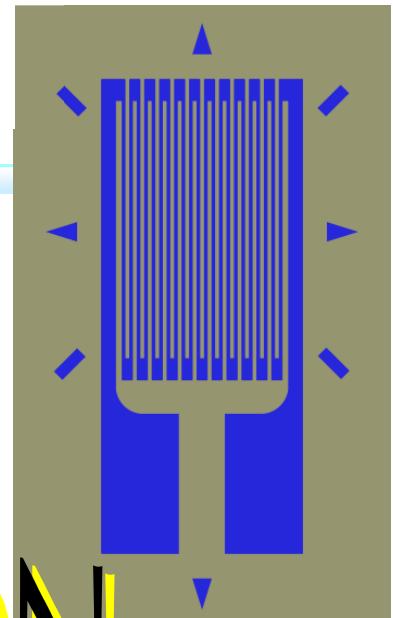


**22.88**



## MEDICIONES DE DEFORMACIÓN, FUERZA Y PESO



# Introducción

## ★ Veremos en este Capítulo:

- los principios fundamentales de la extensometría,
- su aplicación práctica
  - ★ a la medición de deformaciones,
  - ★ a la medición de esfuerzos en distintas situaciones típicas,
  - ★ la determinación mediante la medición de deformaciones, de:
    - ⇒ fuerzas,
    - ⇒ torques y
    - ⇒ pesos

## ★ Dispositivo fundamental

- la **banda extensométrica**, o indicador de fuerzas de deformación, o *strain gage*.

## ★ Relación entre el conjunto de fuerzas aplicadas a un sólido (esfuerzo, tensión, estado de carga, o stress) y la deformación resultante (strain)

## ★ Otros parámetros que se miden en base a deformación

- Presión
- Caudal
- Desplazamiento, etc.

# Medición de Esfuerzos y Deformaciones, Principios Físicos

## Esfuerzos Normales

- Las fuerzas que los provocan actúan en dirección perpendicular a la superficie
- Esfuerzo de Tracción o Tensión

★ Se define *esfuerzo* como:

$$\Rightarrow \text{Esfuerzo Tensil} [\text{N/m}^2] = \sigma_T \equiv F / A$$

★ Se define *deformación* como:

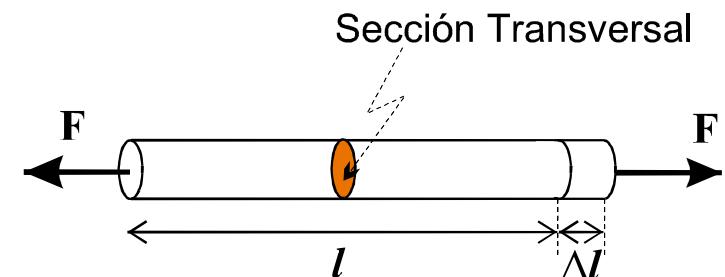
$$\Rightarrow \text{Deformación Tensil} [10^{-6}\text{m/m} = \mu\epsilon] = \epsilon_T = \Delta l / l$$

★ Unidad habitual: la *microdeformación* [ $\mu\epsilon$ ]

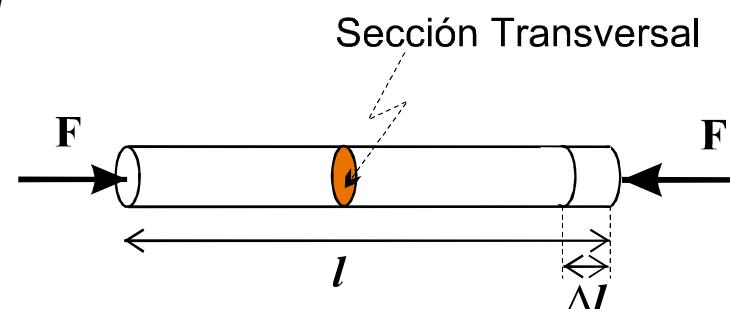
- Esfuerzo de Compresión

★ Se define igual que para el caso de tracción, pero con las siguientes diferencias:

- ⇒ el sentido de las fuerzas se invierte, y
- ⇒ la deformación resultará negativa, dado que la longitud de la muestra disminuye.



a) Esfuerzo de Tracción



b) Esfuerzo de Compresión

# Medición de Esfuerzos y Deformaciones, Principios Físicos

## \* Esfuerzo Tangencial o de Corte (*shear stress*)

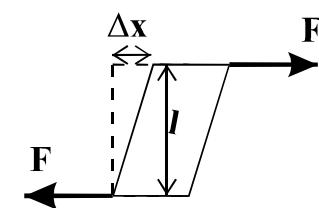
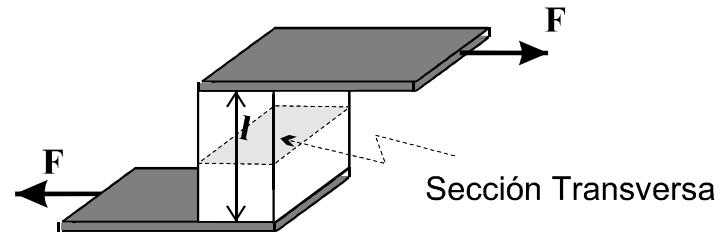
### → Definiciones

★ Esfuerzo de Corte

$$\sigma_C = \tau \equiv F / A$$

★ Deformación de Corte

$$\varepsilon_C = \gamma \equiv \Delta x / l$$



## \* Esfuerzos Multi-axiales

### → En la práctica, el estado de esfuerzo bi-axial es el más común,

★ se puede encontrar un par de orientaciones ortogonales (*ejes principales*) a lo largo de las cuales

⇒ no existe el esfuerzo de corte y

⇒ los esfuerzos normales son máximo y mínimo

★ Importancia de los ejes principales

⇒ Midiendo las deformaciones en ellos se puede calcular el estado completo de carga de la pieza.

★ Si no se conocen los ejes principales

⇒ Midiendo deformación en tres direcciones, se puede calcular la deformación y el esfuerzo en cualquier dirección incluyendo la de los ejes principales.

### → Teoría de la Resistencia de Materiales

# Medición de Esfuerzos y Deformaciones, Principios Físicos

## \* Curvas características

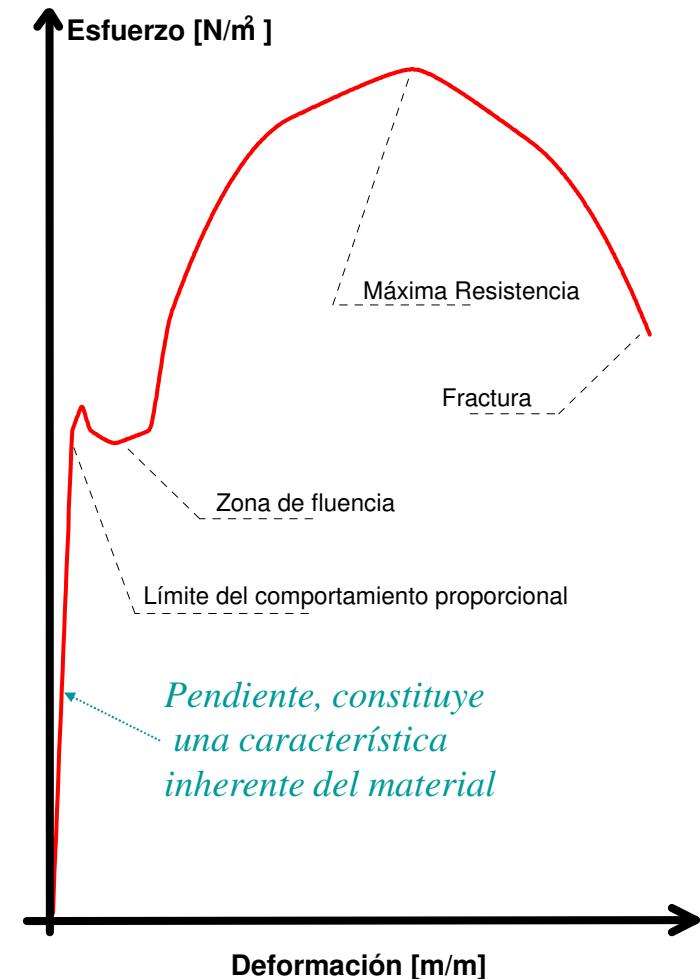
→ Módulo de elasticidad o de Young

$$E \equiv \frac{\text{Esfuerzo}}{\text{Deformación}} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A}{\Delta l/l}$$

→ Módulo de corte,  $G$

$$G \equiv \frac{\text{Esfuerzo}}{\text{Deformación}} = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{F/A}{\Delta x/l}$$

Material	Relación de Poisson ( $\nu$ )	$E = \text{Módulo de Elasticidad}$ [N/m <sup>2</sup> ]
Aluminio	0.32	$6.89 \times 10^{10}$
Cobre		$11.73 \times 10^{10}$
Acero	0.285	$20.7 \times 10^{10}$
Polietileno		$3.45 \times 10^{08}$
ABS		$0.14 - 0.28 \times 10^{10}$
Bronce	0.33	$10.3 \times 10^{10}$
Hierro (Fundición Gris)		$8.96 - 9.65 \times 10^{10}$
Policarbonato	0.285	$0.21 - 0.26 \times 10^{10}$
Acero AISI-304	.25	$19.3 \times 10^{10}$
Acero AISI-410	0.27 - 0.29	$20 \times 10^{10}$
Aleación de Titanio	0.34	$9.65 \times 10^{10}$



# Medición de Esfuerzos y Deformaciones, Principios Físicos

## ★ Deformación o Efecto de Poisson

- Disminución de sección que acompaña al aumento de longitud
- Definición

★  $\nu = -\varepsilon_y / \varepsilon_x = -\varepsilon_z / \varepsilon_x$

★ para los metales más usuales toma valores del orden de 0.3

- Podemos, entonces, escribir:

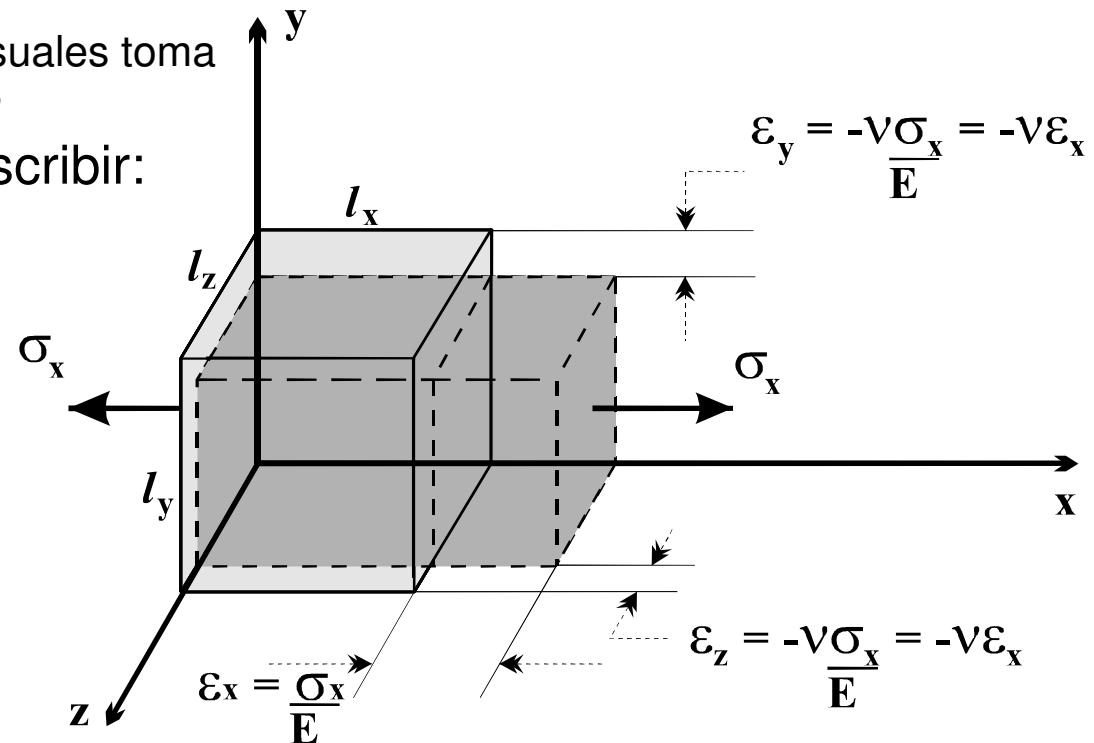
★  $\varepsilon_x = \sigma_x / E$

★  $\varepsilon_y = -\nu \varepsilon_x$

★  $\varepsilon_z = -\nu \varepsilon_x$

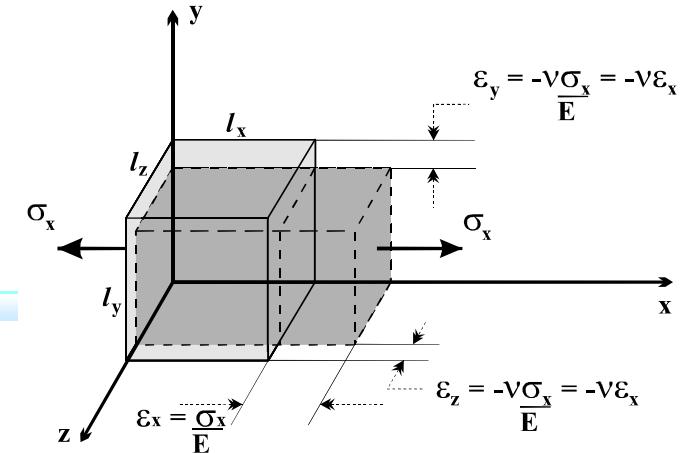
- Se puede relacionar el módulo de elasticidad,  $E$ , con el módulo de corte,  $G$ , como:

$$E = 2(1 + \nu)G$$



# Tecnología de Mediciones con Strain-Gages

- \* Siendo  $R = \rho l / A$
- \* Si se aplica a la probeta un esfuerzo,
  - ➔ sufre un incremento de longitud  $\Delta l$ , y una disminución de sección  $\Delta A$



$$A = yz \Rightarrow \ln A = \ln y + \ln z \Rightarrow$$

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta y}{y} + \frac{\Delta z}{z} = \epsilon_y + \epsilon_z = -\nu(\epsilon_x + \epsilon_x) = -2\nu\epsilon_x$$

- ➔ tomando logaritmos y diferenciando  $\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \epsilon_x + 2\nu\epsilon_x = \frac{\Delta \rho}{\rho} + (1+2\nu)\epsilon_x$
- ➔ despreciando el término en  $\Delta \rho/\rho$ , válido para bandas metálicas

$$\Delta R = R - R_0 \cong (1+2\nu)\epsilon R_0 \cong 1.6\epsilon R_0$$

## Sensibilidad

- ➔ Habitualmente se define el GF o Gauge Factor como

$$GF \equiv \frac{\Delta R/R}{\epsilon} = 1 + 2\nu + \frac{\Delta \rho / \rho}{\epsilon} \cong 1 + 2\nu \cong 1.6$$

# Tecnología de las Mediciones con Strain-Gages

## (cont.)

### \* Sensibilidad ó Gage Factor

- ➡ El cálculo teórico daba aprox.
- ➡ Pero en la práctica, la resistividad también cambia con la deformación

#### ➡ Variaciones de $\rho$ con deformación

- ★ Efecto piezoresistivo,
  - ⇒ pequeño en metales
  - ⇒ notable en semicond's
- ★ Se debe a:
  - ⇒ impurezas de materiales
  - ⇒ aleación utilizada
  - ⇒ influencia de materiales que conforman un sensor práctico

#### ➡ Resultado

- ★ para las bandas metálicas de uso habitual, sensibilidades entre 2.0 y 4.5, y
- ★ para las bandas semiconductoras, del orden de 150.

#### ➡ Por la incertezza en el conocimiento de estos factores, debe recurirse a los valores de sensibilidad que suministra el fabricante

$$GF \equiv \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \approx 1 + 2\nu \approx 1.6 \Rightarrow \varepsilon \approx \frac{\Delta R}{R_0 \cdot GF}$$

Material	GF
Platinum (Pt 100%)	6.1
Platinum-Iridium (Pt 95%, Ir 5%)	5.1
Platinum-Tungsten (Pt 92%, W 8%)	4.0
Isoelastic (Fe 55.5%, Ni 36% Cr 8%, Mn 0.5%) *	3.6
Constantan / Advance / Copel (Ni 45%, Cu 55%) *	2.1
Nichrome V (Ni 80%, Cr 20%) *	2.1
Karma (Ni 74%, Cr 20%, Al 3%, Fe 3%) *	2.0
Armour D (Fe 70%, Cr 20%, Al 10%) *	2.0
Monel (Ni 67%, Cu 33%) *	1.9
Manganin (Cu 84%, Mn 12%, Ni 4%) *	0.47
Nickel (Ni 100%)	-12.1

# Dispositivos Prácticos

## Características Constructivas Generales

### ✳ Materiales Sensores

- ➡ Constantan
  - ★ coeficiente de temperatura bajo y controlable en el rango de -70 á +280° C
  - ★ Se obtienen valores de  $GF \approx 2$ .
- ➡ Nichrome V
  - ★ para  $T < 650^\circ C$  (estát.) y  $T < 1000^\circ C$  (dinámicas)
  - ★  $GF \approx 2.2$ .
- ➡ Dynaloy e IsoElastic:
  - ★ coef. de temperatura muy elevado.  $GF \approx 3.5$ .
- ➡ Stabiloy y Karma
  - ★ de muy buenas características térmicas
- ➡ Aleaciones Platino-Tungsteno
  - ★ para mediciones en alta temperatura.
- ➡ Semiconductores
  - ★ muy alta sensibilidad a deformación y temperatura,
  - ★ muy alineal,
  - ★ muy utilizada en celdas de carga y sensores de presión.

# Tecnología de las Mediciones con Strain-Gages: Ejemplo

**Ejemplo 10-1:** calcular la deformación que sufre la barra de acero de la Figura 10-5, cuando es sometida a un esfuerzo tensil de 2 ton. Estudiar la variación de resistencia si la barra es instrumentada por un sensor con resistencia  $R_0 = 350\Omega$ .

**Figura 10-5:** ejemplo de deformación de una barra de acero redonda

de acuerdo a su definición, el módulo de elasticidad es igual a:

$$E \equiv \frac{F/A}{\Delta l/l} = 20.7 \times 10^{10} \text{ N/m}^2 = \frac{2000 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/seg}^2}{0.0004 \text{ m}^2 * \epsilon}$$

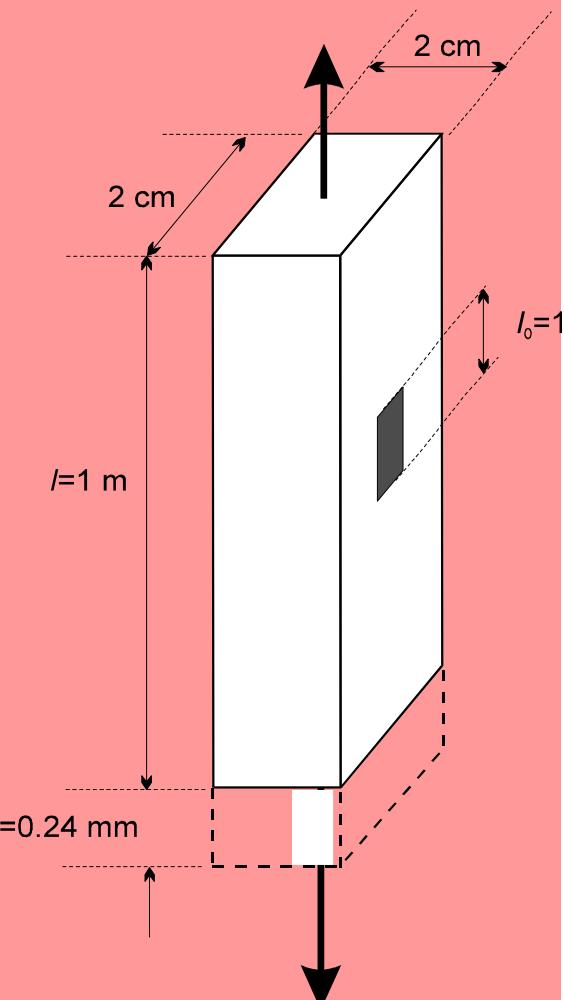
por lo que

$$\epsilon = \frac{2000 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/seg}^2}{0.0004 \text{ m}^2 * 20.7 * 10^{10} \text{ N/m}^2} = 236.7 \mu\text{m/m} = 236.7 \mu\epsilon = 0.24 \text{ mm/m}$$

y para este caso, la variación de resistencia será:

$$\Delta R = R - R_0 = 2\epsilon R_0 = 2 * 236.7 * 10^{-6} * 350 \Omega = 0.166 \Omega$$

como se puede apreciar la variación de resistencia, para una medición que podríamos llamar normal es muy pequeña, por lo que debe preverse el uso de técnicas de medición sofisticadas.



# Dispositivos Prácticos

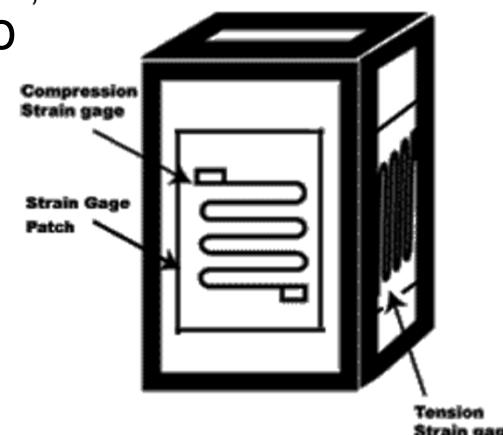
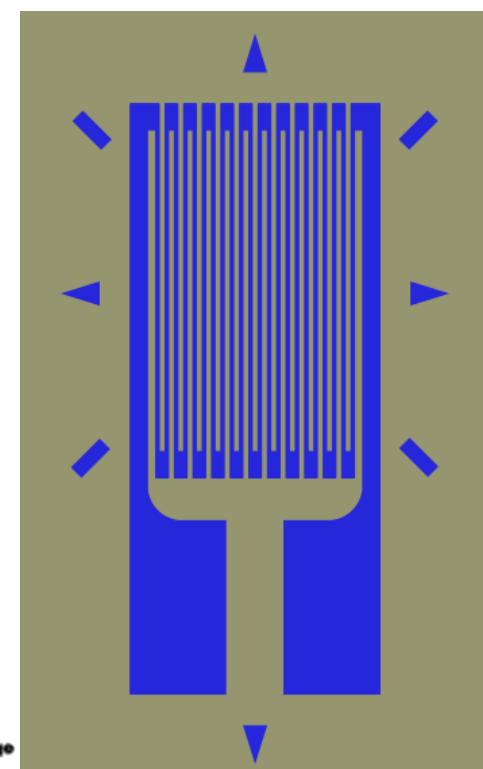
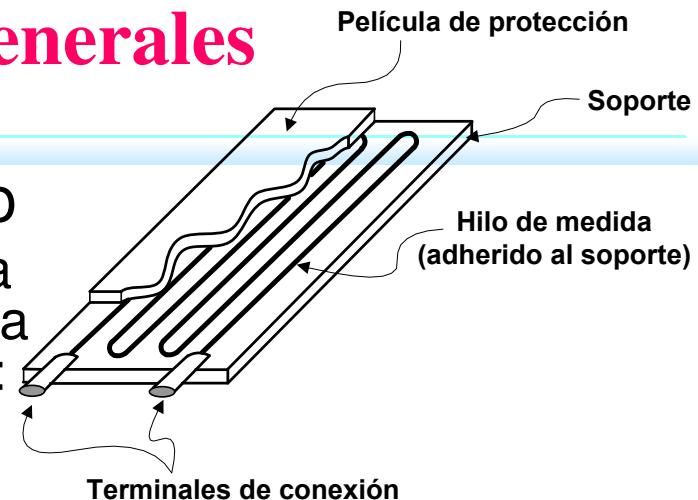
## Características Constructivas Generales

### \* El elemento sensor propiamente dicho

- Consiste de una configuración geométrica de fino alambre u hoja ultradelgada de una aleación especialmente conformada para:
  - ★ maximizar el cambio de resistencia con la deformación.
  - ★ no oponer resistencia mecánica apreciable a la deformación
- depositada sobre un sustrato aislante
  - ★ que se pega sobre el elemento cuya deformación interesa
- cubierto por una capa protectora
- Hasta hace un par de décadas, sensores de alambre muy fino
- Actualmente, casi exclusivamente sensores de película ultradelgada

### \* Formato más común

- Causas



# Dispositivos Prácticos

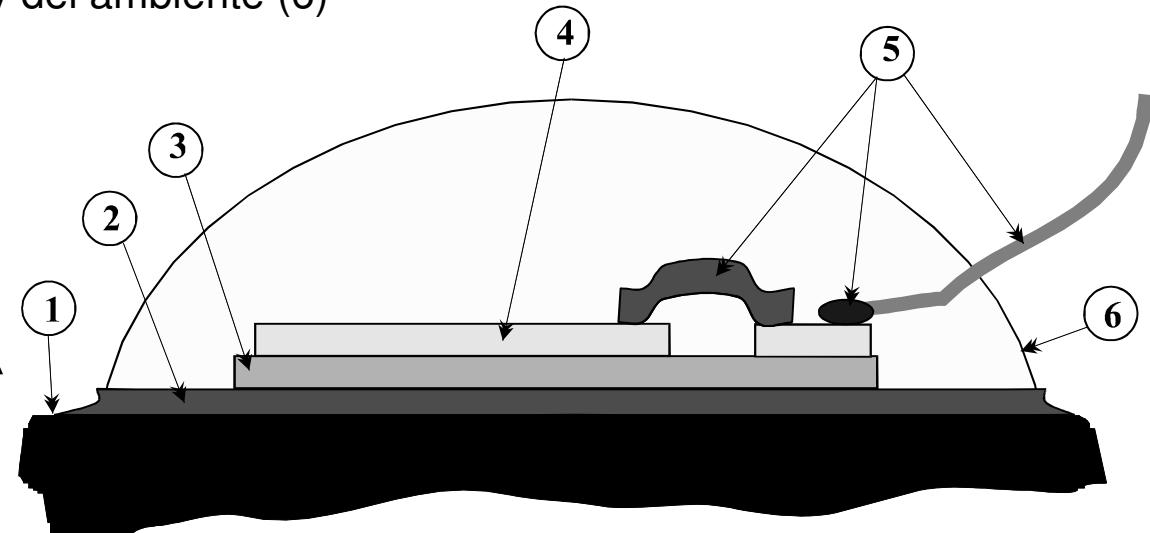
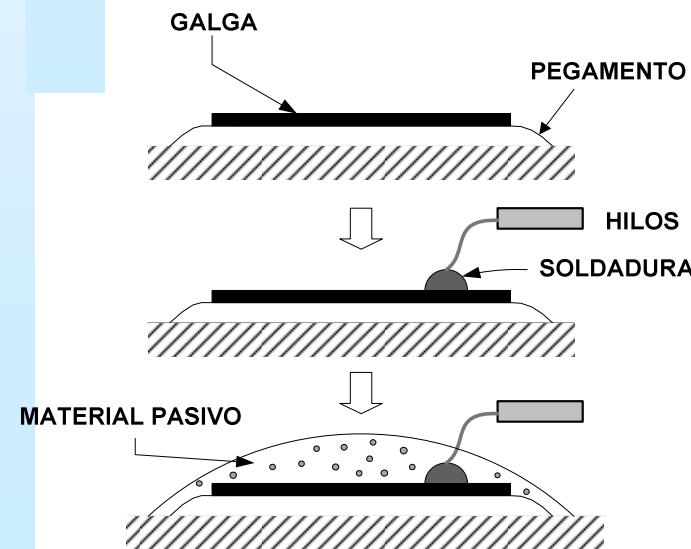
## Características Constructivas Generales

### \* El elemento sensor propiamente dicho

#### → Componentes

- ★ superficie de la pieza cuya deformación se desea medir (1)
- ★ pegamento efectivo entre la pieza y el sensor (2)
- ★ material de soporte del sensor propiamente dicho (3)
- ★ el sensor propiamente dicho (4)
- ★ conexiones apropiadas (5)
- ★ cubierta protectora capaz de atemperar agresiones mecánicas y del ambiente (6)

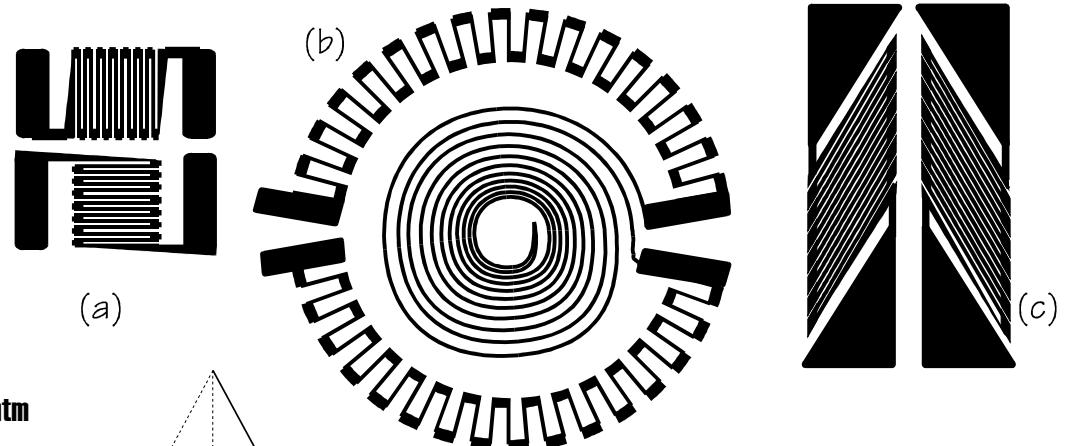
#### → Instalación



# Dispositivos Prácticos

## Características Constructivas Generales (cont.)

### \* Formas Geométricas



Ver: Transducer Gages Transducer Grade Strain Gages specs.htm

### → Material de Soporte o Estructural

- ★ Provee el soporte necesario para el transporte e instalación de la grilla sensora, que de otro modo sería inestable dimensionalmente.
- ★ Debe lograrse una adherencia tal que minimice la deformación por corte y pueda transmitirse fielmente la deformación a la grilla sensora.
- ★ Usualmente se trata de materiales orgánicos que aislan eléctricamente a la grilla sensora, ofrecen alta elasticidad y buen contacto térmico.

# Dispositivos Prácticos: Bandas Extensométricas Metálicas

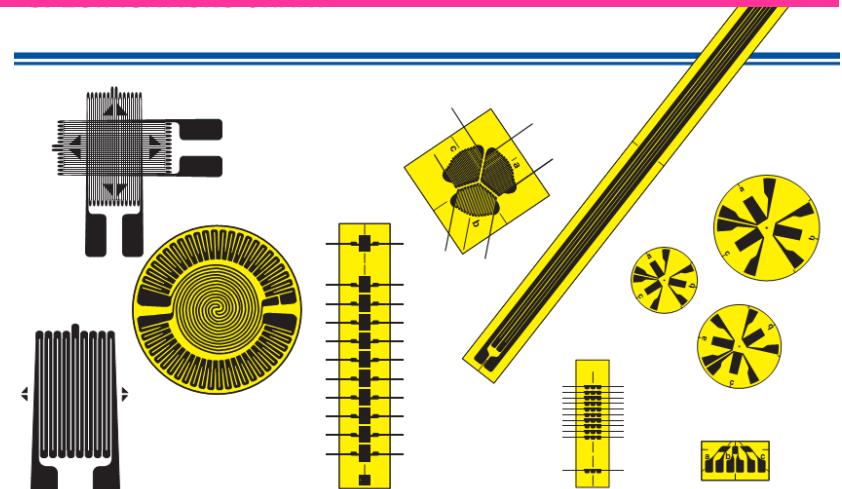
## \* Características constructivas, bandas metálicas

- Se fabrican en base a un delgado alambre o una hoja muy fina de material, tratando de minimizar la dimensión transversal, para lograr
  - ★ alta resistencia eléctrica,
  - ★ baja resistencia mecánica a la deformación,
  - ★ conservar la integridad estructural.
- Se consiguen con resistencias de 60, 120, 240, 350, 500 y 1000Ω.

