximado de su longitud en centímetros con una precisión de tal vez, un dígito representando los milímetros ya que este sería la máxima precisión con que cuenta el instrumento, por lo cual siempre existirá una incertidumbre asociada sobre el valor exacto de la medida y obviamente conducirá a un error en la medida y en todos los cálculos posteriores que se hagan con estos valores. Por tanto la pregunta no es si se acepta o no una respuesta con error, la pregunta a hacer es qué nivel de error se está dispuesto a permitir o en equivalencia, qué precisión y exactitud es la que se demanda en la respuesta. A manera de ejemplo, supóngase que se tiene una regla graduada en centímetros y con ella se quiere medir la longitud de un pedazo de lápiz como muestra la figura.

Como certeza se tiene que el lápiz de la figura mide al menos 4,6cm, sin embargo no se tiene certeza de un valor más exacto con la regla utilizada para el siguiente decimal y solo se puede especular con algún grado de confianza; claramente se ve que la longitud del lápiz no sobrepasa los 4,65cm pero las 5 centésimas es una medida aproximada, y como parámetro de incertidumbre se debe especificar de forma explícita.

$$\text{Medida del lápiz} = 4,63\text{cm} \pm 0.03 \text{ cm}$$

Esto quiere decir que la medida del lápiz cumple con la relación $4,6 \leq x \leq 4,66$. Bajo otras circunstancias con este mismo problema se podría generar otro valor de incertidumbre con mayor o menor tolerancia siendo igualmente válido según sea la precisión del equipo de medida. Generalizando se tiene entonces la ecuación 2.1.

$$x = \bar{x} \pm \Delta x \quad [2.1]$$

Aquí x es la medida real, \bar{x} es la mejor medida estimada y Δx es la incertidumbre absoluta de la medición. La incertidumbre invalida la medida tomada, razón por la cual se debe definir un rango infinito de valores donde existe una muy alta probabilidad casi 1, de encontrar la medida exacta.

$$\bar{x} - \Delta x \leq x \leq \bar{x} + \Delta x$$

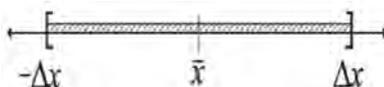
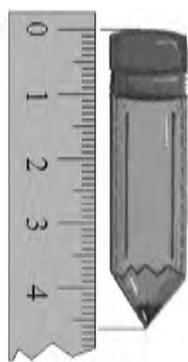


Figura 2.6. Intervalo numérico donde existe una probabilidad muy alta que se encuentre la medida.



Tomado de
<http://autofillforms.mozdev.org>

Figura 2.5. Incertidumbre de las medidas

Debido a que los errores en las medidas generan incertidumbres sobre el valor definido, los dos conceptos se encuentran íntimamente relacionados; las incertidumbres o errores se pueden producir por diversos factores tanto humanos como sistemáticos. Entre los errores más comunes que se presentan al momento de toma de medidas están:

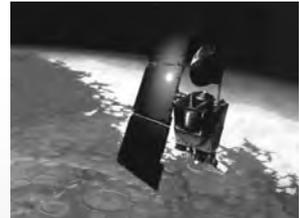
- ☑ **Errores de apreciación o paralelaje:** Se presentan por la falta de agudeza sensorial de las personas que toman la medida, por ejemplo no se tiene la suficiente certeza del punto exacto donde quedo finalmente la aguja del medidor y se debe aproximar tomando una decisión de forma subjetiva.
- ☑ **Errores de exactitud:** Cada instrumento de medida tiene una capacidad para realizar comparaciones en una escala determinada, el nivel de detalle de la escala es la que finalmente determina la exactitud de la medida.
- ☑ **Errores de calibración:** Los equipos de medida por el uso o por abuso, eventualmente se deterioran y pierden su patrón de referencia, por esta razón se usan otros dispositivos con patrones más precisos que permiten recuperar en los medidores iniciales la referencia; este proceso se denomina calibración. Sin embargo algunas veces el dispositivo calibrador pierde su patrón sin que el operador se dé cuenta agregando un error a todos los medidores que se calibren con esta herramienta y en consecuencia las medidas que se hagan con estos medidores contendrán estos mismos errores.

