

# MEDICIONES CONFIABLES EN LA PRÁCTICA DE LA INGENIERÍA

Rubén J. Lazos Martínez

Trabajo realizado por el Centro Nacional de Metrología

El Marqués, Qro., México, 31 de agosto de 2006.

## IMPORTANTE

Este material ha sido elaborado por el Centro Nacional de Metrología con recursos del gobierno mexicano, por lo que solamente está permitida la reproducción del documento sin fines de lucro y haciendo referencia a la fuente:

Rubén J. Lazos-Martínez, Centro Nacional de Metrología, El Marqués, Qro., México, agosto de 2006.

**En mi práctica profesional**

**¿Qué tengo que hacer para que una medición sea confiable?**

**¿Qué beneficios obtengo al medir bien?**

Las mediciones son de indiscutible importancia en ingeniería. La práctica profesional de esta disciplina demanda el manejo de algunos conceptos básicos de metrología, los cuales deben formar parte del cúmulo de conocimientos que los egresados deben adquirir y practicar durante su formación profesional.

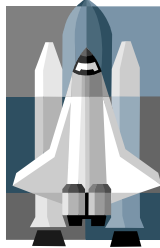
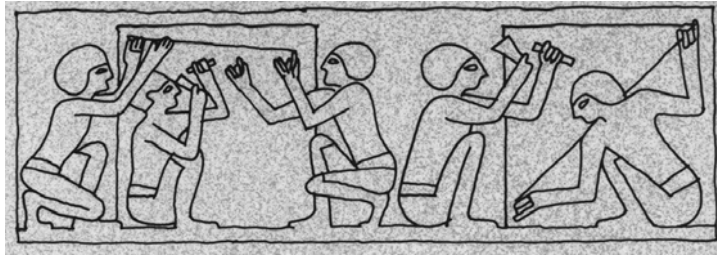
El Centro Nacional de Metrología (CENAM) desea compartir sus experiencias con los estudiantes de ingeniería próximos a completar su formación, y con ello promover una mejor cultura de las mediciones en el país.

Repasar algunos conceptos básicos sobre mediciones y procesos de medición

- error
- repetibilidad y reproducibilidad
- patrón de medición
- calibración
- trazabilidad e incertidumbre de la medición

Indicar algunas características de la infraestructura en el país para obtener mediciones confiables

Ilustrar algunas aplicaciones de la metrología en el ejercicio profesional de los ingenieros.



Los ingenieros –personas que se dedican al aprovechamiento práctico del conocimiento científico– constituyen uno de los gremios siempre presentes en la historia de la humanidad. Su trabajo se apoya en mediciones, independientemente de su especialidad: construcción de edificios; diseño y construcción de herramientas, barcos, artefactos para la agricultura, transbordadores, aplicaciones a la medicina, comunicaciones, etc.

### DISEÑA

compara  
innova  
adapta  
calcula  
estima  
planea  
...

### FABRICA

implementa  
capacita  
calcula  
estima  
supervisa  
ajusta  
...

### EVALÚA

inspecciona  
compara  
supervisa  
ajusta  
...

## TOMA DECISIONES

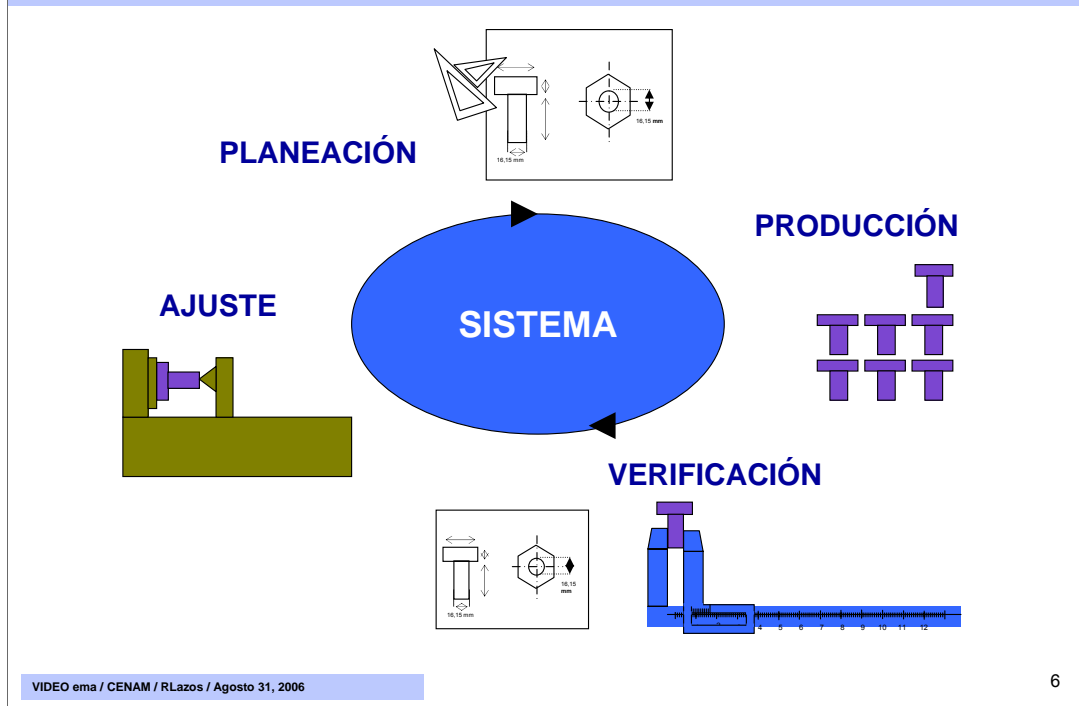


El alcance de las actividades de un ingeniero es muy vasto, pero se puede decir que incluye el diseño, la fabricación y la evaluación de productos (inclusive servicios), actividades que admiten desgloses adicionales en los cuales se encuentran muy probablemente las labores particulares que usualmente desempeña.

En todo caso, un ingeniero TOMA DECISIONES, lo cual puede llevarse a cabo a partir de argumentos emocionales, por imitación, intuitivos, u otros de naturaleza subjetiva; o bien bajo consideraciones objetivas como los resultados de mediciones.

Aún cuando medir no se percibe usualmente como una actividad compleja, es indispensable atender apropiadamente el proceso de medición para que sus resultados sean confiables, en el sentido en que reflejen realmente aquello que se quiere medir y que puedan ser reproducidos, con las correcciones pertinentes, en condiciones distintas a las prevalecientes al tiempo de la medición.

Las mediciones que usa un ingeniero deben ser confiables; de otro modo su uso puede dar lugar a decisiones equivocadas. Las mediciones confiables deben tener necesariamente integradas consideraciones metrológicas como su incertidumbre y su trazabilidad.



Las mediciones en un sistema productivo permiten que se mantenga vigente el propósito para el cual fue establecido.

El ciclo PHVA –planear, hacer, verificar y ajustar- es una de las muchas expresiones de este concepto. La consecuencia de la falta de mediciones es la degradación del sistema.