## \* Sensibilidad

- El valor teórico de 1.6 no se cumple en la realidad ⇒
  - ★ cada fabricante realiza pruebas estadísticas para determinar la curva de dispersión, y
  - ★ los más serios informan el valor de GF, y además, su Incerteza
- Existen aleaciones especiales con de GF de hasta 10
- Las características tienen una alinealidad despreciable.

$$GF \equiv \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = 1 + 2\nu + \frac{\Delta \rho/\rho}{\varepsilon} \cong 1 + 2\nu \cong 1.6$$



# Dispositivos Prácticos: Bandas Extensométricas Semiconductoras

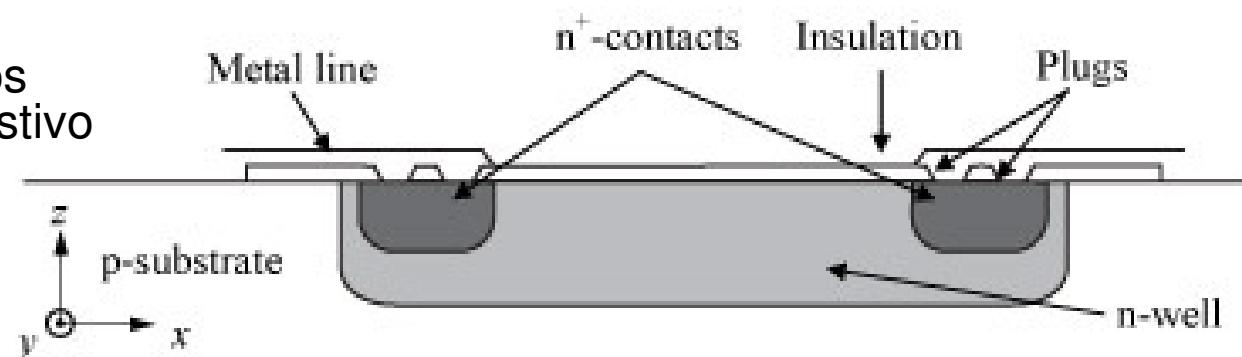
## ★ Efecto piezoresistivo

- ➡ Cambio de resistencia eléctrica de un material debido a deformación
- ➡ Difiere del efecto piezoeléctrico pues no produce una diferencia de potencial.
- ➡ Tamaño
  - ★ Despreciable en metales
  - ★ Notable en semiconductores (dos órdenes de magnitud mayor que en metales) como germanio y silicio en todas sus formas
- ➡ El efecto básico se debe a cambios en la movilidad de huecos y electrones en la estructura cristalina.

$$GF \equiv \frac{\Delta R/R}{\epsilon} = 1 + 2\nu + \frac{\Delta\rho/\rho}{\epsilon}$$

## ★ Piezoresistores

- ➡ Son resistores hechos de material piezoresistivo
- ➡ Son los dispositivos piezoresistivos más elementales



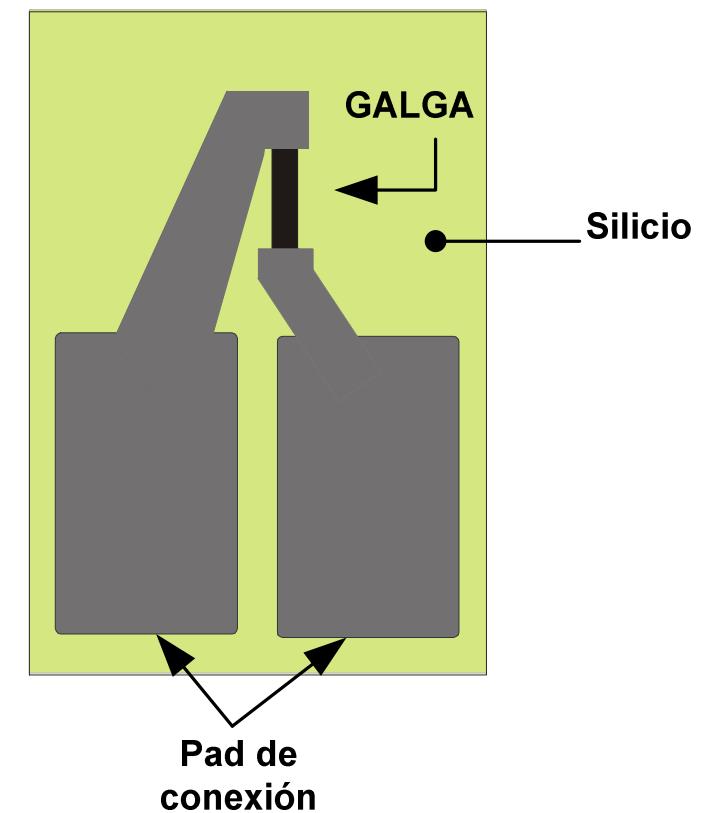
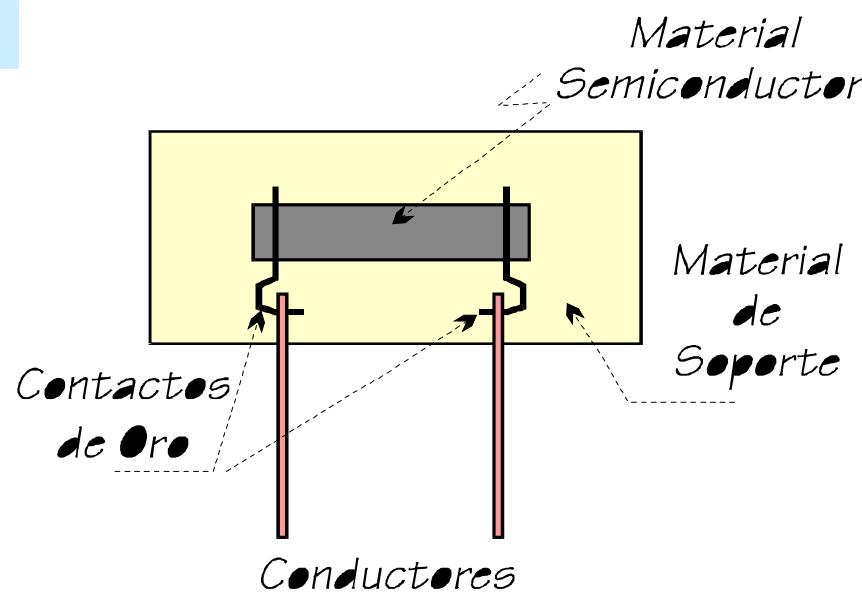
## ★ Fabricación

- ➡ En su forma más simple se los fabrica por difusión
  - ★ Constan de un pozo N (ó P) difundido sobre un sustrato P (ó N) con sus respectivos contactos
  - ★ Como las resistencias resultantes en los contactos son elevadas (centenares de ohms), se las pasa por difusiones N+ o N++
  - ★ Así resultan más caros

# Dispositivos Prácticos: Bandas Extensométricas Semiconductoras

## \* Características constructivas, bandas de Silicio

- Es un pequeño monocristal de material **piezoresistivo** tal como el silicio, dopado con trazas de impurezas, p.ej.,
  - ★ de boro, para PTC
  - ★ de fósforo, para NTC



Ver: Catálogo Omega STRAIN\_GAGES.pdf

# Dispositivos Prácticos:

## Bandas Extensométricas Semiconductoras

### \* Características Operativas

- Sensibilidad muy superior a la de las bandas metálicas.
- El rango de deformaciones a medir es restringido, con valores típicos de máxima deformación tolerable, de  $3000 \mu\epsilon$ .
- Se recomienda para
  - ★ problemas en que la deformación a medir es muy baja ,
  - ★ deformaciones dinámicas.
- Su deformación es de tipo elástico, hasta el punto de ruptura
  - ★ no presenta fenómenos de fluencia ni de histéresis.

### \* Sensibilidad

- Entre -50 y -200, o sea, 25 á 100 veces superior a las metálicas.
- El GF no es constante sino que varía con la deformación.
- Es imprescindible que el fabricante provea una curva o tabla de la sensibilidad en función de la resistencia o que relacione resistencia con deformación.
- Algunos fabricantes, proveen una aproximación del tipo 
$$\frac{\Delta R}{R} = S_1 \epsilon + S_2 \epsilon^2$$
  - ⇒ donde,
  - ★  $S_1$  = GF, toma valores entre 40 y 200, y puede ser +va (semiconductor P), ó -va (material N)
  - ★  $S_2$  es del orden de 4000 y representa el grado de alinealidad del sensor

# Dispositivos Prácticos: Bandas Extensométricas

## Características de la señal de salida

### → Bandas Metálicas

- ★ Se debe tratar de compensar con el circuito de acondicionamiento
  - ⇒ la pequeñísima  $\Delta R$  que causan las deformaciones típicas, y
  - ⇒ las  $\Delta R$  ocasionadas por cambios en la temperatura.
- ★ El circuito puente provee herramientas para solucionar ambos

### → Bandas Semiconductoras

- ★ Son dos los efectos que debe tratar de compensar:
  - ⇒ la fuerte alinealidad de la curva resistencia vs. deformación, y
  - ⇒ las  $\Delta R$  ocasionadas por cambios en la temperatura.
- ★ El circuito puente sólo da herramientas para el problema térmico.

## Bandas Extensométricas Metálicas vs. Semiconductoras

Tipo de Banda	Metálica	Semiconductora
Máxima deformación admisible	Alta	Baja
Sensibilidad	Baja	Alta
Resolución	Baja	Alta
Autocalentamiento	Alto	Bajo
Curva característica	Lineal	Alineal
Flexibilidad	Muy alta	Difícil montaje en superficies curvas
Costo	Bajo	Moderado
Sensibilidad a la temperatura	Moderada	Alta
Ancho de banda	Moderado	Amplio

Ver: Catálogo Omega STRAIN\_GAGES.pdf

# Acondicionamiento de la Señal

## ★ Efecto de la temperatura

### → Muy importante

- ★ debe ser compensado por el circuito de acondicionamiento de señales.
- ★ **Idealmente:**  $R=R_0 * (1+f(\varepsilon))$ .
- ★ **Caso Real:**  $R=R_0 * (1+f(\varepsilon)) * (1+\Delta L(T)) * (1+\Delta \rho(T))$

### → Ante un cambio en la temperatura ambiente:

- a) la resistencia varía, aún en ausencia de deformaciones, por efecto RTD;
- b) tanto la banda como la pieza bajo medición, cambiarán sus dimensiones y, si ambos cambios no son idénticos, el sensor dará una salida que se captará como deformación, sin que ningún esfuerzo la genere.

### → Idea básica: tratar de lograr que se cancelen entre ellos.

- ★ Bandas autocompensadas para medición sobre los materiales más comunes.
- ★ Limitaciones de esta técnica: tipo de material a medir; linealidad
- ★ Utilización de una computadora para anular los efectos térmicos.
- ★ Efectos de la temperatura sobre componentes electrónicos.

# Acondicionamiento de la Señal (cont.)

## ★ Técnicas circuitales

- Autocalentamiento
  - ★ Disipación por conducción a la pieza sobre la que va montado.
- Acondicionador de señales a medida vs. acondicionadores específicos para bandas extensométricas
- Errores
  - ★ Utilizando componentes de muy alta calidad, se obtienen incertezas:
    - ⇒ para los circuitos basados en puente simple:  $\approx \pm 50 \mu\epsilon$
    - ⇒ para los circuitos basados en medio puente:  $\approx \pm 20 \mu\epsilon$
    - ⇒ para los circuitos basados en puente completo:  $\approx \pm 2 \mu\epsilon$
- Resolución de una banda extensométrica de calidad:
  - ★ debe ser del orden de  $2 \mu\epsilon$ ,
  - ★ para un caso típico, será  $GF=2.0$  y  $R_0=120 \Omega$ , y por lo tanto,
  - ★  $\Delta R = GF * \epsilon * R_0 = 2 * 2 * 10^{-6} * 120 \Omega = 0.48 \text{ m}\Omega$
  - ★ Pero
    - ⇒ la tolerancia de la resistencia nominal es del orden de  $\pm 0.2\%$  de  $R_0$ ,
    - ⇒ para este caso, del orden de  $\pm 0.24 \Omega$ , es decir,
    - ⇒ mucho mayor que el efecto que se desea medir, por lo que
    - ⇒ no se puede tomar como  $R_0$  al valor nominal, debiéndose medirlo.

# Técnicas Prácticas de Medición y Montaje

\* Comenzando con la ecuación que define la sensibilidad:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{GF * R_0}$$

\* El método general, sería,

- 1) medir la resistencia de la banda antes de someterla a deformación,  $R_0$ ,
- 2) aplicar la deformación y medir nuevamente la resistencia,  $R$ ,
- 3) calcular  $\Delta R = R - R_0$
- 4) calcular  $\varepsilon$
- 5) aplicando principios de la teoría de resistencia de materiales, calcular el esfuerzo, y a partir de éste,
- 6) calcular las fuerzas que lo ocasionaron

\* En la práctica, se prefiere utilizar alguna variante del circuito puente de Wheatstone.

# Barra de eje recto sometida a tracción simple

## (Puente Simple o Puente 1/4)

\* El método de medición sería:

- 1) leer y almacenar  $V_s$  con la muestra no sometida a deformación;
- 2) aplicar deformación y volver a leer y almacenar  $V_r$ ;
- 3) conociendo o midiendo  $E$ , calcular  $V_r$
- 4) calcular la deformación,  $\varepsilon$ , como:

$$V_r = \frac{V_s}{E} \left|_{\text{en reposo}} \right. - \frac{V_s}{E} \left|_{\text{bajo medición}} \right.$$

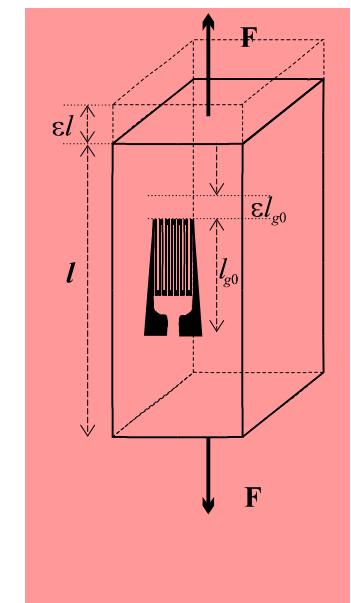
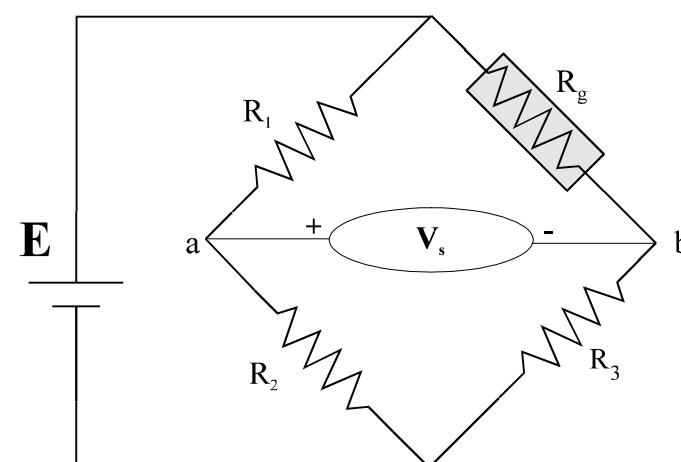
$$\varepsilon = \frac{-4V_r}{GF*(1+2V_r)}$$

### Conclusiones

- la respuesta es no-lineal
- hay “auto-compensación” de temperatura

- Investiguemos las razones para estas conclusiones:

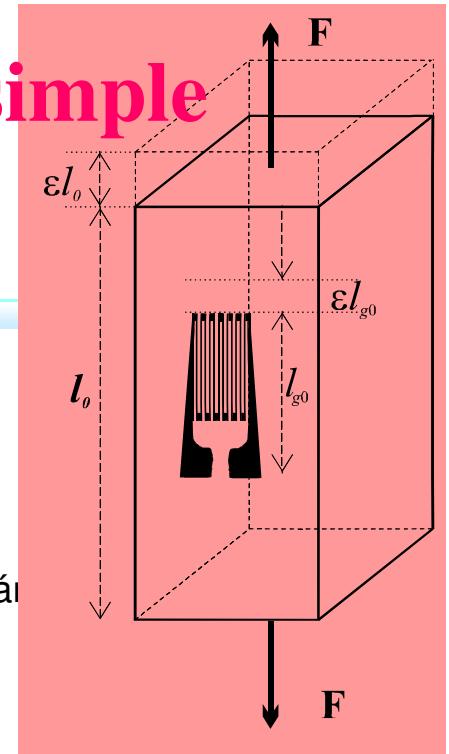
★ La alinealidad de la respuesta se debe a la presencia del término  $V_r$ , en el denominador de la ecuación para  $\varepsilon$ , y....



# Barra de eje recto sometida a tracción simple (Puente Simple o Puente 1/4)

## \* Efectos de la temperatura:

- Si a la temperatura ambiente  $T_0$ ,
  - ★ la longitud de la barra, no sometida a tracción, es  $l_0$ , y
  - ★ la de la banda extensométrica es  $l_{g0}$ .
  - ★ Si se somete a la barra a una tracción  $F$ , las nuevas longitudes serán
  - ★  $l = l_0 (1+\varepsilon_\sigma)$
  - ★  $l_g = l_{g0} (1+\varepsilon_\sigma)$
- Si ahora  $T$  varía desde su valor original  $T_0$  hasta un nuevo valor  $T_0 + \Delta T$ , las longitudes de la barra y de la strain gage también cambiarán como,
  - ★  $l = l_0 (1+\varepsilon_\sigma) (1+\Delta L(T))$
  - ★  $l_g = l_{g0} (1+\varepsilon_\sigma) (1+\Delta L(T)) (1+\Delta \rho(T))$  medida a través de su resistencia,  $R_G$
- Cuando decíamos que se “*autocompensaba*” una banda extensométrica para un material determinado
  - ★ La idea era que, para ese material, se cancelara el efecto neto de la temperatura sobre la longitud, con el efecto de la temperatura sobre la resistencia.
- En ese caso, **si la compensación fuese perfecta**, y se deseara conocer el efecto de la tensión sobre la barra, tendremos:
  - ★  $l = l_0 \{1+\varepsilon_\sigma + \varepsilon(T/l)\}$
  - ★  $l_g = l_{g0} \{1+\varepsilon_\sigma\}$



# Instrumentación de una barra de eje recto sometida a tracción simple (Medio Puente)

## \* Falsa banda sobre barra no deformada

→ Si la  $T$  varía desde  $T_0$  hasta  $T_0 + \Delta T$ ,

$$\star l = l_0 (1 + \varepsilon_\sigma) (1 + \Delta L(T))$$

$$\star l_g = l_{g0} (1 + \varepsilon_\sigma) (1 + \Delta L(T)) (1 + \Delta \rho(T))$$

$$\star l_g (\text{dummy}) = l_{g0} (1 + \theta) (1 + \Delta L(T)) (1 + \Delta \rho(T))$$

→ La salida del puente será,

$$\star V_s = f(l_g - l_g(\text{dummy})) = f(\varepsilon_\sigma)$$

→ Tenemos así, una **verdadera medición de esfuerzo**,

★ detecta exclusivamente, deformaciones debidas a las fuerzas actuantes, sin considerar las causadas por esfuerzos térmicos.

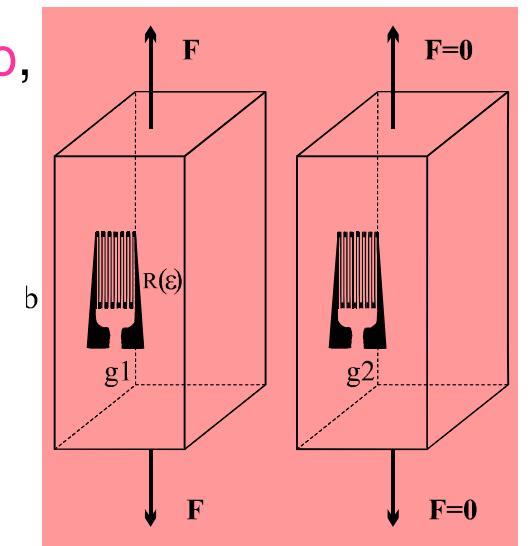
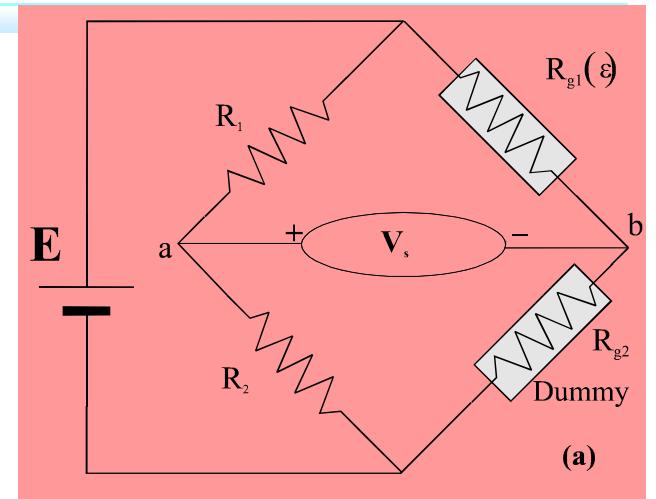
→ Igual que en la sección anterior la deformación será:

$$\varepsilon = \frac{-4V_r}{GF * (1 + 2V_r)}$$

★ Conclusiones

⇒ la respuesta es no-lineal

⇒ hay verdadera compensación de temperatura, a lazo cerrado



# Instrumentación de una barra de eje recto sometida a tracción simple (Medio Puente, cont.)

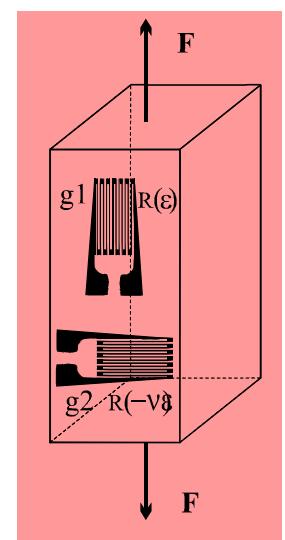
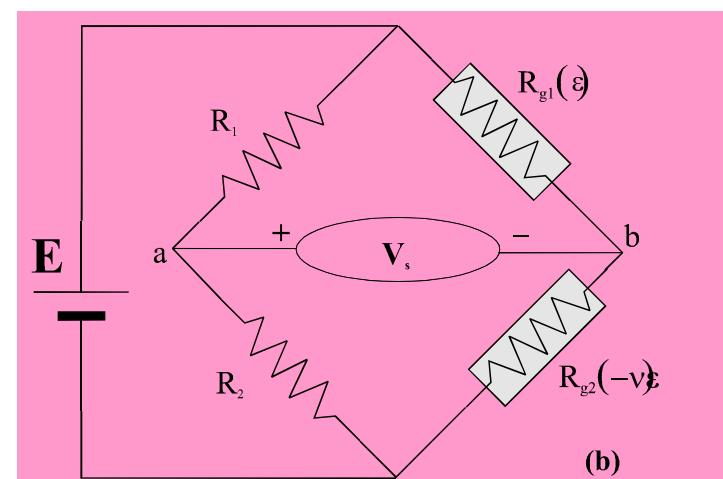
## \* Strain gage activa sobre barra sometida a deformación

- Similar a la sección anterior se puede demostrar que
- El efecto de la temperatura se analiza de modo idéntico a lo visto,
  - ★  $l = l_0 (1 + \varepsilon_\sigma) (1 + \Delta L(T))$
  - ★  $l_g = l_{g0} (1 + \varepsilon_\sigma) (1 + \Delta L(T)) (1 + \Delta \rho(T))$
  - ★  $l_g (\text{compensadora}) = l_{g0} (1 - \nu \varepsilon_\sigma) (1 + \Delta L(T)) (1 + \Delta \rho(T))$
- La salida del puente será función de  $(l_g - l_g(\text{compensadora}))$
- ★  $V_s = f(\varepsilon_\sigma, \nu)$

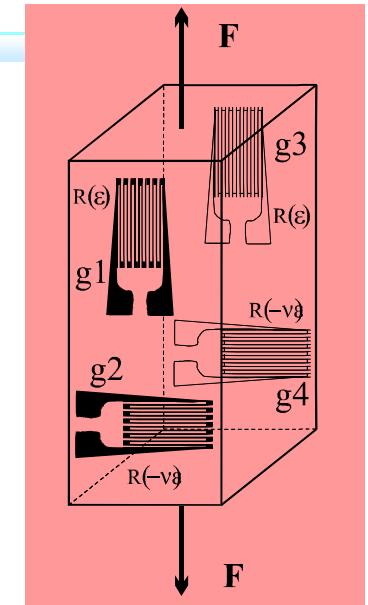
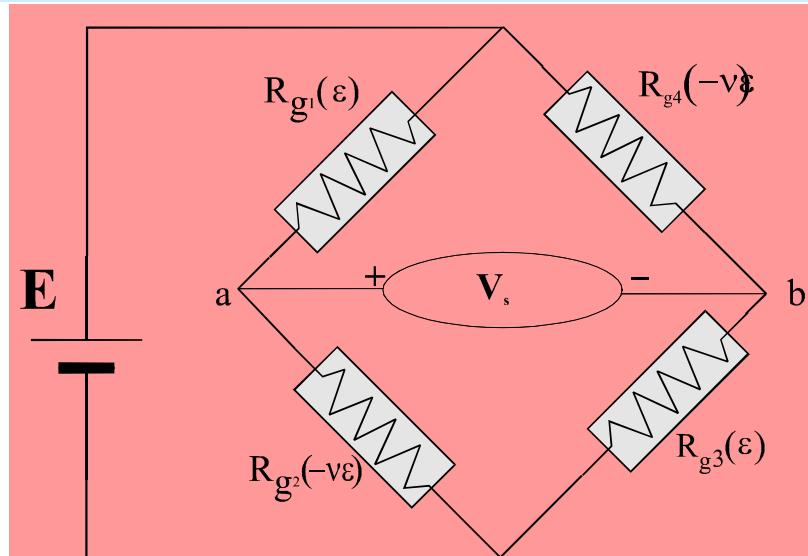
### → Conclusiones

- ★ hay compensación de temperatura
- ★ la respuesta es no-lineal
- ★ instalación más simple

$$\varepsilon = \frac{-4V_r}{GF^*[(1+\nu) + 2(1-\nu)V_r]}$$



# Instrumentación de una barra de eje recto sometida a tracción simple (Puente Completo)



★ Se puede demostrar

→ que la deformación viene dada, para esta configuración circuital, por:

$$\varepsilon = \frac{-2V_r}{GF * [(1 + \nu) + (1 - \nu)V_r]}$$

→ Conclusiones

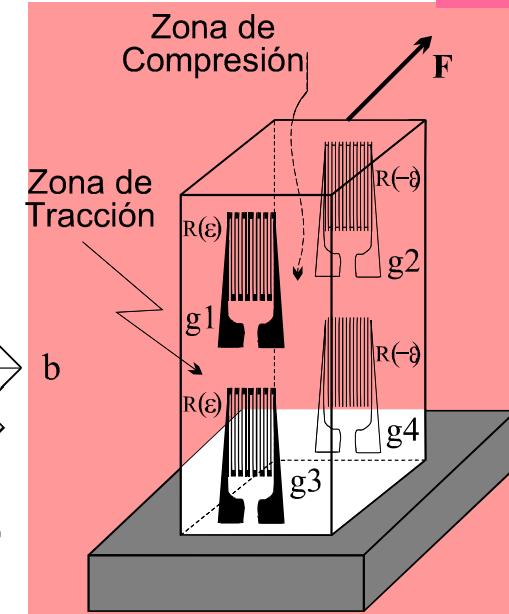
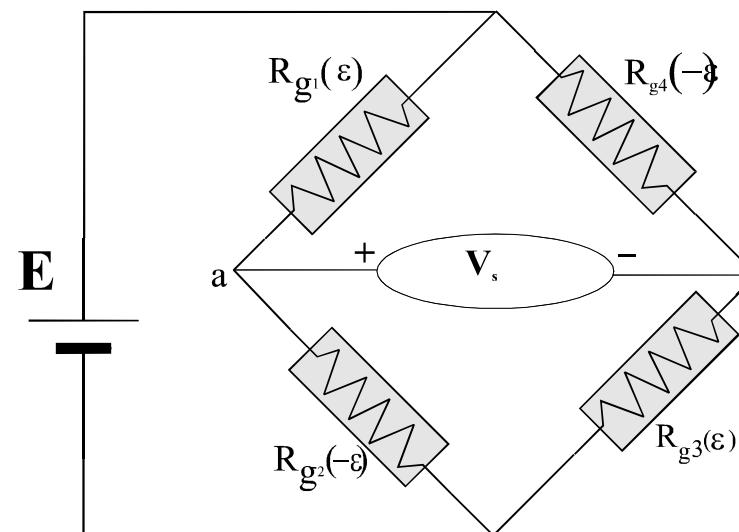
- ★ hay compensación de temperatura
- ★ la respuesta es no-lineal
- ★ mayor sensibilidad
- ★ facilidad de instalación

# Instrumentación de barra prismática de eje recto sometida a flexión simple (Puente Completo)



Se puede demostrar que para esta configuración,

$$\varepsilon = \frac{-V_r}{GF}$$



## ➔ Conclusiones

- ★ hay compensación de temperatura
- ★ la respuesta es lineal

# Barra prismática de eje recto sometida a tracción y flexión simultáneas (Medio Puente \*2)

→ Dejan de ser iguales los esfuerzos en superficies anterior e posterior

→ Si se instrumenta como se muestra

- ★  $g_1$  &  $g_3$ : tracción + flexión
- ★  $g_2$  &  $g_4$ : tracción - flexión

→ Del puente  $g_1/g_2$  se obtiene la deformación por tracción por

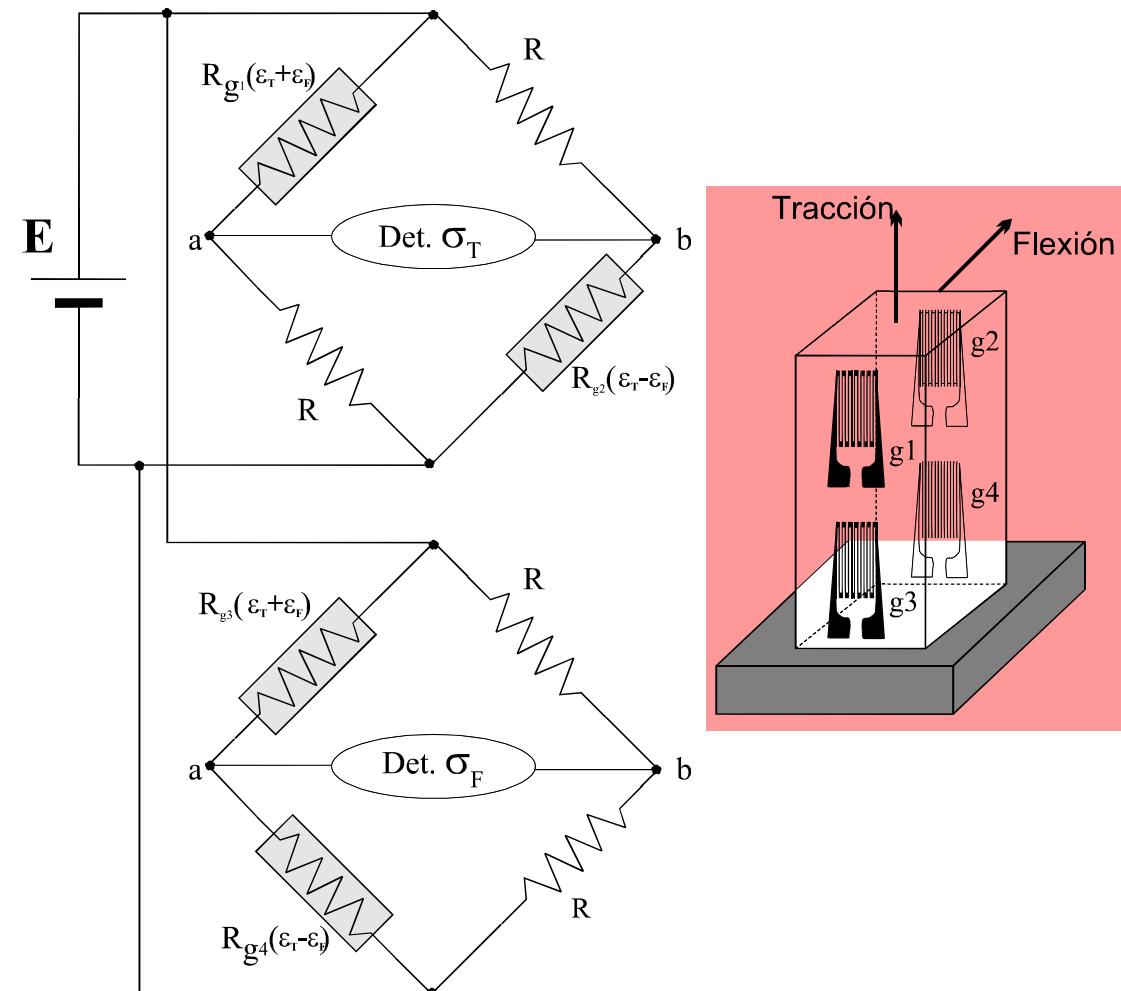
$$\varepsilon_T = \frac{-2V_r}{GF}$$

→ y del puente  $g_3/g_4$  se obtiene la deformación por flexión:

$$\varepsilon_F = \frac{-2V_r}{GF}$$

→ Conclusiones

- ★ hay compensación de temperatura
- ★ la respuesta es lineal



# Instrumentación de un eje sometido a torsión (Puente Completo)

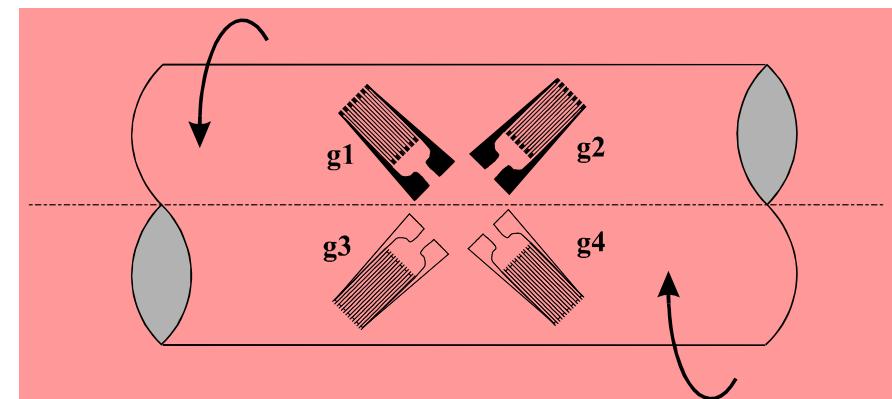
\* Si

- Se instrumenta con los ejes de las bandas extensométricas formando  $45^\circ$  con las generatrices del cilindro, se obtiene la deformación por torsión  $\gamma$  como:

$$\star \quad \gamma = 2 * \varepsilon_{@45^\circ}$$

- Se obtiene la siguiente ecuación para la deformación medida en función de la tensión del puente :

$$\gamma = \frac{-V_r}{GF}$$



- Aplicando la definición del módulo de corte,  $G$ , se obtiene el esfuerzo,  $\tau$ , y a partir de éste se calcula el torque,  $T$ , que lo originó, aplicando principios de Resistencia de Materiales para el caso.

\* Conclusiones

- hay compensación de temperatura
- la respuesta es lineal
- se compensan los esfuerzos de tracción y flexión.

# Instalación Mecánica de Bandas Extensométricas

- ✳ Selección del sitio en que debe pegarse la banda.
- ✳ Selección de la “roseta” más adecuada para la medición.
- ✳ Pegado de la banda extensométrica a la superficie a medir
- ✳ Soldado de los terminales a los hilos de conexión.
- ✳ Protección de influencias externas (humedad, agresiones mecánicas, etc.) de acuerdo a las condiciones del ambiente.
- ✳ Verificación de la instalación:
  - ➡ se recomienda medir la resistencia eléctrica del sensor no-deformado,
    - ★ en condiciones de laboratorio y habiendo utilizado adhesivos que curan a temperatura ambiente, el valor de resistencia debe caer dentro de la banda de error especificada para el sensor
    - ★ en condiciones industriales, pueden aceptarse diferencias de resistencia de hasta el 2% del valor nominal especificado.
  - ➡ Resistencia de aislación de la banda extensométrica respecto de la pieza sobre la que va montada (deben verificarse valores superiores a los  $1000\text{ M}\Omega$ ).

# Selección de Bandas Extensométricas

## Características Típicas a Considerar

### \* Longitud del sensor

- ➔ Cortos: longitud activa inferior a 3 mm
- ➔ Normales, con longitudes activas entre 3 y 10 mm
- ➔ Largos: de longitudes superiores a 10 mm.

### \* Montaje de sensores

- ➔ Depende del conocimiento del estado de esfuerzo.
- ➔ Múltiples bandas extensométricas simples vs. Montaje de una roseta

### \* Resistencia Nominal

- ➔ Valores típicos de 120, 350 y  $700\Omega$
- ➔ Margen de error respecto al valor nominal, habitualmente hasta 1%.
- ➔ Los sensores de  $120\Omega$  son los más comunes; los de  $350\Omega$  muestran
  - ★ menor autocalentamiento,
  - ★ menor incidencia de los errores causados por el cableado y
  - ★ una mejor relación señal/ruido.

### \* Materiales componentes de la aleación sensible

# Selección de Bandas Extensométricas

## Características Típicas a Considerar

- ✿ Materiales componentes de la aleación sensible
- ✿ Material de Soporte y Tipo de encapsulado
  - ➔ Polimida: flexible, resistente, fácil de pegar sobre superficies irregulares, de fácil manipuleo y alta elongación máxima.
  - ➔ Resina fenólica reforzada con fibra de vidrio: alta calidad y precisión.
  - ➔ Kapton: mejora el desempeño de los anteriores carriers.
- ✿ Compensación Térmica
- ✿ Forma, materiales y dimensiones de las islas de conexión
- ✿ Costo

# MEDICIÓN DE FUERZAS Y DEL PESO

\* La fuerza mecánica puede medirse utilizando distintos métodos, todos ellos indirectos:

- ➔ Aprovechando la salida de un acelerómetro
- ➔ Contando franjas de interferencia en un sistema óptico
- ➔ Aprovechando el efecto piezoelectrico
- ➔ mediante la tecnología de bandas extensométricas.

\* **Principio de medición con bandas extensométricas:**

- ➔ Utilizar la fuerza o el peso que se desea medir para deformar una pieza de material elástico (*captor*), instrumentado con bandas extensométricas.
- ➔ Al *conjunto sensor* se lo conoce como *celda de carga*, y convierte la fuerza que actúa sobre él, en una señal eléctrica analógica (variación de la resistencia de las strain gages que lo forman).

