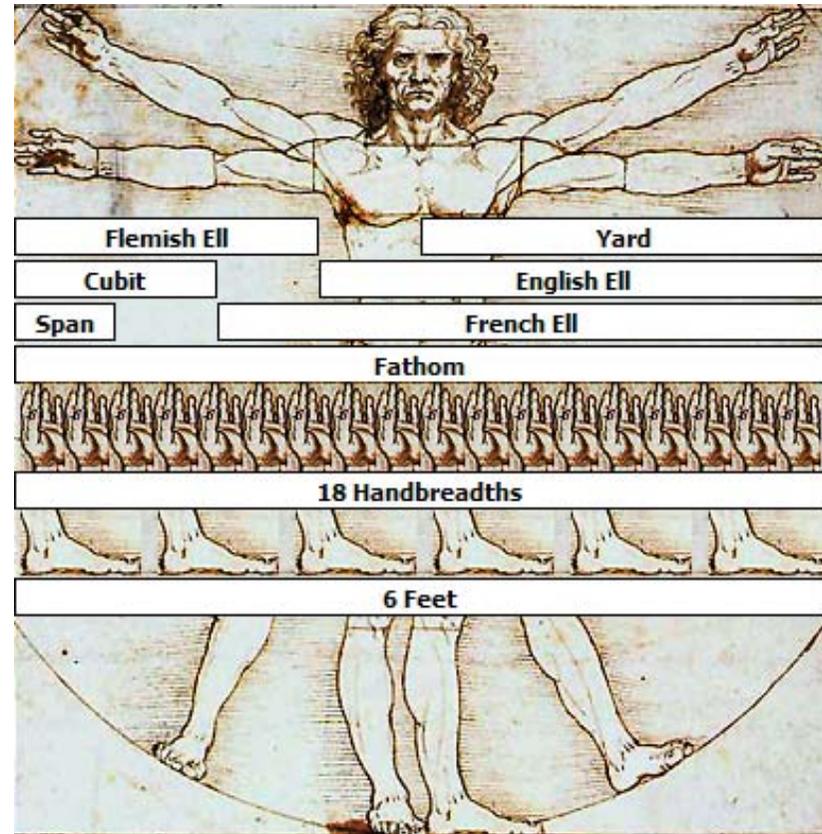




# Tema I: Metrotecnia

Escuela Politécnica Superior:  
Tecnología Mecánica

# Metrología



1 yarda = 3 pies = 36 pulgadas



# Historia del Metro

- **1983-10-21:** se define al metro como la distancia recorrida por la luz en el vacío durante  $1/299\,792\,458$  segundo.
- **1960-10-20:** se define al metro como 1.650.763,73 oscilaciones en el vacío de onda de la radiación emitida por el salto cuántico entre  $2p_{10}$  y  $5d_5$  de un átomo de  $^{86}\text{Kriptón}$ .
- **1927-10-06:** se define al metro como la distancia entre las dos marcas del patrón de platino con 10% de iridio a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  y 1 atmósfera.
- **1889-09-28:** se define al metro como la distancia entre las dos marcas del patrón de platino-iridio a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- **1799-12-10:** se define al metro con un patrón de plata (el primer patrón, construido el 23 de junio de ese año).
- **1795:** se crea un patrón provisional de latón.
- **1791-03-30:** se define al metro como la diez millonésima parte de un meridiano dentro de un cuadrante (un cuarto de la circunferencia polar de la tierra).
- **1790-05-08:** se define al metro con la distancia recorrida por un péndulo determinado que tiene un hemiperíodo de un segundo.

# Prefijos del Sistema Internacional

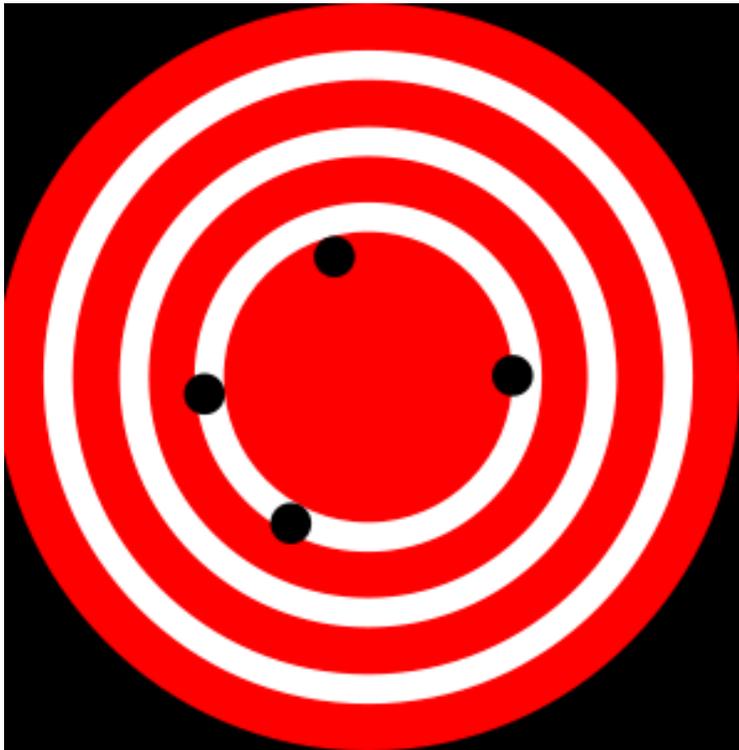
$1000^n$	$10^n$	Prefijo	Símbolo	<u>Escala Corta</u>	<u>Escala Larga</u>	Equivalencia <u>decimal</u> en los <u>Prefijos del SI</u>	Asignación
$1000^8$	$10^{24}$	yotta	Y	Septillón	Cuatrillón	1 000 000 000 000 000 000 000 000	1991
$1000^7$	$10^{21}$	zetta	Z	Sextillón	Mil trillones	1 000 000 000 000 000 000 000	1991
$1000^6$	$10^{18}$	exa	E	Quintillón	Trillón	1 000 000 000 000 000 000	1975
$1000^5$	$10^{15}$	peta	P	Cuatrillón	Mil billones	1 000 000 000 000 000	1975
$1000^4$	$10^{12}$	tera	T	Trillón	Billón	1 000 000 000 000	1960
$1000^3$	$10^9$	giga	G	Billón	Mil millones / Millardo	1 000 000 000	1960
$1000^2$	$10^6$	mega	M	Millón		1 000 000	1960
$1000^1$	$10^3$	kilo	k	Mil / Millar		1 000	1795
$1000^{2/3}$	$10^2$	hecto	h	Cien / Centena		100	1795
$1000^{1/3}$	$10^1$	deca	da	Diez / Decena		10	1795
$1000^0$	$10^0$	ninguno		Uno / Unidad		1	
$1000^{-1/3}$	$10^{-1}$	deci	d	Décimo		0,1	1795
$1000^{-2/3}$	$10^{-2}$	Centi	c	Centésimo		0,01	1795
$1000^{-1}$	$10^{-3}$	mili	m	Milésimo		0,001	1795
$1000^{-2}$	$10^{-6}$	micro	$\mu$	Millonésimo		0,000 001	1960
$1000^{-3}$	$10^{-9}$	nano	n	Billonésimo	Milmillonésimo	0,000 000 001	1960
$1000^{-4}$	$10^{-12}$	pico	p	Trillonésimo	Billonésimo	0,000 000 000 001	1960
$1000^{-5}$	$10^{-15}$	femto	f	Cuatrillonésimo	Milbillonésimo	0,000 000 000 000 001	1964
$1000^{-6}$	$10^{-18}$	atto	a	Quintillonésimo	Trillonésimo	0,000 000 000 000 000 001	1964
$1000^{-7}$	$10^{-21}$	zepto	z	Sextillonésimo	Miltrillonésimo	0,000 000 000 000 000 000 001	1991
$1000^{-8}$	$10^{-24}$	yocto	y	Septillonésimo	Cuatrillonésimo	0,000 000 000 000 000 000 000 001	1991

# Principios de medición



Alta exactitud pero  
baja precisión

# Principios de medición



Alta exactitud pero  
baja precisión



Alta precisión pero  
baja exactitud

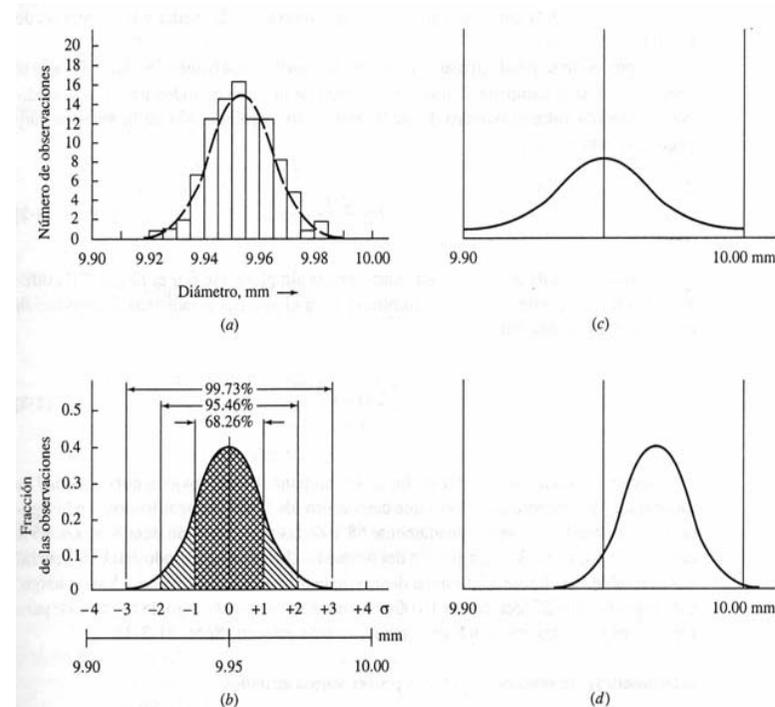
# Principios de medición

- La distribución de los resultados de las mediciones suele aproximarse a una distribución normal.
- La media da una idea de la precisión del instrumento.