## unidad

magnitud particular, definida y adoptada por convenio, con la cual son comparadas otras magnitudes del mismo tipo para expresar la **cantidad** relativa a esa magnitud

**##** ... **unidad**

número

símbolo

5 kg    25,8 L    8,7 x 10<sup>-6</sup> V    4,672 ns  
8,9 THz    1,2 Pa    6,35 cd    23 mA    2,26 MW  
0,003 K

Refs: NOM-008-SCFI  
El Sistema Internacional de Unidades, CENAM

Según el Diccionario de la Real Academia Española, *medir es comparar una cantidad con su respectiva unidad, con el fin de averiguar cuántas veces la segunda está contenida en la primera*. Por tanto, el resultado de una medición debe contener por lo menos un número y la indicación de la unidad que se toma como referencia.

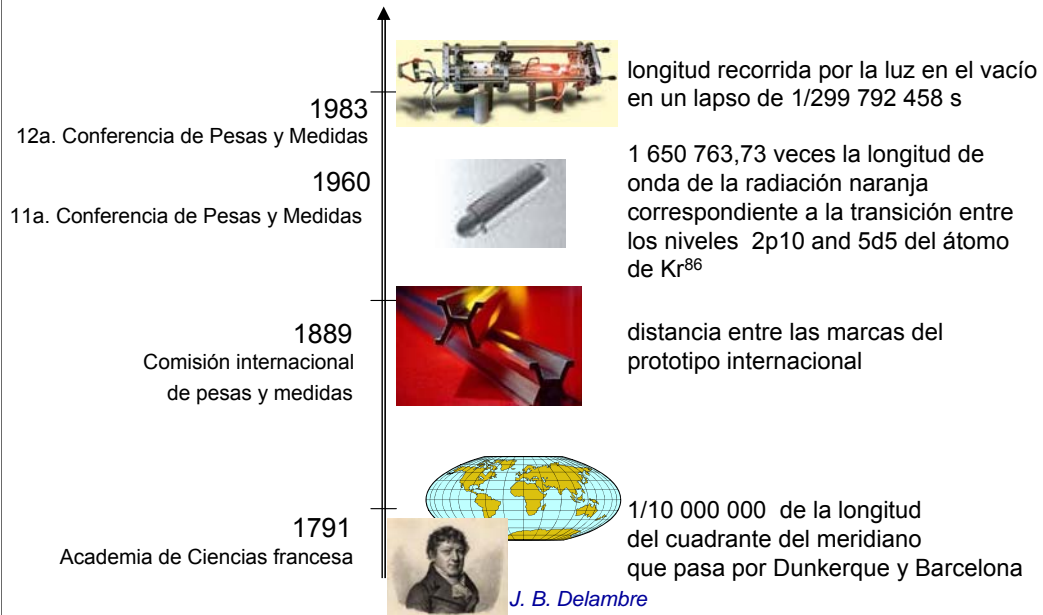
El término unidad está definido como se muestra en la diapositiva según la referencia ***International vocabulary of basic and general terms in metrology. BIPM. (VIM) Su equivalente en México es la norma mexicana NMX-Z-055-IMNC.***

***A menos que se indique de otra manera, las definiciones en este trabajo son las establecidas en esta referencia.***

La Oficina Internacional de Pesas y Medidas, BIPM por sus siglas en francés, - <http://www.bipm.fr/>- es el organismo, establecido por la comunidad internacional, responsable de coordinar el uso de las unidades de medida que actualmente constituyen el Sistema Internacional de Unidades (SI). Los símbolos para representar las unidades han sido convenidos de la misma manera en que se lo han sido las propias unidades.

En México, el SI es parte del Sistema General de Unidades de Medida, de acuerdo a lo establecido en la norma oficial *NOM-008-SCFI Sistema General de Unidades de Medida*. Otra referencia es *El Sistema Internacional de Unidades, CENAM*, disponible en <http://www.cenam.mx/publicaciones/gratuitas/>.

Con la finalidad de hacer práctico el uso de las unidades, se emplean prefijos para denotar múltiplos y submúltiplos decimales de las unidades; pueden consultarse también en las referencias bibliográficas mencionadas.



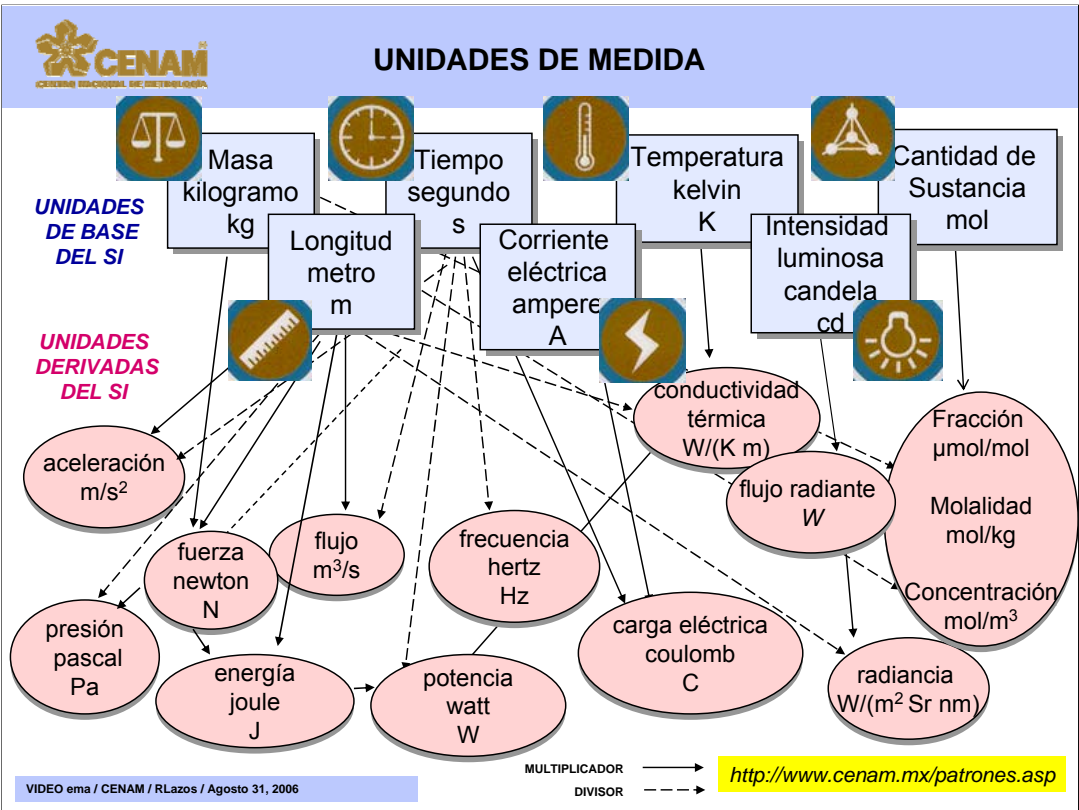
A manera de ejemplo, la evolución de la definición y la realización del metro es ilustrativa.

Uno de los grandes méritos de los científicos franceses de finales del siglo XVIII es usar una definición de la unidad de longitud en términos de magnitudes que no estuvieran sujetas a modificaciones por el hombre, y que fuese universal en el sentido de ser accesible por cualquier interesado, independientemente de su nacionalidad u otras especificidades. Debieron pasar varios años para que Mechain y Delambré pudieran llevar a la práctica la realización de esa definición del metro, y décadas para que fuera adoptada como unidad de longitud por la comunidad internacional –mediante el prototipo internacional–.