\* Veremos,

- ➔ Tipo de material a utilizar como captor,
- ➔ Algunas variantes muy simples para convertir fuerza o peso en deformación,
- ➔ Instalación de bandas extensométricas sobre el captor, cuya salida ( $\Delta R$ ) se utiliza para calcular deformación, y de allí, fuerza o peso.
- ➔ Aplicaciones

# CELDAS DE CARGA

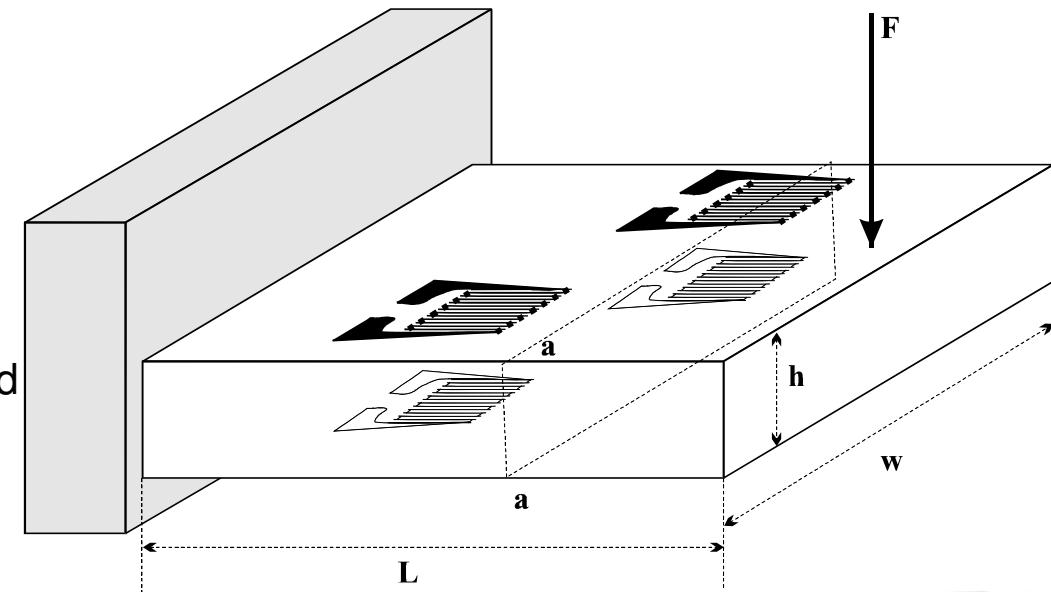
[Ver Load Cells, Force Sensors and Torque Transducers.htm](#)

## Material del captor

→ Requerimientos:

- ★ Elevada rigidez
- ★ Elevada carga de ruptura
- ★ Elevado límite elástico
- ★ Bajo módulo de elasticidad

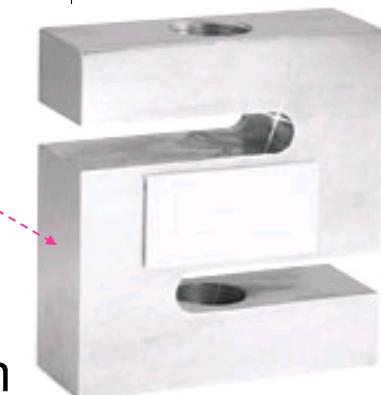
## Captadores basados en flexión



## Captores basados en tensión-compresión

## La Teoría de Resistencia de Materiales

→ provee los elementos para relacionar la deformación acusada por la celda de carga con la fuerza que la provocó

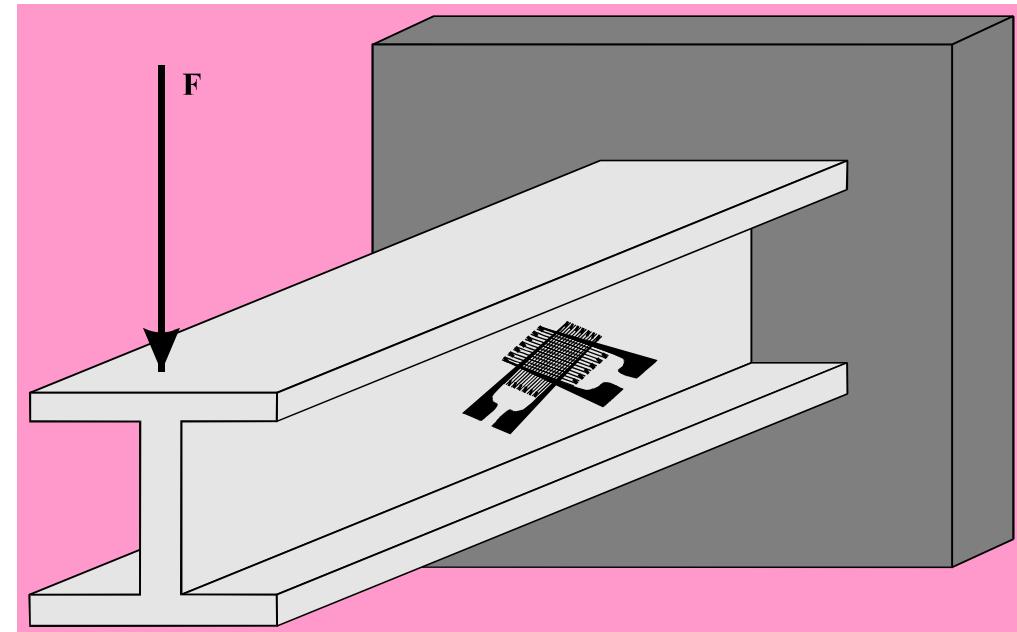


# CELDAS DE CARGA

## (cont.)

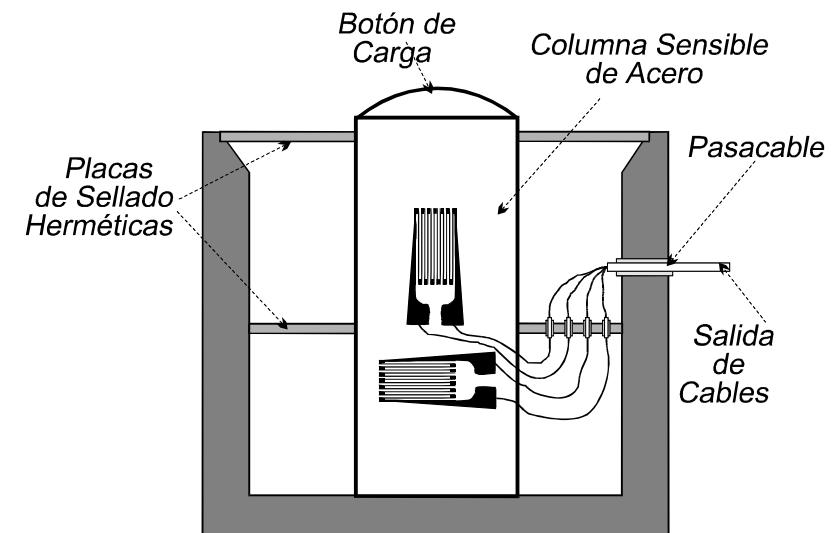
### \* Captores basados en esfuerzo de corte

- Constructivamente, se utiliza una geometría especial para el material captor, en doble-T de modo que el esfuerzo de corte se distribuya uniformemente sobre la sección a-a
- Esta configuración permite determinar el esfuerzo de corte, como,  $\gamma = 2 * \varepsilon_{@45^\circ}$ , y conociendo  $\gamma$  se puede determinar la fuerza vertical  $F_v$  que lo provocó



# CELDAS DE CARGA (cont.)

## \* Captores basados en compresión



# CELDAS DE CARGA

## Ejemplo

### Especificaciones generales

Tensión máxima de excitación(V):	15
Resistencia del puente (ohms):	350
Salida nominal (mV/V):	2
Rango compensado de temperatura (°C):	-18 a 65
Balance de 0 (% C.N.):	+/-1
Alinealidad (% C.N.):	0,03
Histéresis (% C.N.):	0,02
Repetibilidad (% C.N.):	0,02
Creep (% de la carga en 20'):	0,03
Longitud del cable:	1,5 m



Sobrecarga admisible (% C.N.): 150

Corr. cero por temp. (% C.N./°C): +/-0,003

Corr. de sens por temp. (%C.N./°C): +/-0,0015

Resistencia de aislación (Megaohms): 5000

Material base: Aluminio

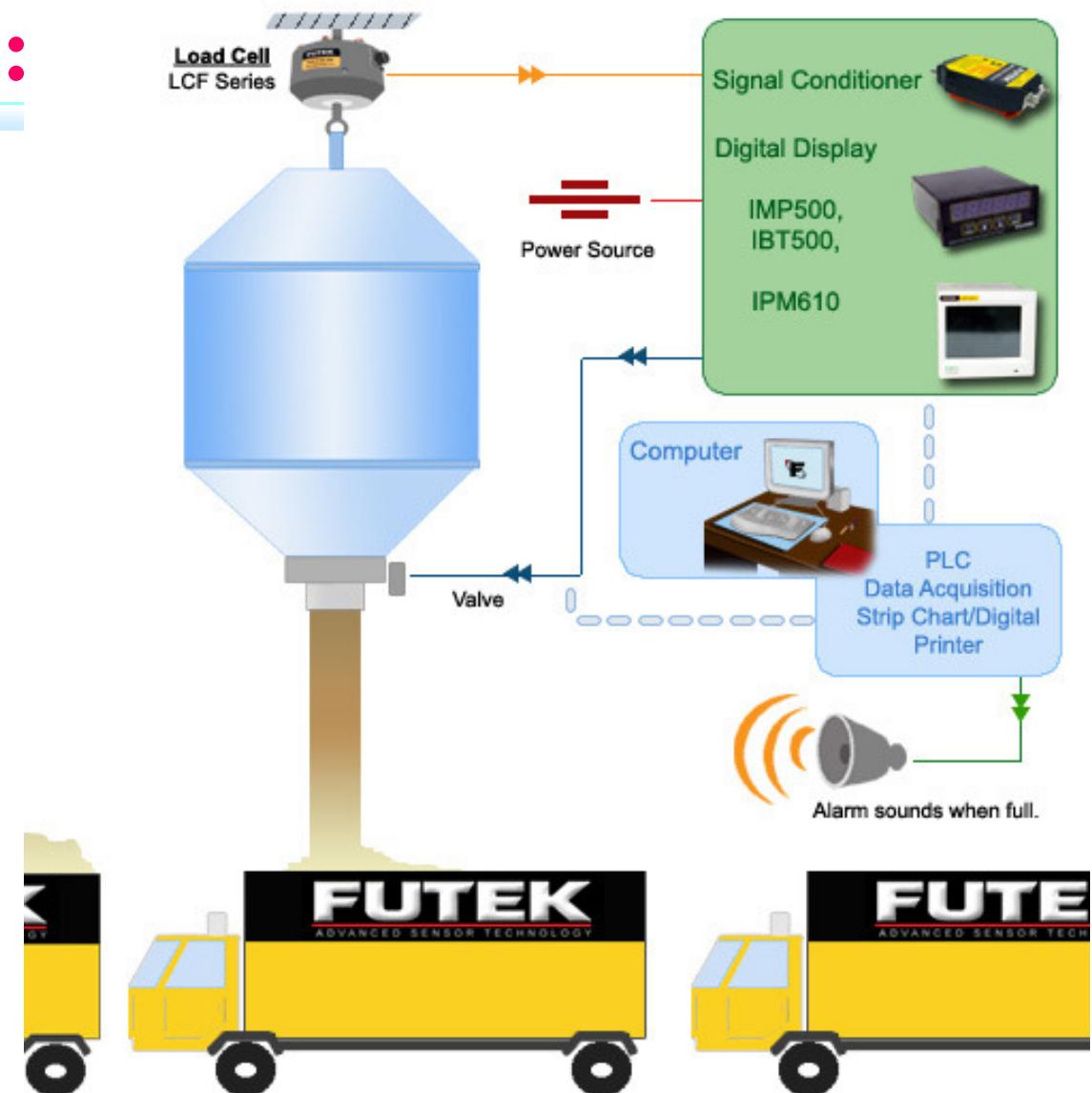
Código de colores:



- $$\text{Sensibilidad} = \frac{\text{Salida nominal} * V_{\text{alimentación}}}{\text{Carga nominal}}$$

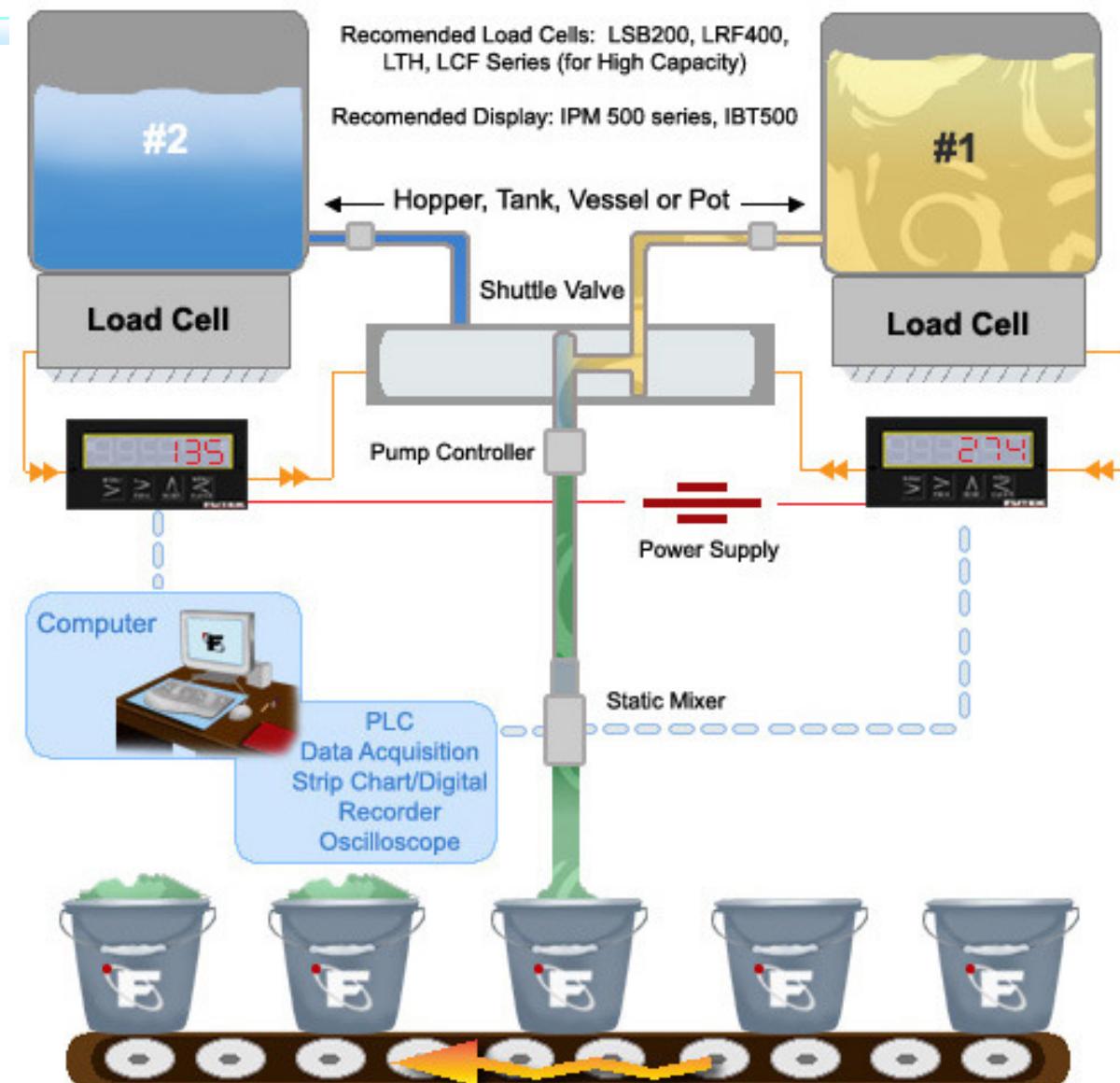
# Aplicación de Celdas de Carga: Distribución de Materiales y Control de Nivel

Application 103

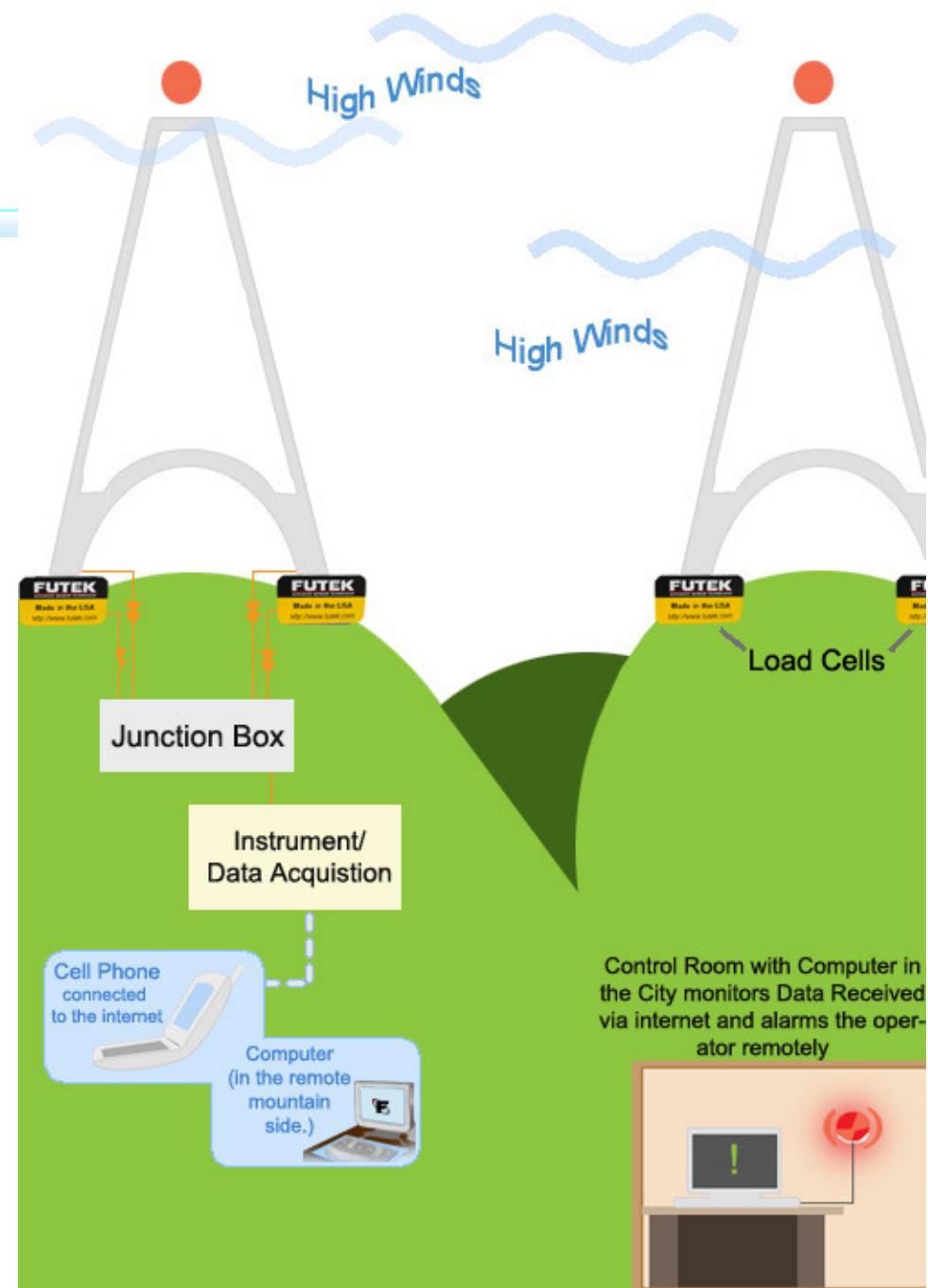


# Aplicación de Celdas de Carga: Llenado de envases con mezcla

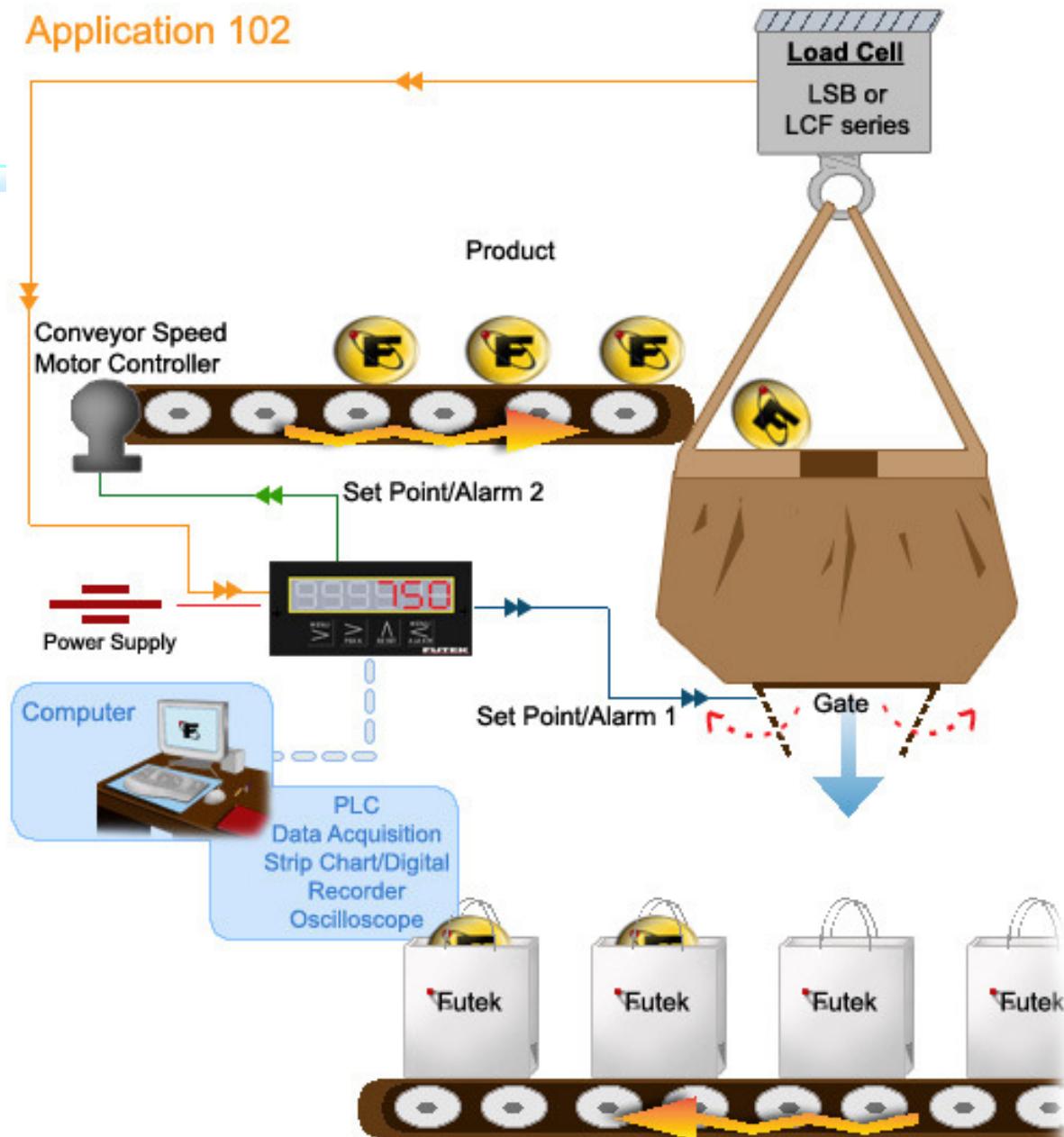
Application 101



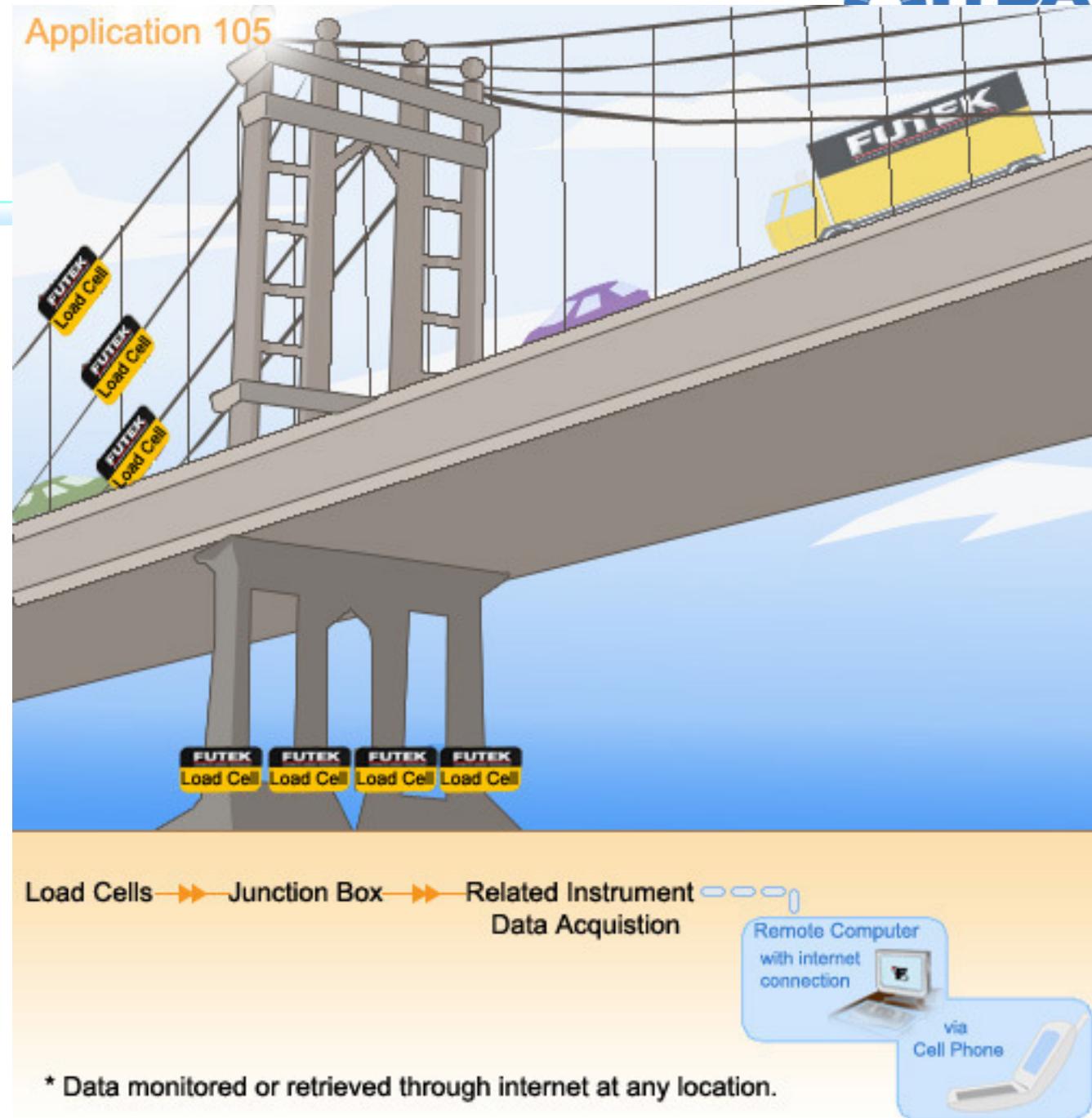
# Aplicación de Celdas de Carga: Medición de esfuerzos debidos al viento



# Aplicación de Celdas de Carga: Llenado de bolsas de regalo

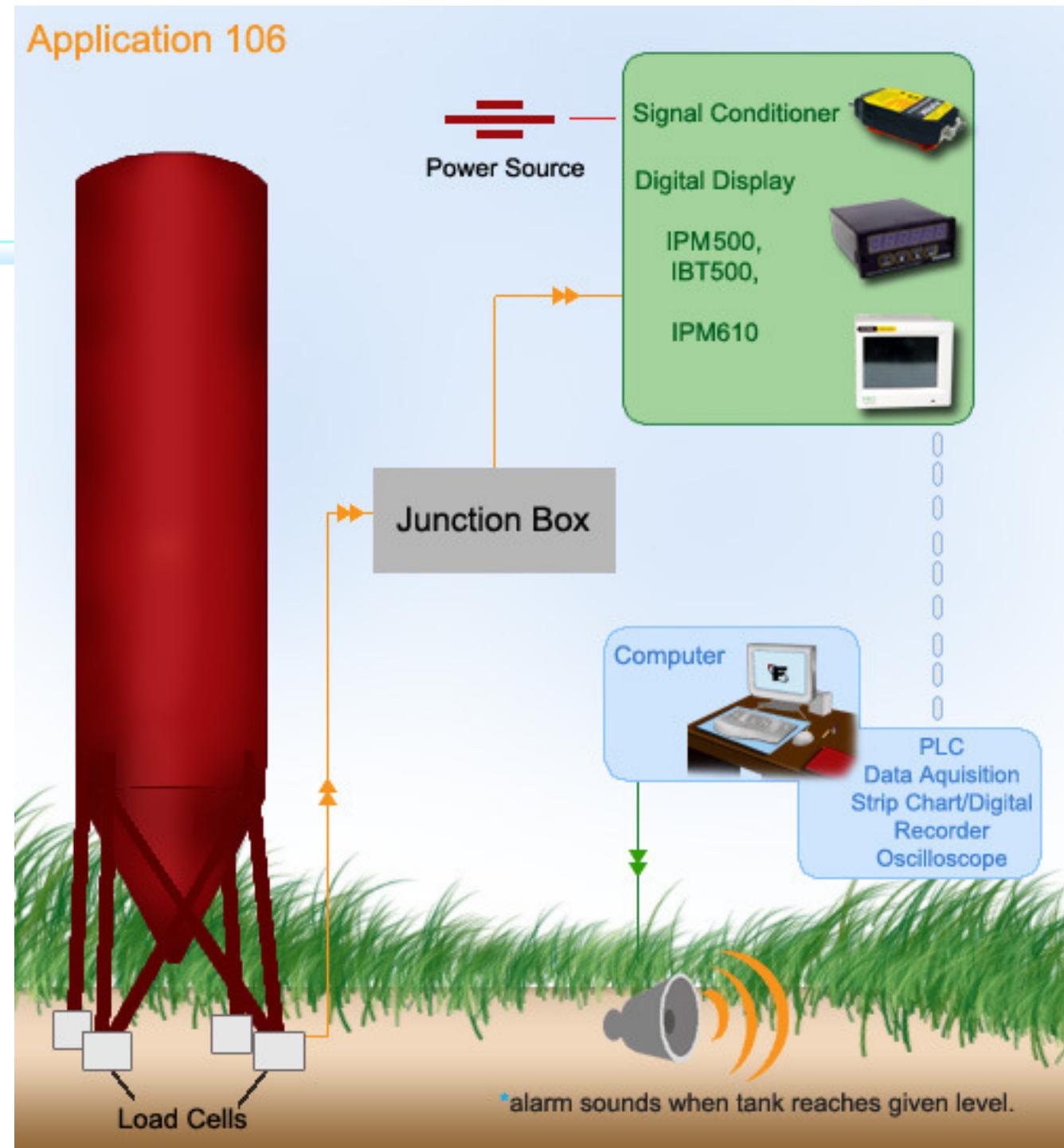


# Aplicación de Celdas de Carga: Tensión en cables del puente



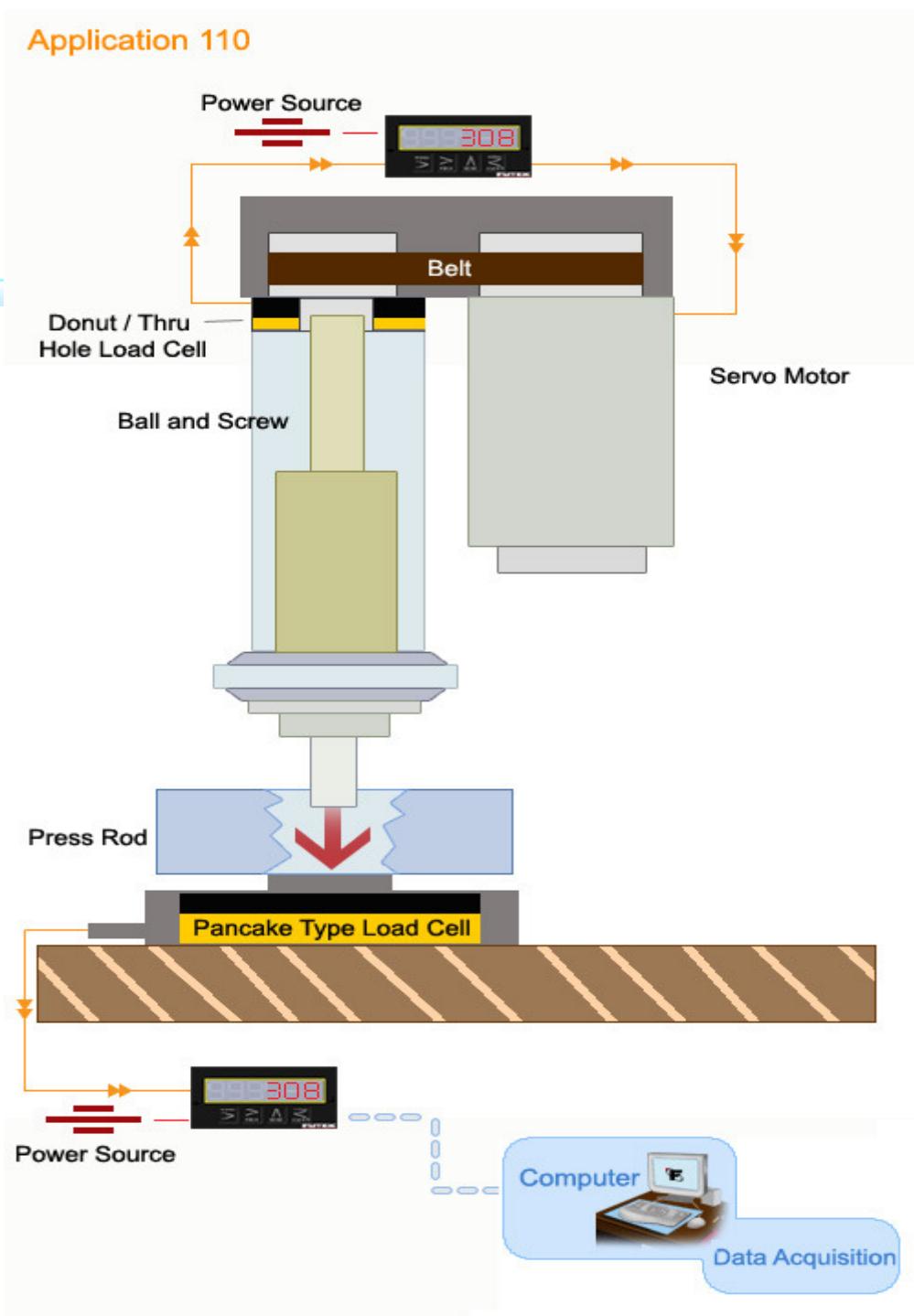
# Aplicación de Celdas de Carga: Nivel de un silo