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$$

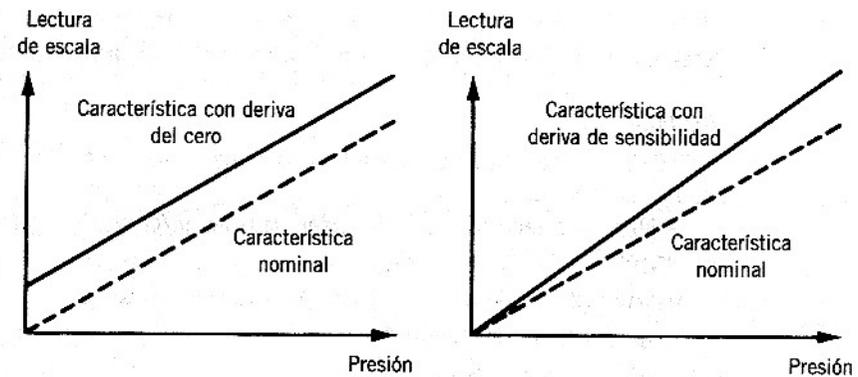
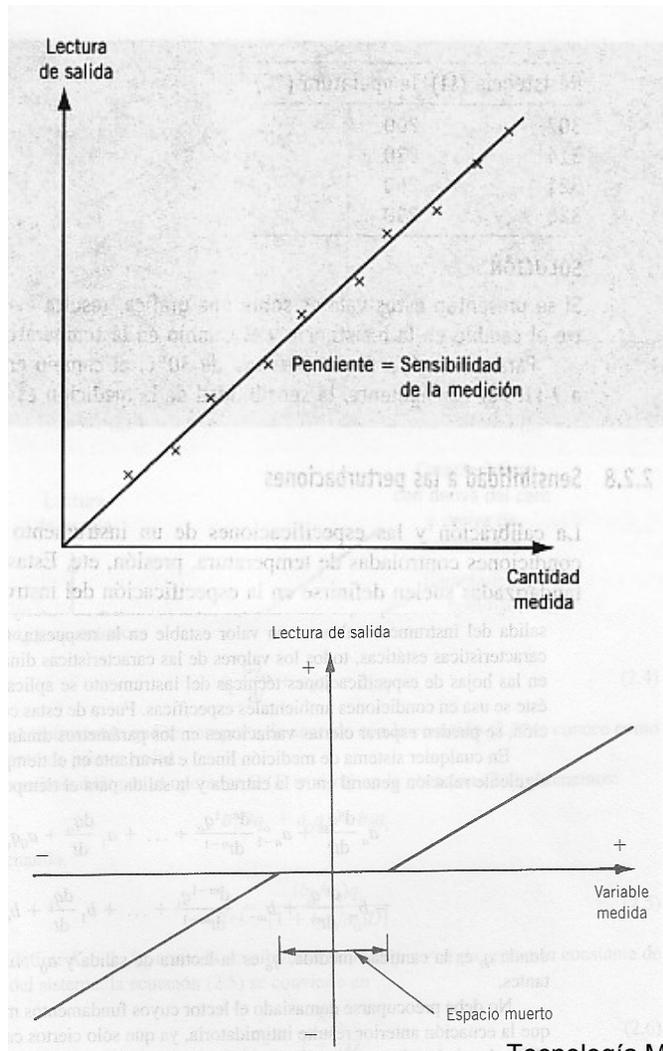
- La dispersión de los datos se puede caracterizar por el rango o la desviación típica.

$$R = x_{m\acute{a}x} - x_{m\acute{i}n} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}}$$



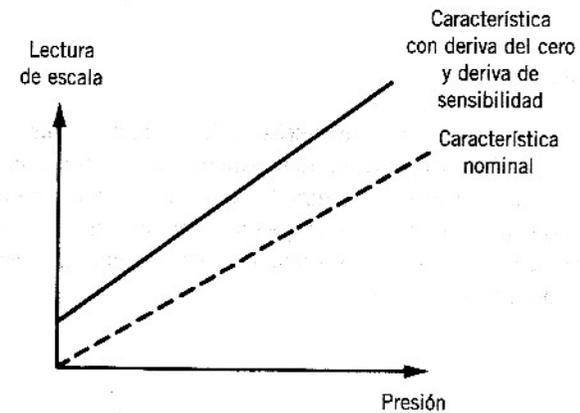
**Figura 3-7** Las propiedades mecánicas, las dimensiones y otras variables medidas siempre muestran alguna dispersión. En este ejemplo, se tornearon 100 flechas hasta un diámetro de  $9.95 \pm 0.05$  mm. Al clasificar las mediciones reales en grupos más angostos (a); la distribución resultó exacta y precisa (b); en otro caso puede ser exacta pero imprecisa (c); precisa pero inexacta (d).

# Instrumentos de medida: Características



(a)

(b)

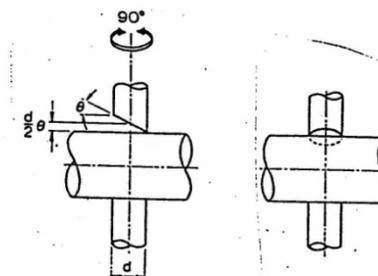
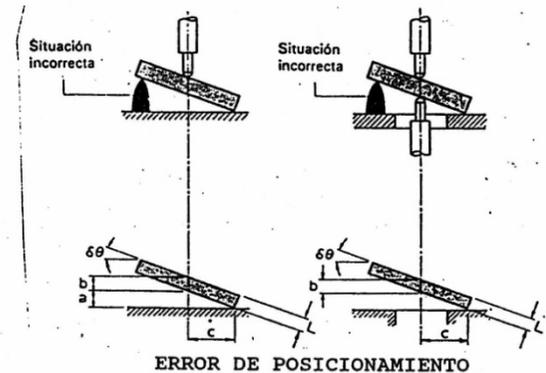
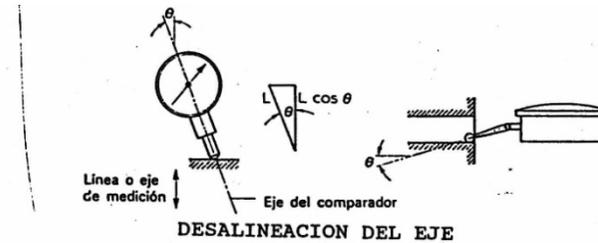


(c)

# Causas de error

Errores debidos al operador.

- Errores de lectura y paralaje.
- Mal posicionamiento de la pieza (errores del coseno).
- Otros errores: fatiga, errores debidos al tacto, etc.