En 1960 fue modificada la definición para aprovechar la mejor estabilidad, reproducibilidad y facilidad de uso de los fenómenos atómicos.

Relativamente rápido, se encontró una nueva definición en términos de la velocidad de la luz en el vacío, una constante fundamental de la naturaleza.





El Sistema Internacional de Unidades (SI) establece siete unidades de base indicadas en la diapositiva, de las cuales se obtienen las llamadas unidades derivadas.

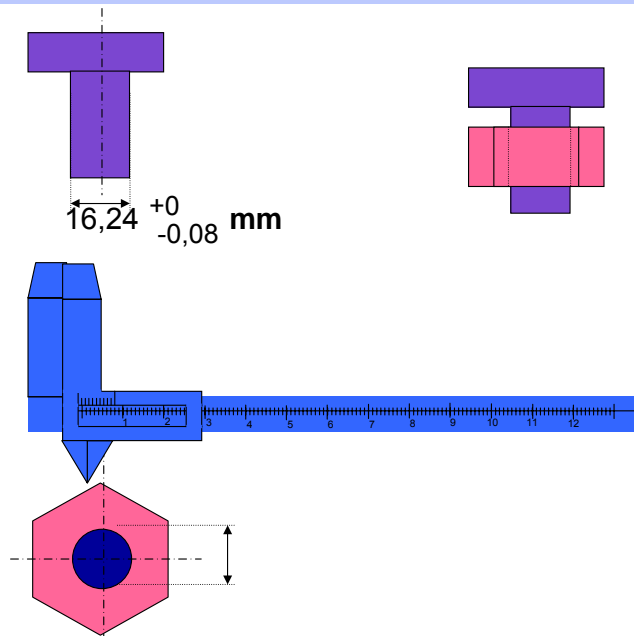
Cabe mencionar que la selección de las unidades de base fue también una convención. No existe alguna razón científica que las haga singulares. La evolución de la ciencia apunta a nuevas definiciones de unidades, y posiblemente a un nuevo conjunto de unidades de base, en términos de constantes fundamentales.

Sin embargo, en algunos casos, por ejemplo dureza, la definición de la unidad SI correspondiente aún está en proceso.

En México el CENAM tiene la responsabilidad de establecer patrones de medida que realicen las unidades. A la fecha ha desarrollado 63 patrones.

El Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) tiene a su cargo los patrones relacionados con radiaciones ionizantes.

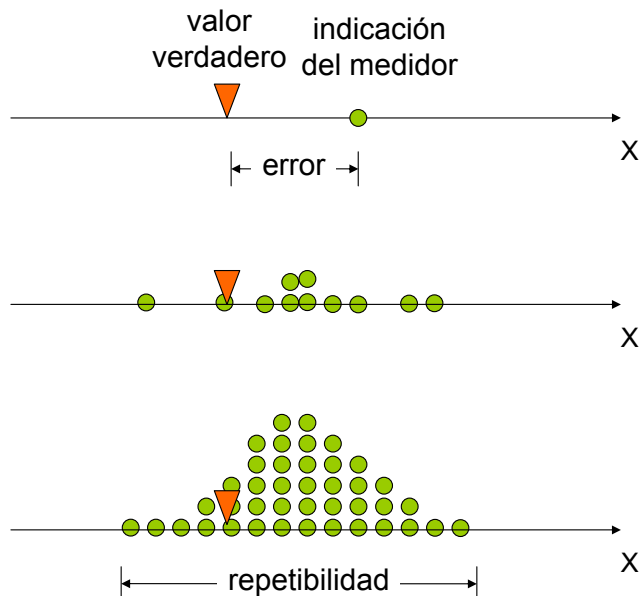
La descripción de los patrones nacionales puede consultarse en <http://www.cenam.mx/patrones.asp>.



El resultado de la actividad de medir no parece ser complicado. Se distinguen dos elementos que lo componen: una unidad y una cuantificación de la relación entre la unidad y la cantidad sujeta a medición.

El instrumento de medición es el medio con el cual se compara la cantidad con la unidad, o se determina el valor de la magnitud.

Existen situaciones en las que el resultado de la medida implica tanto el uso de instrumentos de medida como la aplicación de un método determinado, en cuyo caso los conceptos que se tratan en este trabajo son igualmente aplicables.



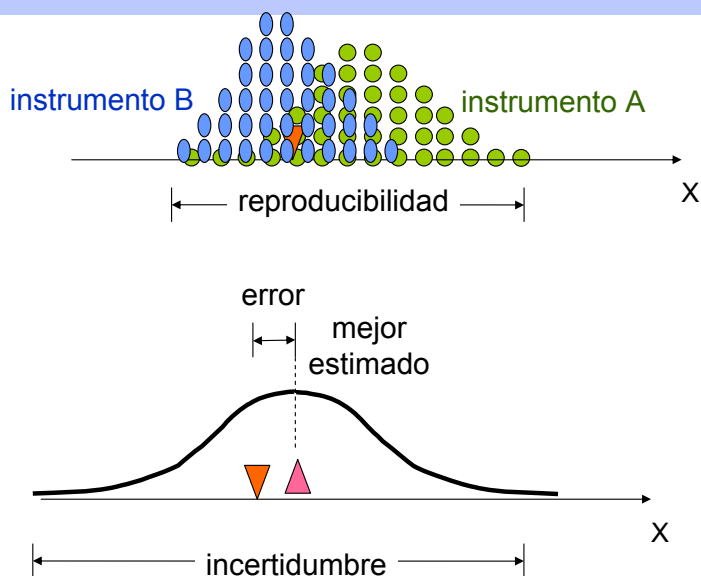
La actividad de medir conlleva inherentemente cierta falta de información. Los elementos con los cuales se realiza la medición están sujetos a innumerables efectos que impiden tener certeza absoluta sobre los resultados de la medición. Por tanto, no puede asegurarse el conocimiento del valor verdadero. Sin embargo, por razones prácticas frecuentemente se acuerda un **valor convencionalmente verdadero**.

Con este valor convencionalmente verdadero como referencia, es posible referirse al **error de una indicación**.

Dadas las condiciones variables a las que están sujetos los elementos que intervienen en la medición, se obtienen diferencias entre ellas al repetir la misma bajo situaciones aparentemente idénticas.

La **repetibilidad**, de acuerdo a su definición, es : Proximidad de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas del mismo mensurando, con las mediciones realizadas con la aplicación de la totalidad de las siguientes condiciones: mismo procedimiento de medición, mismo observador, mismo instrumento, mismo lugar, mismas condiciones de uso, repetición en un periodo corto de tiempo.

El mensurando es la magnitud sujeta a medición.



Cuando hay cambios intencionados en los elementos que intervienen en la medición, ocurren variaciones adicionales. La variación debida a estos cambios es considerada por la **reproducibilidad** definida como la Proximidad de concordancia entre los resultados de mediciones del mismo mensurando, con las mediciones realizadas haciendo variar las condiciones de medición tales como:

- principio de medición,
- método de medición,
- observador,
- instrumento,
- patrón de referencia,
- lugar,
- condiciones de uso,
- tiempo.