43



# Aplicación de Celdas de Carga: Ensamble automático a lazo cerrado de componentes

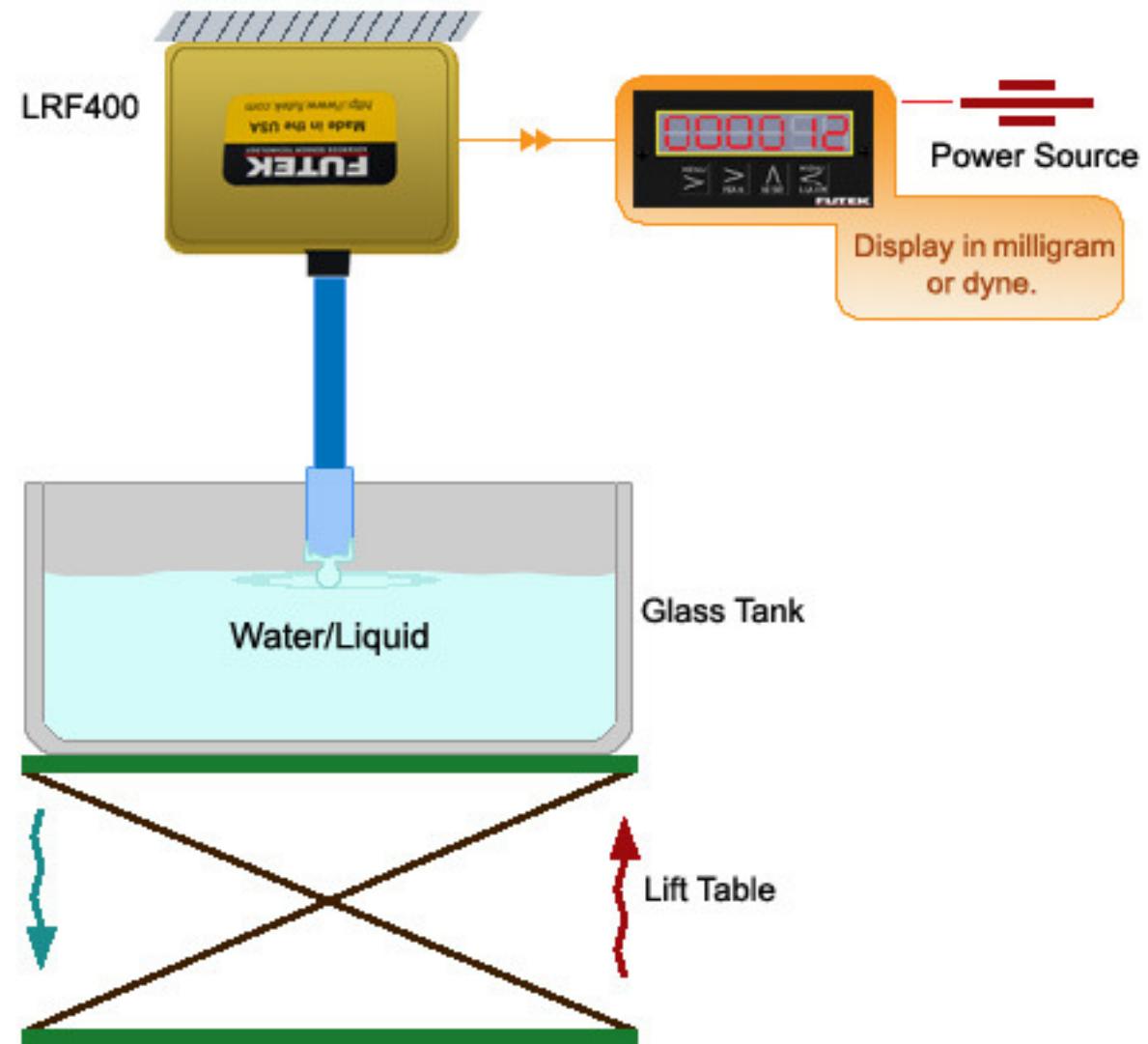
44



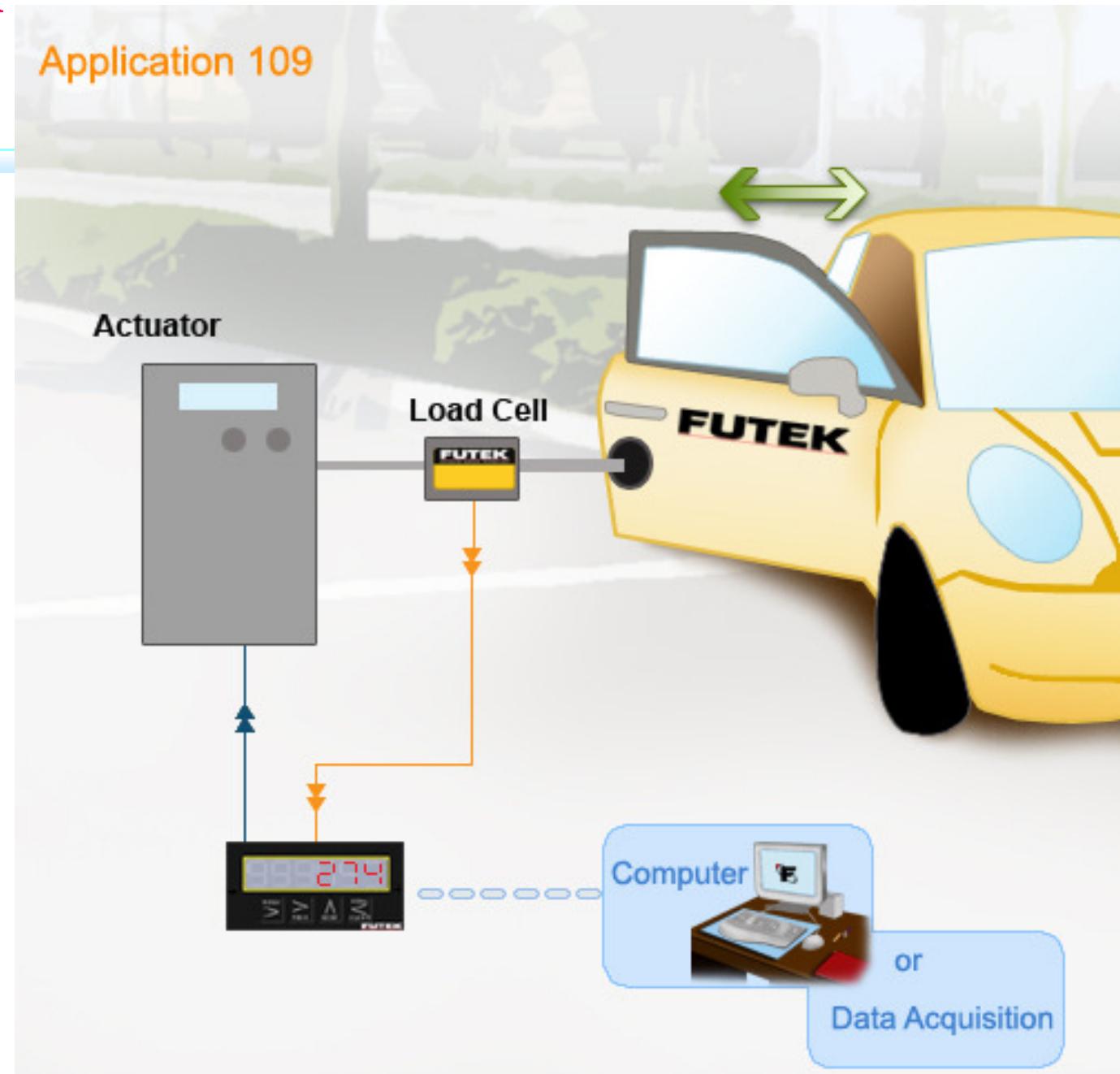
# Aplicación de Celdas de Carga: Separación / Mezcla de distintos líquidos

Application 107

- MIT & NASA Utilize Futek Sensitive Dyne Sensor to measure water or liquid separation forces.



# Aplicación de Celdas de Carga: Ensayo de puerta de automóvil

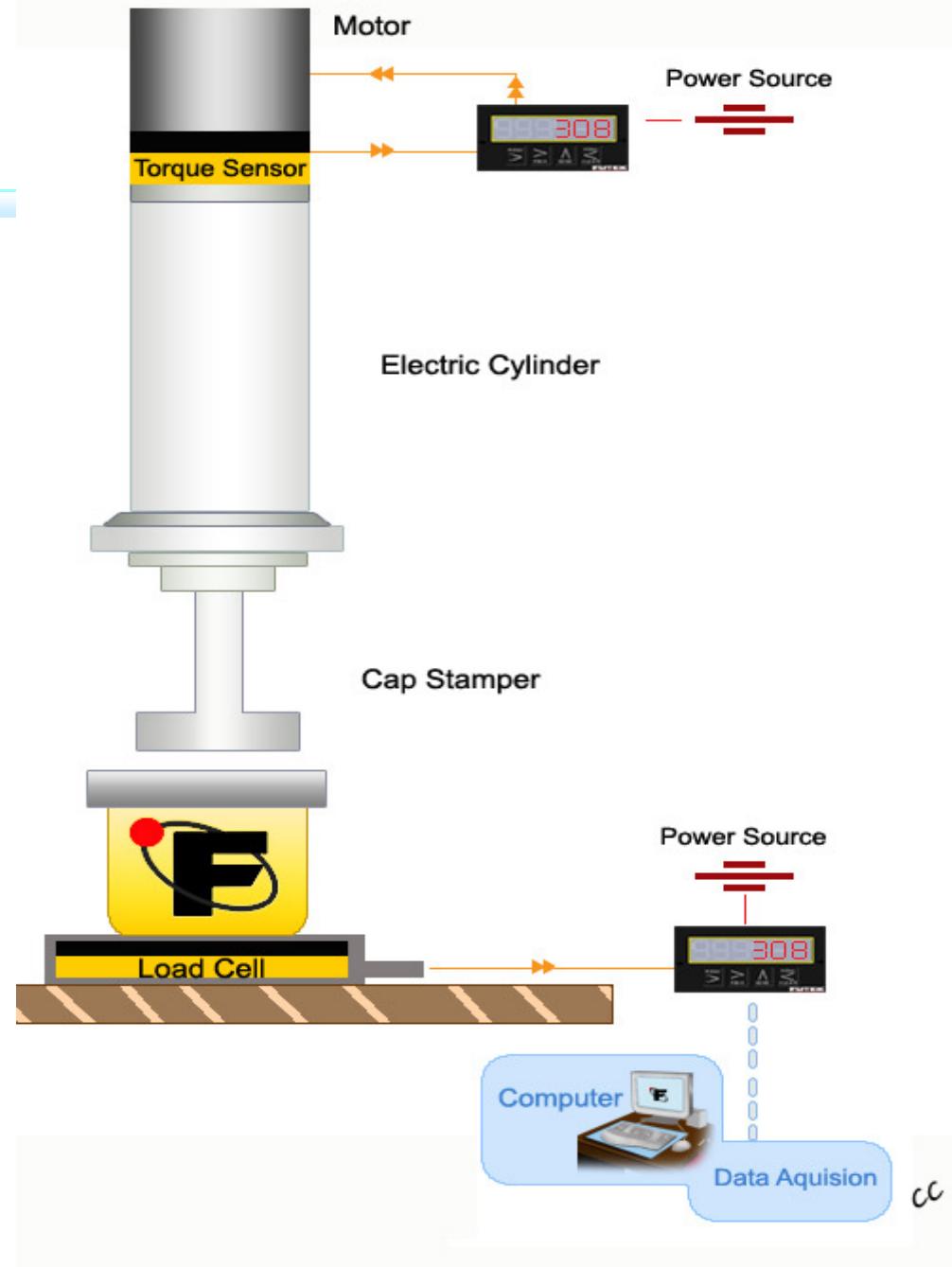


# Aplicación de Celdas de Carga: Ensayo de freno de automóvil



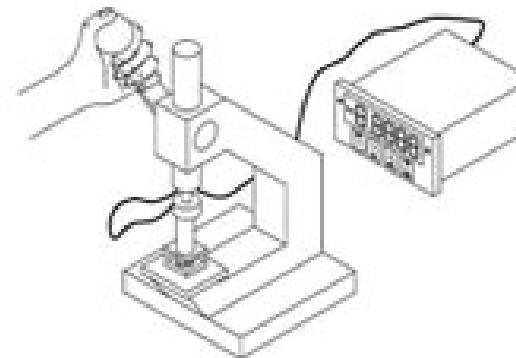
# Aplicación de Celdas de Carga: Estampado / Tapado de Botellas y Envases

Application 116

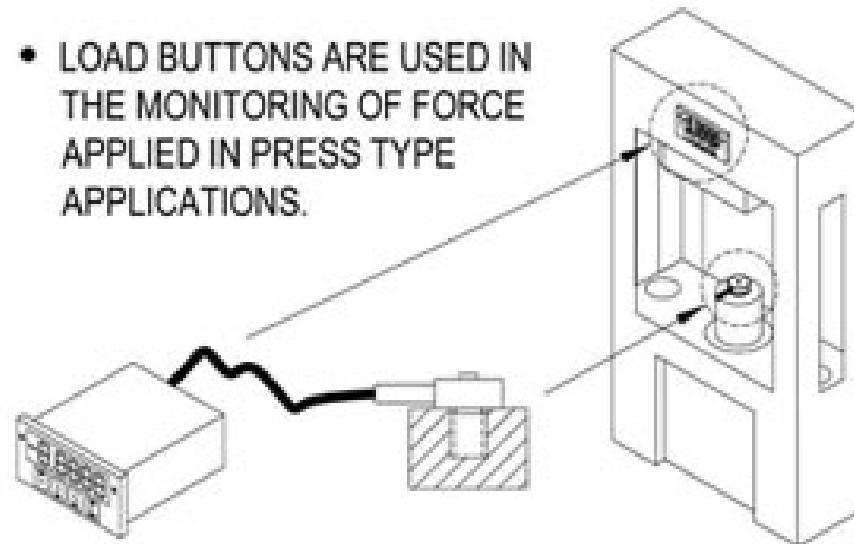


# Aplicación de Celdas de Carga: Aplicaciones en prensas

- SENSOR MAY BE USED TO MONITOR FORCES IN AN ARBOR PRESS



- LOAD BUTTONS ARE USED IN THE MONITORING OF FORCE APPLIED IN PRESS TYPE APPLICATIONS.



Más aplicaciones en  
[http://www.futek.com/apps\\_load.aspx](http://www.futek.com/apps_load.aspx)

# SENSORES DE DETECCIÓN DE OBJETOS

22.88

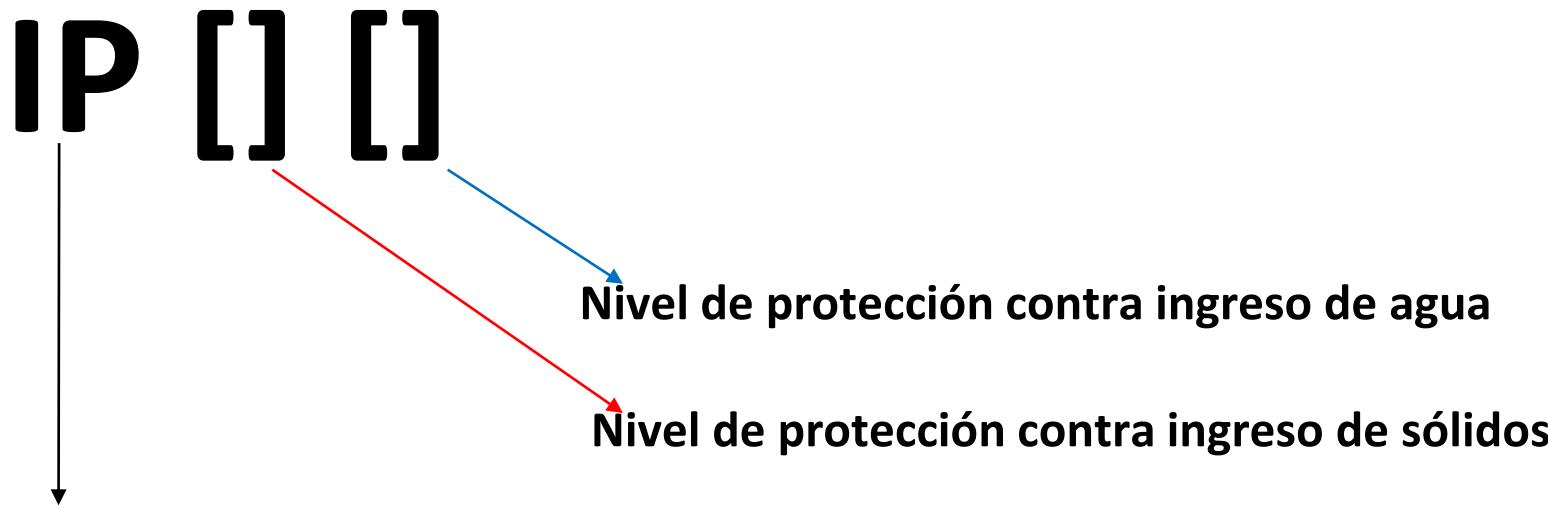
---

# AGENDA

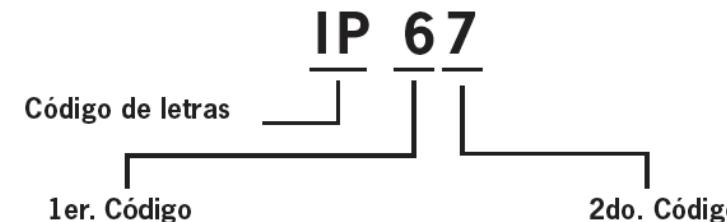
- Conceptos Básicos
- Sensores de detección mecánica
- Sensores de proximidad
  - Inductivos
  - Capacitivos
  - Fotoeléctricos
  - Ultrasónicos
  - Magnéticos
- Criterios de selección

# Grado de Protección (IP)

- Cada uno de los sensores, conectores y cualquier otro dispositivo o equipo industrial puede ver alterado su funcionamiento ante la intrusión de cuerpos extraños o agua en su interior.
- Es por ello que la IEC (International Electrotechnical Commission) especifica el estándar 60529 para definir y clasificar el grado de hermeticidad de los equipos.
- La clasificación utiliza la siguiente codificación:



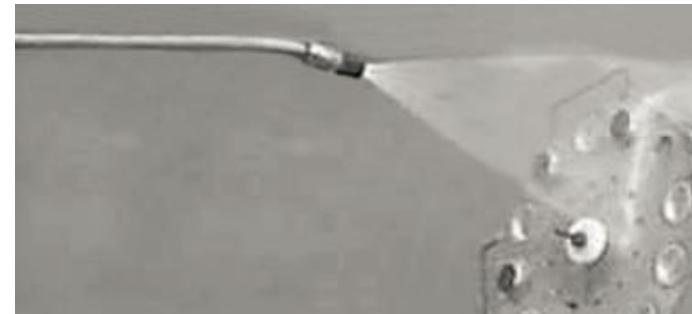
# Grado de Protección (IP)



Nivel IP	Descripción del nivel de protección	Nivel IP	Descripción del nivel de protección
0	Sin protección	0	Sin protección.
1	Protegido contra objetos sólidos extraños de 50 mm de diámetro y mayor (protege contra una gran superficie de cuerpo, tales como el dorso de una mano).	1	Protegido contra la caída vertical de gotas de agua.
2	Protegido contra objetos sólidos extraños de 12.5 mm de diámetro y mayor (protege contra los dedos u objetos similares).	2	Protegido contra la caída vertical de gotas de agua cuando se inclina hasta 15°.
3	Protegido contra objetos sólidos extraños de 2.5 mm de diámetro y mayor (protege contra herramientas, cables gruesos, etc.).	3	Protegido contra salpicaduras de agua en un ángulo de hasta 60° a cada lado de la vertical.
4	Protegido contra objetos sólidos extraños de 1.0 mm de diámetro y mayor (protege contra la mayoría de los alambres, tornillos, etc.).	4	Protegido contra salpicaduras de agua contra el componente desde cualquier dirección.
5	Protegido de la cantidad de polvo que lo haría interferir con el funcionamiento normal.	5	Protegido contra agua proyectada en chorros de cualquier dirección.
6	Protegido contra polvo (no hay penetración de polvo, protección completa).	6	Protegido contra el agua en potente chorros desde cualquier dirección.
		7	Protegido contra la inmersión temporal en agua entre 15 cm y 1 m durante 30 minutos.
		8	Protegido contra la inmersión continua en agua más allá de 1 m.

# Grado de Protección (IP)

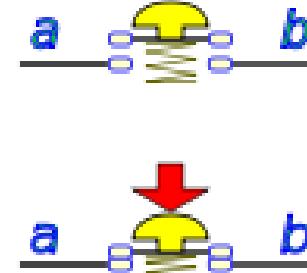
- El estándar alemán DIN 40050-9 extiende la norma descripta anteriormente, especificando la clasificación **IP69K** para aplicaciones dónde se requiere **protección contra ingreso de agua a alta presión**.



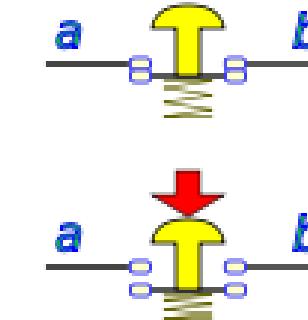
# Circuito de conmutación

Un interruptor conmuta dos puntos: A y B. Se define cómo abierto si no permite la circulación de corriente, diremos que está cerrado si permite dicha circulación.

NA



NC



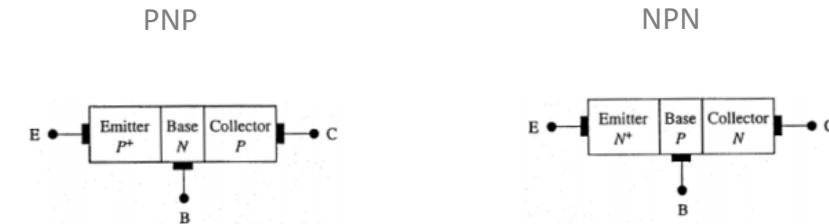
# Tipo de salidas digital

- Contacto seco.
- Corriente continua:
  - Salida 3 hilos.
  - Salida 2 hilos.
- Corriente alterna:
  - Salida 2 hilos.

# Transistores

Es un semiconductor, construido sobre una placa de silicio en el cual se diferencian 3 zonas dopadas con electrones (zona N) o huecos (Zona P)

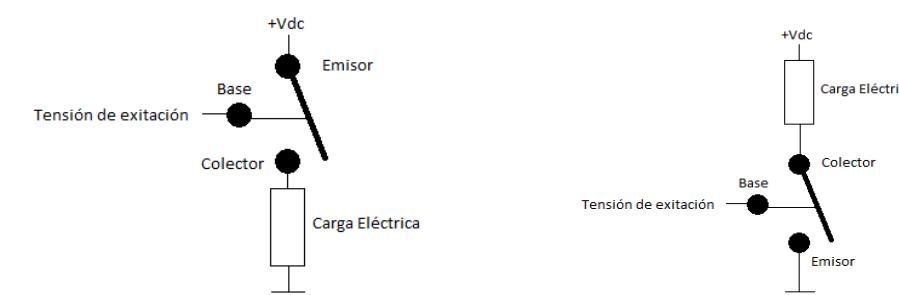
Esquema Constructivo



Esquema Eléctrico



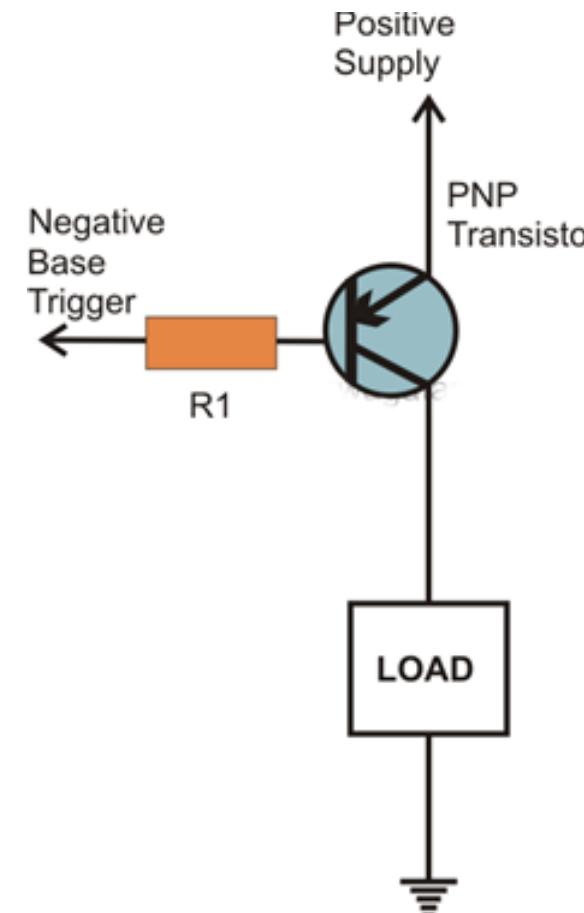
Esquema de funcionamiento  
(Corte y Saturación)



# Sensores PNP y NPN

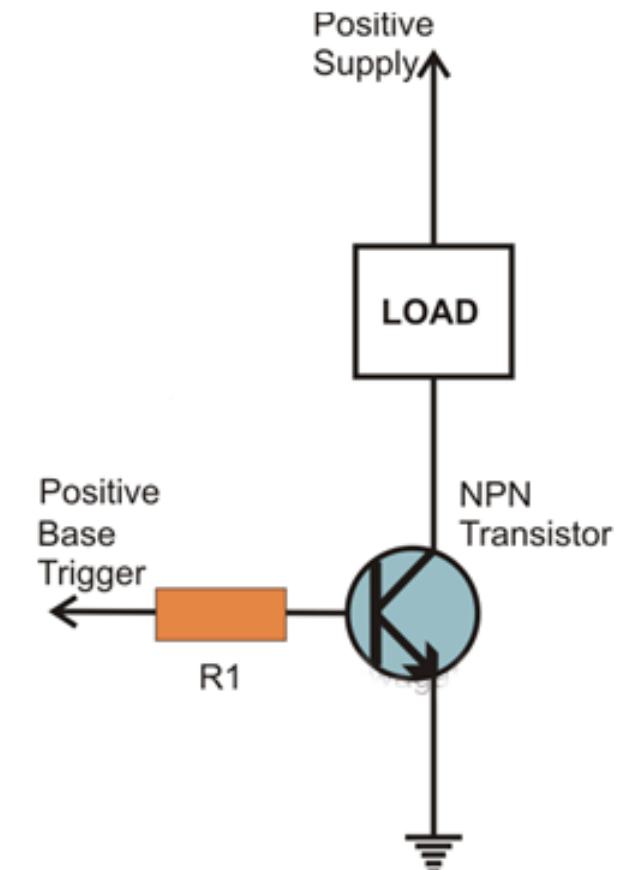
- **Sensor PNP:**

Commuta una terminal positiva



- **Sensor NPN:**

Commuta una terminal negativa



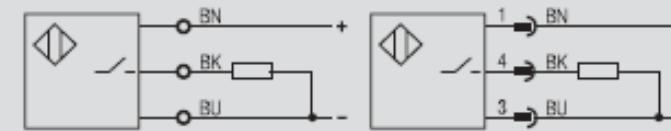
# Esquema de conexiones 3 hilos CC

## DC 3/4-Wire

Normally open

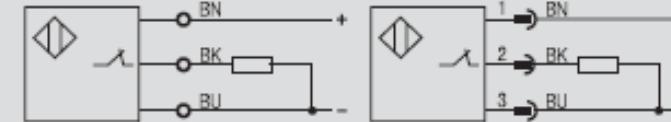
①

PNP (+) sourcing



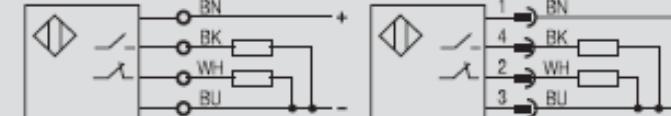
Normally closed

②



NO/NC

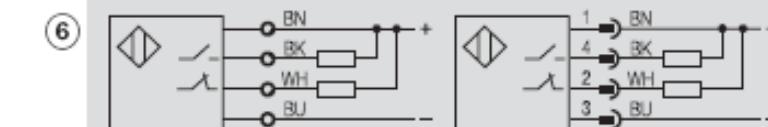
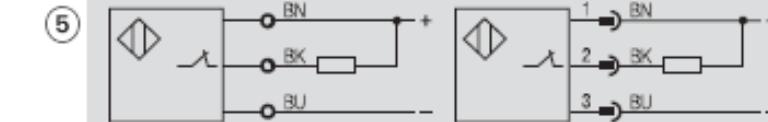
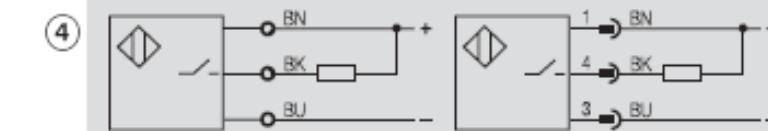
③



## Cable/Terminals      Connector

## Cable/Terminals      Connector

NPN (-) sinking



# Esquema de conexiones 3 hilos CC

## Ventajas

Corriente de fuga muy baja.

Típicamente con protección contra corto-circuito.

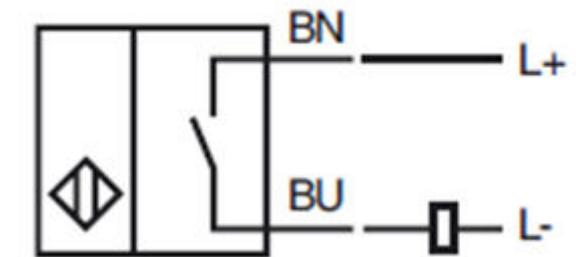
## Desventajas

Configuración PNP o NPN

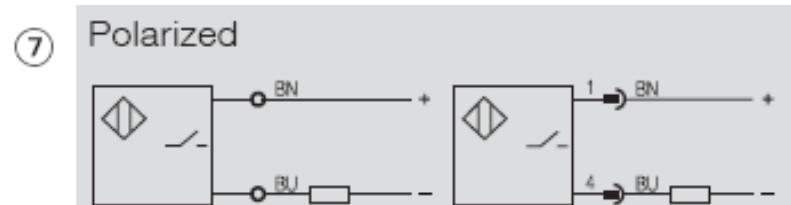
Mas hilos

# Esquema de conexiones 2 hilos CC

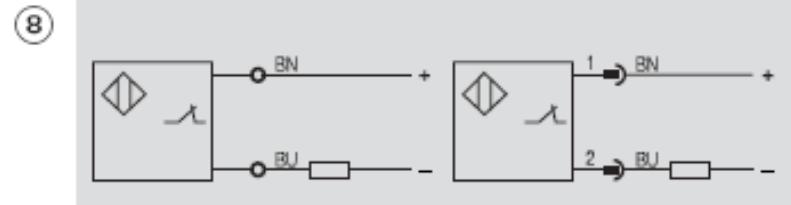
Círculo serie que mantiene activo al sensor constantemente.



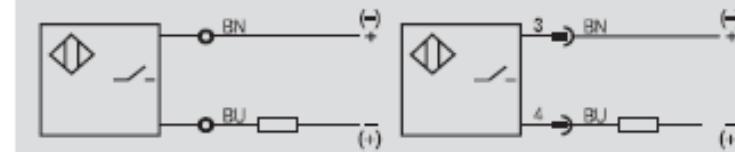
Normally open



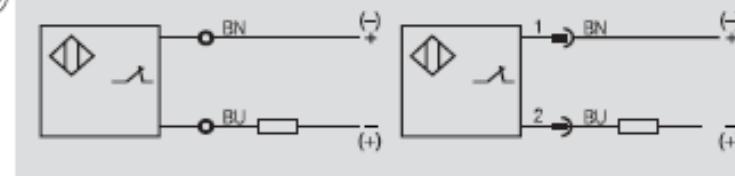
Normally closed



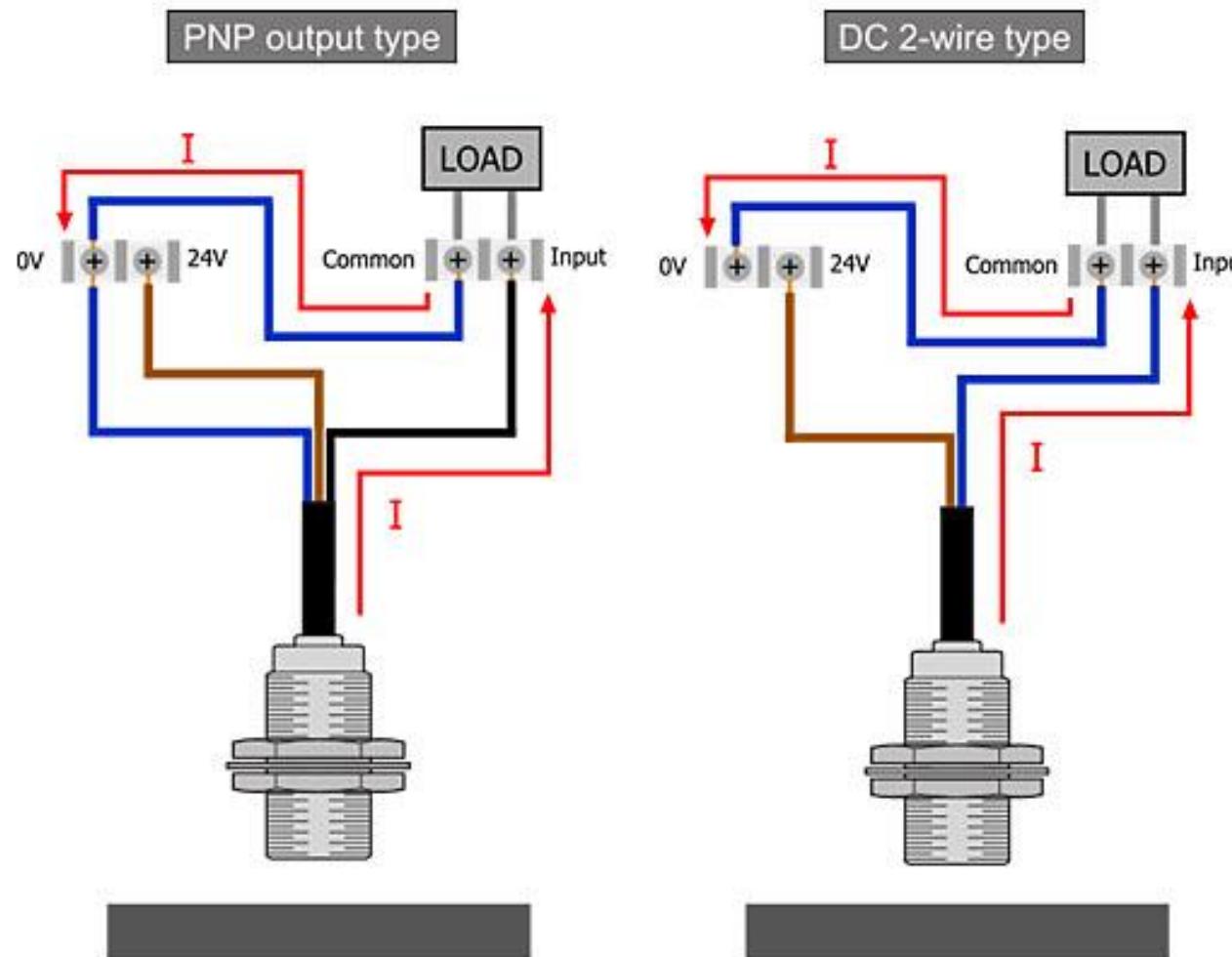
### ⑨ Non-polarized



10



# Esquema de conexiones 2 hilos CC vs 3 hilos CC



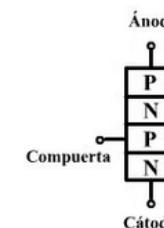
# SCR y Tiristores

Construido sobre una placa de silicio en el cual se diferencian 4 zonas dopadas con electrones (zona N) o huecos (Zona P).