# Errores de posicionamiento y paralaje

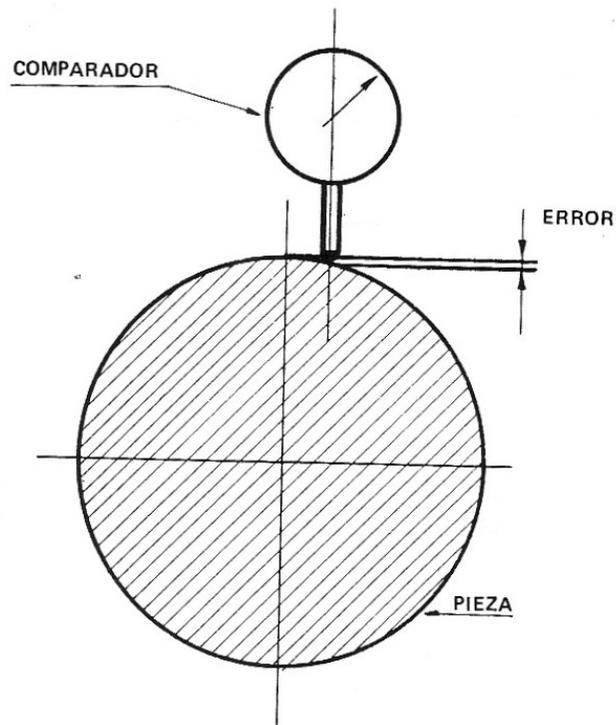


FIGURA 15  
ERROR DE POSICIONAMIENTO

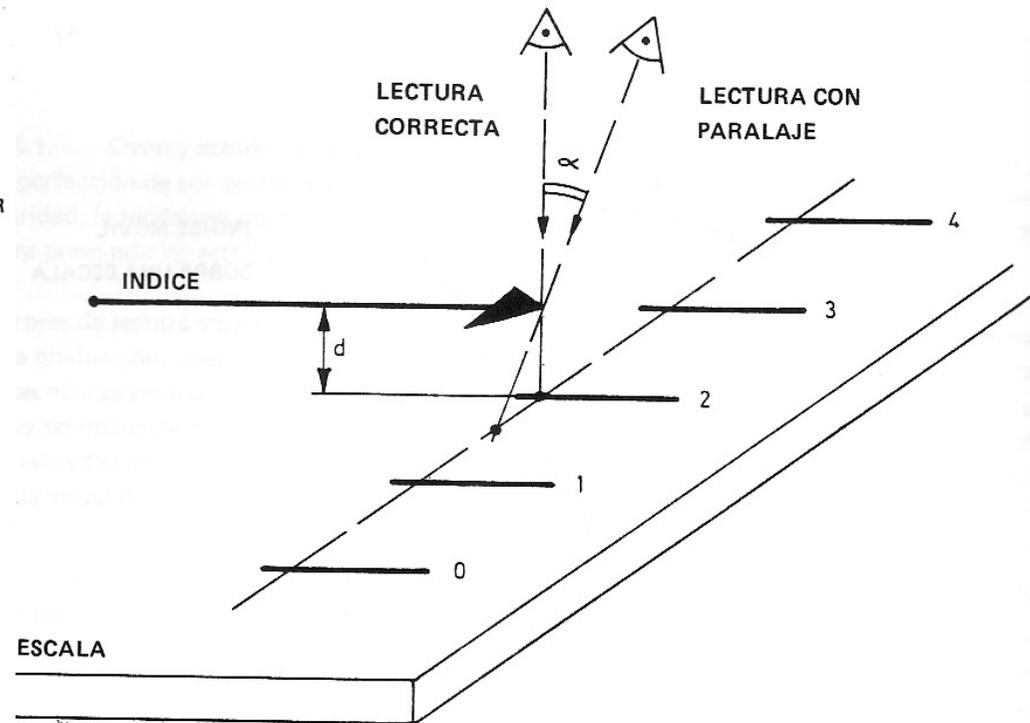


FIGURA 14  
ERROR DE PARALAJE

# Errores del coseno

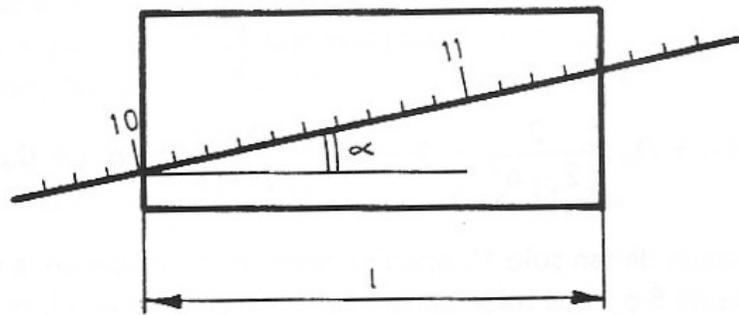


FIGURA 16.  
ERROR DEL COSENO

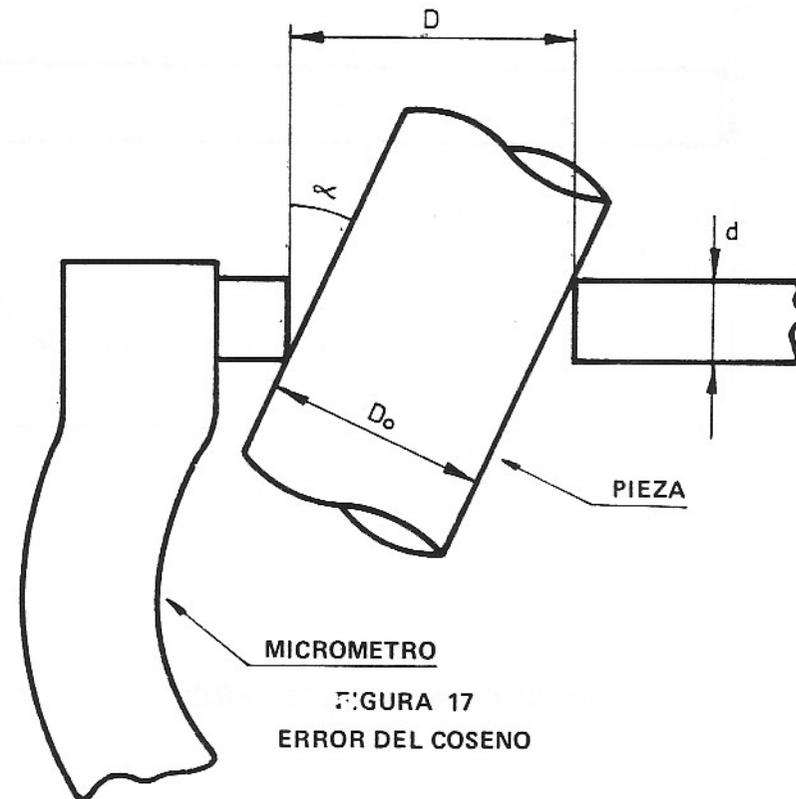
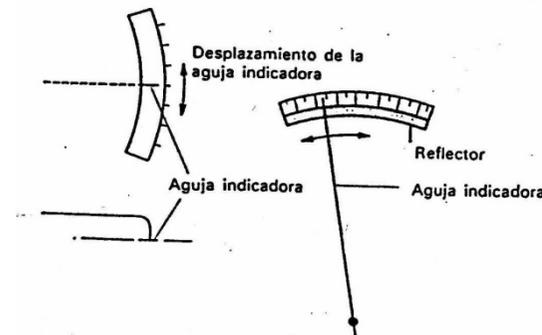
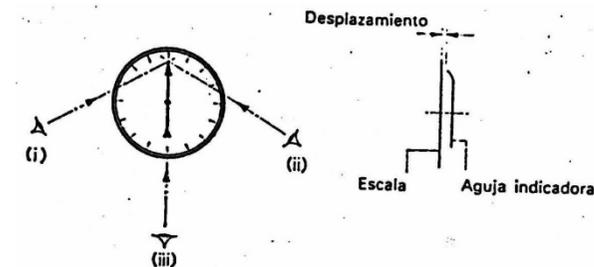
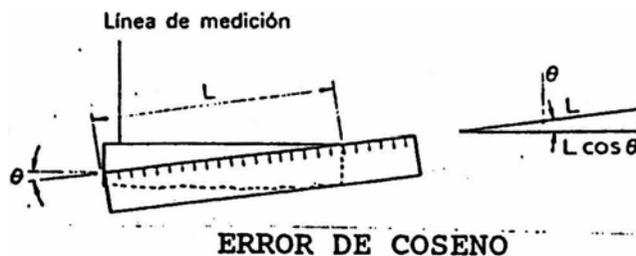


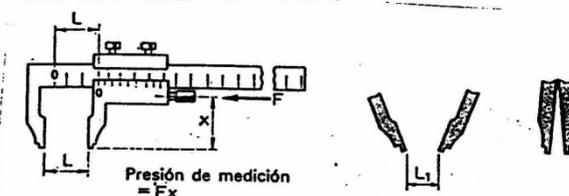
FIGURA 17  
ERROR DEL COSENO

# Errores debidos al instrumento

- Errores de diseño y fabricación.
- Por precisión y forma de los contactos.
- Por desgaste del instrumento.
- Errores de alineación



**EFFECTO DE PARALELAJE**

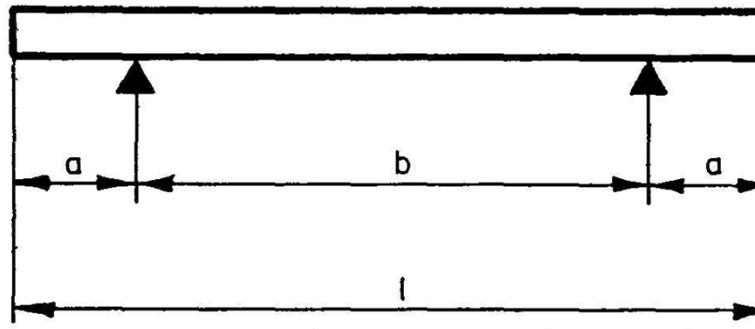


**PRESION DE MEDICION**

# Errores debidos a la propia pieza



Figura 22. Triangulación de 3 y 5 vértices



MINIMA VARIACION DE LONGITUD EN LA FIBRA NEUTRA	a 0,220L	b 0,560L
CARAS EXTREMAS PARALELAS (PUNTOS DE AIRY)	a 0,211L	b 0,578L
MINIMA FLECHA EN EL CENTRO	a 0,223L	b 0,554L

# Realización de una medida

- Se usa un instrumento calibrado.
- Se mide la pieza n veces de los que se obtienen como parámetros representativos:

- la media aritmética  $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$
- la desviación típica muestral  $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$

- Se realiza una depuración de errores.

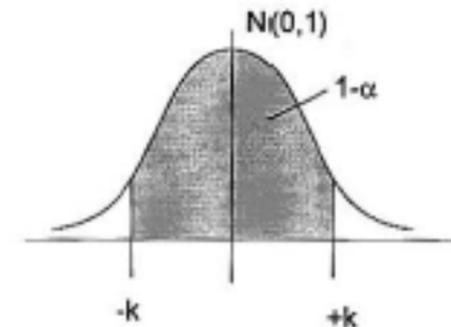
# Expresión de los resultados

1. Se admite que los valores medidos,  $x_i$ , siguen una distribución normal.
2. Se fija un nivel de confianza,  $1-\alpha$  (en valores del 95%, o 99,7%).
3. Tras aplicar el criterio de rechazo, Se calculan los valores de la **media** y la **desviación típica**.
4. Si el valor de  $n$  es reducido (1 a 3), es conveniente adoptar como  $s$  el valor obtenido en la calibración  $s_c$  que se ha calculado con un número de reiteraciones más elevado.
5. Para una distribución normal  $N(0, 1)$ , se establece el intervalo de confianza:

$$\bar{x} \pm k \cdot s$$

En una distribución normal, la relación entre el factor  $k$  y el intervalo de confianza viene dado por:

nivel de confianza	$1-\alpha$	50	68.3	95	95.5	99	99.7
factor de multiplicación	$k$	0.67	1.0	1.96	2.0	2.58	3.0



# Expresión de los resultados

Las distribuciones más frecuentemente empleadas son la Normal, la distribución t-Studentt y la distribución Uniforme.