Finalmente la incertidumbre considera todas las causas de variación.

**ERROR de medición**

El resultado numérico de una medición menos un valor verdadero del mensurando.

Implica un valor tomado como referencia.

Puede corregirse.

Se estima a partir de promedios.

**INCERTIDUMBRE de medición**

Parámetro asociado al resultado de una medición que caracteriza la dispersión de los valores que podrían razonablemente ser atribuidos al mensurando.

Puede reducirse.

Se estima a partir de parámetros de dispersión.

Son notables las diferencias entre los conceptos de error e incertidumbre. Una de éstas consiste en que el error puede llevarse a cero, en tanto que es imposible hacerlo con la incertidumbre.

expresión de una medida:

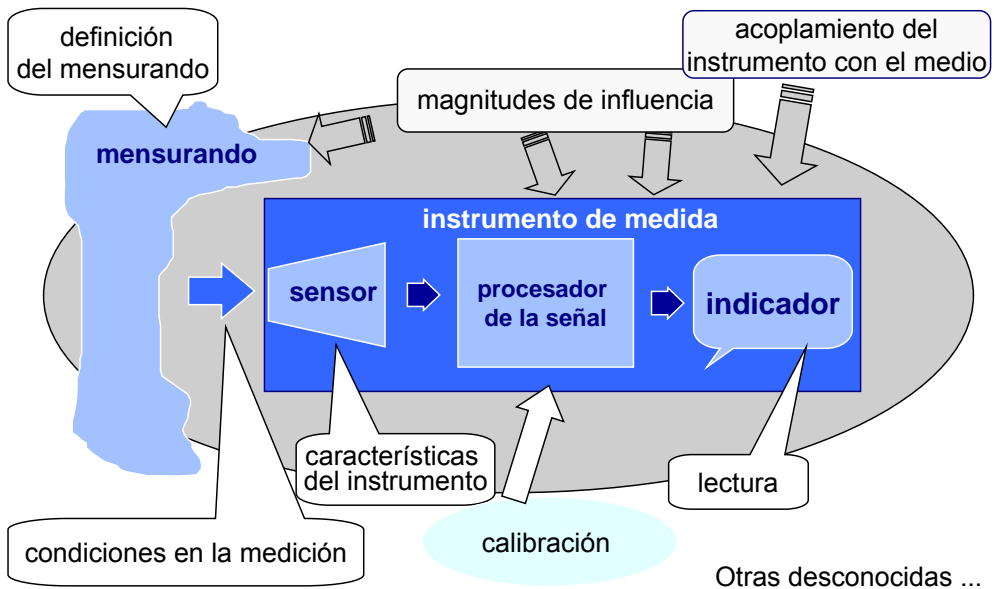
**## ... unidad**

**(promedio – error) ± incertidumbre  
de lecturas** **unidad**

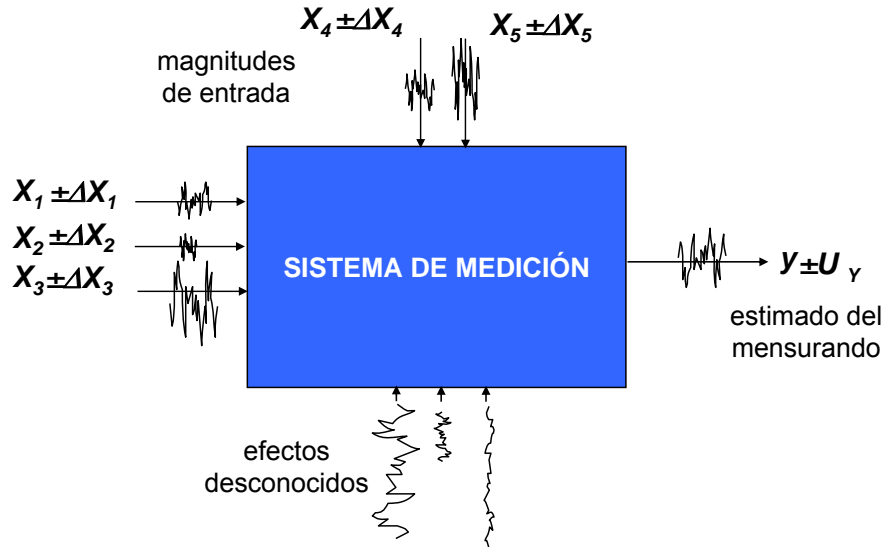
Las medidas entonces se expresan incluyendo :

- el promedio de las lecturas corregido por el error ocurrido;
- una estimación numérica de la incertidumbre de la medición; y,
- la indicación de la unidad de medida que corresponda.

## IMPERFECCIONES EN:



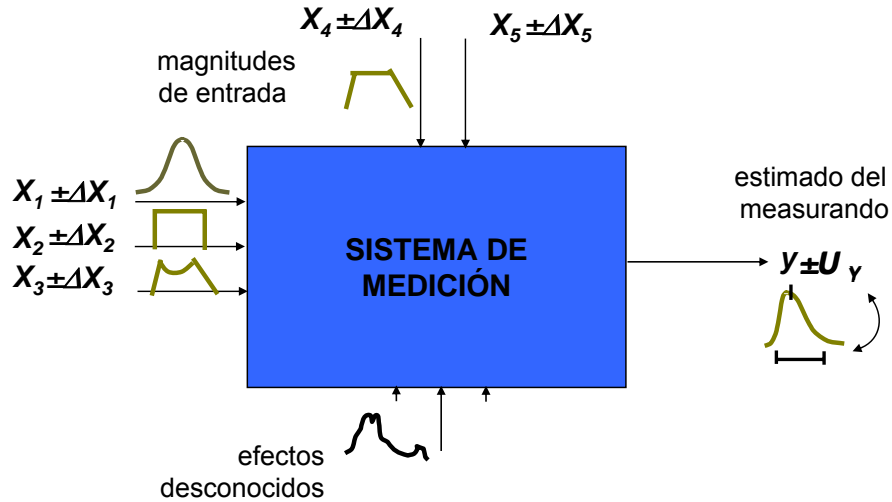
Según W. Kessel, investigador del instituto alemán de metrología, la incertidumbre de la medición es una declaración de ignorancia física. Tiene sus causas en la imperfección de los elementos que intervienen en la medición. Como ejemplos, la definición imperfecta del mensurando –magnitud sujeta a medición- contribuye a la incertidumbre de los resultados; las limitaciones del instrumento para mostrar toda la información que recaba contribuye también a la incertidumbre; etc.



La variación en los elementos que causan la incertidumbre puede deberse a la falta de control, en el mejor de los casos, o la falta de conocimiento suficiente de todos los detalles que pueden influir sobre el proceso de medición. Más aún, no es posible incorporar todos los efectos para describir con certeza absoluta el valor del mensurando.

Por tanto, los resultados de las mediciones tienen que describirse usando la estadística. La cuantificación de la incertidumbre de medida en términos de la varianza reconoce que los resultados de mediciones son de naturaleza estadística.