Existen otros errores de calibración y aparecen cuando el medio externo o el objeto medido interfieren con el instrumento de medición y en consecuencia el equipo se debe re-ajustar. Un ejemplo concreto se presenta cuando se usa una cinta metálica para medir longitudes, el calor hace que el metal se dilate y puede ocasionar que se registre una distancia menor de la que realmente existe; dado lo anterior es necesario hacer un ajuste por temperatura sobre la cinta metálica.

- ☑ **Errores Metódicos:** Son muchos las clases de errores metódicos, sin embargo algunos de los más comunes son dificultades de conectividad entre equipos, tiempos de respuestas no sincronizados, pérdida de información, interferencia del objeto medido y no ajustado, entre otras.

Existe otro grupo de errores que generan incertidumbres, estos son los **errores estadísticos o aleatorios**, las causas de estos son muy variadas y se generan al azar cometiéndose con igual probabilidad por exceso o por defecto. Aunque los errores y las incertidumbres no son posibles de

Error de Conversión



<http://www.jpl.nasa.gov>

Figura 2.7. Sonda espacial prototipo enviada a Marte

La sonda espacial Mars Climate Orbiter (MCO) fue un satélite artificial lanzado por la NASA en 1999, que después de un viaje de 9 meses y medio y una inversión cercana a los \$US 120 millones de dólares se pierde en Marte por un error de conversión.

El control en Tierra, responsable de la navegación, hacía los cálculos con el Sistema Anglosajón de unidades (distancia en millas), mientras que la computadora a bordo de la sonda los recibía y procesaba como si fueran del Sistema Métrico decimal (distancia en kilómetros), lo que ocasionó que la nave se desviara de su curso y terminara estrellada contra el gigante rojo, en vez de orbitarlo como se tenía pensado.



eliminar completamente, si es posible reducir y mitigar los efectos de estos en metrología, lo cual se logra entre otras cosas mejorando la calibración de los instrumentos de medición o reemplazándolo por instrumentos de mayor exactitud. En el caso de las calibraciones es importante disponer de una trazabilidad documentada y ampliamente demostrable según los estándares de medida aceptados internacionalmente. La reducción del error también se logra por correcciones sucesivas, por métodos analíticos más sofisticados o por la selección de modelos físicos más apropiados.

La incertidumbre total, combinada o efectiva de una variable, se obtiene como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las incertidumbres individuales, tal como se muestra en la ecuación 1.2.

$$\Delta x = \sqrt{\sum_i \Delta x_i^2} \quad [\text{Ec. 2.2}]$$

Si por ejemplo se necesita encontrar el valor de un parámetro físico a través de varios instrumentos o en el proceso de encontrar el valor del parámetro secuencialmente se usan varios medidores cada uno con una incertidumbre asociada, la incertidumbre total de la medición corresponde al valor numérico proporcionado por la ecuación anterior. Entre las formas de cuantificar los errores en las incertidumbres están:

- ⊕ **Error absoluto:** El error absoluto es el rango máximo de valores que puede tomar la variable; por esta razón muchos autores asumen que el error absoluto es exactamente igual a las incertidumbres y aunque esto en gran parte es cierto, la diferencia entre una y otra se puede dar por el contexto.

$$e = \Delta x = |x_{\text{máx}} - x_{\text{mín}}| \quad [\text{Ec. 2.3}]$$

El error no sólo se define para las incertidumbres sino también para las mediciones realizadas; cuando se hace una práctica experimental y por medio de un análisis se determina la magnitud de algún parámetro, es posible establecer una medida de error entre el valor obtenido y el valor calculado siendo entonces:

$$e = |v_{\text{teo}} - v_{\text{exp}}| \quad [\text{Ec. 2.4}]$$

Aquí v_{teo} es el valor teórico y v_{exp} el valor experimental, convirtiéndose esto en una discrepancia de la medida.