En el caso de que se emplee la distribución normal, la incertidumbre se calcula como:

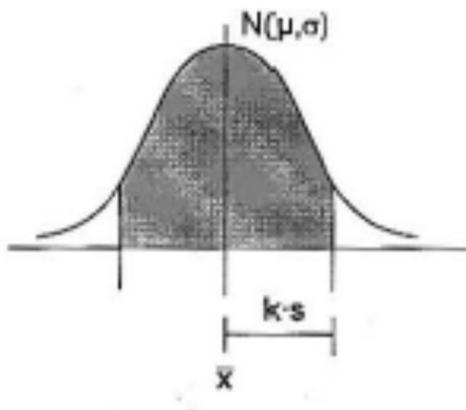
$$\text{Normal } N(\mu, \sigma) \quad I = k \cdot \sigma$$

El resultado de la medida será:

$$\bar{x} \pm I \quad (1-\alpha, \text{ distribución})$$

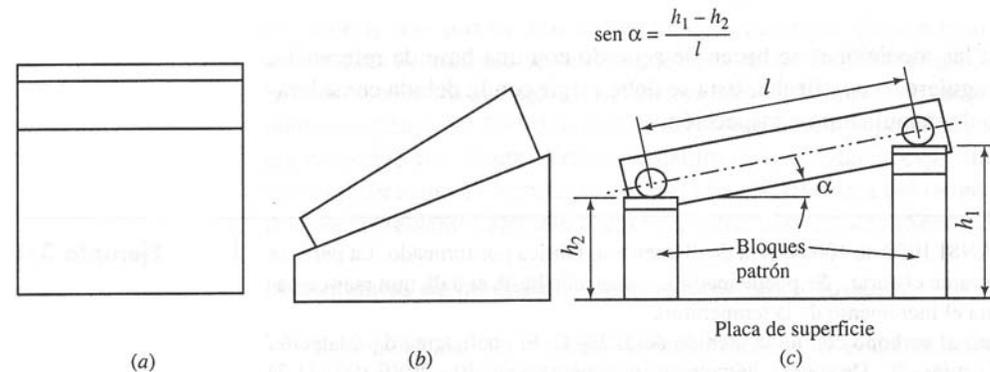
Ejemplo:

$$10.03 \pm 0.01 \quad (95\%, \text{ normal})$$

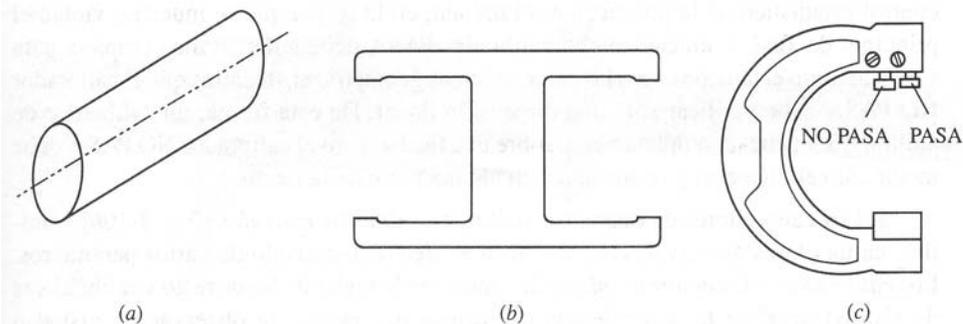


# Instrumentos de medida: calibradores (I)

- Bloques patrón.
- Bloques de ángulo.
- Barras seno.
- Calibradores cilíndricos y de anillos para medición de cilindros.

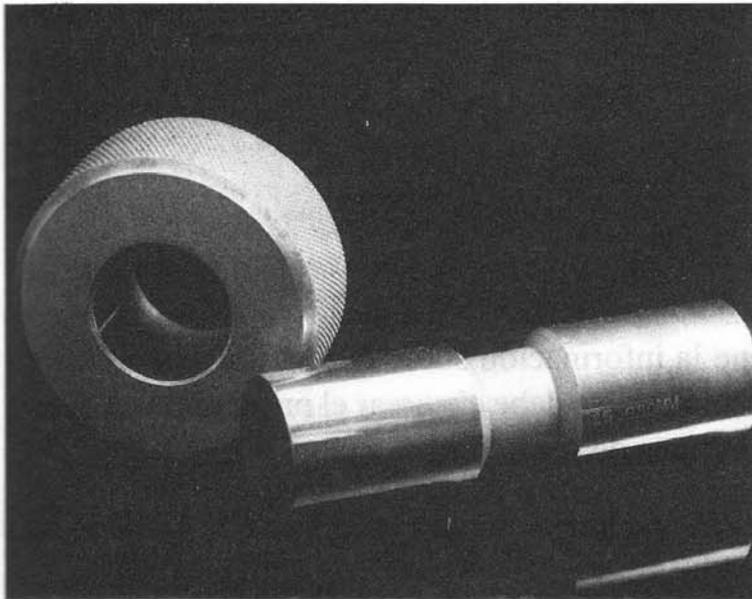


**Figura 3-8** Calibradores de acero endurecido como los (a) bloques patrón, (b) bloques en ángulo y (c) barras de seno, se usan extensivamente para propósitos de calibración comparativa.

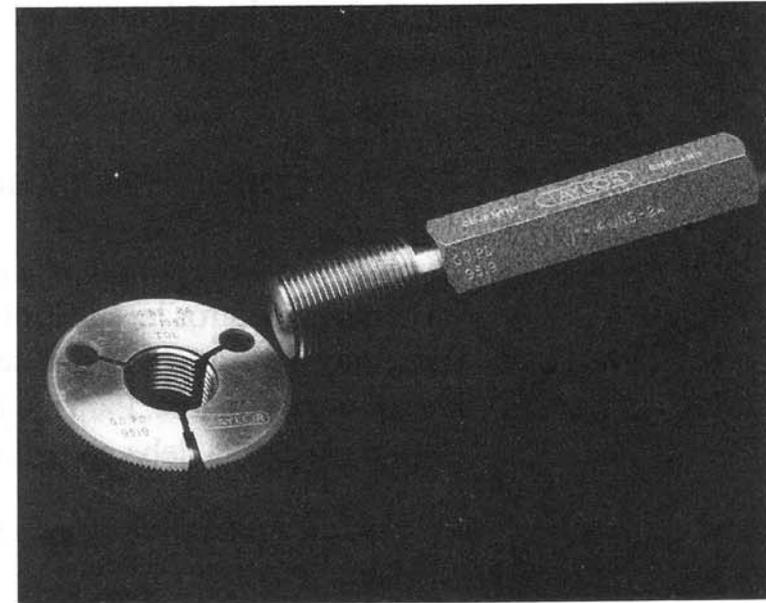


**Figura 3-9** Las mediciones comparativas de dimensiones de longitud son posibles con: (a) barras de longitud, (b) calibradores de separación fijos, o (c) calibradores de separación ajustables.

## Instrumentos de medida: calibradores (II)



(a)



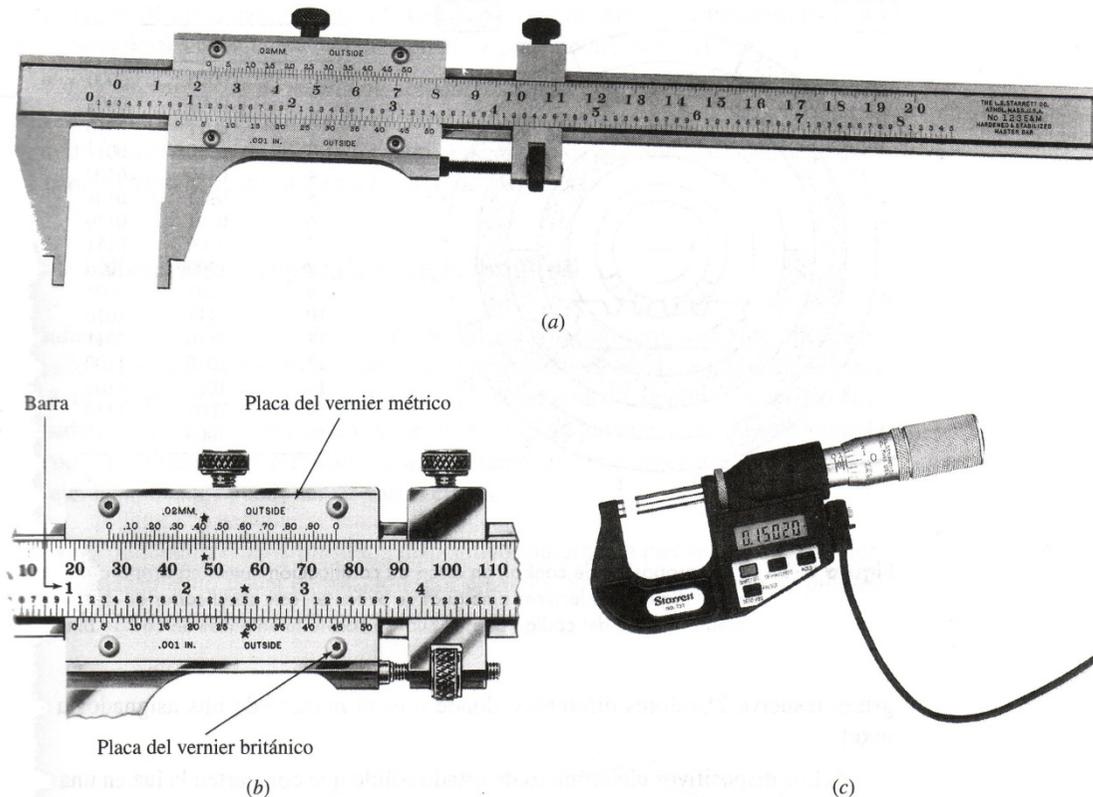
(b)

**Figura 3-10** (a) Los diámetros de los agujeros se pueden verificar con calibradores de inserción y los diámetros de las barras con calibradores de anillo. (b) Configuraciones más complejas se verifican con calibradores especiales, como los cilindros roscados.