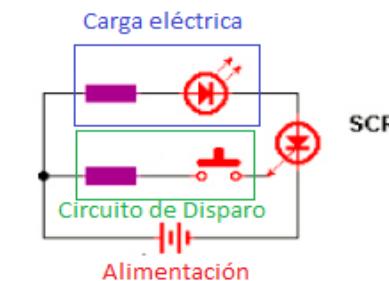
Esquema Eléctrico



Esquema Constructivo



Esquema de funcionamiento  
(Corte y Saturación)



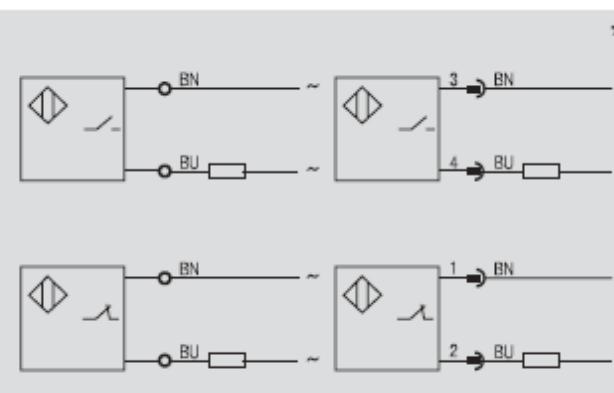
# Esquema de conexiones AC

## AC Sensor

5

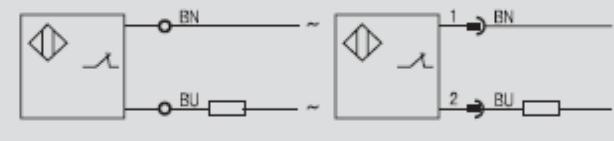
Normally open

⑪



⑫

Normally closed

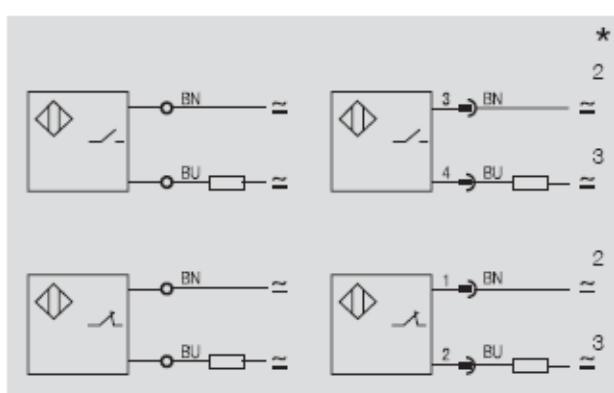


## AC/DC

### AC/DC-Sensors

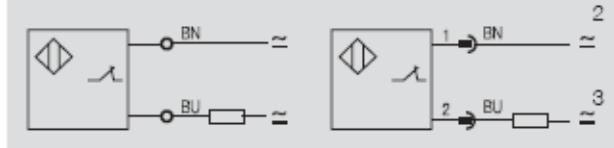
Normally open

⑯



⑰

Normally closed



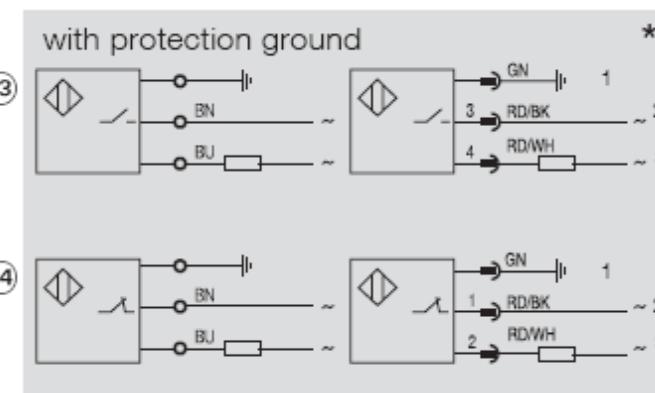
### Wire colors

Coding per DIN IEC 60757

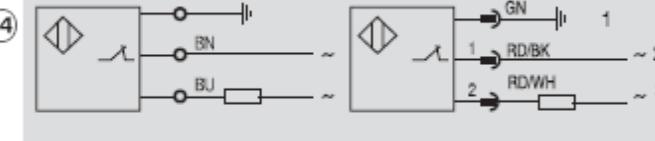
BN	brown
BK	black
BU	blue
WH	white

with protection ground

⑯

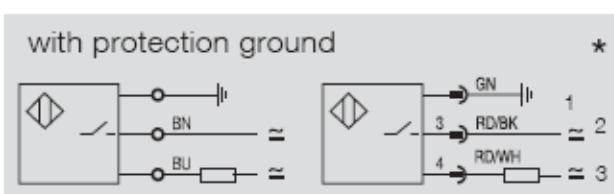


⑰

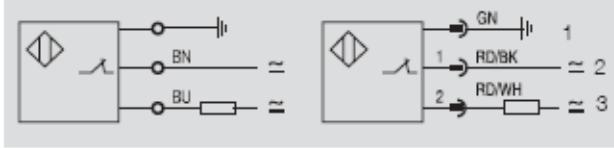


with protection ground

⑯



⑰



\*Pin assignments shown are based on the U.S. standard for cable connectors

# Frecuencia de conmutación

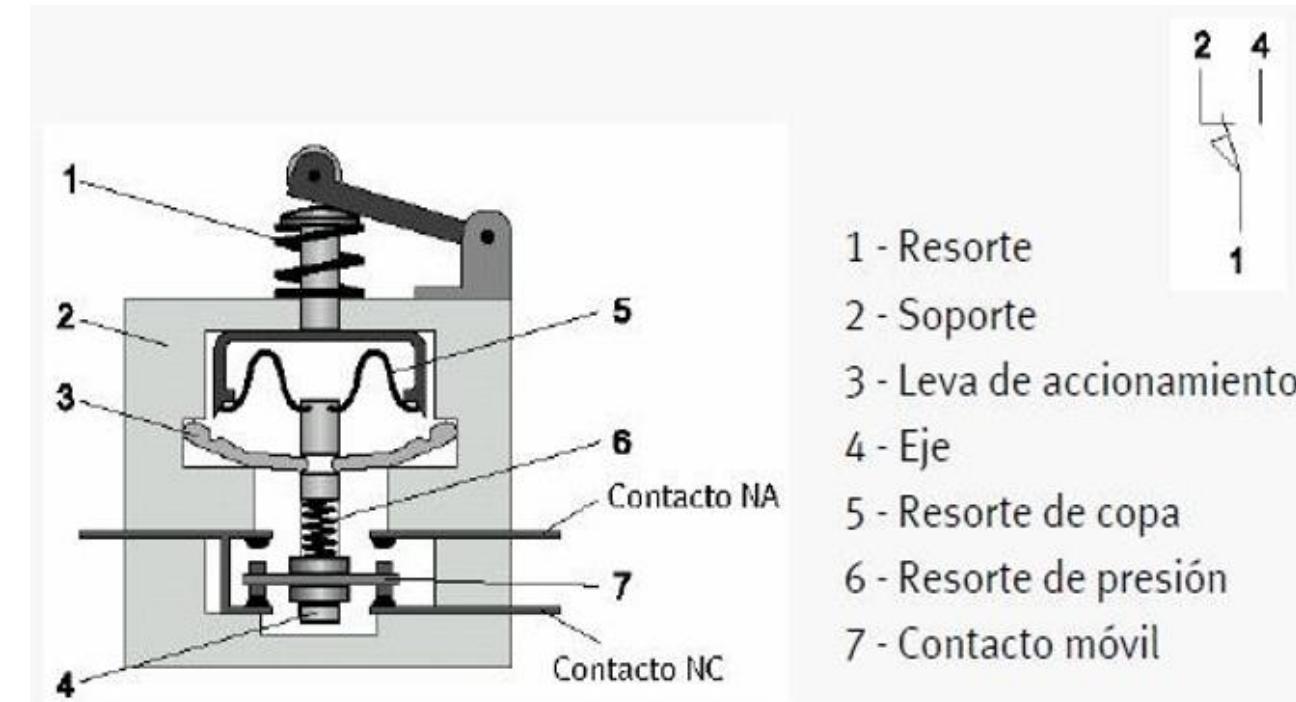
- Cuantas veces puede conmutar un sensor en un segundo
- Se representa en Hertz



# Sensores de detección mecánica

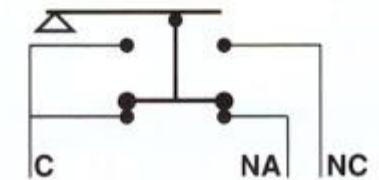
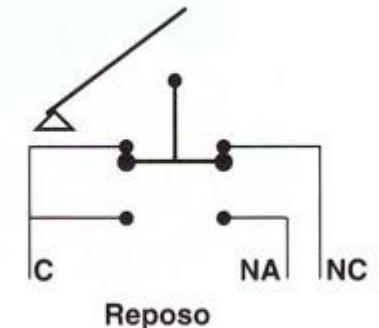
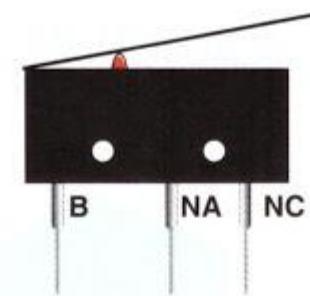
## Principio de Funcionamiento

Son dispositivos electromecánicos que constan de un accionador vinculado mecánicamente a un conjunto de contactos. Cuando un objeto entra en contacto con el accionador, el dispositivo opera los contactos para cerrar o abrir una conexión eléctrica.



# Sensores de detección mecánica

## Ejemplos



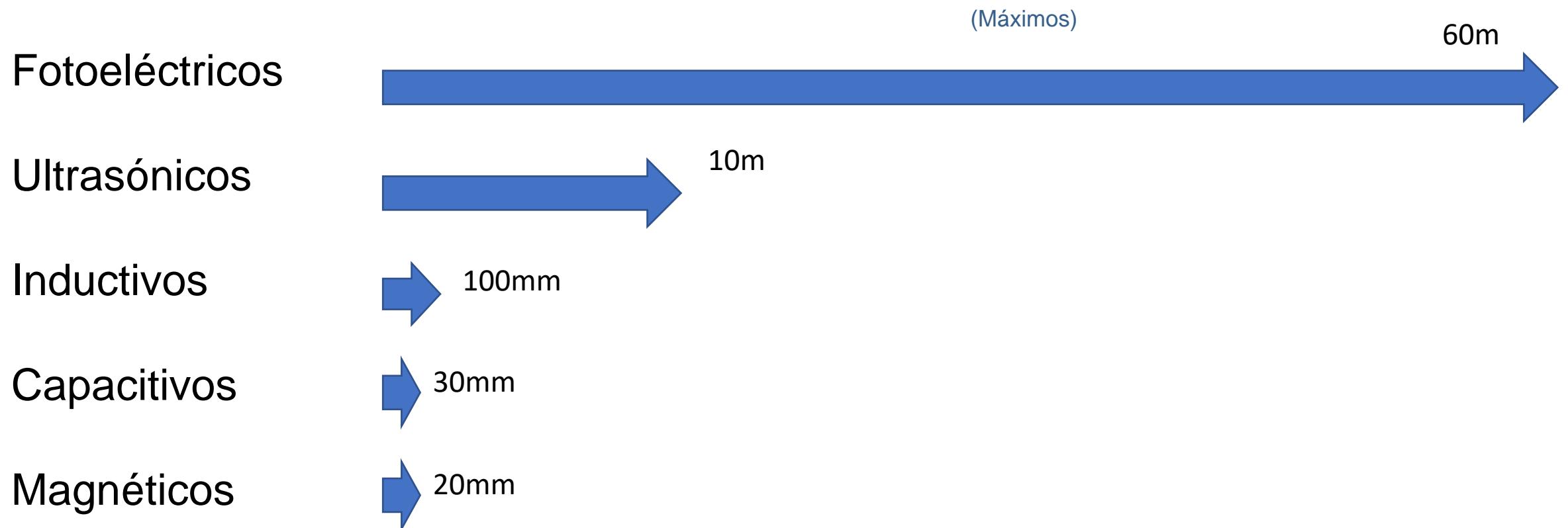
# Sensores de detección mecánica

Aplicaciones: fin de carrera

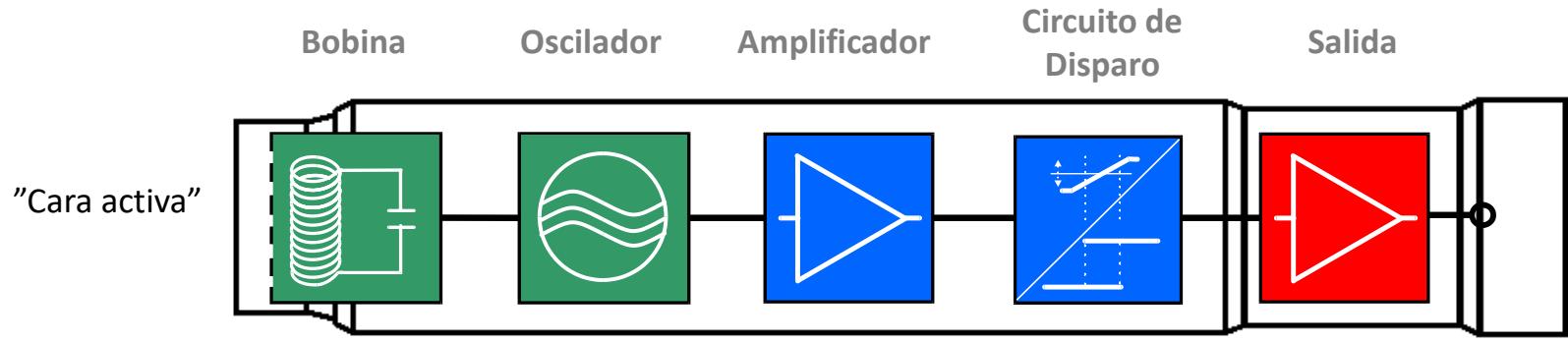


# Sensores de proximidad

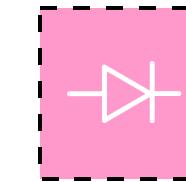
## Rangos de operación típicos



# Sensores Inductivos - Funcionamiento

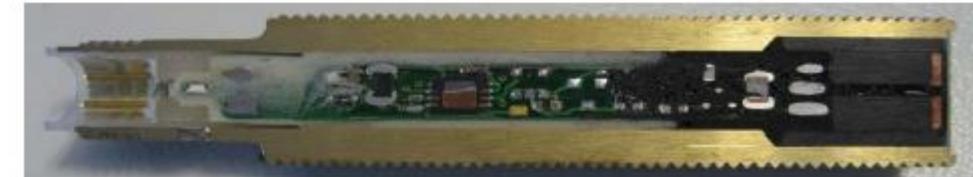
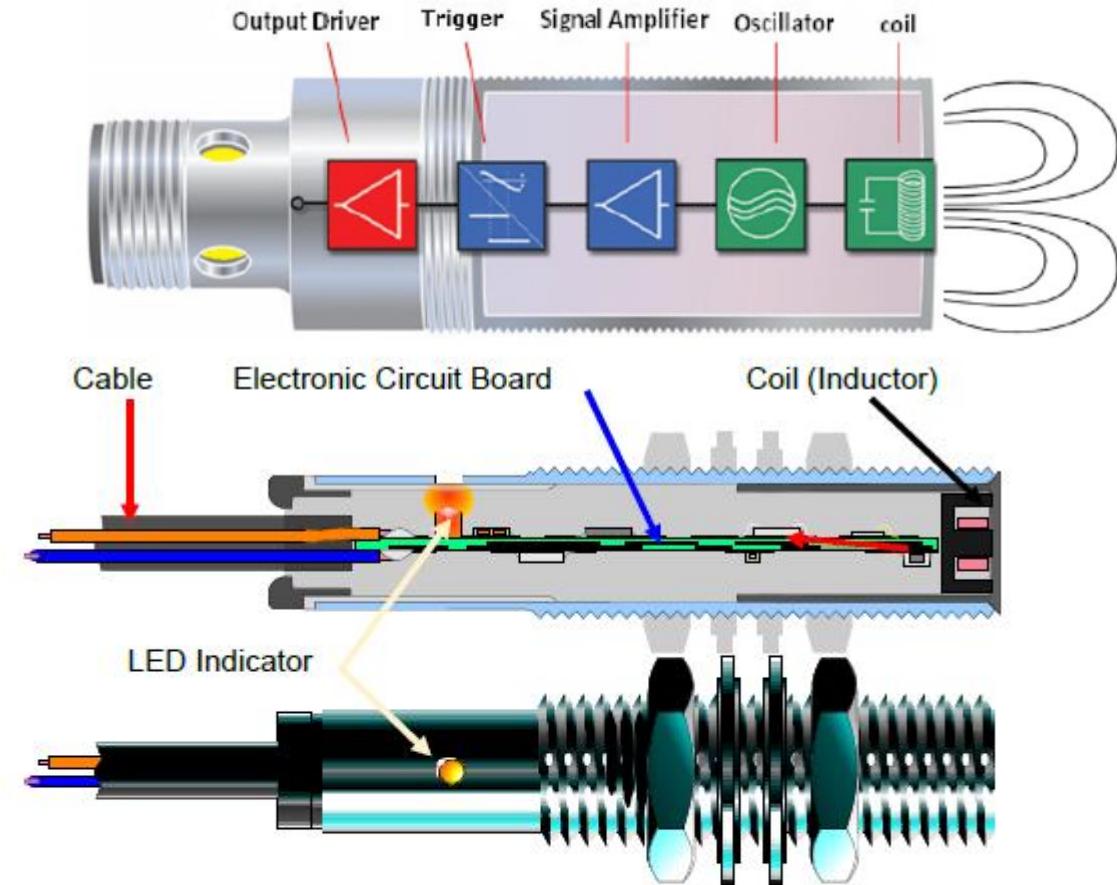
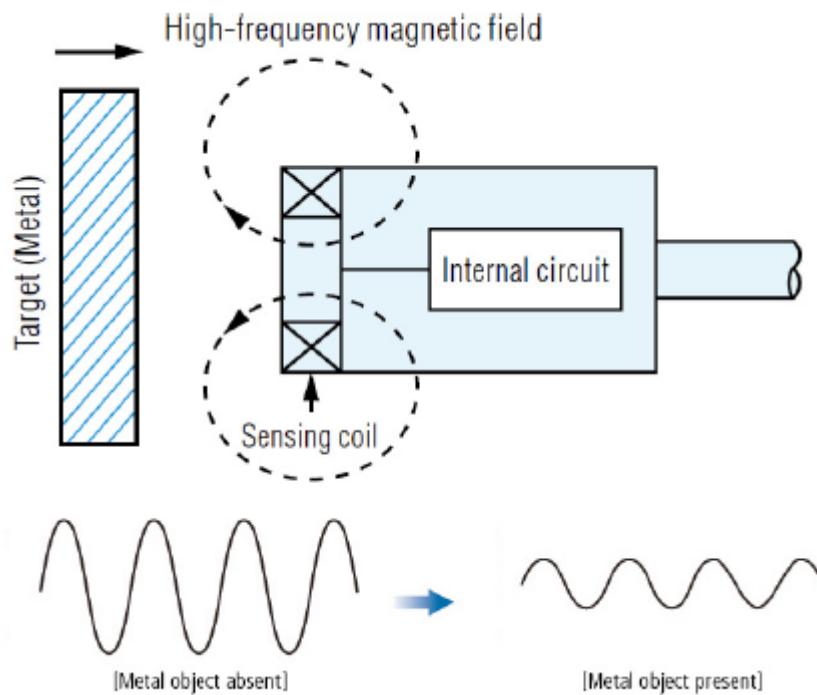


El funcionamiento del sensor inductivo de base en la interacción de metales con un campo electromagnético. El campo genera corrientes parásitas en el material, estas corrientes reducen la amplitud del campo electromagnético, esto es detectado por el sensor y genera el cambio en la salida



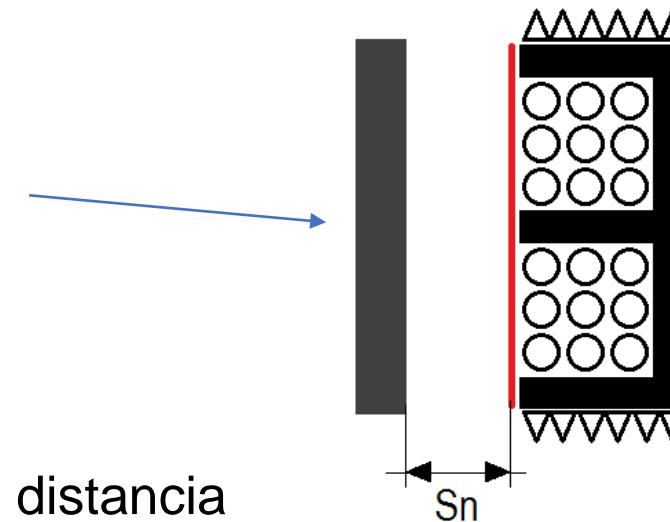
Voltaje de alimentación

# Sensores Inductivos - Funcionamiento



# Sensores Inductivos - Funcionamiento

Objetivo Estándar, construido en material de Hierro 360, formato cuadrada cuyo tamaño de arista es el diámetro del sensor.



$Sn$ , conocida como sensibilidad nominal, distancia de detección, rango de detección, etc. Es un valor teórico que representa la distancia máxima entre la cara del sensor y el objetivo estándar de manera que al ser detectado por el sensor este commute su salida. Este valor no toma en cuenta tolerancias de fabricación, temperatura, etc.

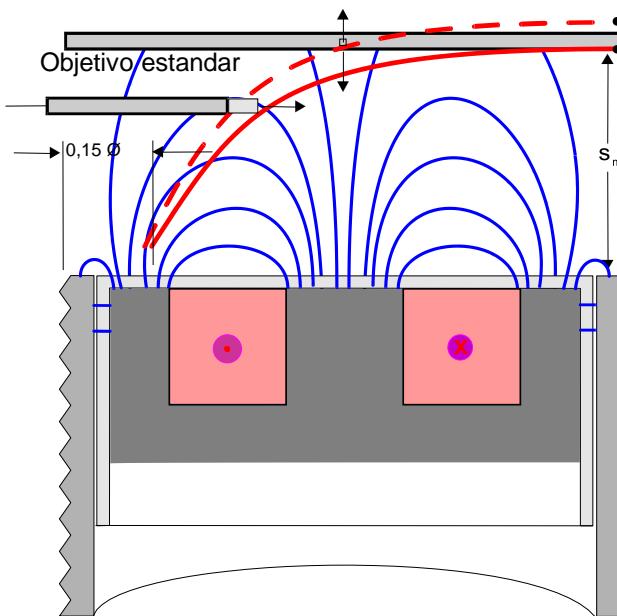
# Sensores Inductivos

Factores que afectan la Sn del sensor

- Forma de Montaje
- Tamaño del Sensor
- Material a detectar

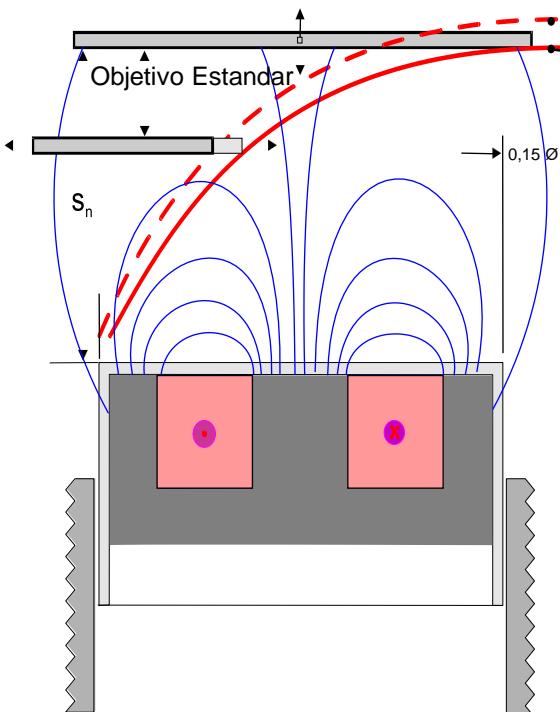
# Sensores Inductivos

- Forma de montaje: **RASADOS**



# Sensores Inductivos

- Forma de montaje: **NO RASADOS**  
Tienen mayor alcance que los rasados



# Sensores Inductivos

(Solo detectan 1 tipo de material!!!)

Tamaño del Sensor	Rasado	No Rasado
M8	1.5 mm	2.5 mm
M12	2 mm	4 mm
M18	5 mm	8 mm
M30	10 mm	15 mm
Q40	20 mm	40 mm

Material	Factor de Corrección
Acero inoxidable	0.8
Aluminio	0.4
Bronce	0.4
Cobre	0.35



# Sensores Inductivos

## Familias



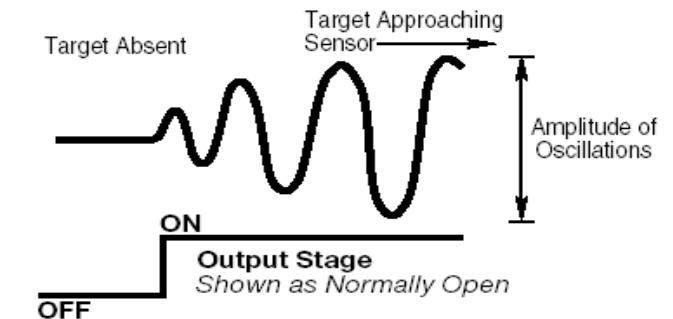
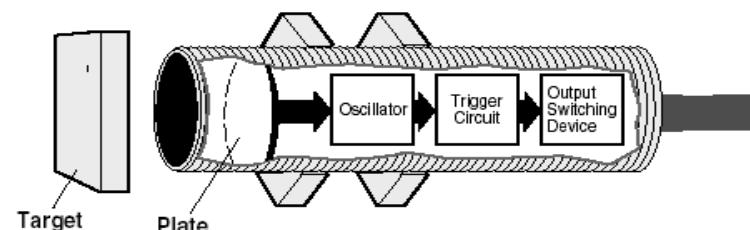
# Sensores Inductivos

## Aplicaciones

- Detección de objetos metálicos
- Fin de carrera

# Sensores Capacitivos

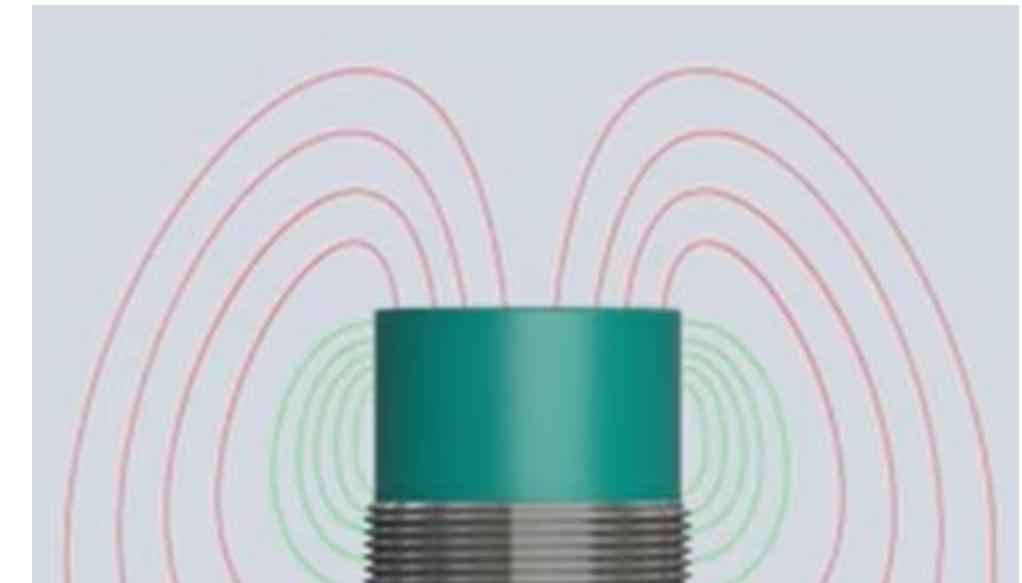
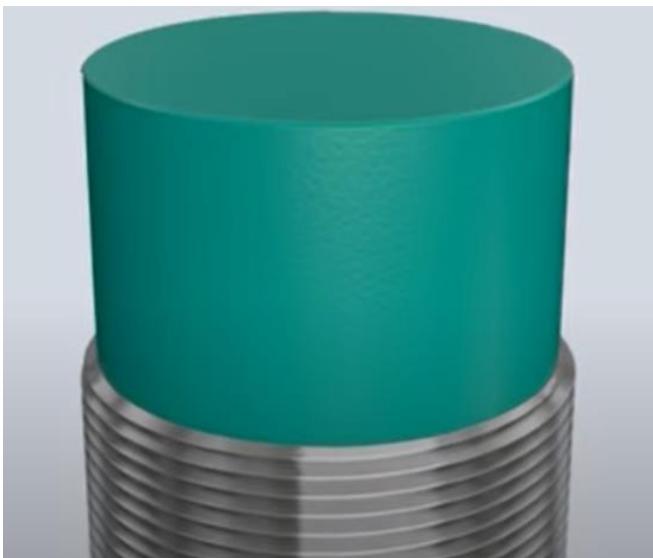
## Principio de funcionamiento



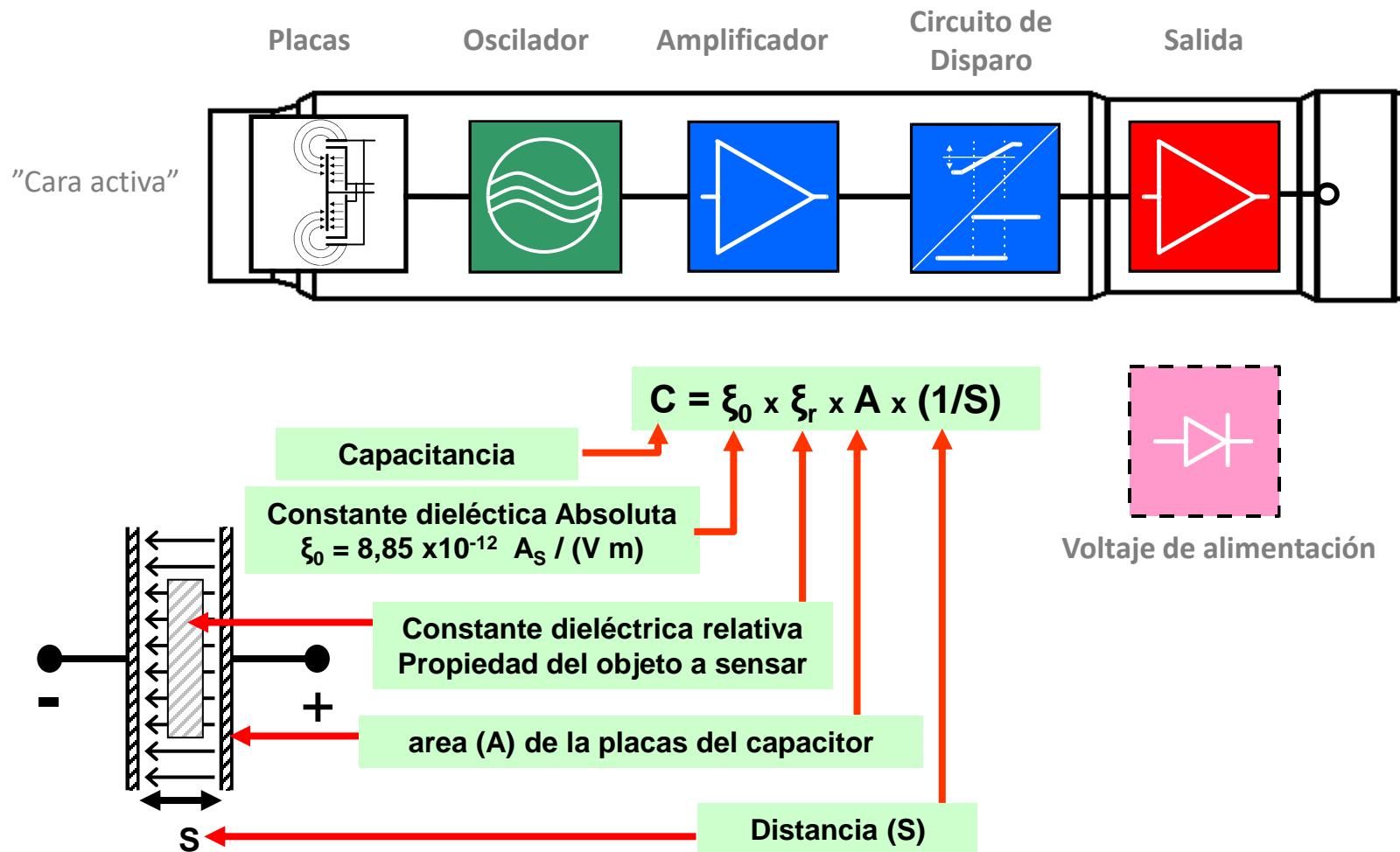
- Un Sensor Capacitivo actúa como un simple capacitor.
- Una placa metálica en la cara del sensor esta conectada eléctricamente a un circuito oscilador interno.
- El objeto a ser detectado actúa como un dieléctrico.
- La capacidad entre el objetivo y la placa interna del sensor, forma parte de la capacidad de retroalimentación en el circuito oscilador
- Al aproximarse un objetivo las oscilaciones se incrementan y entonces alcanzan un valor de umbral y activan el circuito de switcheo, generando así una salida.