- ⊕ **Error relativo por unidad:** Algunas veces es difícil establecer la calidad de una respuesta obtenida solo con el error absoluto, por esa razón es una costumbre comparar este error con un

patrón de referencia; este patrón de referencia puede ser el mejor valor estimado

$$e_{pu} = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \quad [\text{Ec. 2.5}]$$

El error relativo es un indicativo más concluyente pues permite comparar diferentes medidas realizadas sobre un mismo parámetro de forma sencilla.

- ⊕ **Error porcentual:** Es el mismo error por unidad expresado en porcentaje e igualmente esta forma de mostrar el error es muy utilizada, tal vez más que el error por unidad, ya que la comparación de la magnitud de la incertidumbre o el error se hace con respecto a la escala porcentual.

$$e_{pu} = \frac{\Delta x}{\bar{x}} 100\% \quad [\text{Ec. 2.6}]$$

Las causas de estos errores son variadas, sin embargo se pueden clasificar en tres grandes factores como se ilustra en la figura 2.8.



Figura 2.8. Causas del error en procesos de medición.

El factor instrumental introduce errores en la medida debido principalmente a calibraciones incorrectas o al uso de equipos de medida sin el respectivo cuidado y mantenimiento lo que hace perder precisión del mismo. Los errores por factor procedimental ocurren cuando no se toman correctamente las medidas o hay errores conceptuales en la forma de representar el problema y en consecuencia el modelo que se obtiene no lo representa acertadamente; finalmente el factor humano sigue siendo otra causa de error, cuando el operario no es cuidadoso al momento de tomar la medida, usa incorrectamente el equipo o carece de experticia incide negativamente en las medidas.

Calculo del Error y su Propagación

Existen diversos factores que introducen incertidumbres en las medidas, sin embargo son objetivos de esta sección analizar los errores instrumentales absolutos, los errores estadísticos y la propagación de estos errores a través de las operaciones. Para calcular el error es fundamental conocer la forma como se desarrolla el proceso de medición.

Medición única directa: Esta medición se realiza una sola vez y a través de un instrumento de medida, con el fin de simplificar cálculos se va a suponer que el error es sólo de naturaleza instrumental; para calcular el error total se debe sumar el error dado por la clase de exactitud (e_{\max}) del instrumento y el error de lectura (e_{lec})

$$\Delta x = e_{\max} + e_{lec} \quad [\text{Ec. 2.7}]$$

Este último error de lectura se calcula como se muestra en la ecuación 2.8.

$$e_{lec} = \frac{C}{\delta} \quad [\text{Ec. 2.8}]$$

Donde C es un valor denominado Constante del Instrumento y es proporcionado por el fabricante y δ es un parámetro de ajuste de acuerdo a las características del instrumento tal como se ilustra en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Tipos de escalas en los instrumentos de medida.

Caso	δ
Escala fina (Sin apreciación)	1
Escala fina (con apreciación)	2
Escala gruesa	10
Instrumento con nonio	Numero de divisiones en el nonio

Cuando se cuenta con estos dos errores, el valor encontrado se debe reportar adecuadamente con la suma de los errores instrumentales y de medida.

Medición directa realizada varias veces: Cuando es posible contar con muchas mediciones de un mismo parámetro con el mismo instrumento de medida, se debe calcular el error estadístico a partir de la desviación estándar (σ) del conjunto de valores.



$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad \text{y} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{x} - x_i)^2}{N(N-1)}} \quad [\text{Ec. 2.9}]$$

Donde \bar{x} es el valor promedio, x_i es un dato cualquiera y N es el número total de datos.

Medición indirecta hecha una sola vez: En algunas situaciones no es posible obtener una medida directa de alguna variable y es necesario realizar otro tipo de medidas para así, mediante un análisis matemático o físico, encontrar el valor deseado. Supóngase como ejemplo que se quiere medir el volumen de un tanque cilíndrico y para ello se toma la medida del radio y de la altura, mediante una operación matemática, que corresponde a la fórmula del volumen del cilindro $V = \pi r^2 h$ se puede encontrar la medida solicitada.