# Instrumentos de medida: dispositivos graduados de medición (I).

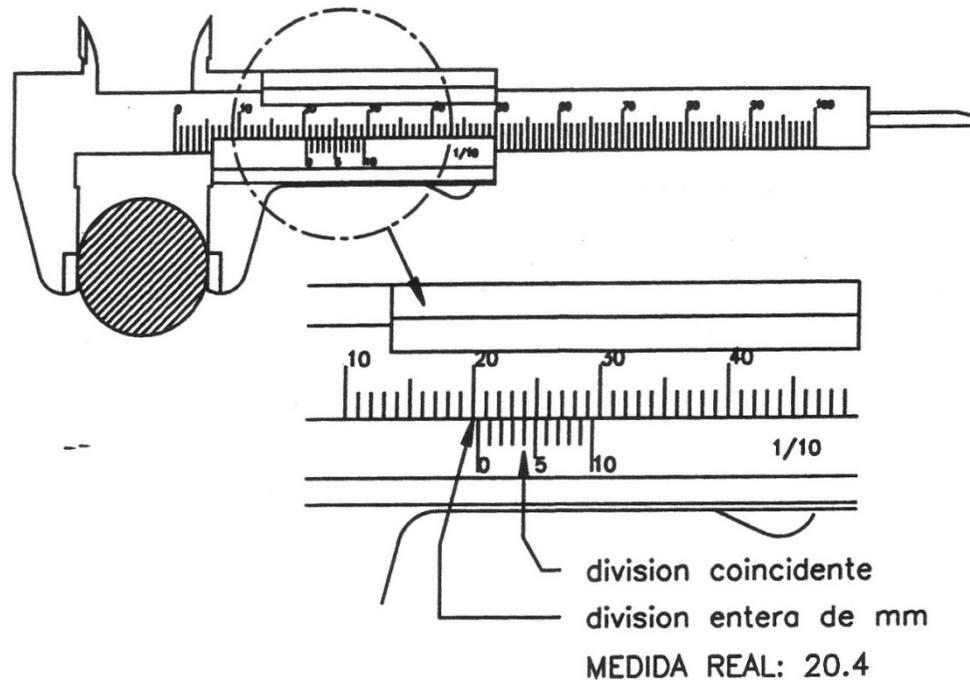
Principio de Abbe: la línea de la escala debe coincidir con la línea de medición.

- Reglas y cintas de medición.
- Un “vernier” o nonio aumenta la sensibilidad de los pies de rey y de los micrómetros.



**Figura 3-11** Un calibrador de vernier permite lecturas de hasta algunas fracciones de la división más pequeña sobre la escala principal (a). Para leer, se toma la lectura de la línea de la escala del vernier que coincide con una línea sobre la escala principal; el resultado se suma a la lectura básica sobre la escala principal del calibrador vernier (b). No hay vernier en instrumentos de lectura digital como en este micrómetro (c). (Cortesía de The L.S. Starrett Co., Atole, Massachusetts.)

# Pie de Rey

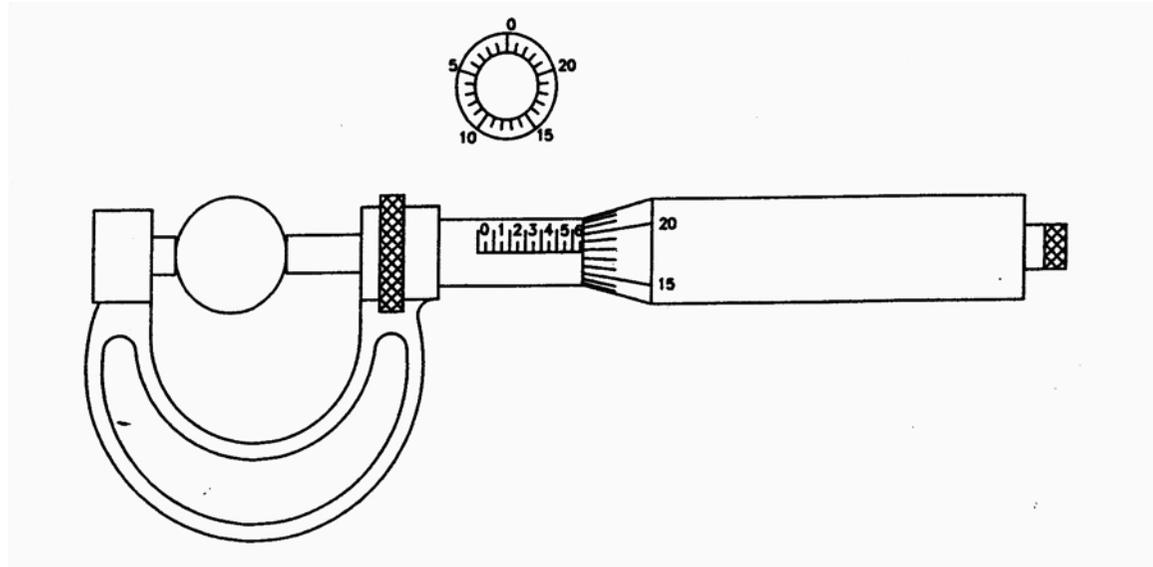


Cálculo de la precisión

$$p = d - \frac{l}{n}$$

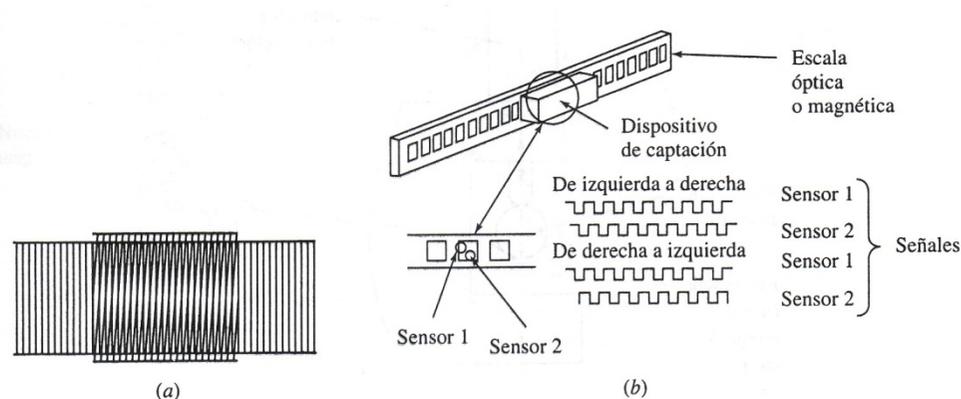
- $p$ : precisión del nonio.
- $d$ : unidad entera de medida más próxima por exceso a una división del nonio.
- $l$ : longitud real de la regleta del nonio.
- $n$ : número de divisiones en que está dividido el nonio.

# Palmer o micrómetro

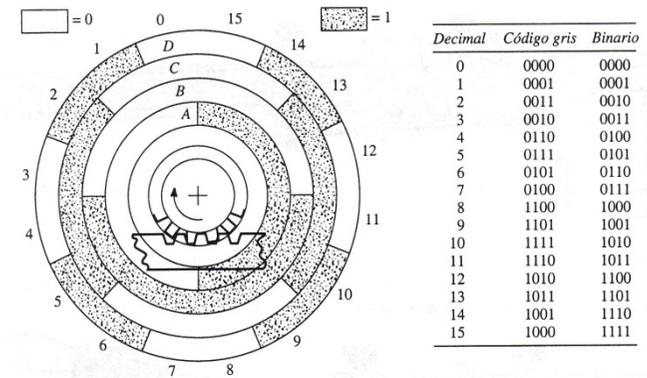


- Normalmente la rosca del usillo tiene un paso de 0,5 mm.
- En la figura, si el tambor tiene 25 divisiones, cada división corresponde a un avance de  $0,5/25=0,02$  mm.
- Al leer en el tambor nos fijaremos en la división más próxima.