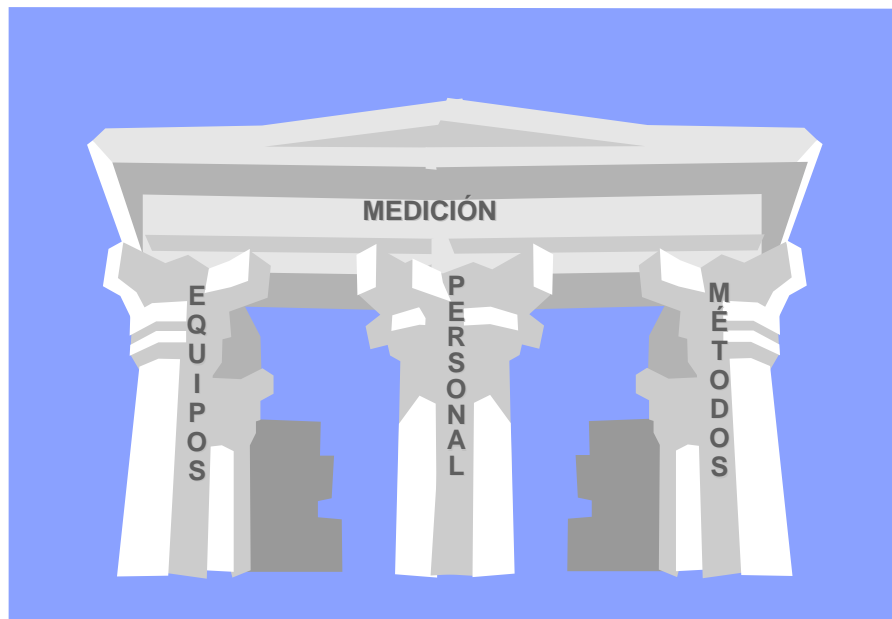


La expresión de la medida resulta de una combinación de **DISTRIBUCIONES**

Una descripción estadística incluye los promedios de las lecturas de las magnitudes que influyen en la medición, la varianza –o la desviación estándar- de tales lecturas, y en general información sobre la función de densidad distribución de probabilidad -o sobre la función de distribución de probabilidad- asociada a cada una de tales magnitudes.

Adicionalmente, es necesario desarrollar o aplicar un modelo de la medición para combinar apropiadamente los efectos de las distintas magnitudes en el mensurando.

El proceso aceptado para estimar la incertidumbre de las medidas se encuentra en *Guide to the expression of the uncertainty in measurement, BIPM*, cuyo equivalente en México es la norma NMX-CH-140-IMNC-2001 *Guía para la expresión de la incertidumbre en los resultados de las mediciones*.



El resultado de una medición depende de tres elementos fundamentales: equipos e instalaciones, métodos y procedimientos, y personal.

Una medida no puede ser confiable si alguno de estos elementos no está presente de manera apropiada. La trazabilidad, y con ella la incertidumbre de las mediciones, requiere necesariamente de

- la disponibilidad de equipos e instalaciones adecuadas al propósito de la medida;
- la aplicación de los métodos y procedimientos apropiados;
- y, sobre todo, del concurso de personal competente, con habilidades y conocimientos que le permitan evaluar los resultados que obtenga, y no sólo estar limitado a aplicar técnicas conocidas.

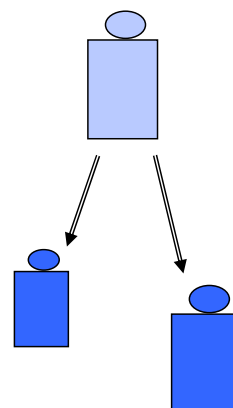
Los valores éticos del personal deben ser sólidamente comprometidos en las tareas de medición, para las cuales muy frecuentemente el usuario no tiene la posibilidad de hacer verificaciones adicionales.

**Patrón:**

Medida materializada, aparato de medición o sistema de medición destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una **unidad**, o uno o varios valores conocidos de una magnitud, **para servir de referencia.**

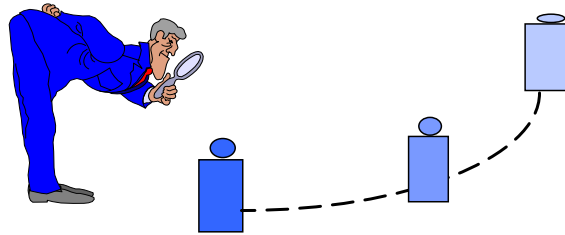
**Calibración:**

Conjunto de operaciones que establecen bajo condiciones especificadas, la **relación entre los valores indicados por un aparato\_o** sistema de medición o los valores representados por una medida materializada y **los valores** correspondientes de la magnitud realizada por **los patrones.**



Un patrón de medición es una referencia de la unidad de medida, que se haya convenido en usar. Puede notarse que un patrón puede tomar varias formas, por ejemplo, una pesa calibrada, un bloque patrón calibrado y un material de referencia certificado son medidas materializadas de las unidades respectivas; una balanza y un termómetro calibrados son aparatos que también pueden servir como patrones.

La calibración es la actividad por la cual se disemina la unidad desde su origen definitorio hasta las mediciones necesarias en el lugar de producción. Debe notarse que la calibración consiste en encontrar la relación entre las indicaciones del instrumento y los valores del patrón. No implica formalmente hacer ajuste alguno, aunque es conveniente realizar los ajustes en los instrumentos al momento de calibrarlos con el propósito de facilitar su uso.



**Propiedad del resultado de una medición** o de valor de un patrón, tal que éste pueda ser **relacionada a referencias determinadas**, generalmente patrones nacionales o internacionales, por medio de una **cadena ininterrumpida** de comparaciones teniendo todas **incertidumbres** determinadas.

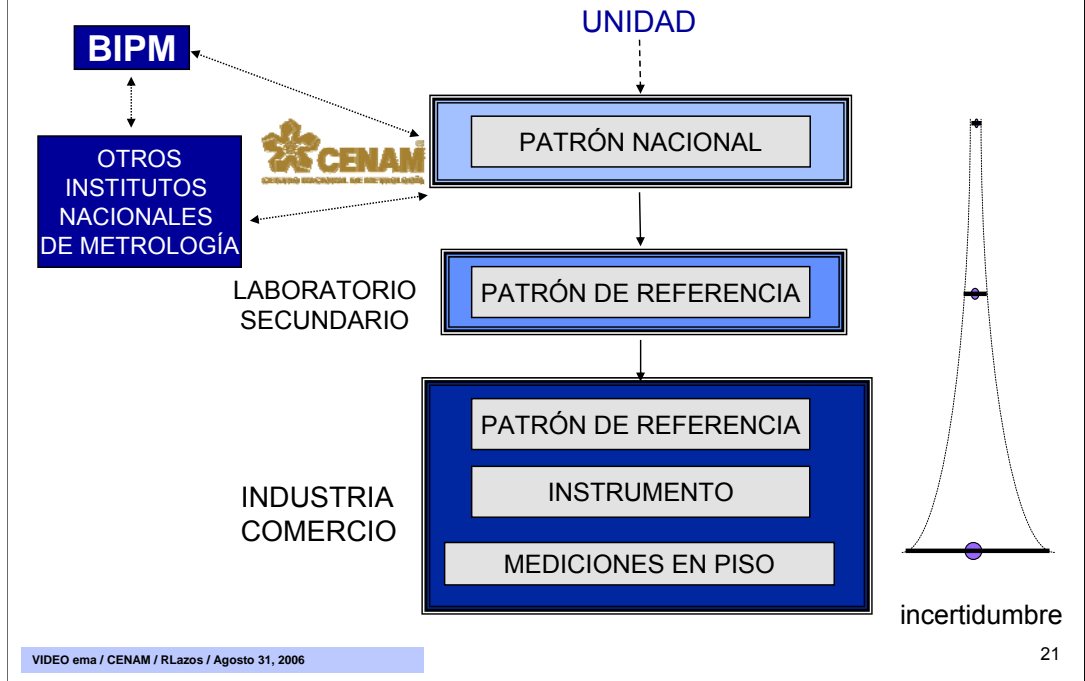
La trazabilidad de una medida permite diseminar la referencia determinada, que de hecho define la unidad de medida que se ha convenido, y con ello permite que los resultados de mediciones de la misma magnitud sean comparables.