Supóngase que se tiene una función de la forma $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ con sus respectivos errores absolutos

$$\begin{aligned} \bar{x}_1 &= \bar{x}_1 + \Delta x_1 \\ \bar{x}_2 &= \bar{x}_2 + \Delta x_2 \\ &\vdots \\ \bar{x}_n &= \bar{x}_n + \Delta x_n \end{aligned}$$

Usando herramientas estadísticas se puede demostrar fácilmente que el error absoluto de la medida indirecta está dado por la expresión

$$\Delta f = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right| \quad [\text{Ec. 2.10}]$$

Medición indirecta realizada varias veces: Cuando se tiene la oportunidad de realizar las mismas mediciones varias veces con el mismo instrumento, se puede obtener el valor promedio de cada parámetro medido y la desviación estándar, siendo este el error estadístico.

$$\begin{aligned} \bar{x}_1 &= \bar{x}_1 + \sigma_1 \\ \bar{x}_2 &= \bar{x}_2 + \sigma_2 \\ &\vdots \\ \bar{x}_n &= \bar{x}_n + \sigma_n \end{aligned}$$

El único hombre que no se equivoca es el que nunca hace nada.
Johann Wolfgang Goethe



Dadas estas condiciones, el error final de la medida indirecta se calcula como se muestra en la ecuación 2.11.

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_i^2} \quad [\text{Ec. 2.11}]$$

Mediante procedimientos estadísticos fácilmente se puede demostrar que las incertidumbres asociadas a mediciones indirectas, son menores que cuando se realiza una única medición. Finalmente, cuando se tiene el error estadístico y el error instrumental, siempre se debe usar el error más grande, pues es el peor de los escenarios posibles.

Discrepancia: En algunas ocasiones, es posible medir la misma variable física a través de métodos diferentes y como es de esperar, se obtienen resultados también diferentes, en consecuencia es importante saber si la discrepancia entre estos valores es significativa o no. Supóngase que se tienen dos medidas para el mismo parámetro

$$\begin{aligned} x_1 &= \bar{x}_1 \pm \Delta x_1 \\ x_2 &= \bar{x}_1 \pm \Delta x_2 \end{aligned}$$

Con los cuales se puede definir un error estadístico de discrepancia como se ilustra en la ecuación 2.12:

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2} \quad [\text{Ec. 2.12}]$$

Y en consecuencia, las medidas con un límite de confianza del 68% cumplen con $|x_1 - x_2| \geq 2\Delta x$ y si se cumple con $|x_1 - x_2| \geq \Delta x$ el límite de confianza es de un 96%.

Es importante hacer una clara diferencia entre los que es el error y la discrepancia, el error se define en virtud a sí mismo o se asocia con la exactitud de los equipos de medida, por otro lado la discrepancia se define en términos de otros resultados, inclusive resultados ya tabulados y resultados teóricos. Cuando se hace una medición de algún parámetro físico es común denominar error a la diferencia que existe con un valor ya conocido u obtenido a través de algún procedimiento matemático o como resultado de una práctica mejor elaborada con instrumentos más exactos y parámetros muy controlados, pero realmente y para ser justos con la terminología empleada, este no es propiamente un error sino una discrepancia y como tal se debe de tratar.

Trazabilidad

Un evento natural es aceptado como verdadero para la física cuando es medible, cuantificable y repetible en el tiempo y el espacio y es aquí donde el laboratorio de física toma importancia, pues es el lugar en el que ocurren estas comprobaciones; ahora cuando se toma una medida cualquiera existen factores internos y externos que hacen diferir el valor adquirido finalmente con el valor verdadero del parámetro que se está midiendo, y en consecuencia se deben tomar acciones para mitigar esta variabilidad o para reconocer en términos matemáticos el impacto del error en la toma de las medidas. Esto se logra o ajustando los instrumentos de medida o repitiendo la medida de forma concisa y metódica; para comprender mejor el concepto del error en la toma de datos, es importante antes unificar y clarificar conceptos.