# Instrumentos de medida: dispositivos graduados de medición (II).



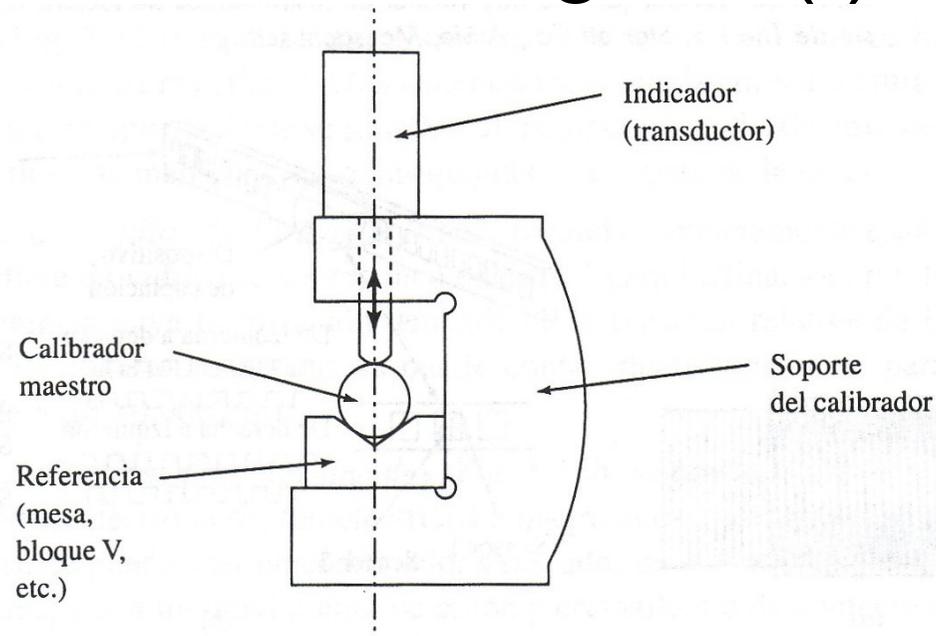
**Figura 3-12** (a) La longitud se puede medir contando el número de bandas de interferencia.  
(b) La dirección del desplazamiento de una escala óptica o magnética se detecta por dos transductores.



**Figura 3-13** Para propósitos de control, un disco de codificación numérica proporciona una señal digital. Las lecturas ambiguas se evitan en este codificador de 4 bits por medio del uso del código gris, el cual se convierte entonces en código binario.

- Rejillas de difracción.
- Transductores digitales lineales.
- Discos de codificador numérico.
- Dispositivos electrónicos de estado sólido (fotodetectores)
- Microscopios de matricero

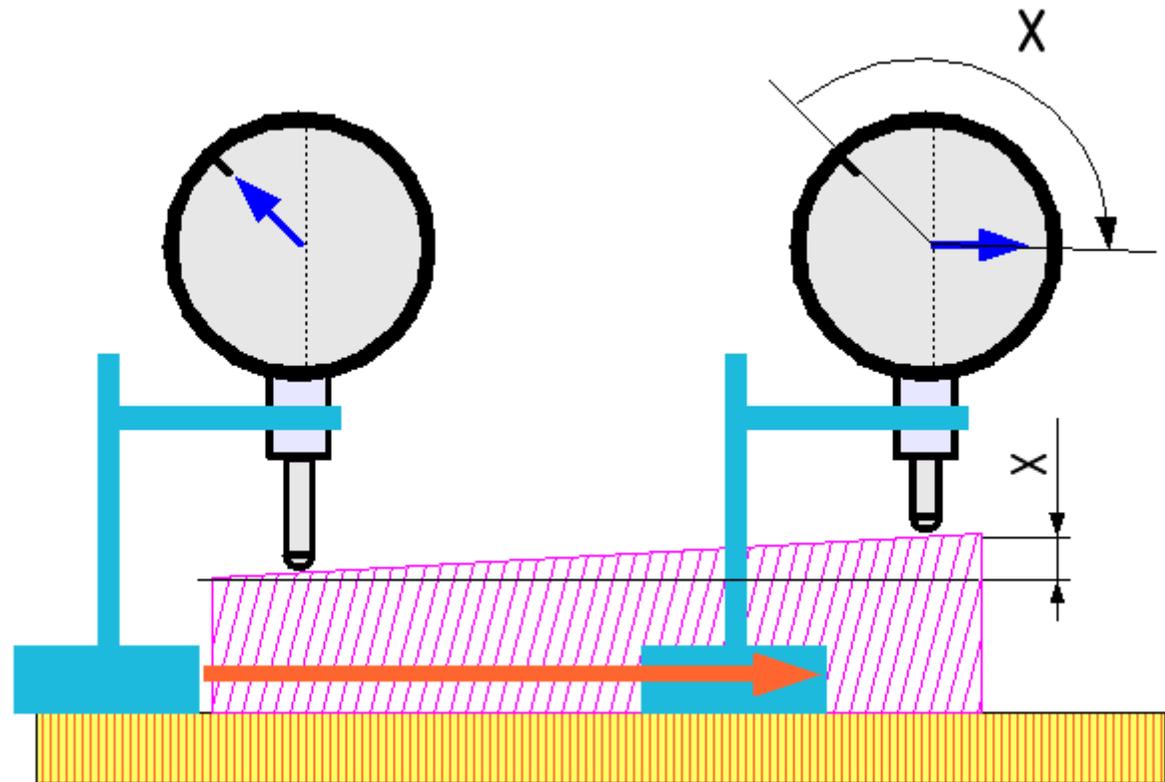
# Instrumentos de medida: medición comparativa de la longitud (I).



**Figura 3-14** Las dimensiones se pueden leer mediante calibradores equipados con un indicador, o con alguna forma de transductor de posición.

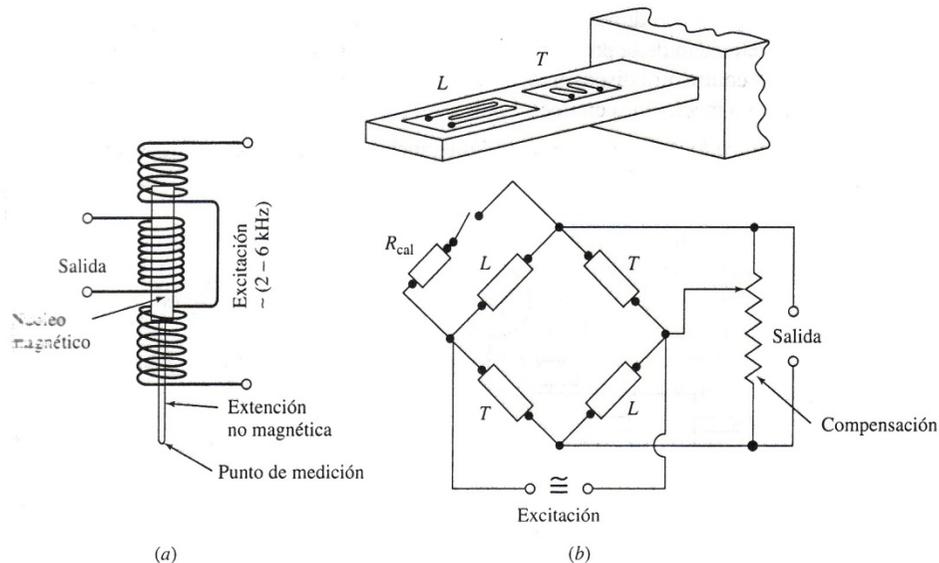
Si se utiliza un indicador con suficiente sensibilidad y una base de referencia se puede obtener información relevante sobre longitud y además sobre descentramiento, alineación, etc.

# Instrumentos de medida: medición comparativa de la longitud (II).



Reloj comparador

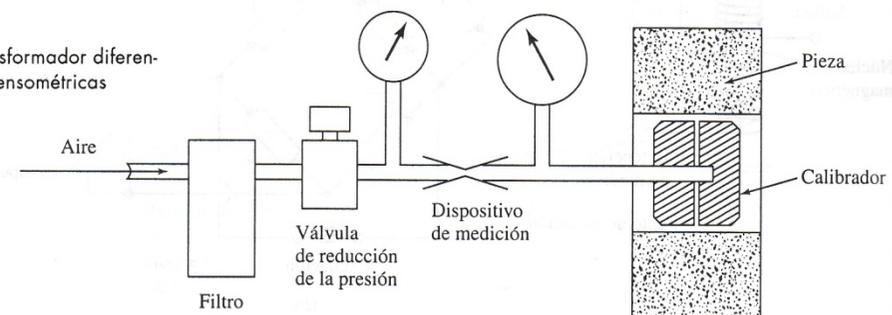
# Instrumentos de medida: medición comparativa de la longitud (III).



**Figura 3-15** Los desplazamientos se obtienen por medio de: (a) la posición de un transformador diferencial, o (b) la deflexión de una viga al cual se le han colocado galgas extensométricas interconectadas para formar un puente de Wheatstone.

- Indicadores de carátula (reloj comparador).
- Calibradores electrónicos (transductores). Utilizan un transformador diferencial.

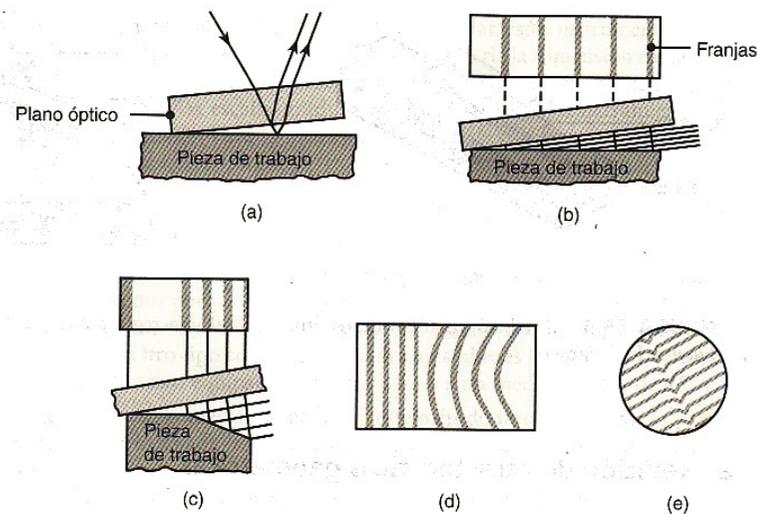
- Calibradores neumáticos.
- Calibradores capacitivos.
- Calibradores ultrasónicos.