Los eslabones de la cadena ininterrumpida de comparaciones están constituidos de calibraciones o mediciones, por lo cual tienen incertidumbres de medición asociadas. Cabe señalar que los valores de las incertidumbres aumentan en la medida que el eslabón se aleja más de la referencia determinada, origen de la cadena.

El otro extremo de la cadena se encuentra en la medición que realiza el usuario.

Al comparar dos medidas, se consideran:

- a. la diferencia de sus mejores estimados –representados por sus promedios corregidos por los errores pertinentes- y
  - b. la incertidumbre de cada medición,
- y se aplican criterios estadísticos de equivalencia.



Los resultados de medición y los valores de los patrones se integran en una cadena –llamada cadena de trazabilidad- que va desde una referencia, como los patrones nacionales hasta la medición en piso.

Las flechas que unen los patrones y las mediciones en piso representan las calibraciones correspondientes.

Se observa que aún cuando está indicada la UNIDAD, la relación con el patrón nacional no se establece mediante una calibración, salvo en el caso de la masa.

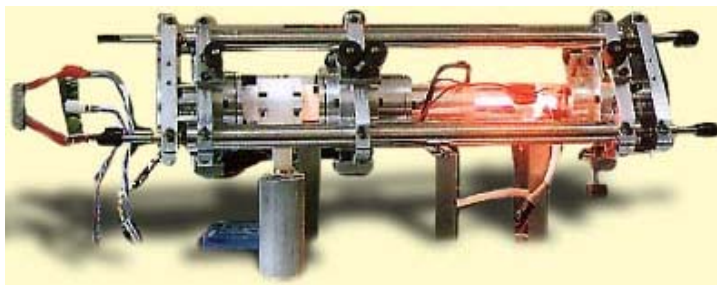
Por otro lado, los patrones nacionales se comparan sistemáticamente con patrones de otros países, con la coordinación de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas, cuyo portal se encuentra en <http://www.bipm.fr/> .

Debe notarse que intervienen varios actores en la cadena, un instituto nacional de metrología –el CENAM o el ININ en México-, laboratorios de calibración en este caso denominados secundarios, y los usuarios finales, entre los cuales puede estar la industria, el comercio, las autoridades, etc.

Cabe hacer notar que los laboratorios secundarios de calibración pueden mejorar la confianza en sus resultados mediante su acreditación, que implica la obtención del reconocimiento formal de su competencia por un tercero.

**Definición**

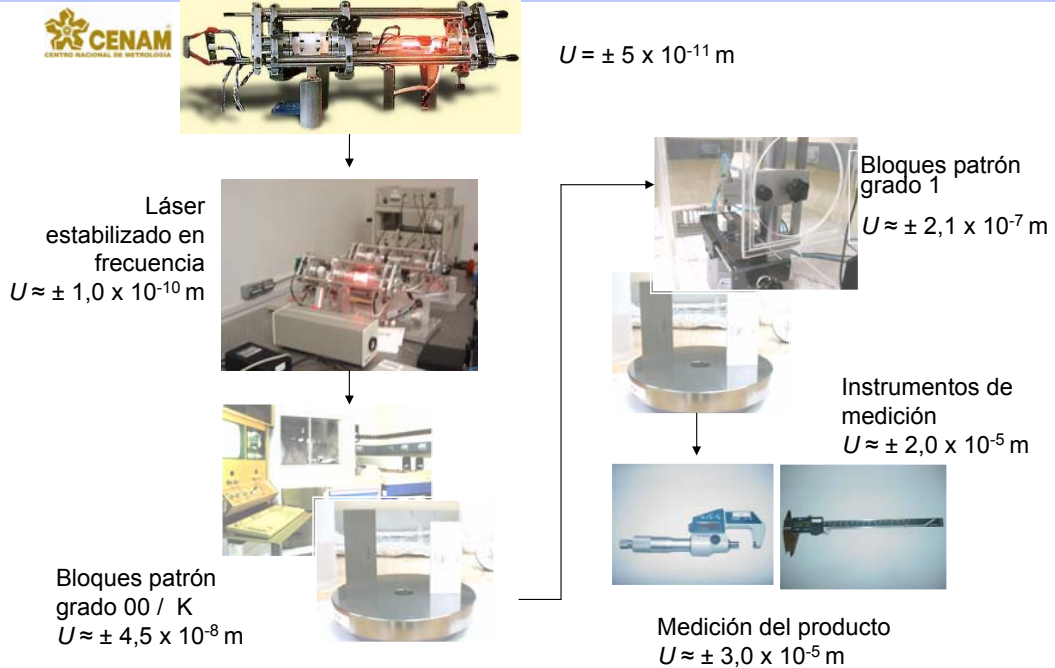
longitud recorrida por la luz en el vacío en un lapso de  $1/299\,792\,458$  s

**Realización:**

**láser estabilizado en frecuencia por medio de espectroscopia saturada de la molécula de yodo  $^{127}\text{I}_2$  operando a una longitud de onda de  $\lambda = 632,991\,398\,22$  nm**