Atendiendo a la definición de la Organización Internacional de Normalización (ISO),

“La trazabilidad es una propiedad que tiene la medición donde esta pueda relacionarse con referencias especificadas, usualmente estándares nacionales o internacionales, a través de una cadena continua de comparaciones todas con incertidumbres especificadas”

Este concepto apareció aproximadamente a mediados de la década de los 90, como respuesta a la Encefalopatía Espongiforme Bovina más conocida como la enfermedad de las vacas locas que apareció inicialmente en Europa cobrando la vida de muchas personas; se necesitaba entonces tener un referente histórico de las condiciones sanitarias bajo las cuales se procesaba la carne, para definir si eran aptas o no para el consumo humano.

Aunque el concepto de trazabilidad como tal es nuevo, se viene aplicando en la ciencia desde hace muchos años dentro del método científico y en particular la trazabilidad en el laboratorio de física toma vital importancia, pues permite definir un referente histórico de la manera como se realizó la medición del parámetro físico que se está analizando y de esta manera permite comprobar a otros investigadores el valor de veracidad de las conclusiones que se alcanzaron; por tanto en cualquier práctica de laboratorio, la trazabilidad debe tener en cuenta las siguientes componentes:

- Definición del objeto de estudio.** Es fundamental delimitar muy bien las variables que se van a tener en cuenta en el

El GPS y Einstein



<http://concurso.cnice.mec.es>

Figura 2.9. Satélite GPS

Los GPS –Global Positioning System– son dispositivos que permiten identificar y ubicar cualquier punto sobre la Tierra, con una precisión de hasta algunos pocos centímetros. Se basan en la señal proveniente de no menos cinco satélites de un gran grupo de 33 en órbita para calcular la posición en la que se encuentra el dispositivo GPS.

Los satélites GPS se mueven en órbitas casi circulares a 14.000 km/s y una altura aproximada de 20.000 km, y cuentan con un reloj atómico para sincronizar los tiempos de emisión de las señales, sin embargo a esa altura y esa velocidad, los relojes atómicos se adelantan 38 microsegundos al día lo que equivale a decir que los satélites estarían viajando al futuro 38 microsegundos cada día, esto efectivamente corrobora la Teoría de la Relatividad de Einstein. Este error, aunque aparentemente pequeño, de no ser corregido, ocasionaría que el GPS tuviera un error de más de 10 km de distancia sobre la superficie de la Tierra, inutilizando totalmente el equipo.

Estas sincronizaciones y correcciones las hace el mismo satélite, para proporcionar al GPS en Tierra, los valores correctos que le permiten así determinar su posición de forma casi exacta.



estudio del fenómeno físico, intentando simplificarlo lo mejor posible pero teniendo cuidado de no llegar a un modelo simplista que finalmente no describa acertadamente el evento.

- ☑ **Historicidad de la práctica:** Para poder aceptar un resultado como verdadero, este debe repetirse y para poder realizar este proceso, es importante establecer muy bien la cadena de eventos que sucedieron, la forma como se midieron aportando todas las condiciones particulares que se presentaron y en adición, el tipo y calidad de instrumentos que se utilizaron. Los resultados deben mostrarse con un formato estadístico, con su respectivo error o incertidumbre.
- ☑ **Una presentación adecuada:** que resuma de forma concisa y muy precisa para el lector, los resultados alcanzados en la práctica de laboratorio.

En consecuencia, la trazabilidad en física describe de forma detallada la manera como se hace la experiencia, el sustento teórico que se emplea y la manera como se obtienen los resultados. Aunque no existe un formato único de trazabilidad si es posible encontrar modelos comúnmente aceptados por comunidades científicas y por los grupos económicos.