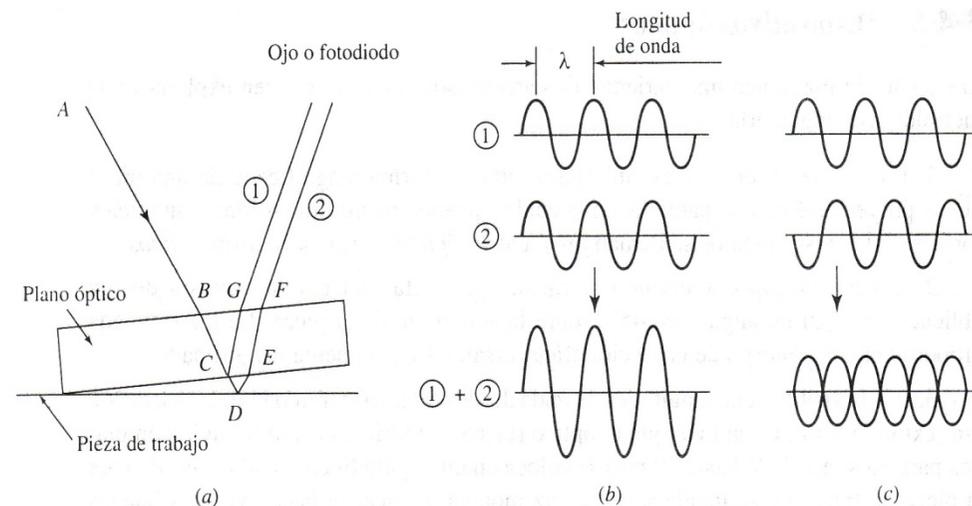
**Figura 3-16** Los calibradores neumáticos dan una medida de la distancia entre la cabeza del calibrador y la superficie de la pieza de trabajo.

# Instrumentos de medida: dispositivos ópticos.

## • Interferometría.



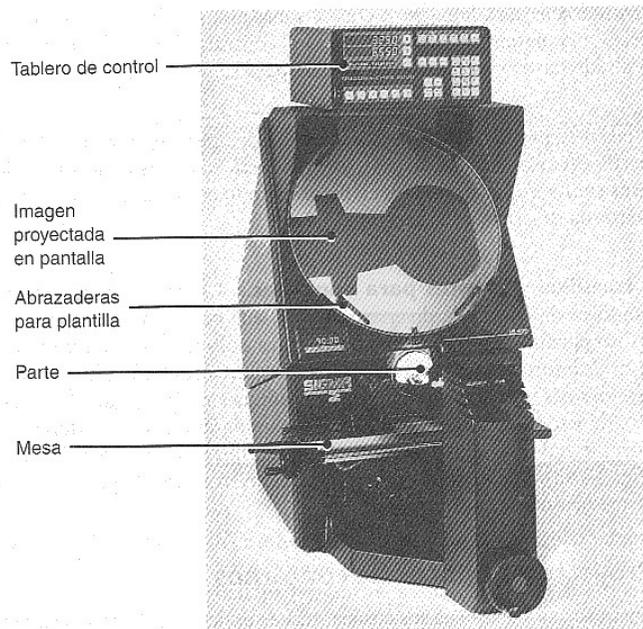
**FIGURA 35.6** (a) Método de interferometría para medir la planicidad utilizando un plano óptico. (b) Franjas en una superficie plana, inclinada. Un plano óptico descansando sobre una superficie perfectamente plana de una pieza de trabajo no divide el rayo de luz, y no aparecen las franjas. (c) Franjas sobre la superficie con dos inclinaciones. *Nota:* cuanto mayor es la inclinación, más cerca estarán las franjas. (d) Los patrones de franjas curvadas indican curvaturas sobre la superficie de la pieza de trabajo. (e) Patrón de franjas que indican una rayadura en la superficie.



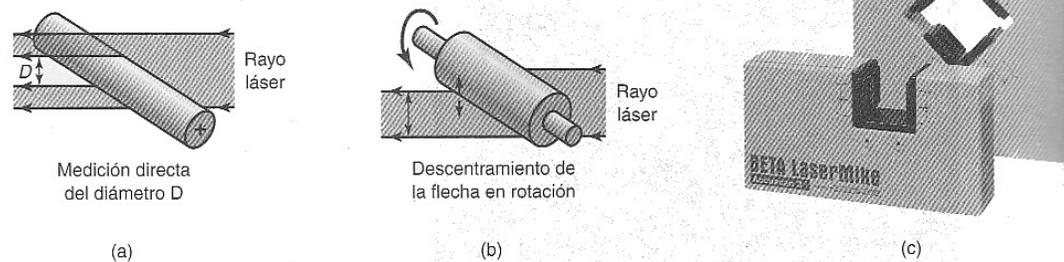
**Figura 3-17** La planicidad de una superficie se obtiene por medio de (a) bandas de interferencia producidas con la ayuda de un plano óptico. La luz se divide en dos haces: (b) cuando están en fase se refuerzan entre sí y aparece una banda de luz, (c) cuando están fuera de fase se cancelan y aparece una banda oscura.

# Instrumentos de medida: dispositivos ópticos.

- Proyectores ópticos o comparadores.
- Haces láser.



**FIGURA 35.9** Modelo de banco de proyector de contornos de rayo horizontal con una pantalla de 16 pulgadas de diámetro con iluminación halógena de tungsteno de 150 W. Fuente: Cortesía de L. S. Starrett Company, Precision Optical Division.



**FIGURA 35.14** (a) y (b) Dos tipos de mediciones realizadas con un micrómetro de exploración láser. (c) Dos tipos de micrómetros láser. Obsérvese que el instrumento en el frente explora (barrido) la parte (colocada en la abertura) en una dimensión; el instrumento más grande explora la parte en dos dimensiones. Fuente: Cortesía de BETA LaserMike.

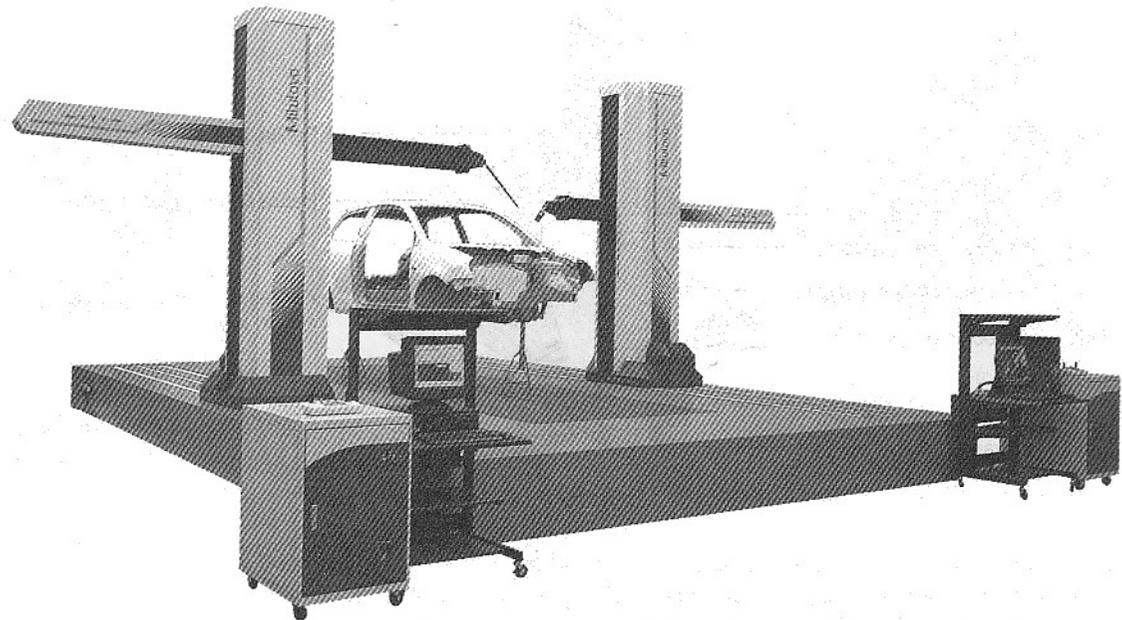
# Máquinas de medidoras de coordenadas.

Son estructuras construidas para proporcionar soporte a transductores relativos a una superficie o eje de referencia.

Su finalidad es ser altamente estables. Realizan movimientos de precisión a lo largo de uno, dos o tres mutuamente perpendiculares.