# Sensores Capacitivos

Esquema interno



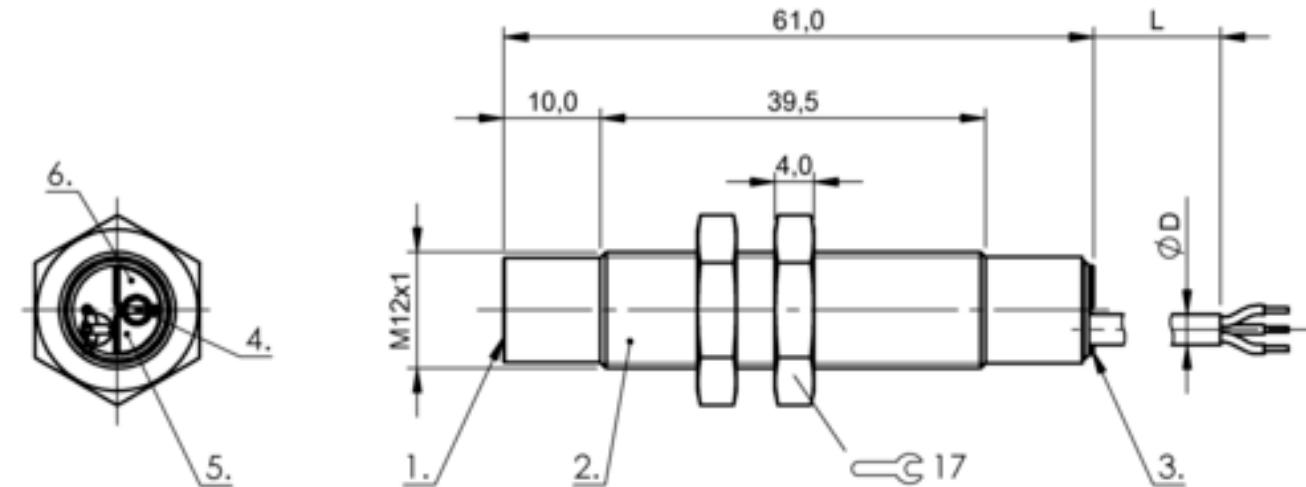
# Sensores Capacitivos - Funcionamiento



# Sensores Capacitivos

## Parametrización

Todos los Sensores Capacitivos tienen un ajuste de sensibilidad  
(puede ser remoto, por potenciómetro o por comunicación)



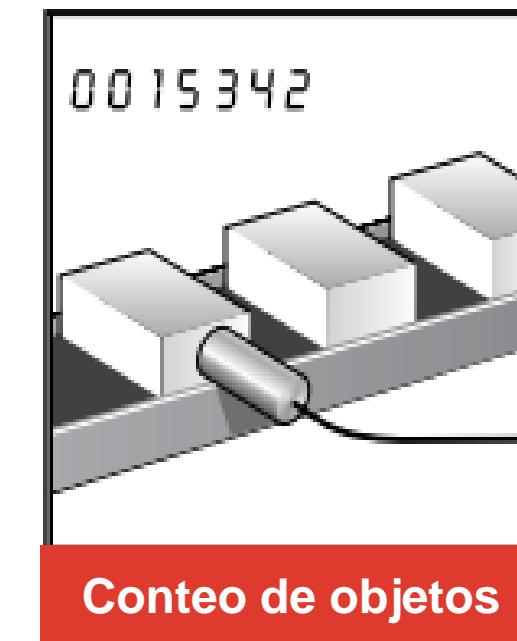
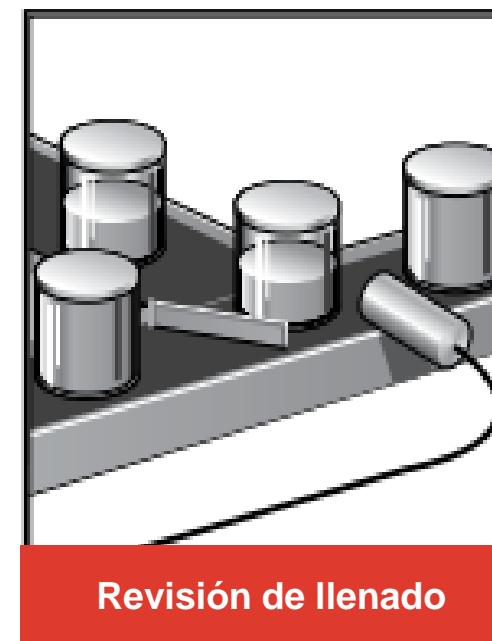
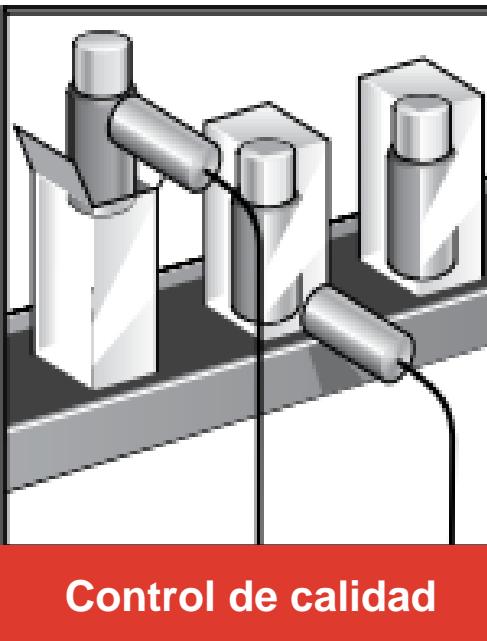
# Sensores Capacitivos

## Aplicaciones típicas

- Detección de Objetos
- Control de Nivel
  - Materiales Granulados
  - Materiales paletizados (presencia de volumen)
  - Líquidos (Aceites, agua, alcohol, etc)

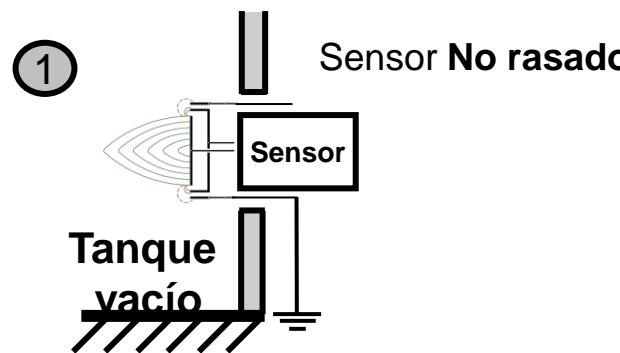
# Sensores Capacitivos

## Detección de objetos

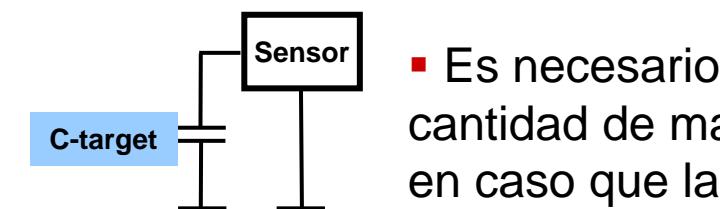
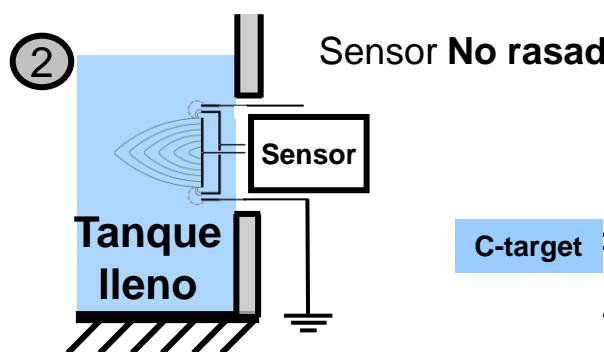


# Sensores Capacitivos

## Detección de nivel directo



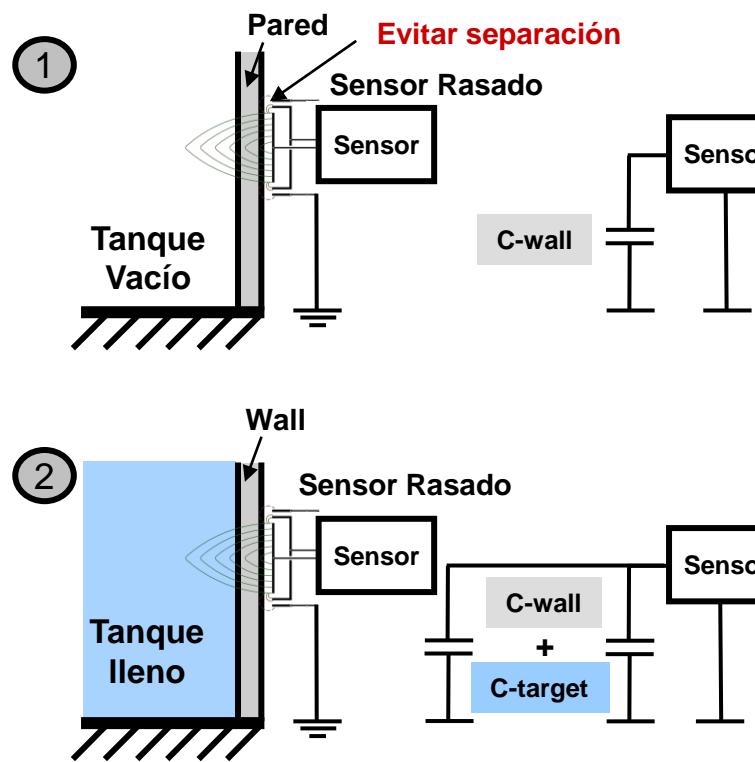
- No se requiere Pre-Ajuste



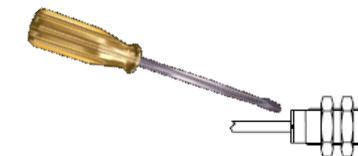
- Es necesario ajustar el sensor con la cantidad de material que se desea detectar o en caso que la conductividad relativa del sensor sea baja

# Sensores Capacitivos

## Detección de nivel indirecto



- Se necesita ajustar el sensor para no detectar la pared
- **C-wall** depende del material y del espesor.
- El material de la pared debe ser **no metálico**, de lo contrario la capacidad puede ser infinita

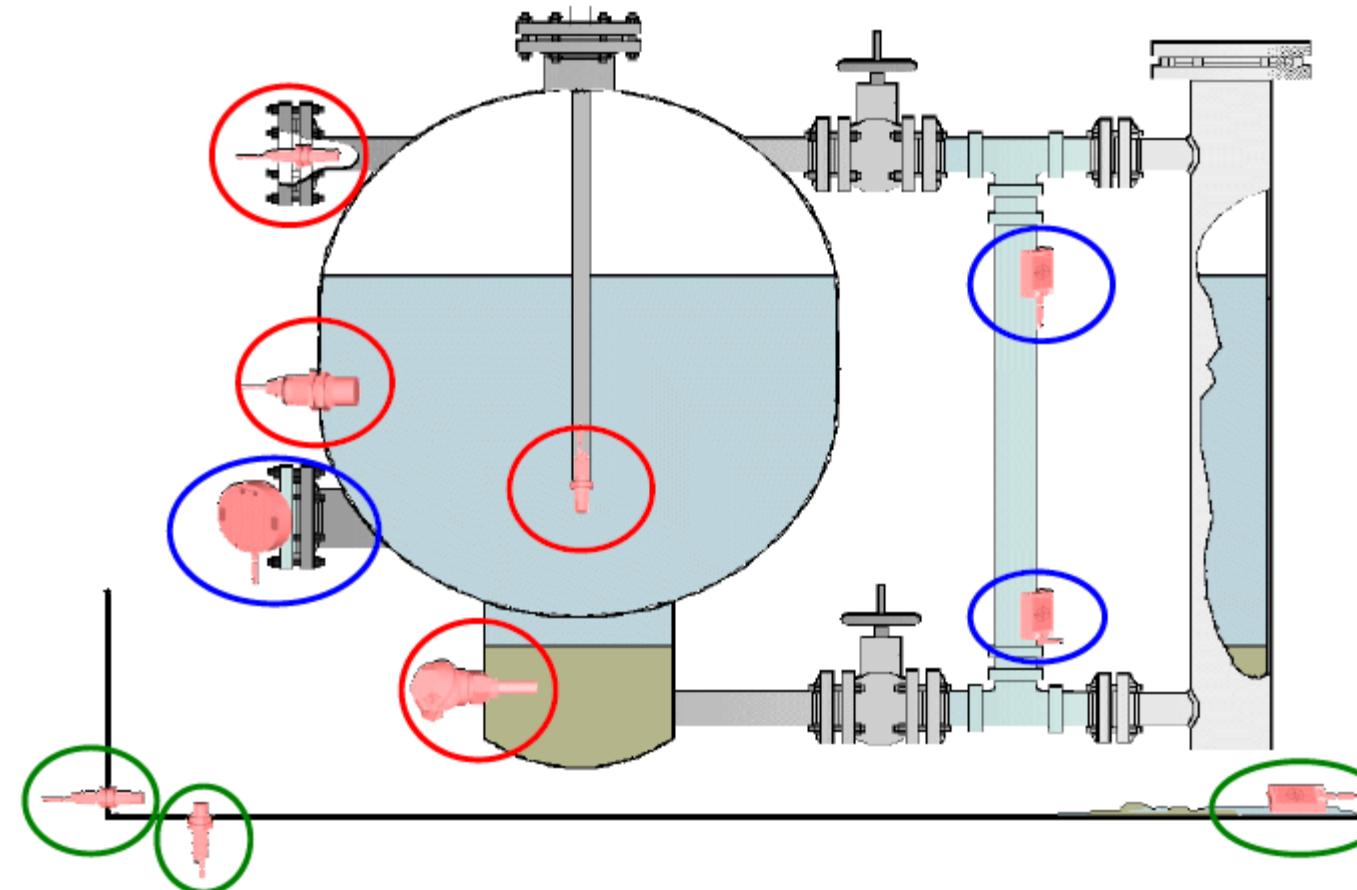


- El sensor requerirá un ajuste adicional a fin de compensar fluctuaciones del material

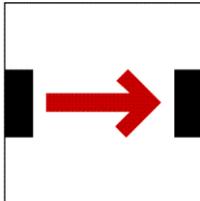
# Sensores Capacitivos

## Detección de nivel

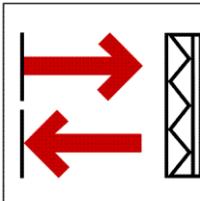
Red Circles → Direct Sensing (4)  
Blue Circles → Indirect Sensing (3)  
Green Circles → Leakage Sensing (Direct Sensing) (3)



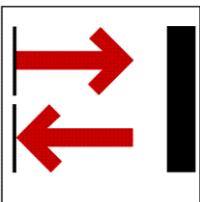
# Sensores Fotoeléctricos - Clasificación



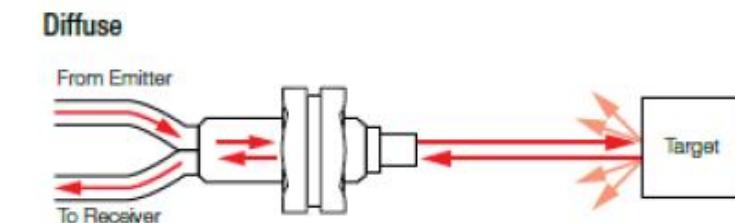
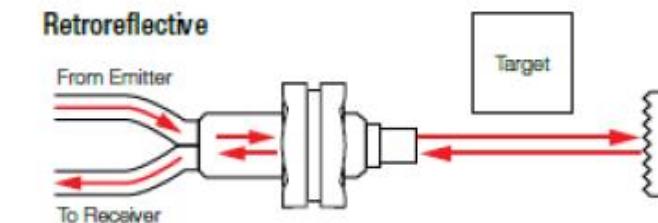
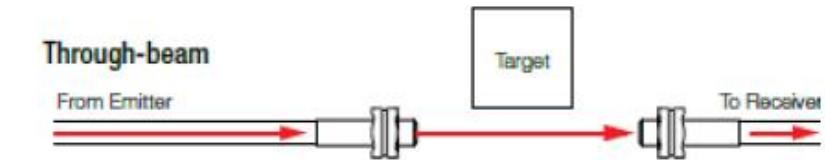
- Emisor / Receptor (Thru-Beam, Barrera)



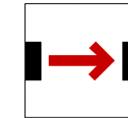
- Retroreflectivo



- Difuso

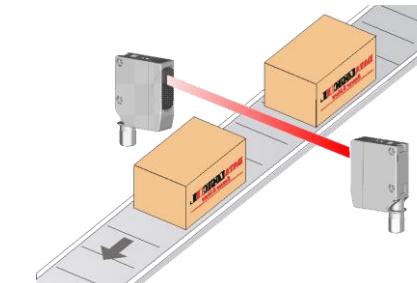
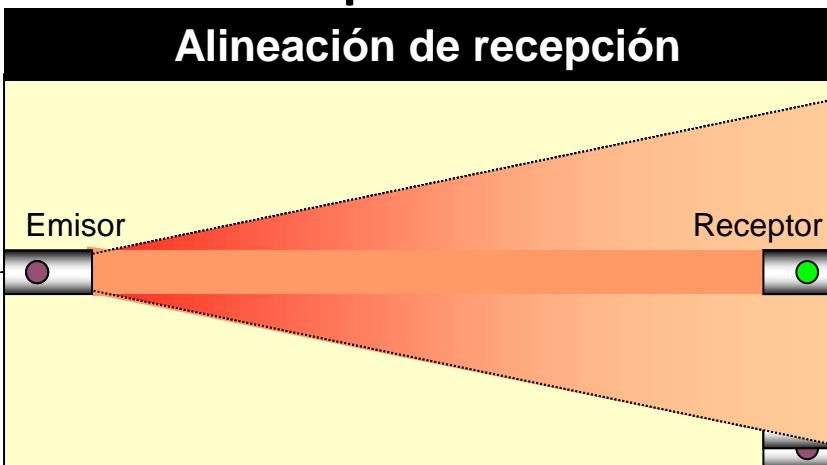


# Sensores Fotoeléctricos - Funcionamiento

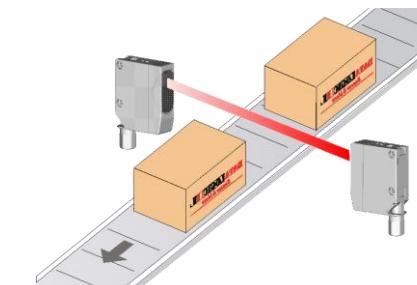
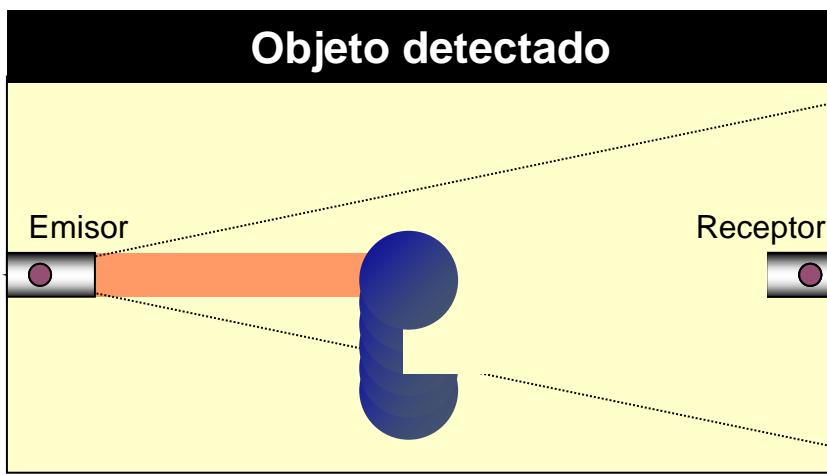


## **Emisor - Receptor**

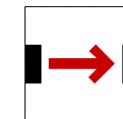
## Alineación de recepción



## Objeto detectado

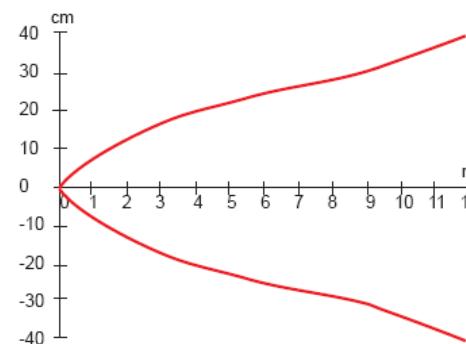


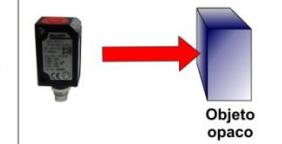
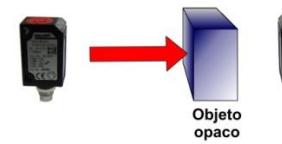
# Sensores Fotoeléctricos - Funcionamiento



## Emisor - Receptor

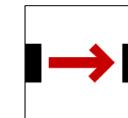
© Thru-Beam



Tipo de Detección	Operación	Light On	Dark On
Emisor-Receptor Thru-Beam	<b>Objeto ausente</b> El receptor ve la luz del Emisor	Emisor  Receptor La salida es activada	Emisor  Receptor La salida no se activa
	<b>Objeto presente</b> El receptor no ve la luz del Emisor	Emisor  Receptor Objeto opaco La salida no se activa	Emisor  Receptor Objeto opaco La salida se activa

## Gráfico de comportamiento Fotoeléctrico

# Sensores Fotoeléctricos - Funcionamiento



## Familias

### 2 Elementos



Tubular



Bloque



Cortina Dimensional

### 1 Elemento



Herradura



Ángulo



Ventana

### Amplificador



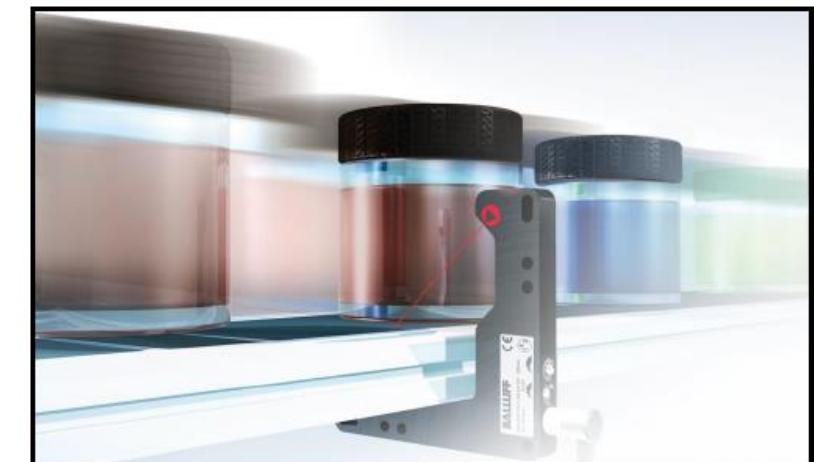
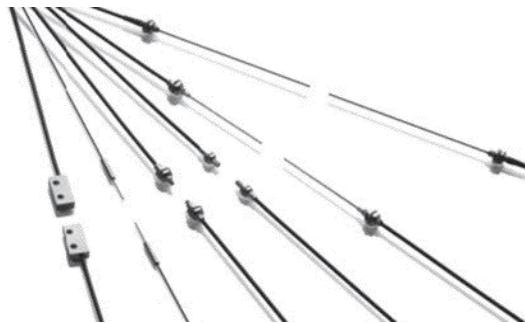
Fibra Óptica



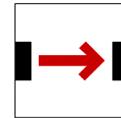
Cabeza Óptica

# Sensores Fotoeléctricos

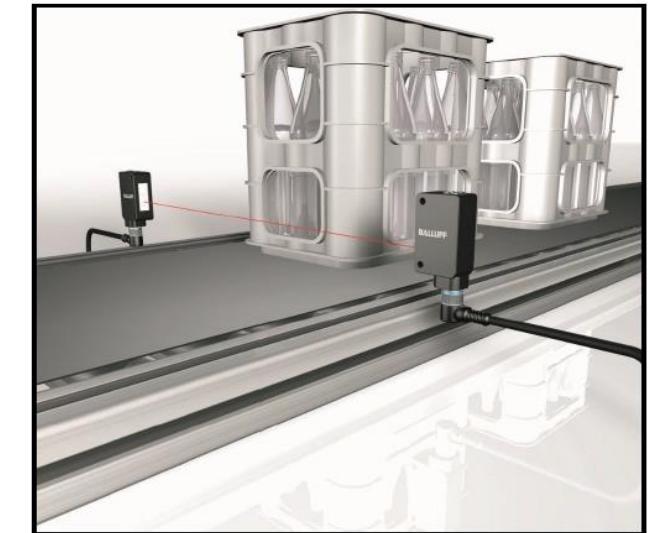
## Emisor - Receptor



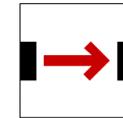
# Sensores Fotoeléctricos



## Aplicaciones



# Sensores Fotoeléctricos

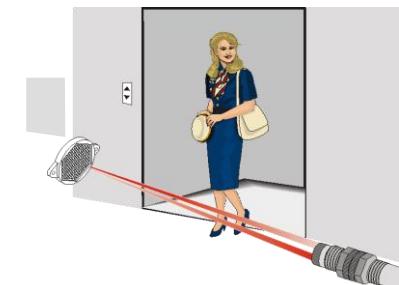
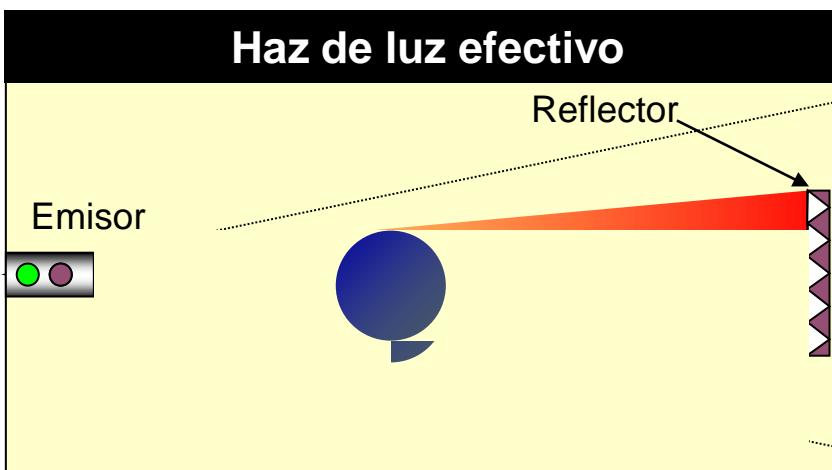
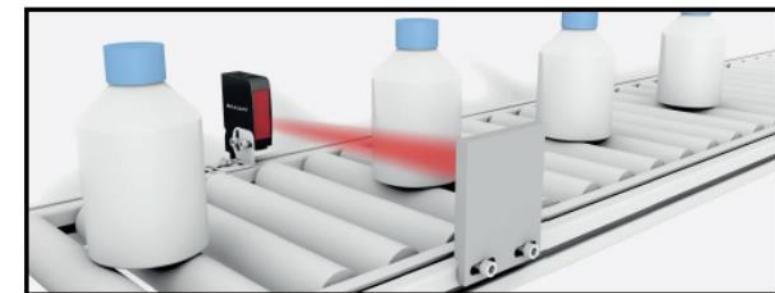
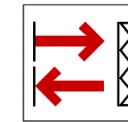
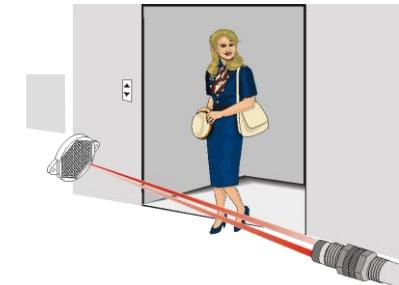
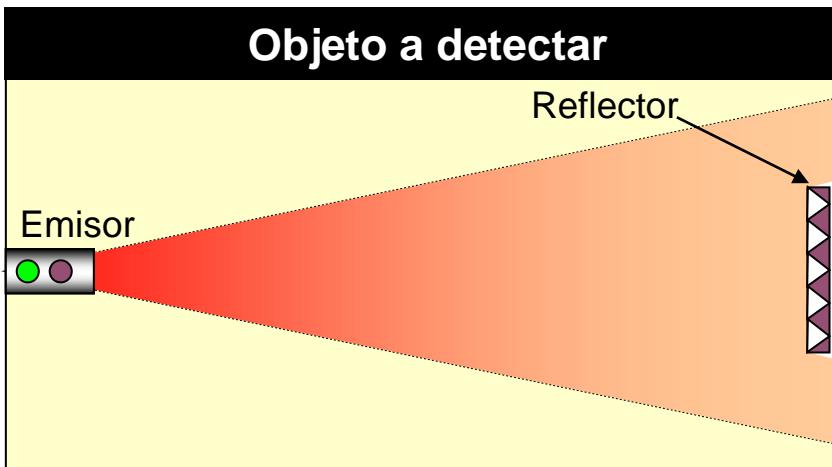


## Emisor – Receptor

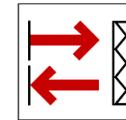
- Ventajas
  - ✓ Rango de hasta 60 metros
  - ✓ Discrimina objetos translúcidos
  - ✓ Detección de partes pequeñas
  - ✓ Excelente repetitividad
- Desventajas
  - Se deben instalar dos dispositivos
  - No detecta objetos transparentes

# Sensores Fotoeléctricos

## Retroreflectivo



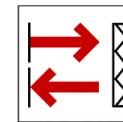
# Sensores Fotoeléctricos



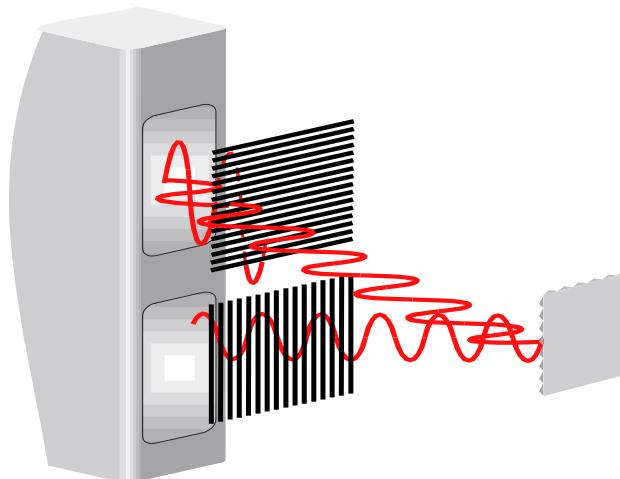
## Retroreflectivo

- Ventajas
  - ✓ Rango de hasta 20 metros
  - ✓ Instalación eléctrica de un solo dispositivo
  - ✓ Detección de cuerpos sin importar color
  - ✓ Fácil de alinear
- Desventajas
  - Requiere un reflector
  - ¿Tiene problemas para detectar cuerpos **Brillosos?**

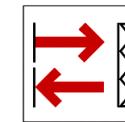
# Sensores Fotoeléctricos



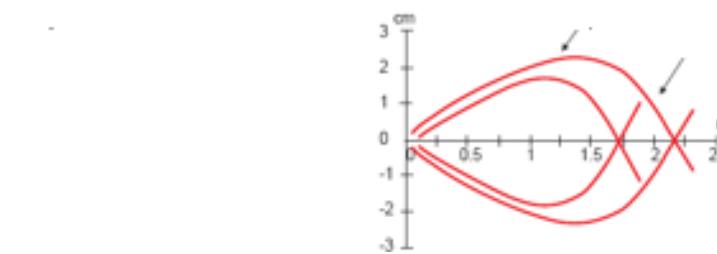
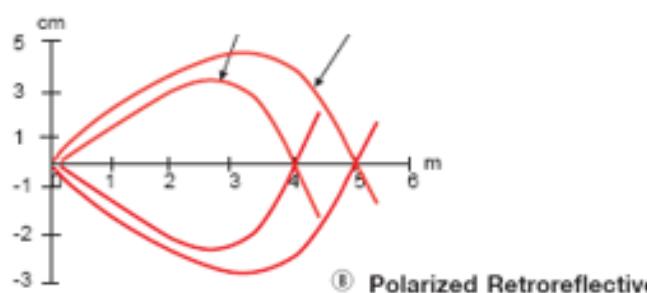
## Retroreflectivo Polarizado



# Sensores Fotoeléctricos



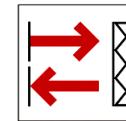
## Operación Light On – Dark ON



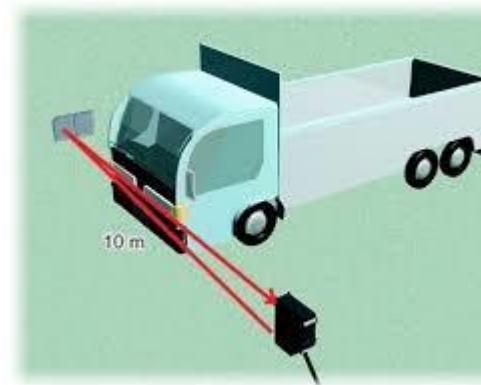
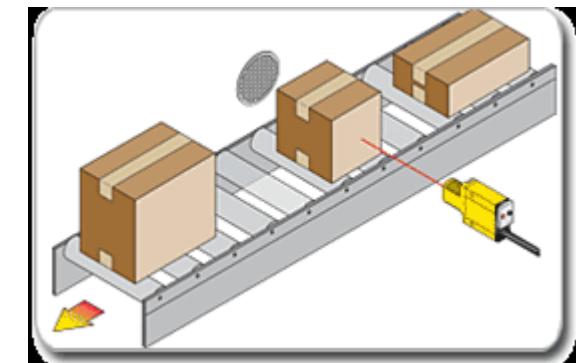
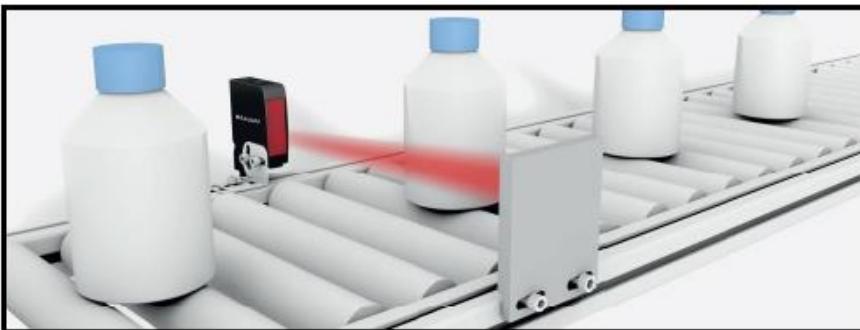
Tipo de Detección	Operación	Light On	Dark On
Retro-reflectivo	<b>Objeto ausente</b> El receptor ve la luz del Emisor	Emisor/Receptor → Reflector La salida es activada	Emisor/Receptor → Reflector La salida no se activa
	<b>Objeto presente</b> El receptor no ve la luz del Emisor	Emisor/Receptor → Objeto opaco → Reflector La salida no se activa	Emisor/Receptor → Objeto opaco → Reflector La salida se activa