2.3. Cifras Significativas

Cuando se hacen mediciones de parámetros físicos, algunas veces con ellos se deben realizar operaciones algebraicas y como consecuencia aparecen resultados con una cantidad infinita de dígitos; por ello se debe tener especial cuidado con la cantidad de números decimales a tomar y a manejar, para que estos resultados sean consistentes y coherentes.

Se denomina cifras significativas a los dígitos que se conocen con cierta certeza en una cantidad mensurada, tomando el caso del lápiz $4,63\text{cm} \pm 0.03\text{ cm}$ se tiene que:

Tabla 2.7. Cifras significativas

	Unidad	Décima	Centésima
Numero	4	6	3
Incertidumbre	0	0	3



Sobre el dígito de las unidades y de las décimas se tiene total certeza sin embargo en el dígito de las centésimas existe cierta incertidumbre; dado lo anterior se puede decir que la longitud del lápiz está expresada con tres cifras significativas; agregar más dígitos después de las centésimas no tiene ningún sentido si el valor de la incertidumbre está expresado hasta las centésimas; sería una especulación que no lleva a ninguna conclusión importante.

Para determinar la cantidad de cifras significativas de un número menor a 1 se cuentan el número de dígitos que lo conforman incluyendo los ceros que están a la derecha o en medio, los ceros que estén a la izquierda no se cuentan; como ejemplo considere la tabla 2.8.

Tabla 2.8. Cifras significativas

Cantidad	Cifras significativas
0,125	3
0,00125	3
0,001250	4
0,001250125	7
0,12500	5

En el caso de cantidades mayores a 1, para determinar el número de cifras significativas, se cuentan los dígitos que la conforman incluyendo los ceros situados en el medio, pero no se cuentan los ceros a la derecha, con la excepción que la cantidad tenga parte decimal, en cuyo caso esos ceros cuentan como dígitos.

Tabla 2.9. Cifras significativas

Cantidad	Cifras significativas
4568	4
456800	4
456801	6
456800100	7
45,68	4
45,6800	6

Cuando se operan cantidades con cifras significativas seguras y dudosas, es importante tener en cuenta que los errores se ven modificados, a estos errores no se les puede aplicar propiedades de la linealidad de números enteros y en consecuencia es preciso aplicar herramientas del cálculo más elaboradas.

Para estos cálculos con cantidades que tienen cierto nivel de incertidumbre, el resultado numérico igualmente poseerá esa misma incertidumbre o mayor por lo que las cifras significativas del resultado de una multiplicación o división por ejemplo, no pueden tener más



cifras significativas que el número de cifras significativas de la cantidad de mayor incertidumbre. Tómese como ejemplo la siguiente multiplicación de dos cantidades que se midieron en un laboratorio con instrumentos de diferente precisión

$$3,14159 \times 4,31 = 13,5402529$$

La primera cantidad tiene 6 cifras significativas mientras que la segunda cantidad tiene 3 cifras significativas, por tanto el resultado de la multiplicación de las dos cantidades no puede tener más de tres cifras significativas, así es correcto establecer que

$$3,14159 \times 4,31 \approx 13,5$$

Que tiene más sentido que el primer resultado. Para el caso de suma o resta de cantidades con incertidumbre ya no se tiene en cuenta la cantidad de cifras significativas sino cantidad de cifras decimales del número teniendo el resultado, la misma precisión de la cantidad de menor número de dígitos después de la coma. Tómese como ejemplo la siguiente operación

$$45,1254 - 2,14 = 42,9854$$

La primera cantidad tiene cuatro dígitos después de la coma siendo su precisión de 0,0001 mientras que el otro número tiene dos dígitos después de la coma lo que corresponde a una precisión de 0,01 así el resultado no debe tener más de dos cifras después de la coma, es decir su precisión solo puede ser alrededor de las centésimas.

$$45,13 - 2,14 \approx 42,99$$

Nótese que la cantidad de mayor número de cifras después de la coma, se redondea a la centésima que es la menor precisión que tiene cualquier otra cantidad en la operación; esto tiene más sentido ya que más decimales no mejoran la precisión del resultado, pudiéndose llegar a conclusiones equivocadas.