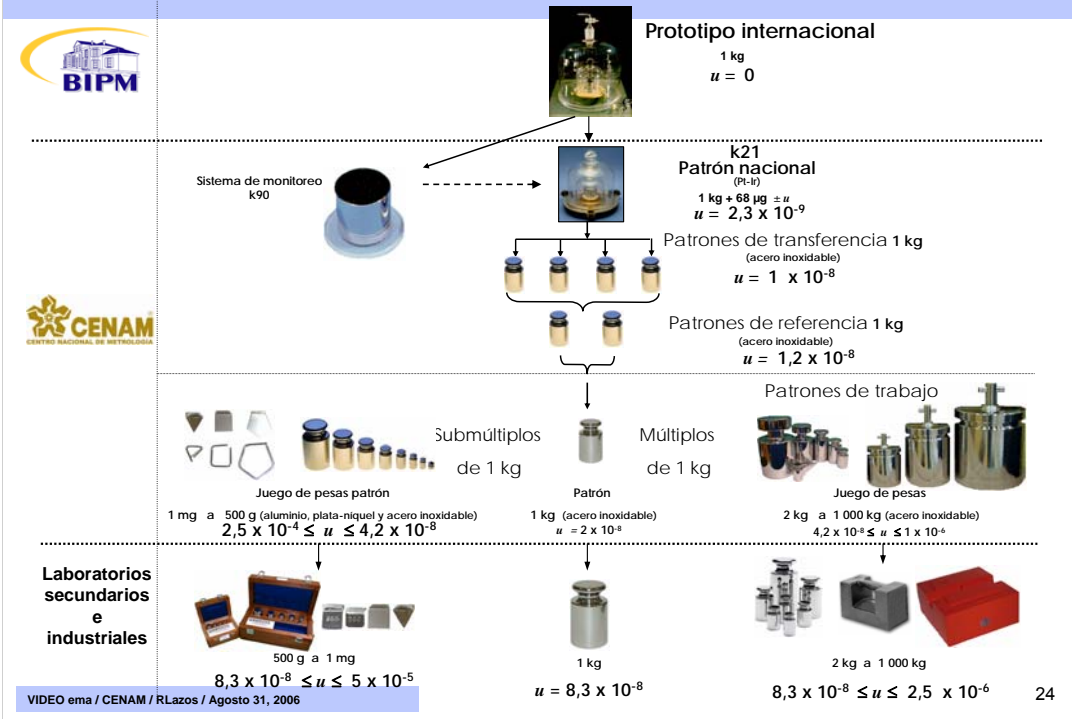
Incertidumbre expandida:  $\pm 5 \times 10^{-11}$  (para un factor de cobertura  $k=2$ )

La unidad de longitud, el metro, se lleva a la práctica –se realiza- mediante un láser estabilizado en frecuencia como se indica, para lo cual se sigue un conjunto de recomendaciones emitidas por el BIPM.



Como ejemplo, se muestran los componentes de la cadena de trazabilidad de las mediciones de longitud en México.

Debe notarse los valores crecientes de las incertidumbres de las mediciones conforme se alejan del origen de la trazabilidad, en este caso el patrón nacional de longitud.



La figura muestra la cadena de trazabilidad de las medidas de masa en México. Se inicia con la masa del prototipo internacional, que por definición tiene una masa de 1 kg –con incertidumbre cero–, esto es, define la unidad de masa, y se disemina mediante réplicas asignadas a los institutos de metrología en el mundo. El CENAM tiene bajo su resguardo la copia denominada K21, la cual ha sido designada como patrón nacional de masa.

En la última comparación del K21 con el prototipo internacional se determinó que existe una diferencia de 68  $\mu\text{g}$ , y la incertidumbre de esta medida es de  $\pm 2,3 \mu\text{g}$ .





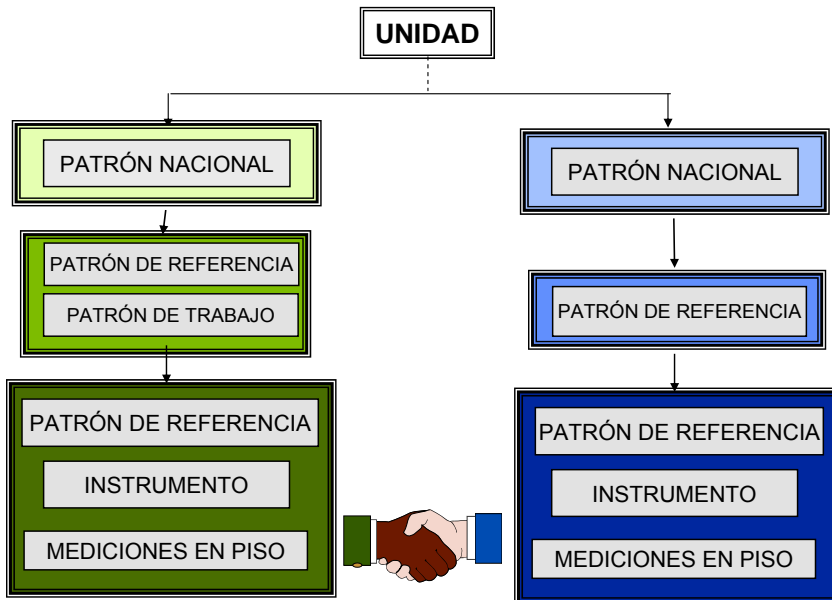
- kg** masa del prototipo internacional del kilogramo.
- s** duración de 9 192 631 770 periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del átomo de cesio 133.
- A** intensidad de una corriente constante que mantenida entre dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable y colocados en el vacío separados 1 m uno del otro, producirá una fuerza de  $2 \times 10^{-7}$  N/m entre estos conductores.
- K** la fracción  $1/273,16$  de la temperatura termodinámica del punto triple del agua.
- cd** intensidad luminosa en una dirección dada de una fuente de radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12}$  Hz y cuya intensidad energética en esa dirección es de  $1/683$  W/sr.
- mol** cantidad de substancia que contiene tantas entidades elementales como existen en 0,012 kg de C
- m** longitud recorrida por la luz en el vacío en un lapso de  $1/299\,792\,458$  s.

Es notable la diferencia conceptual entre la definición del kilogramo y la del segundo: El prototipo del kilogramo no puede reproducirse idénticamente y sólo pocos de los interesados tienen acceso directo al mismo; el segundo es reproducible independientemente de tiempo y lugar, y sólo se necesita disponer de cesio 133, del adecuado equipo y del conocimiento suficiente para realizar las medidas.

Note que es imposible realizar estrictamente la unidad de corriente eléctrica, razón por la que actualmente se buscan sustitutos.

Están en marcha proyectos multinacionales con el propósito de redefinir la unidad de masa en términos de magnitudes eléctricas. A la fecha, la incertidumbre que se ha logrado aún es demasiado burda para realizar la sustitución.

## Propicia acuerdos cliente-proveedor



Si dos mediciones tienen un origen común, y los elementos de la cadena son confiables, no es difícil lograr acuerdos entre clientes y proveedores. De modo inverso, la falta de una referencia común, o la pérdida de credibilidad en alguno de los elementos de la cadena de trazabilidad dan lugar a conflictos entre los usuarios de las mediciones al final de la cadena.

# TRAZABILIDAD

GLOBALIDAD

MEDICIONES EQUIVALENTES

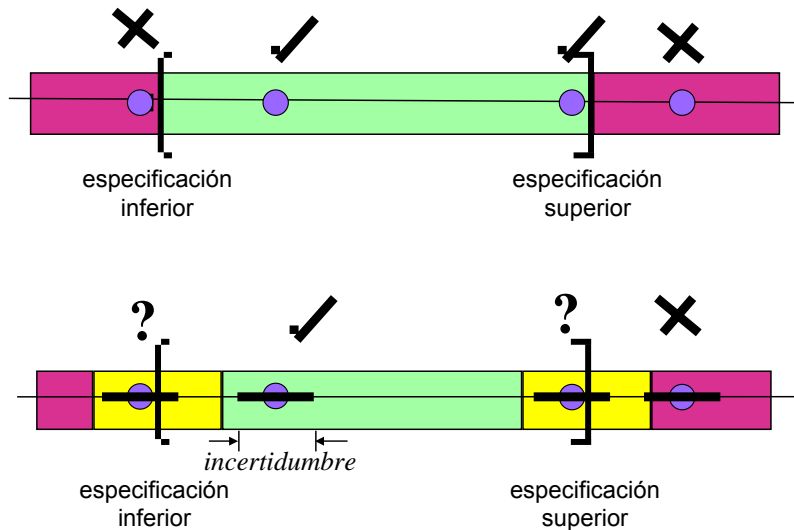


La confiabilidad del sistema depende de la fortaleza de sus elementos

INTERCAMBIABILIDAD

¿Qué tan importante es este concepto para los ingenieros?