Gráfico de comportamiento Fotoeléctrico

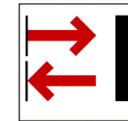
# Sensores Fotoeléctricos



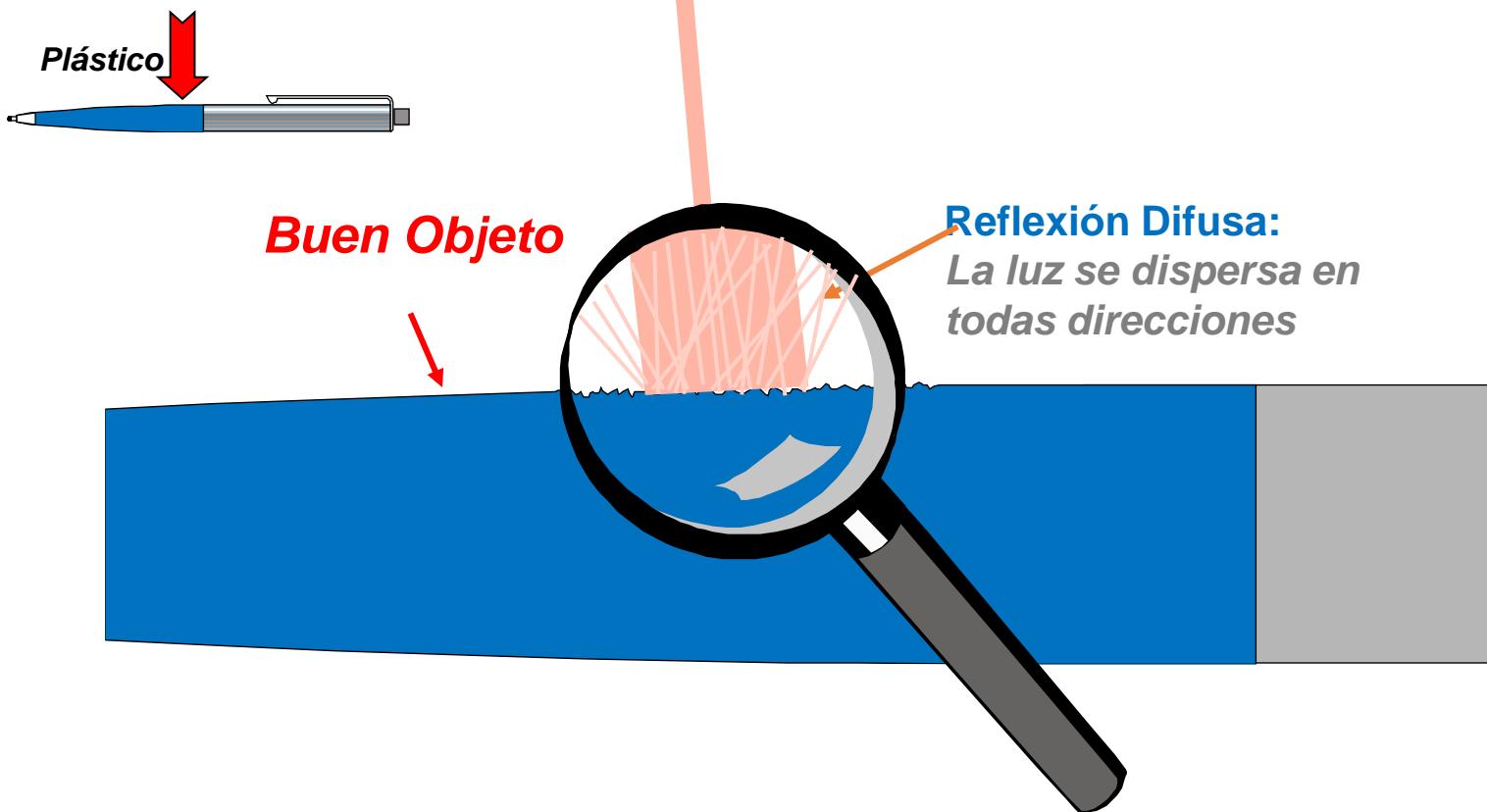
## Aplicaciones



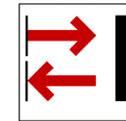
# Sensores Fotoeléctricos



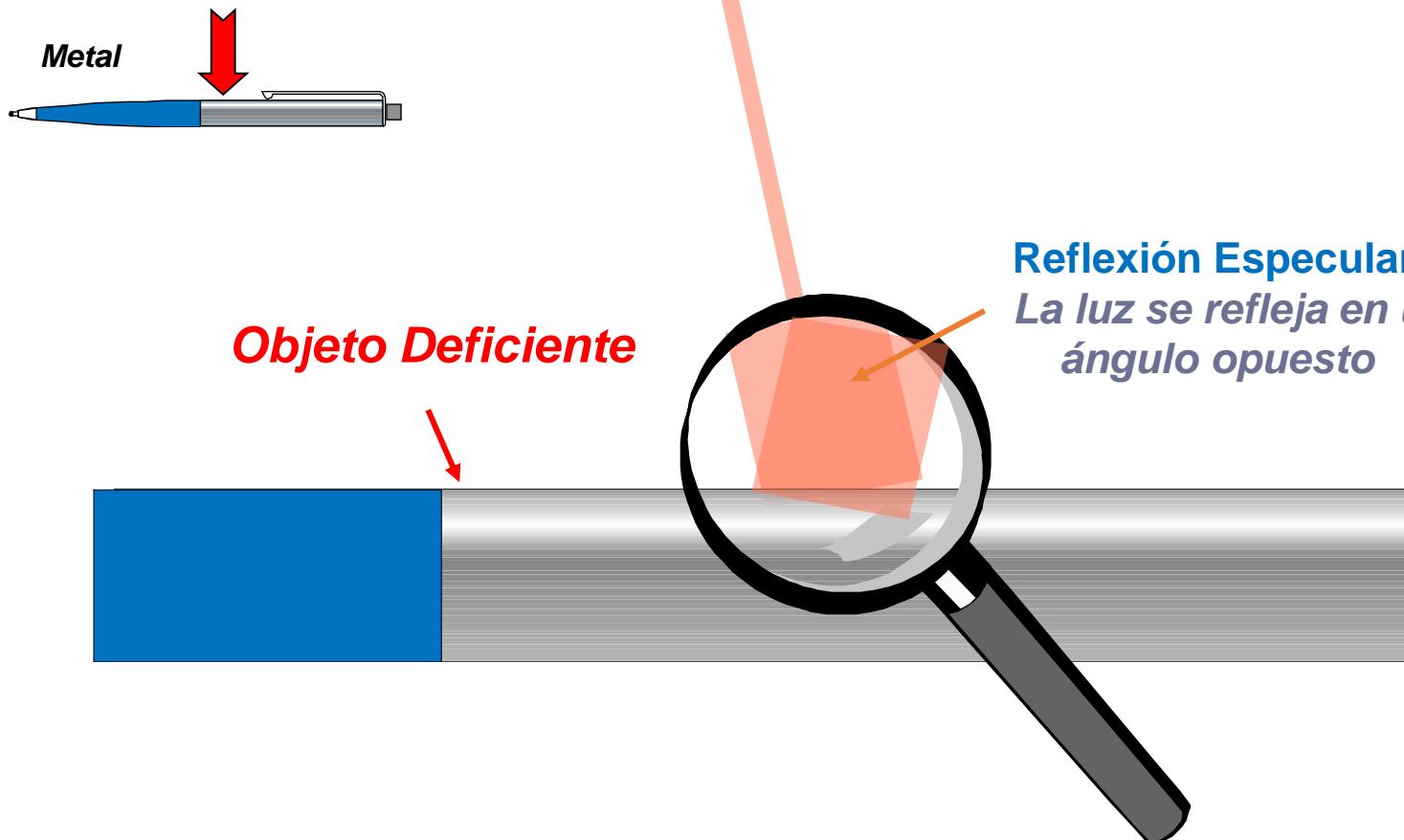
## Difuso



# Sensores Fotoeléctricos



## Difuso

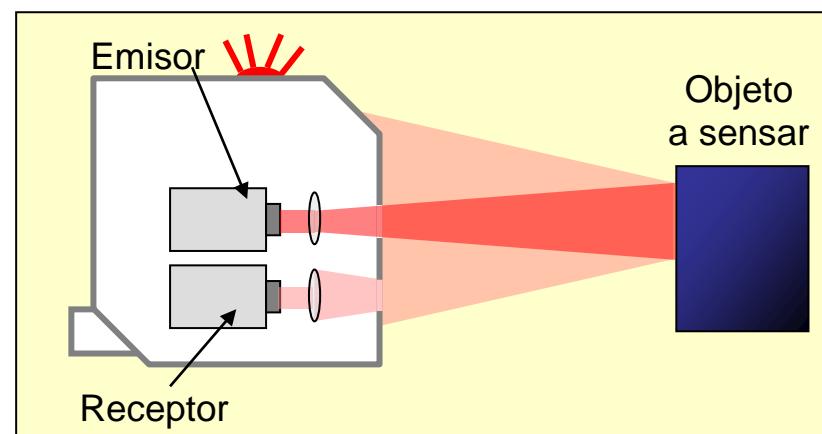


# Sensores Fotoeléctricos

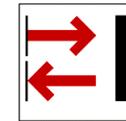


## Difuso

- La luz impacta sobre el objeto
- La luz difundida por el objeto es detectada por el receptor



# Sensores Fotoeléctricos



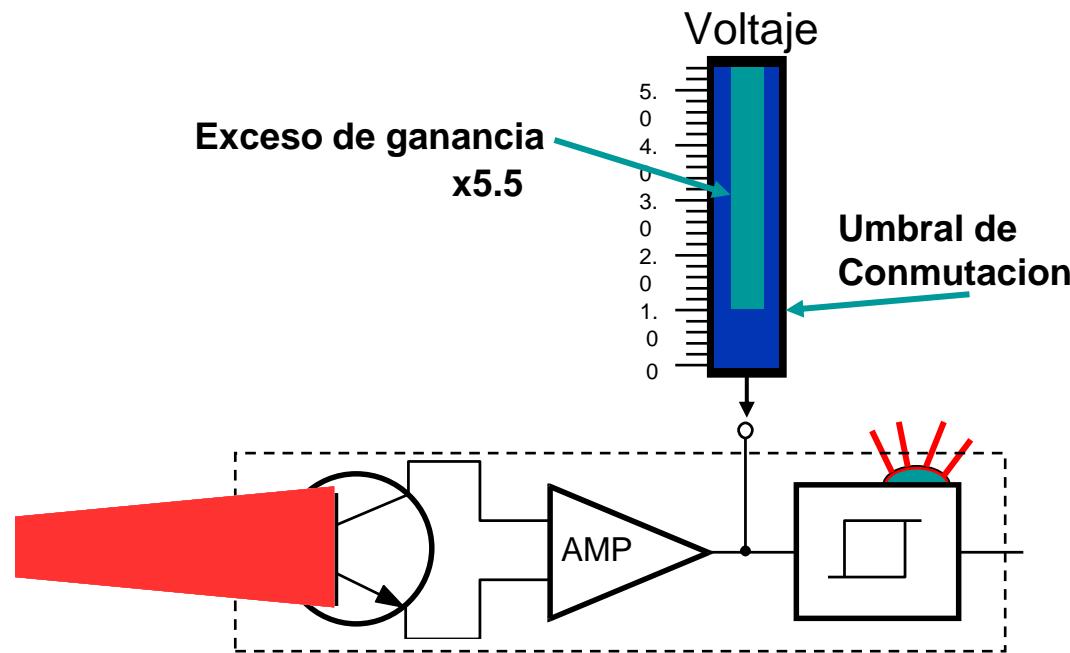
## Difusos: Exceso de ganancia

- Es la cantidad de luz que recibe el receptor por encima de la porción necesaria para disparar la salida.
- Permite predecir el comportamiento del sensor en según las propiedades reflectivas del objeto y las características ambientales.

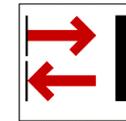
# Sensores Fotoeléctricos



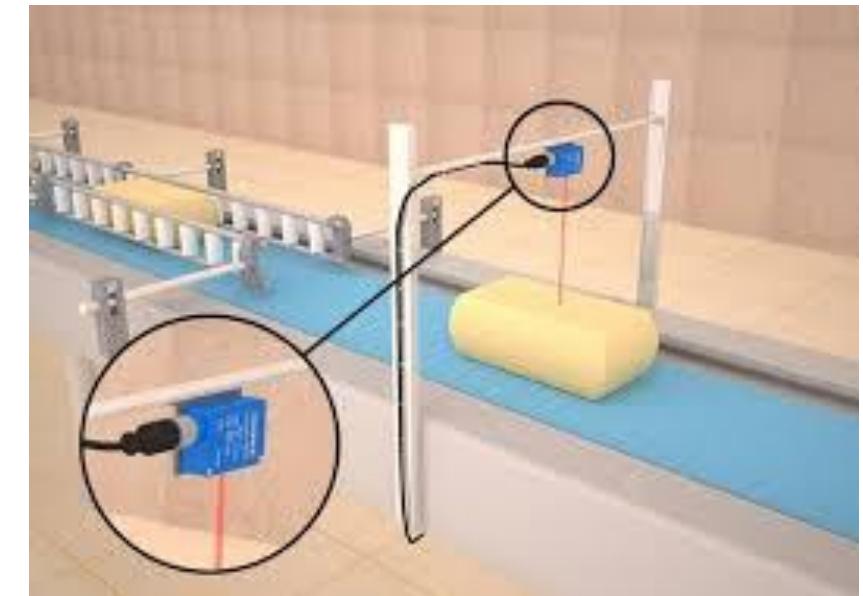
## Difusos: Exceso de ganancia



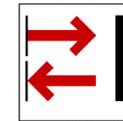
# Sensores Fotoeléctricos



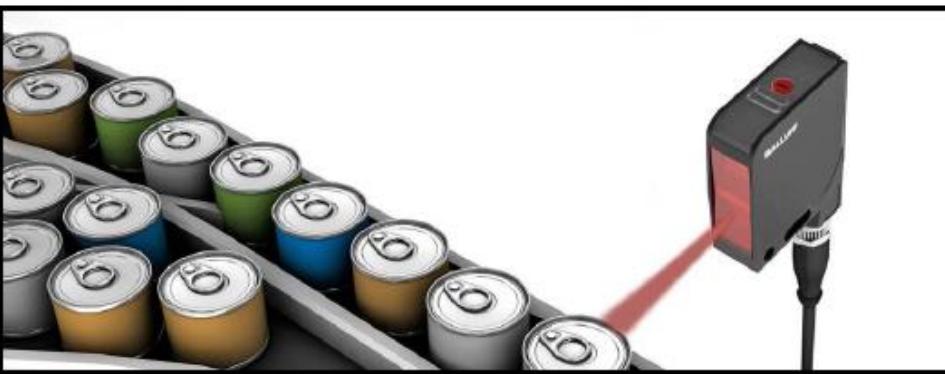
## Aplicaciones



# Sensores Fotoeléctricos



## Aplicaciones



# Sensores Ultrasónicos

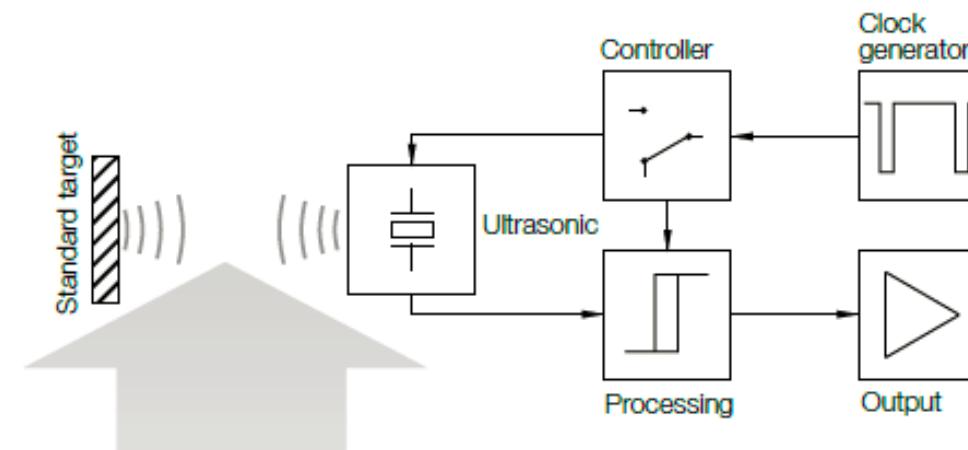
## Principio de Funcionamiento

- La tecnología de ultrasonido se basa en la emisión de ondas acústicas con frecuencias mayores a 20kHz.
- Cuando estas ondas se encuentran con un objeto sólido, el sonido se refleja.
- El sensor recibe el sonido reflejado como un eco, determinando la distancia y convirtiendo este valor en una salida.

# Sensores Ultrasónicos

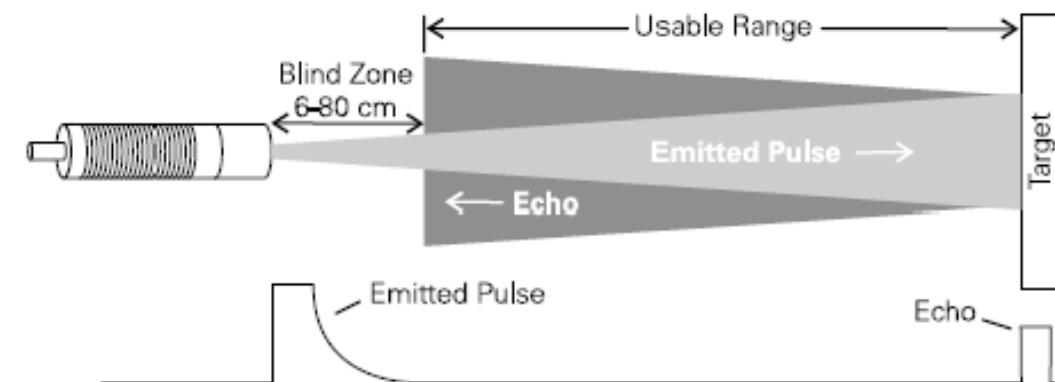
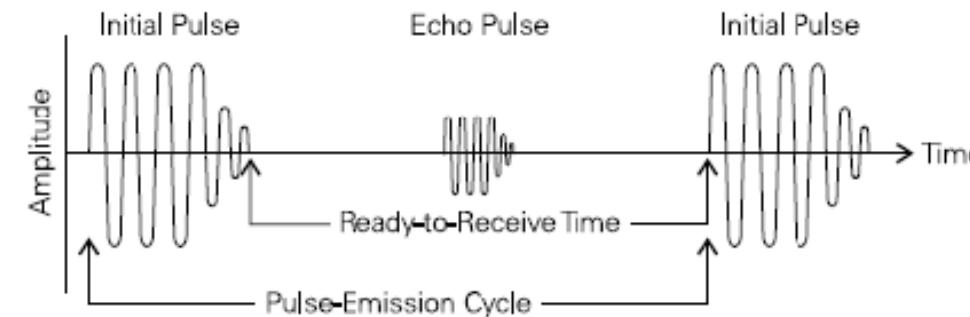
## Principio de Funcionamiento

- La onda ultrasónica es generada internamente (ej. Piezoeléctrico).
- Al aplicarse un voltaje en este elemento, éste oscila y genera la señal de ultrasonido (ej. Parlante).
- Cuando el eco impacta contra este piezoelemento, se genera un voltaje (ej. Micrófono).



# Sensores Ultrasónicos

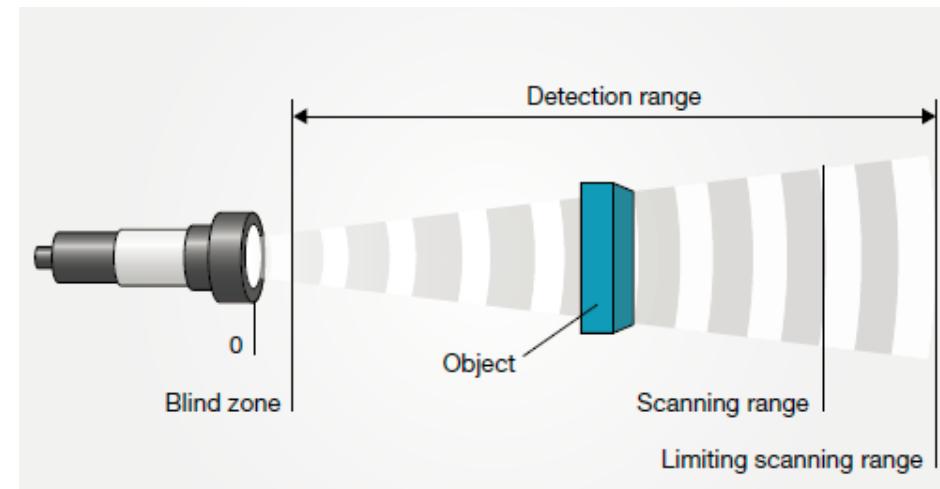
## Principio de Funcionamiento



# Sensores Ultrasónicos

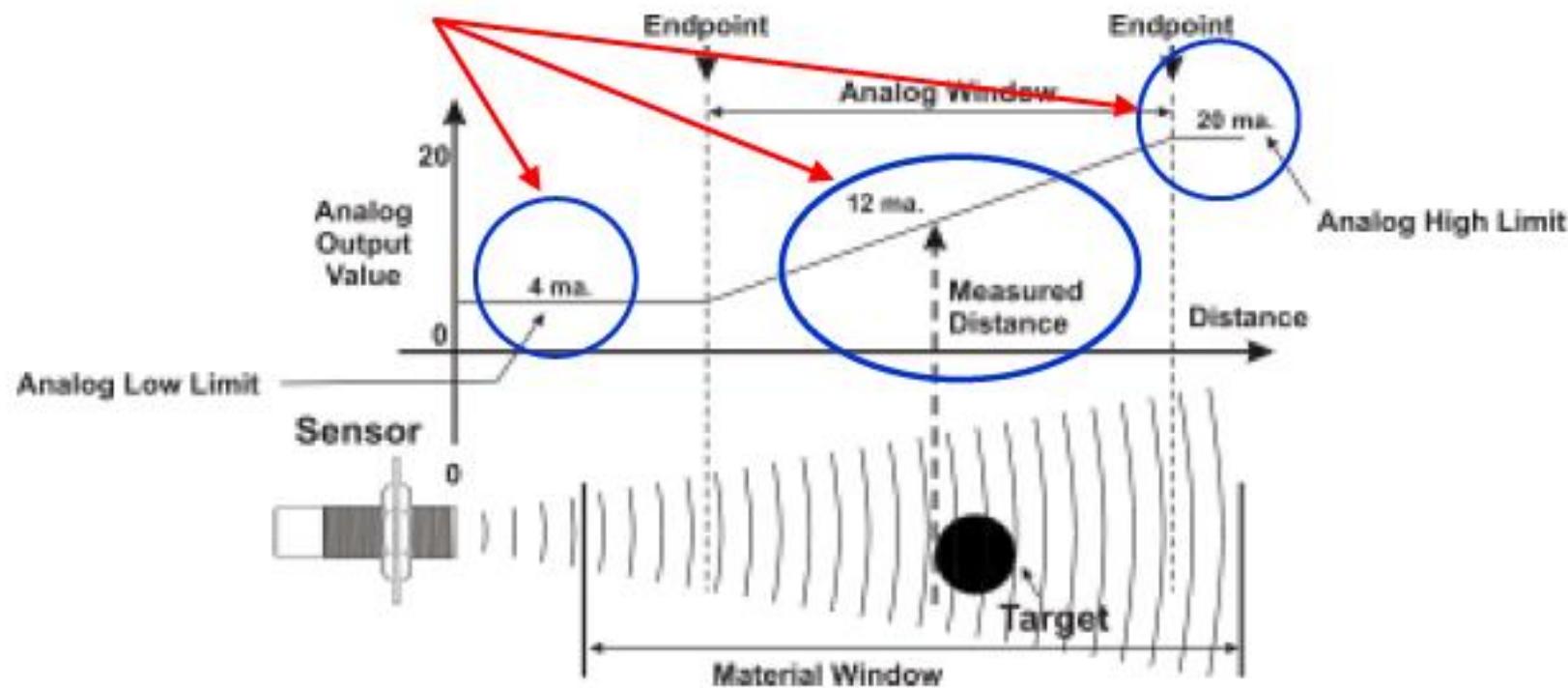
## Principio de Funcionamiento

- El rango en el cual el sensor puede detectar objetos, se encuentra limitado por la menor y mayor distancia de operación.
- Existe una zona ciega, en la cual el sensor no puede detectar ningún objeto.



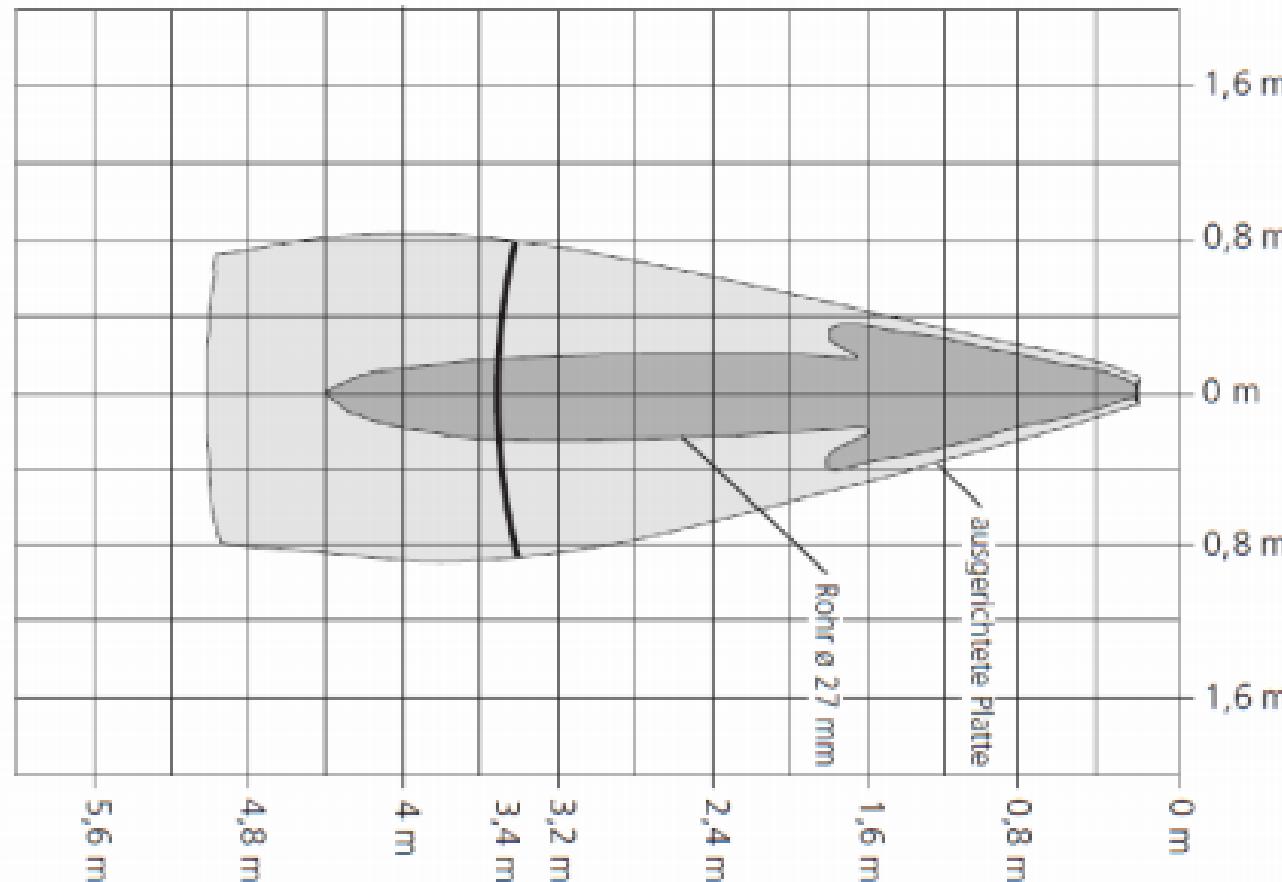
# Sensores Ultrasónicos

## Principio de Funcionamiento



# Sensores Ultrasónicos

## Curva característica



Curva 1: placa plana 100 mm x 100 mm. Curva 2: barra redonda, Ø 27 mm

# Sensores Ultrasónicos

## Propagación

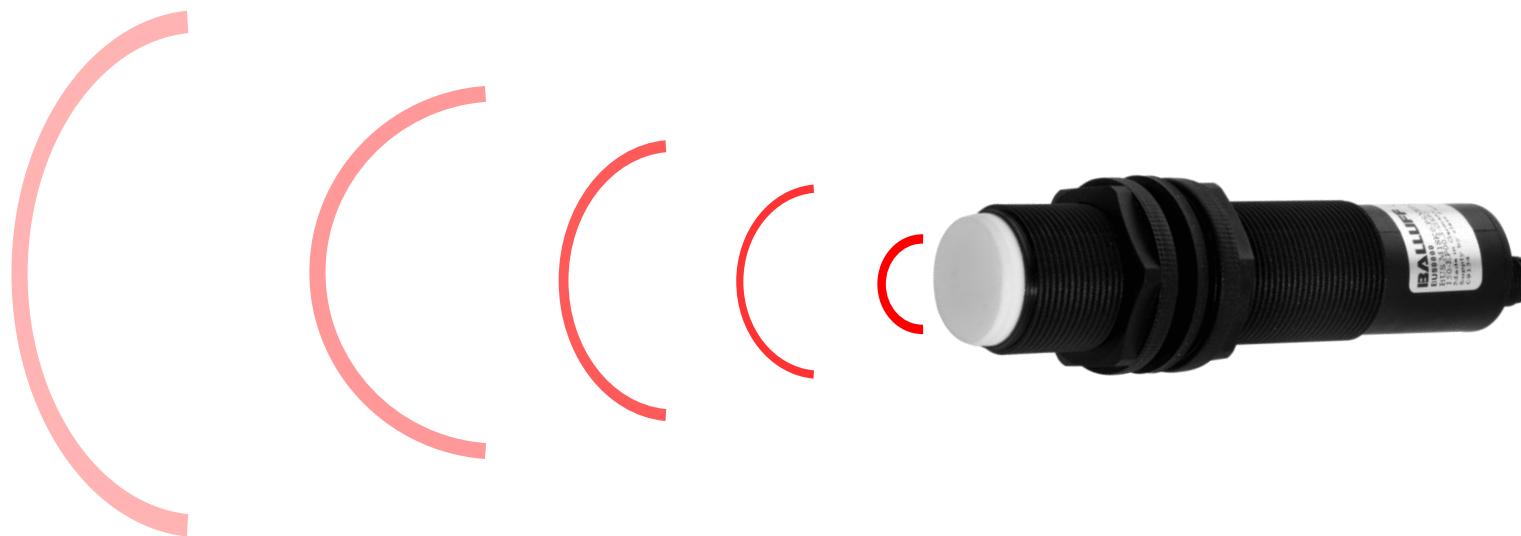
- El sonido es una onda mecánica y, por lo tanto, necesita de un medio para propagarse:
  - Gas
  - Líquido
  - Sólido



# Sensores Ultrasónicos

## Propagación en Aire

- Los sensores ultrasónicos son mayormente diseñados para uso en medios aéreos.
- Emiten un campo enfocado, el cual se vuelve mayor a medida que aumente la distancia.

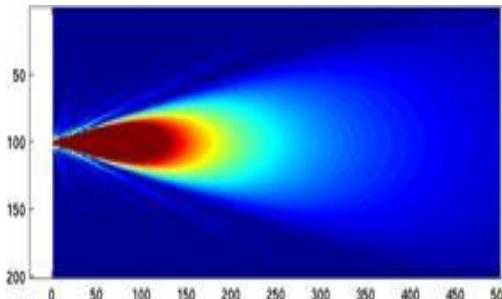


# Sensores Ultrasónicos

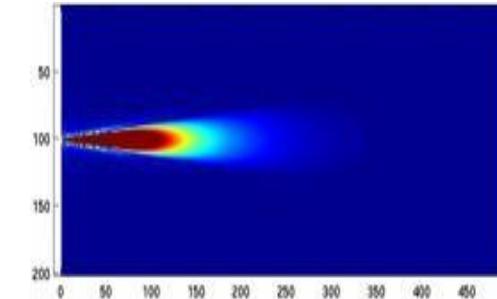
## Cobertura de un sensor ultrasónico

A medida que aumenta la frecuencia, los sensores ultrasónicos poseen conos más pequeños y más enfocados.

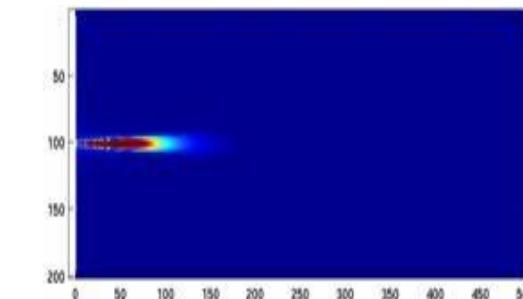
100 kHz



200 kHz



300 kHz



# Sensores Ultrasónicos

## Limitaciones en distancia de sensado

El amortiguamiento del sonido en aire, depende de los siguientes factores:

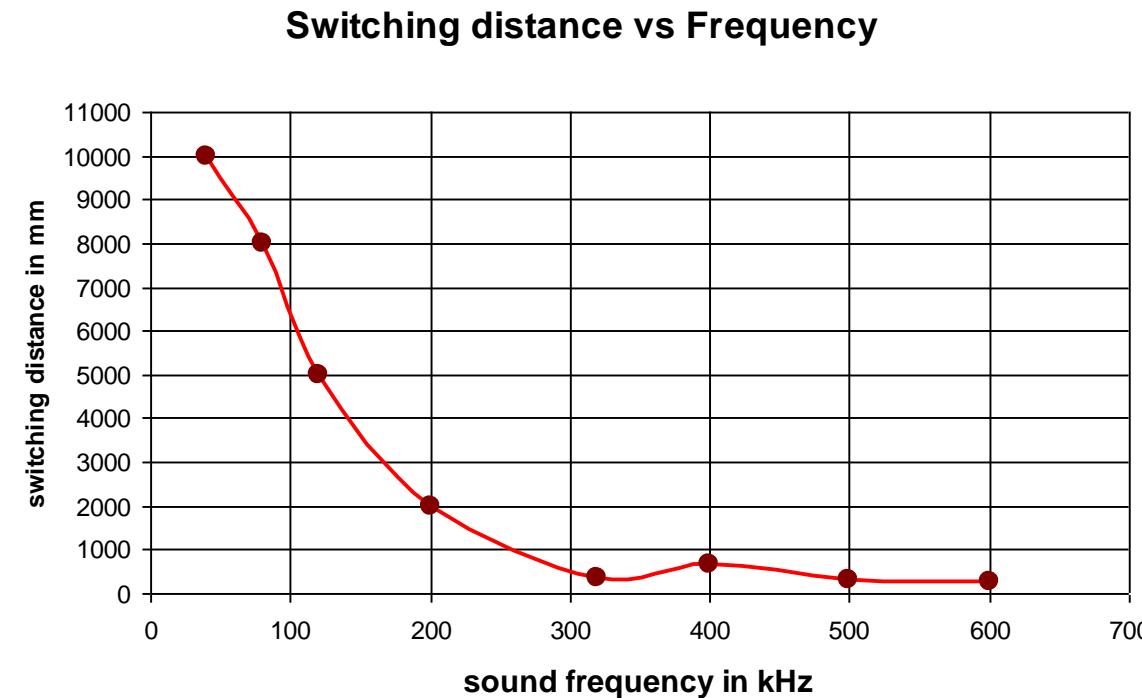
1. Frecuencia del sonido.
2. Temperatura del aire.
3. Humedad del aire.
4. Presión del aire.

# Sensores Ultrasónicos

## Limitaciones en distancia de sensado

A mayor frecuencia del sonido, menor distancia de sensado.

- **Frecuencia del sonido.**
- Temperatura del aire.
- Humedad del aire.
- Presión del aire.



# Sensores Ultrasónicos

## Limitaciones en distancia de sensado

A mayor temperatura y humedad del aire, menor distancia de sensado.

- Frecuencia del sonido.
- **Temperatura del aire.**
- **Humedad del aire.**
- Presión del aire.

# Sensores Ultrasónicos

## Limitaciones en distancia de sensado

A mayor presión del aire, menor amortiguamiento. Por lo tanto, el sensor posee mayor rango de detección.

- Frecuencia del sonido.
- Temperatura del aire.
- Humedad del aire.
- **Presión del aire.**

# Sensores Ultrasónicos

## Reflexión y Absorción de ondas ultrasónicas

- Los materiales suaves o delgados pueden ser permeables para el ultrasonido.
- Los materiales “duros” tienen buena reflexión.

Buena reflexión	Mala Reflexión
Agua, concreto, metal, madera, vidrio, plástico.	Alfombras, algodón, ropa, espuma.

# Sensores Ultrasónicos

## Reflexión y Absorción de ondas ultrasónicas

- Sin embargo, prácticamente todos los objetos pueden ser detectados, aún aquellos con mala reflexión. Pero sí se verá reducida la distancia de detección.
- La capacidad de detección de un objeto es independiente del color y brillo, pero si depende de la superficie.