Preguntas y Ejercicios de Medición, Error y Cifras Significativas

Preguntas

1. Para medir el tiempo, arbitrariamente se toma como elemento de referencia el movimiento de la Tierra sobre su propio eje y alrededor del Sol. ¿Qué otro fenómeno podría tomarse para medir el tiempo?. Justifique su respuesta.
2. ¿Qué patrón propondría usted como referencia para medir la masa de los cuerpos y cuáles serían las características de este patrón de medida?
3. Si fuera a medir el diámetro de una esfera, el espesor de una hoja y la curvatura de un cascarón, ¿qué instrumentos utilizaría?
4. Explique las razones por las cuales se considera que un patrón de medida confiable, debe ser invariante en el tiempo.
5. Consulte sobre otras unidades derivadas y defínalas en términos de las unidades fundamentales.
6. Cuáles son las causas más frecuentes de error cuando se toman medidas en un laboratorio de física.
7. Establezca un cuadro comparativo de semejanzas y diferencias entre los conceptos de precisión y exactitud
8. ¿Qué precisión se obtiene típicamente con una regla, un vernier, un esferómetro y un tornillo micrométrico?
9. Explique qué error conceptual hay en la expresión numérica $x = (3 \pm 2)cm$
10. porqué cuando se quiere obtener el valor de un parámetro físico, es preferible realizar varias medidas a realizar una sola.
11. Enuncie algunos escenarios laborales y/o académicos donde es fundamental la aplicación de la trazabilidad.
12. Una unidad para la altura de los caballos que aún es posible encontrar es la “mano”, explique por qué este patrón no es conveniente.
13. Estime la masa de este texto en gramos y compárela usando un instrumento de medición. Qué puede concluir de la experiencia?
14. Realice una pequeña consulta sobre la “datación por prueba de carbono-14” y exponga las principales características de este método, prestando especial atención en los posibles errores en los resultados arrojados por la prueba.

Ejercicios

1. La distancia aproximada entre la Tierra y la Luna es 350.000 km. Haciendo uso de notación científica, exprese esta cantidad en metros.
2. Una cuadra es un sistema de medición de origen Español que consiste en un cuadrado de 80m de lado. Encuentre el área de una cuadra expresada en metros cuadrados y yardas cuadradas.
3. La velocidad del sonido en el acero es aproximadamente 5200 m/s. Encuentre esa rapidez en km/h y en milla/h.
4. Una piscina tiene una dimensión de 12m×8m×140 cm. Encuentre la capacidad de la piscina expresada en litros y en galones americanos.
5. Dada su edad en años, exprésela en días, horas y segundo, usando notación científica cuando esto sea necesario.
6. Si un galón de pintura cubre una superficie de 25m², cuántos litros de pintura se necesitan para pintar 200m².
7. Un automóvil promedio tiene un tanque de 12 galones con un rendimiento de 40 km/gal, exprese este mismo rendimiento en kilómetros por litro y la capacidad del tanque del auto en litros.
8. Una lámina rectangular tiene $(4,51 \pm 0.03)cm$ de largo y $(2,4 \pm 0,1)cm$ de ancho. Encuentre el perímetro de la lámina y su área con sus respectivas incertidumbres.
9. Por medio de un nonio, se determina que el diámetro de cierta moneda es $(1,72 \pm 0.01)cm$, encuentre el perímetro y la superficie de la moneda con sus respectivas incertidumbres.
10. En cierta práctica de laboratorio se hace la medida del punto de impacto de la caída de un cuerpo llegando a los siguientes valores consignados en la tabla.

Dato	1	2	3	4	5	6	7	8
Valor (cm)	14,23	14,4	13,98	14,01	13,88	14,32	14,17	14,1

- A. Pueden asumirse estos datos como representativos para el parámetro medido?
- B.Cuál es el mejor valor que representa la distancia medida –incluya el valor de incertidumbre–