La trazabilidad de las mediciones es un concepto que cobra importancia en la situación de globalidad actual. En el intercambio comercial de productos entre individuos, organizaciones o naciones, el ideal es hacer una medición única sobre el producto en la cual puedan confiar los involucrados para tomar decisiones.



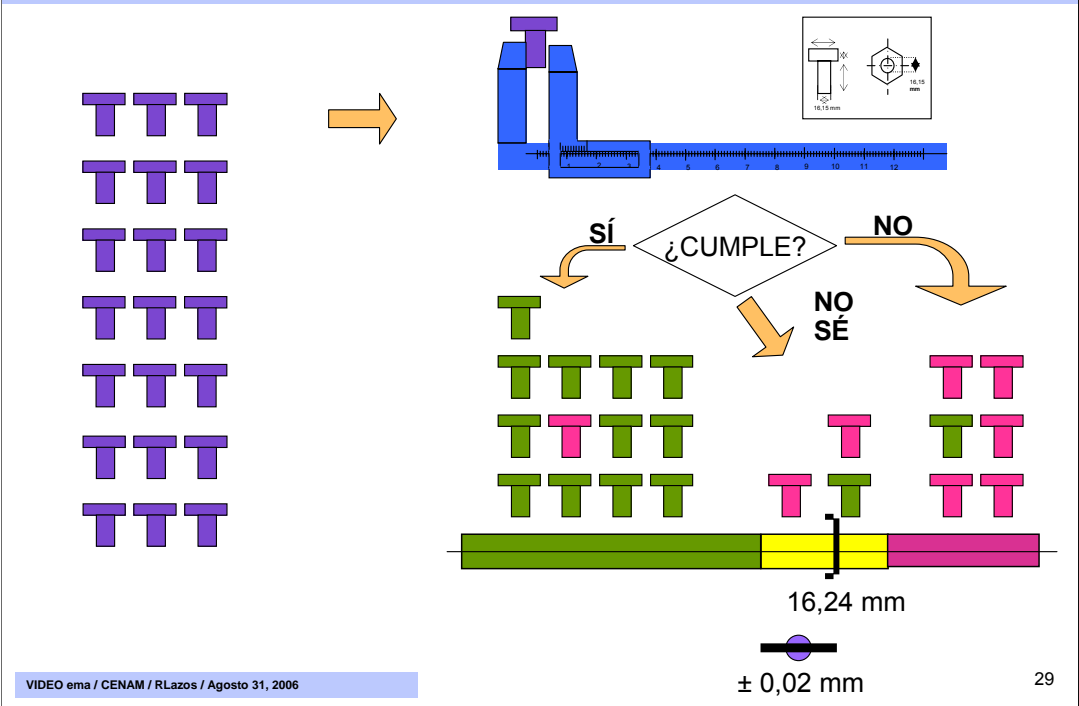
**PARA TOMAR DECISIONES APROPIADAS**

En la práctica de la ingeniería, la toma de decisiones está siempre presente. Considérese como ejemplo la decisión de aceptar o rechazar un producto tomando como criterio el cumplimiento o no de sus especificaciones.

Si las mediciones fueran perfectas, si su incertidumbre fuera nula, sólo habría dos opciones como resultado de la comparación con las especificaciones: aceptación o rechazo.

En la realidad debe considerarse la incertidumbre de la medición al decidir el cumplimiento de la especificación, con lo cual aparece una tercera opción en la cual no se tiene información suficiente que aseguren el cumplimiento o no-cumplimiento con las especificaciones. Esta situación se presenta cuando el resultado de la medición se encuentra tan cerca de los valores de la especificación que la incertidumbre de la medida no permite decidir con certeza: el valor verdadero puede ser cualquiera de los contenidos en la incertidumbre.

La solución cuando ocurre esta tercera opción depende del caso específico, y puede consistir en repetir la medida, usar otro instrumento, degradar el producto, etc.



La eficiencia de un sistema productivo depende de que la verificación de la conformidad con las especificaciones se lleve a cabo confiablemente, incluida la debida consideración a al incertidumbre de las mediciones como parte del criterio de toma de decisiones de aceptación – rechazo.

costo

alto costo  
por no calidadINCERTIDUMBRE ACTUAL  
(mucho mayor que)  
INCERTIDUMBRE REQUERIDAalto costo  
por operaciónINCERTIDUMBRE ACTUAL  
(mucho menor que)  
INCERTIDUMBRE REQUERIDAINCERTIDUMBRE ACTUAL  
(del orden de)  
INCERTIDUMBRE REQUERIDA

Debe considerarse que el “costo” incluye no sólo el incurrido al efectuar la medición, sino también el de sus consecuencias.

En un extremo, cuando la incertidumbre actual es mucho mayor que la requerida, las actividades asociadas a la no calidad como reclamaciones y retrabajos elevan los costos. En el otro, un sistema de medición con incertidumbre actual demasiado pequeña incrementa los costos por la inversión en equipo, instalaciones, capacitación y operación del sistema de medición mismo.



#### Misión

Apoyar a los diversos sectores de la sociedad en la satisfacción de sus necesidades metrológicas presentes y futuras, con el establecimiento de patrones nacionales de medición, el desarrollo de materiales de referencia y la diseminación de sus exactitudes por medio de servicios tecnológicos de la mas alta calidad, para incrementar la competitividad del país y contribuir al desarrollo sustentable y mejorar la calidad de vida de la población.

El Centro Nacional de Metrología –CENAM- es un organismo descentralizado del gobierno federal coordinado por la Secretaría de Economía.

Sus instalaciones están ubicadas en el km 4,5 de la carretera a Los Cués en el municipio El Marqués del Estado de Querétaro.

- Tomar decisiones es una de las principales actividades de un ingeniero en la práctica de su profesión
- Las mediciones deben ser confiables: repetibles, reproducibles y comparables
- La trazabilidad de las mediciones hace posible su equivalencia
- La incertidumbre forma parte de toda medición
- Es muy recomendable tomar decisiones con soporte en mediciones, sin olvidar su incertidumbre.

Entonces, aún cuando el tema de las mediciones ha estado presente en las civilizaciones más antiguas y en la actualidad ocasionalmente no se le da la debida relevancia, en el CENAM estamos convencidos de que los estudiantes de ingeniería necesitan contar con una sólida formación en mediciones como parte de su capital de conocimientos, que les permita practicar su profesión con altos estándares de desempeño.



# *Muchas gracias*

**Centro Nacional de Metrología**

**Rubén J. Lazos Martínez**

**Tel 01(442) 211 0575**

**FAX 01(442) 211 0568**

**Correo electrónico:**

**rlazos@cenam.mx**

**www.cenam.mx**