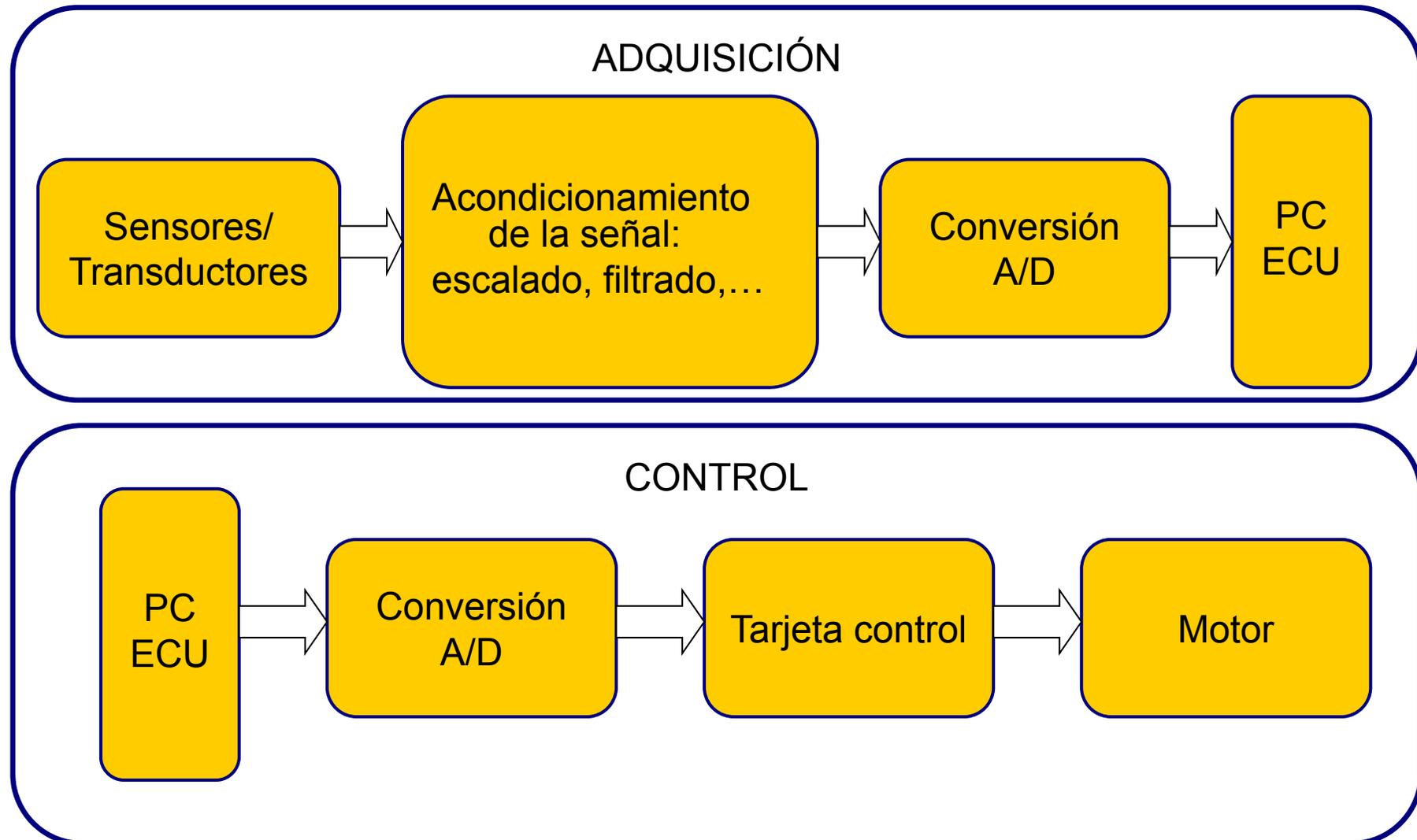
Posibilidad de uso de sondas de contacto (resolución: 250 nm.)

Sin contacto:  
exploración por haz láser, procesamiento de imagen de vídeo y transductores ópticos.



**FIGURA 35.16** Máquina grande de medición de coordenadas con dos cabezales que miden diversas dimensiones en la carrocería de un automóvil. Fuente: Cortesía de Mitutoyo America Corp.

# Adquisición de y control de datos



# Adquisición de datos

- Sensores: transforman (transductores) magnitudes físicas en magnitudes eléctricas.

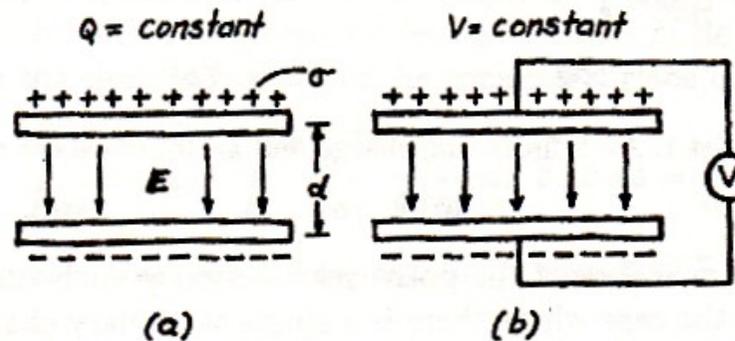
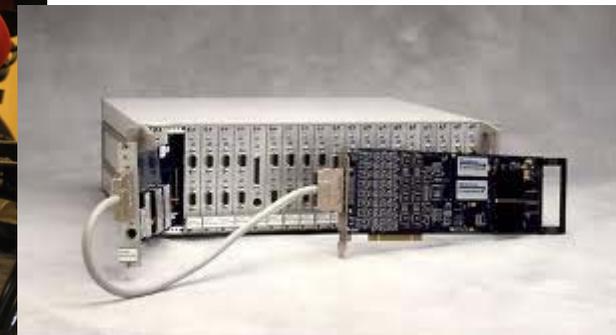
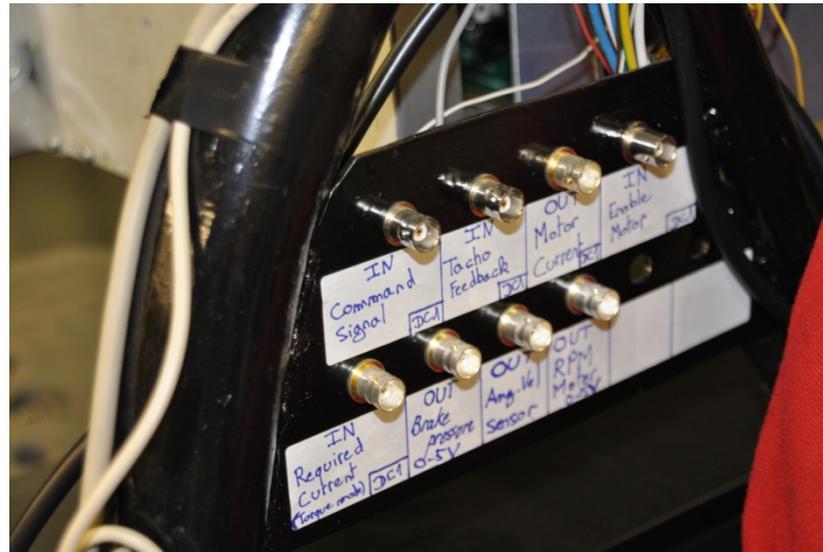


FIGURE 4.2. A parallel-plate capacitor.

$$V = Ed = \frac{\sigma d}{\epsilon_0} = \frac{d}{\epsilon_0 A} Q = \frac{Q}{C} \quad \text{or} \quad Q = CV$$

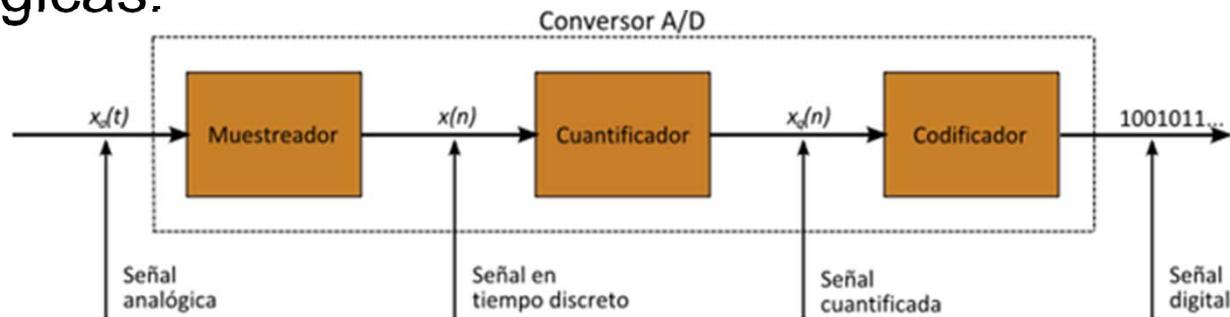
$$C = \frac{\epsilon A}{d}$$

# Adquisición de datos



# Conversión analógica-digital

- La **conversión analógica-digital (CAD)** consiste en la transcripción de señales analógicas en señales digitales, con el propósito de facilitar su procesamiento (codificación, compresión, etc.) y hacer la señal resultante (la digital) más inmune al ruido y otras interferencias a las que son más sensibles las señales analógicas.





# Conversión analógica-digital

- **Muestreo** (*sampling*): Tomar de muestras periódicas de la amplitud de onda. **Frecuencia de muestreo**: número de muestras por segundo.
- **Retención** (*hold*): las muestras tomadas deben ser retenidas (retención) por un **circuito** de retención (hold), el tiempo suficiente para permitir evaluar su nivel (cuantificación).
- **Cuantificación**: medida del nivel de **voltaje** de cada una de las muestras.
- **Codificación**: traducción de los valores obtenidos durante la cuantificación al **código binario** (u otros).

# Ejemplo

- Convertidor analógico digital ADC0804 con capacidad de convertir una muestra analógica de entre 0 y 5 voltios y 8 bits de resolución:
- Resolución = valor analógico /  $(2^8) = 5 \text{ V} / 256 = 0.0195\text{v}$  o 19.5mv (LSB\*)
- Lecturas:

Entrada – Salida

0 V – 00000000

0.02 V – 00000001

0.04 V – 00000010

Entrada - Salida

1 V - 00110011

(5 V-LSB) - 11111111

\* **LSB**: Least Significant Byte