# Sensores Ultrasónicos

## Factores a Considerar

### Temperatura ambiente

- Puede usarse en ambientes de temperaturas cálidas o templadas. Los cambios de temperaturas no deben ser bruscos, para que el sensor pueda compensarlos.

### Objetos calientes

- Detectarlos puede ser difícil, dado que se generan turbulencias de aire que debilitan las ondas de sonido.

### Variaciones de la presión de aire

- Los sensores ultrasónicos no pueden usarse en vacío.

# Sensores Ultrasónicos

## Factores a Considerar

### **Humedad y Lluvia**

Debe asegurarse que la superficie del sensor se mantenga seca, ya que la velocidad del sonido varía en zonas húmedas.

### **Superficies convexas**

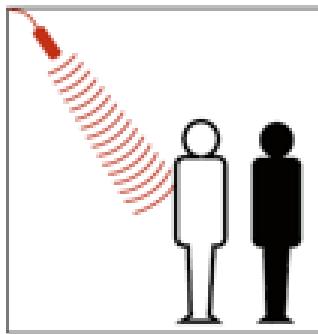
El rango máximo de detección decrece a medida que disminuye el radio.

### **Líquidos**

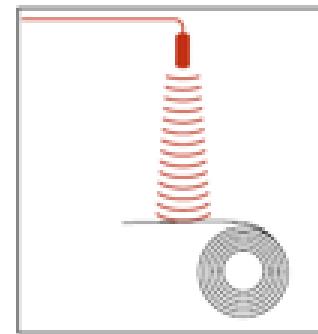
Es posible detectar líquidos con un sensor ultrasónico. El eje del haz de onda no debe desviarse más de 3° desde una línea perpendicular a la superficie del líquido.

# Sensores Ultrasónicos

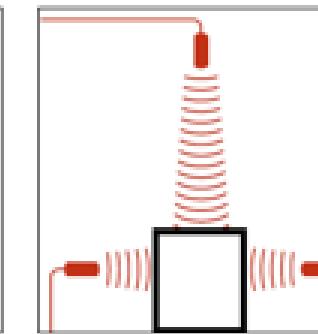
## Aplicaciones típicas



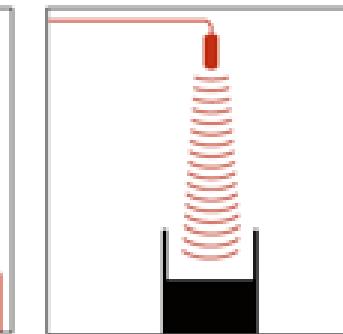
Detection of persons



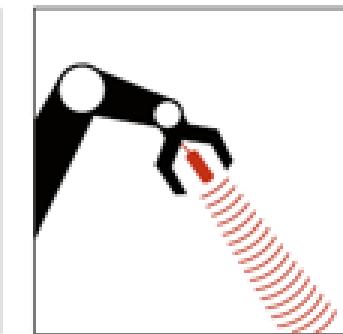
Foil-tear monitoring



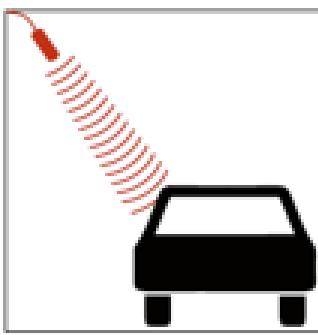
Height / width measurement



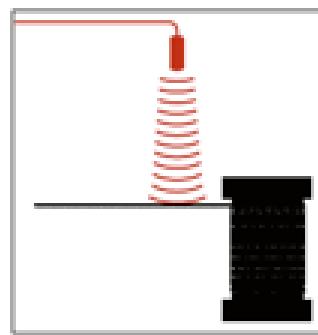
Presence monitoring



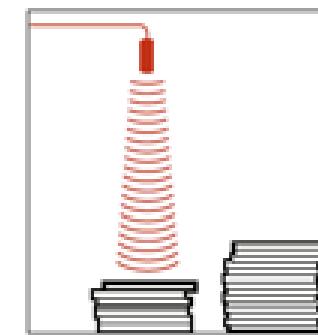
Robot positioning



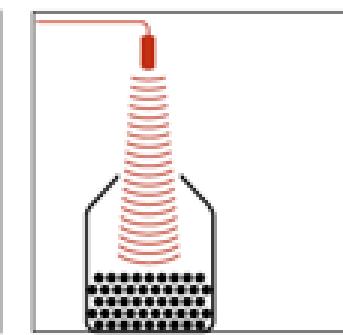
Positioning



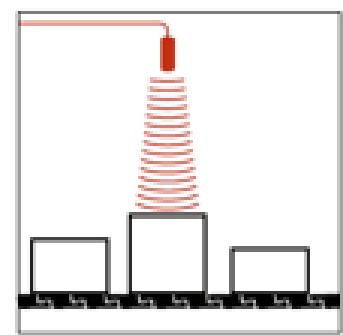
Wire-breakage-monitoring



Stack-height detection



Fill-level monitoring



Object detection

# Sensores Ultrasónicos

## Aplicaciones típicas

Medición de nivel:

- Líquidos
- sólidos



# Sensores Ultrasónicos

## Tipos de salida eléctrica

- Digital: PNP/NPN (NA o NC)
- Analógica (4-20mA / 0-10V)

# Sensores Ultrasónicos

Adaptador de enfoque

Permite enfocar el haz ultrasónico



# Sensores Ultrasónicos

## Deflectores

Permite direccionar el haz ultrasónico



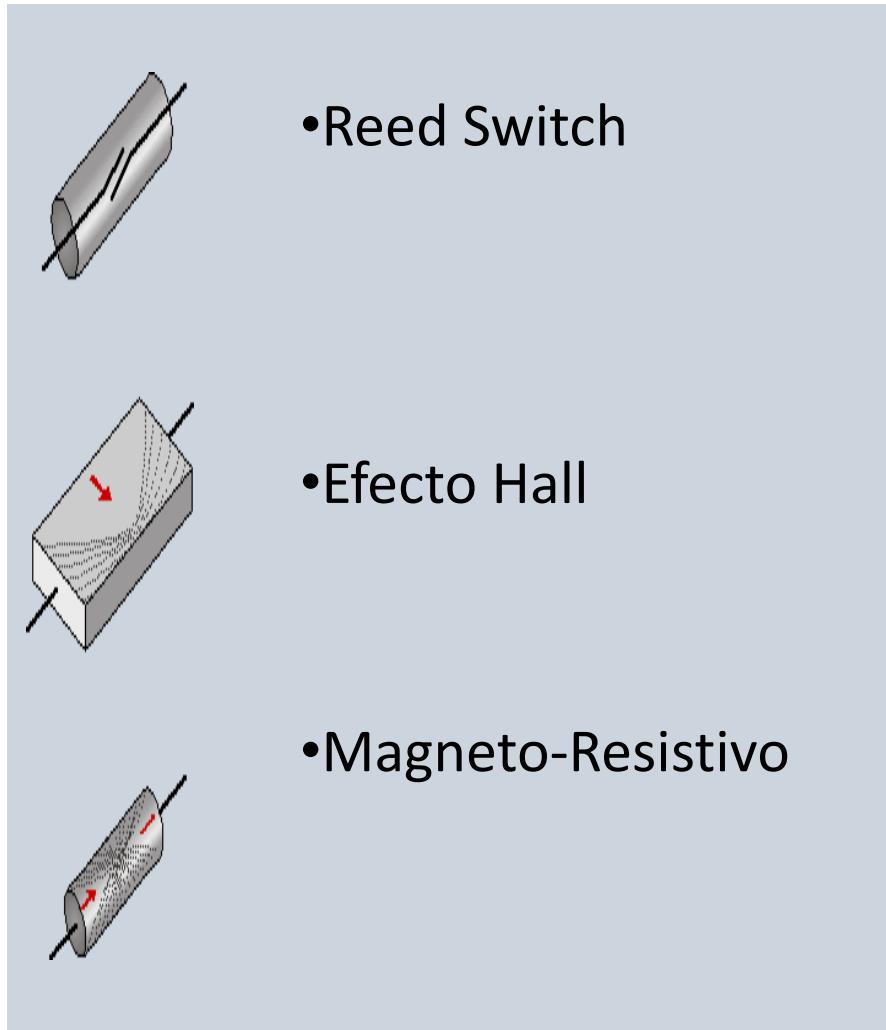
# Sensores Magnéticos

## Principio de Funcionamiento

- Los sensores magnéticos son aquellos que detectan campos magnéticos (de imanes) a través de metales no ferrosos (aluminio, bronce, etc.)
- Estos sensores convierten estos campos en señales de conmutación y entregan estas señales al controlador de la misma forma que un sensor inductivo.

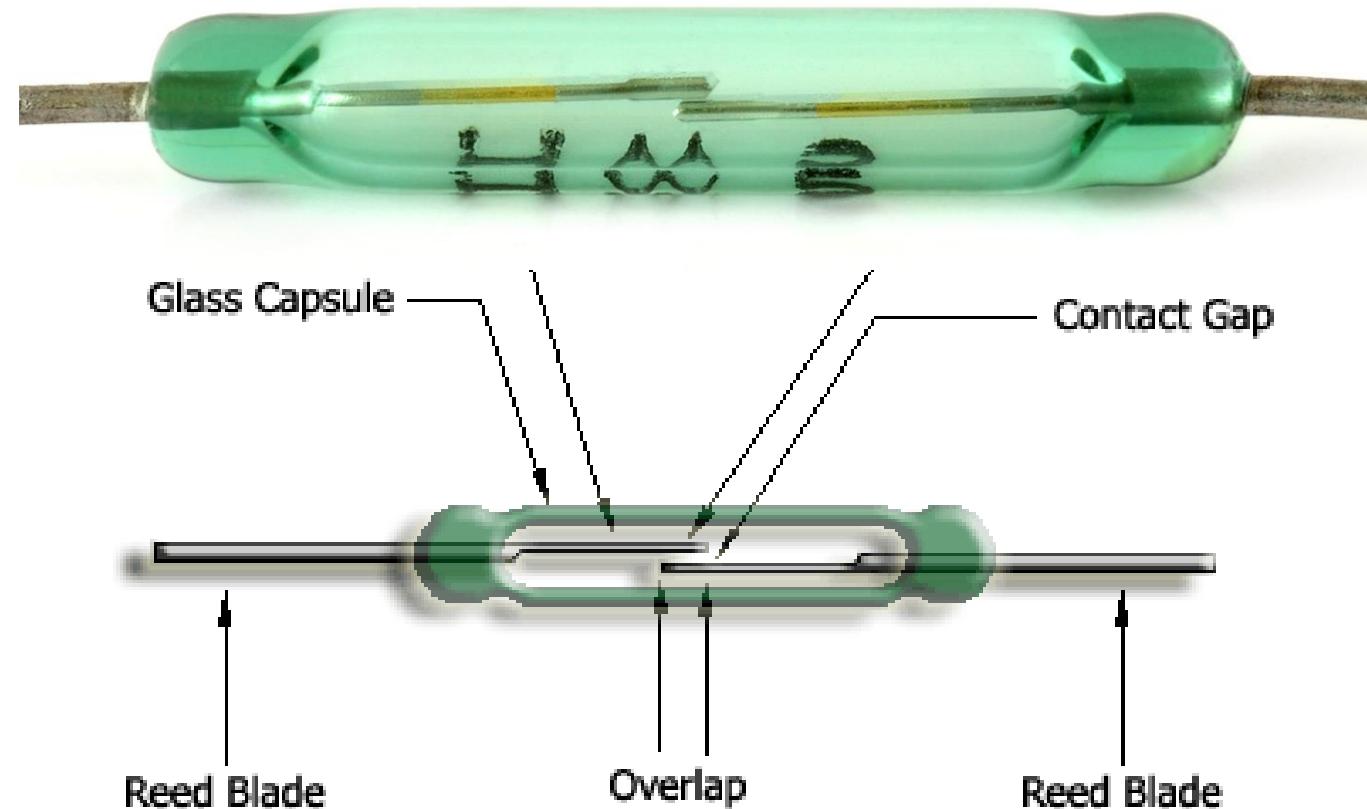
# Sensores Magnéticos

## Tecnologías de detección



# Sensores Magnéticos

Tecnología reed-switch



# Sensores Magnéticos

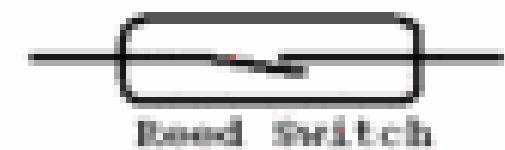
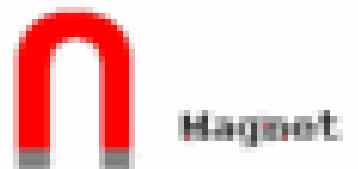
## Tecnología reed-switch

- Dos lengüetas de contacto son moldeadas dentro de un tubo de vidrio sin aire, rellena de gas inerte.
- Estos contactos son magnetizados por las líneas de fuerza magnética de un imán permanente.
- Los contactos son atraídos al mismo tiempo.

# Sensores Magnéticos

## Tecnología reed-switch

- Cuando un campo magnético se genera en paralelo al sensor, las placas se convierten en portadoras de flujo en el circuito magnético.
- Las puntas de cada placa se convierten en polos magnéticos opuestos que se atraen.
- Si la fuerza magnética entre los polos es más fuerte que la encontrada en los polos de las placas, éstas se unirán.

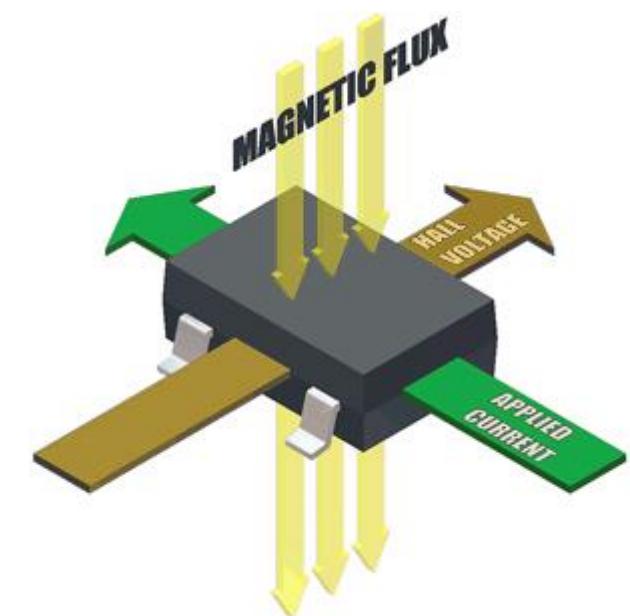
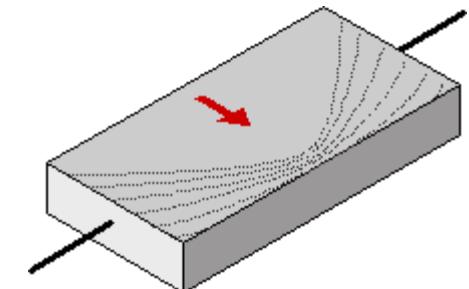


# Sensores Magnéticos

## Tecnología efecto hall

La polaridad del campo magnético induce un pequeño cambio de voltaje.

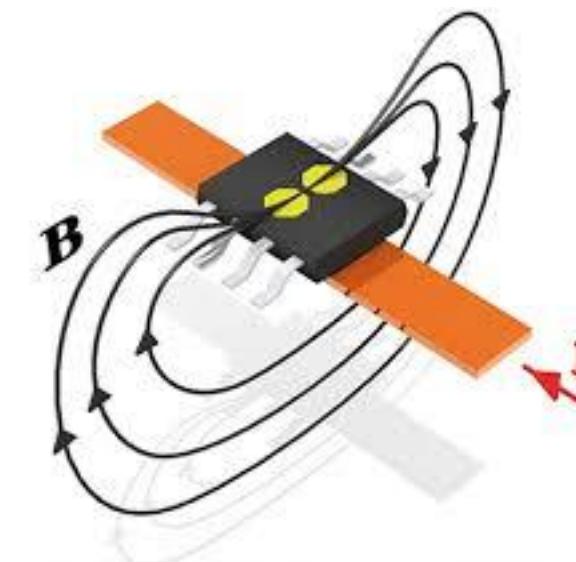
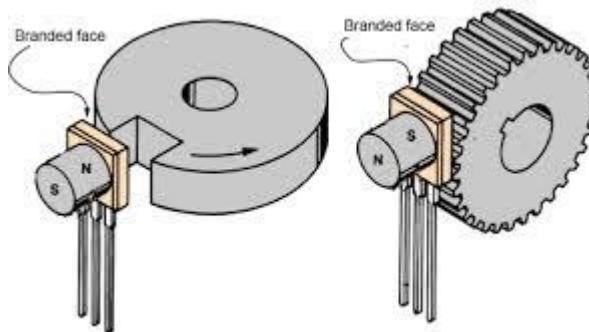
- Dispositivo de estado sólido.
- Elemento pequeño.
- Sensible a la polaridad.



# Sensores Magnéticos

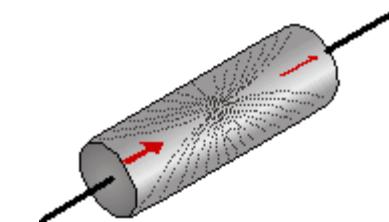
Tecnología efecto hall

## Aplicaciones

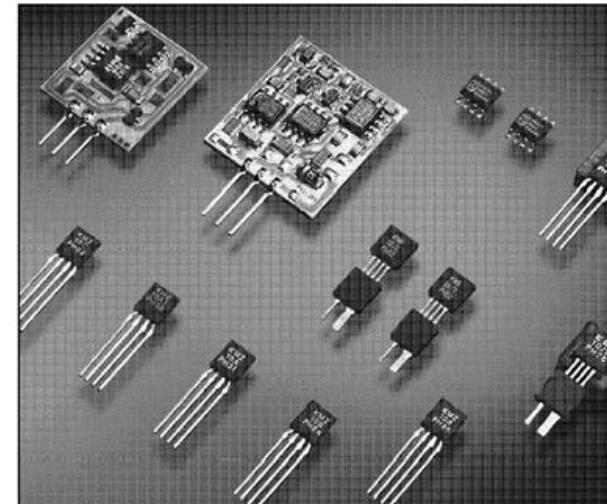


# Sensores Magnéticos

## Tecnología magneto-resistiva



- El campo magnético provoca un cambio en la Resistencia.
- Usado en cabezas de lectura de discos duros.
- El más estable de todos.
- Tolera los cambios de dirección del campo magnético.



# Sensores Magnéticos

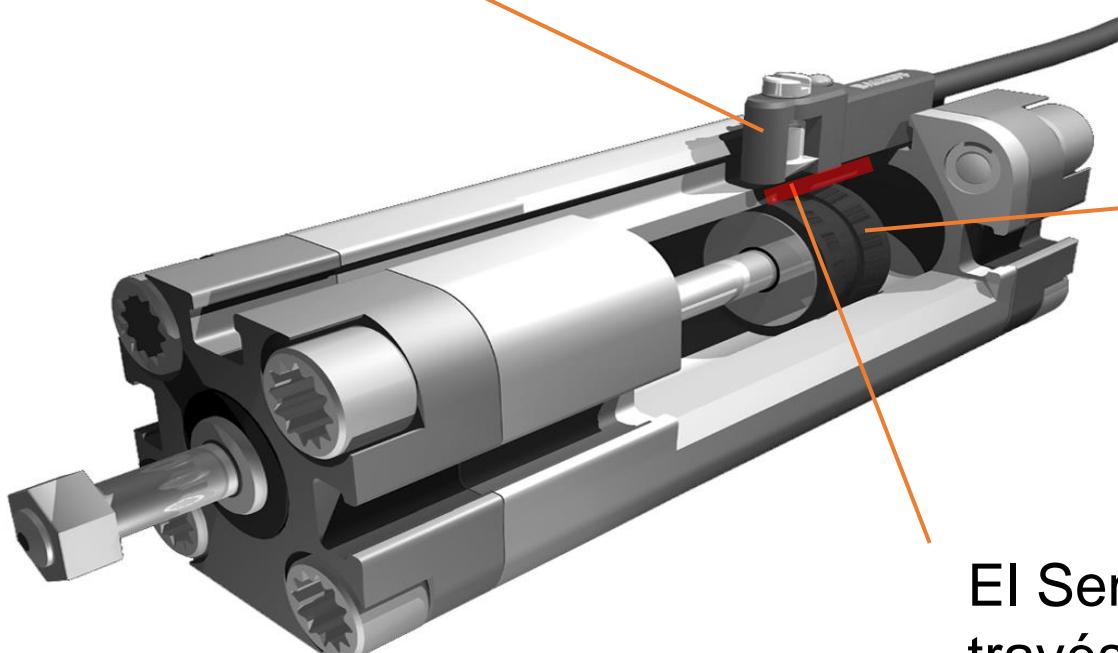
## Comparación tecnologías

	<b>Reed Switch</b>	<b>Hall Effect Technology</b>	<b>Magnetoresistive Technology</b>
Attribute			
Operation	Mechanical contact pulled closed by magnetic field	Polarity of magnetic field induces small voltage change	Magnetic field causes change in resistance
Sensitivity	Medium	Low	High
Speed	Low	High	High
Temp. stability	Medium	Low	High
Noise immunity	High	Low	High
Magnet orientation	Parallel	Perpendicular	Any

# Sensores Magnéticos

Aplicaciones típicas: detección de fin de carrera en cilindros neumáticos

El Sensor se monta en el cilindro



Anillo magnético instalado por el fabricante de cilindros.

El Sensor detecta el Magneto a través de la pared del cilindro (aluminio).

# Sensores Magnéticos

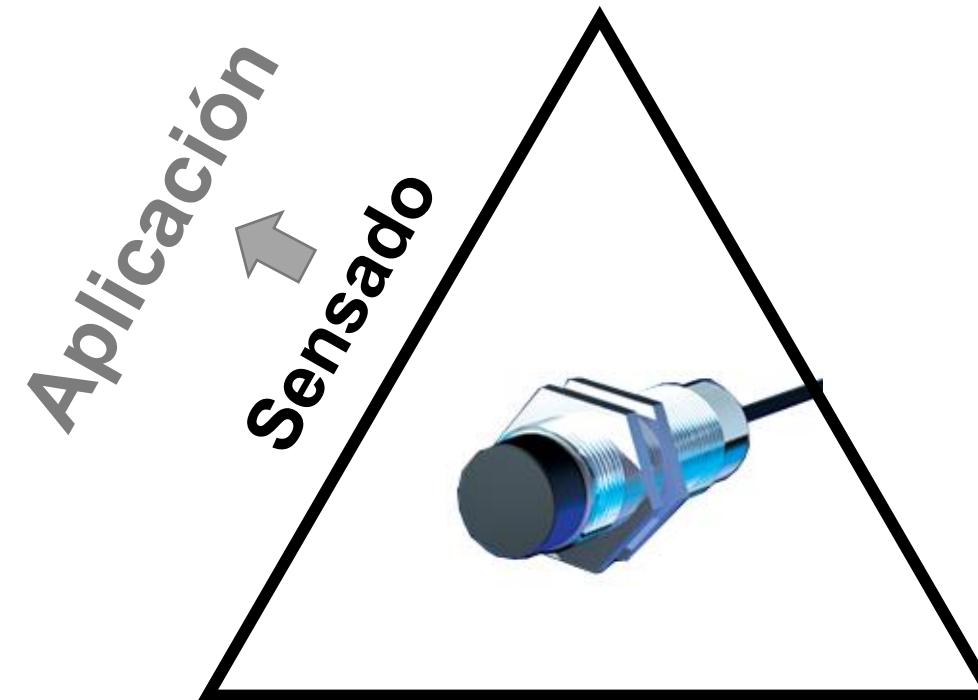
## Tipos de salida eléctrica

- Digital: PNP/NPN (NA o NC)
- Contacto seco (en sensores tipo reed-switch).

# Criterios de selección



# Criterios de selección



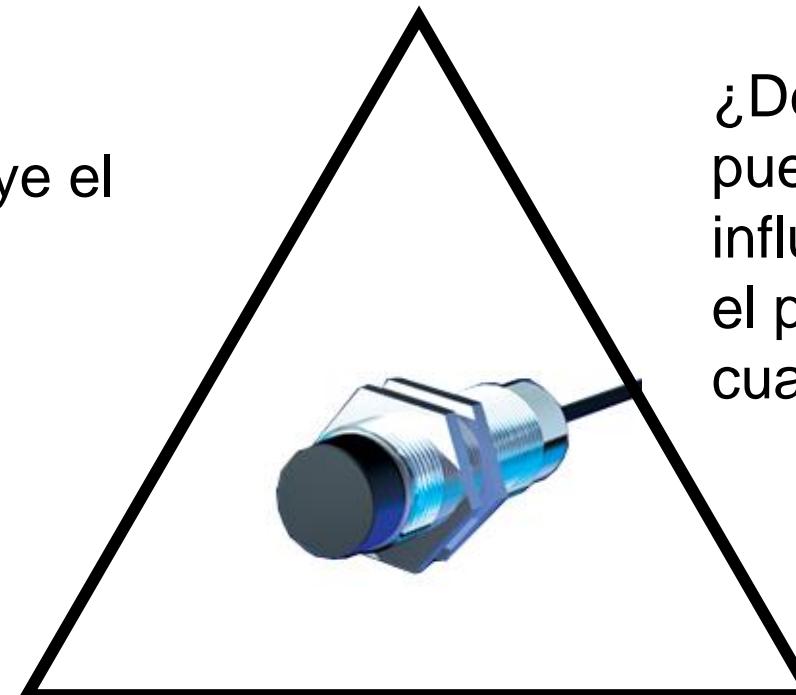
¿Que voy a detectar?  
¿A que distancia?



Tecnología

# Criterios de selección

¿De que manera influye el Medio ambiente en la integridad del sensor?



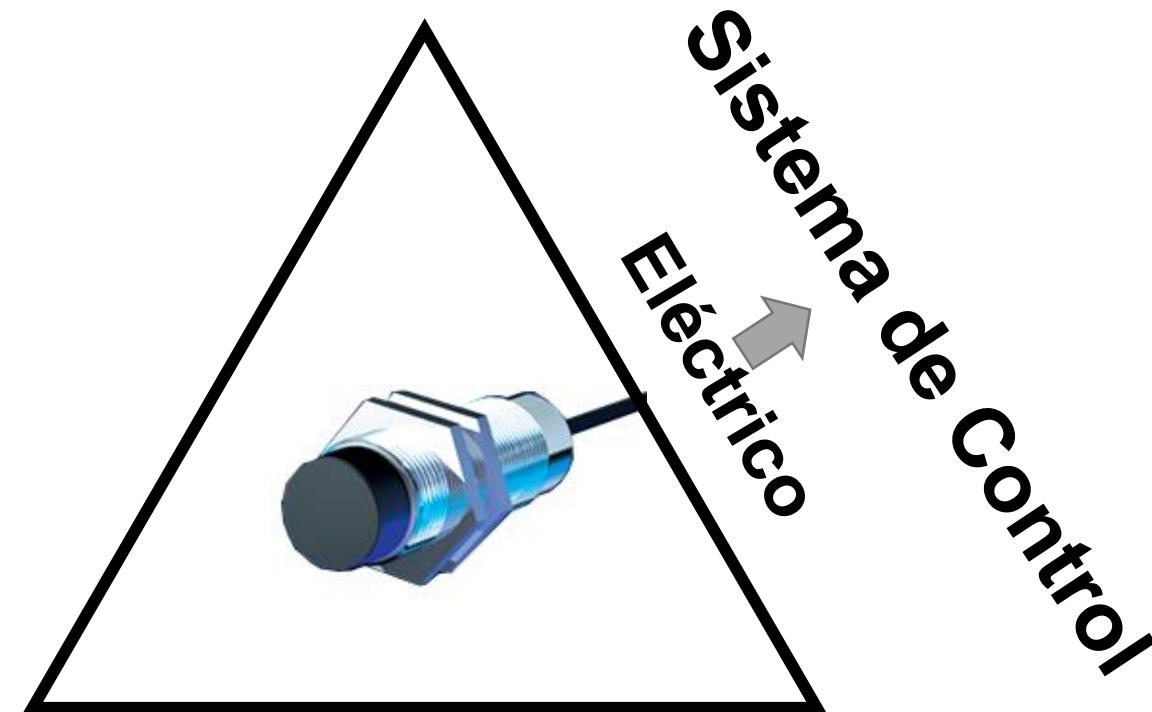
¿De que manera, puede el sensor influir o contaminar el proceso en el cual está montado?

**Encapsulado**



**Ambiente**

# Criterios de selección



- Alimentación.
- Tipo de salida.
- Frecuencia de operación.
- Corriente y Tipo de Carga.
- Conectividad.
- Protocolo de comunicación.
- Diagrama de conexiones.

# SENsores de presión

22.88

# AGENDA

- Principios Físicos
  - Definición
  - Unidades
  - Tipos de presión
- Tecnologías de sensado
  - Sensores basados en conversión mecánica
  - Sensores basados en conversión eléctrica.
- Instalación
- Aplicaciones

# Importancia de los sensores de presión

- La presión es la segunda variable más monitoreada en la industria, luego de la temperatura.
- La medición de presión tiene tres razones fundamentales:
  - Indicación de presión para su visualización.
  - Control de procesos automatizados.
  - Monitoreo de presiones en forma remota

# Sensores de presión en la vida cotidiana



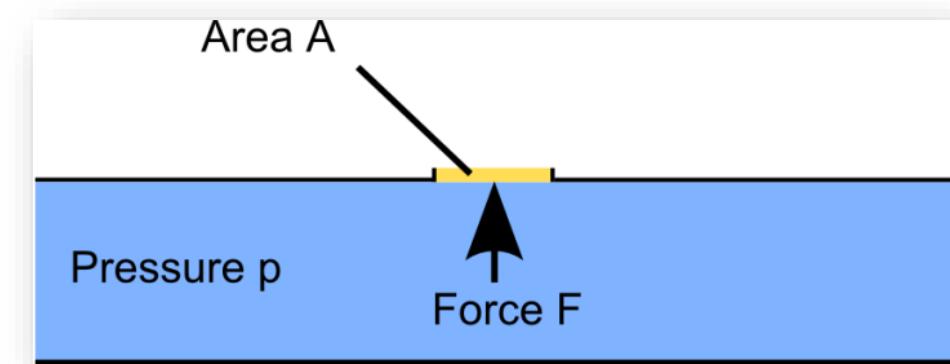
# Sensores de presión en la vida cotidiana



# ¿Qué es la presión?

- Presión P es una fuerza F aplicada sobre una unidad de área A en dirección perpendicular de la superficie.
- En un contenedor cerrado la presión es la misma en cualquier punto y la presión no tiene dirección. Por lo tanto no importa la posición o la orientación del montaje del sensor.

$$p = \frac{F}{A}$$



# ¿Qué es la presión hidrostática?

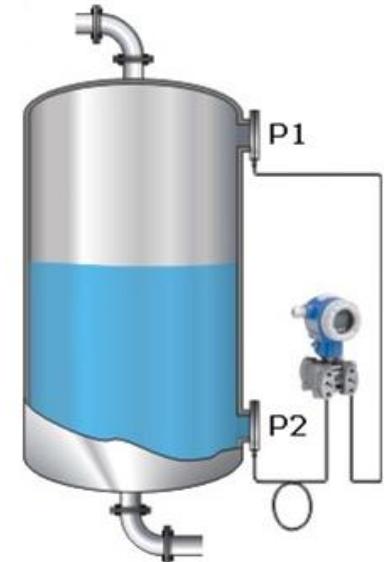
La presión en un fluido dentro de un contenedor abierto depende de la altura en donde se haga la medición. Entre más abajo esté el punto de medición más alta será la presión.

Si la presión se mide en 2 puntos diferentes la presión será más alta en el punto de medición más abajo.

La presión **P** es proporcional a la altura **H**:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot g}{\pi * r^2} = \frac{m \cdot g}{\pi * r^2}$$

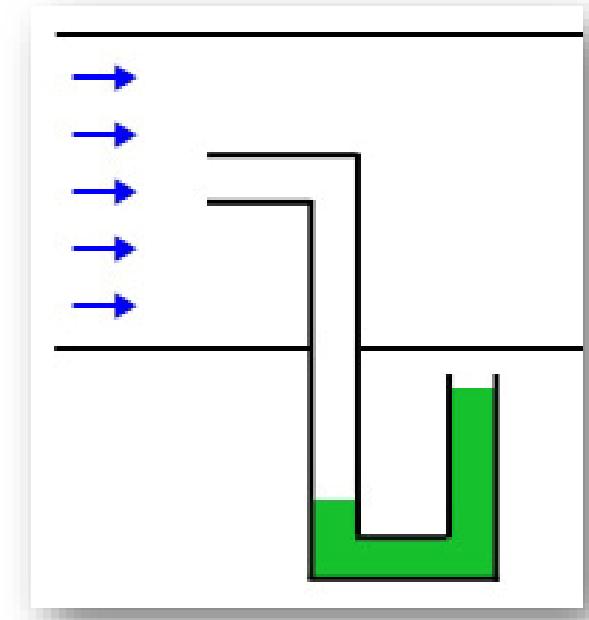
$$m = \delta * Vol = \delta * \pi * r^2 * h \Rightarrow p = \frac{\delta * \pi * r^2 * h * g}{\pi * r^2}$$
$$p = \delta * g * h$$



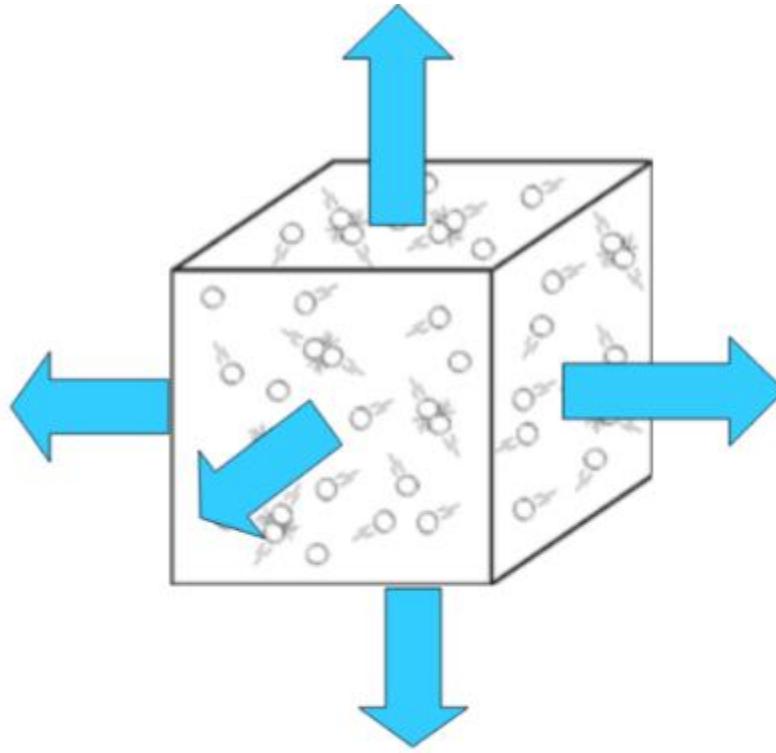
# ¿Qué es la presión dinámica?

«*Representa la energía cinética de un fluido en movimiento.*».

- En la imagen se aprecia una tubería con un fluido en movimiento. Hay un segundo tubo interno, con un diámetro más pequeño.
- El fluido verde es empujado por el fluido en la tubería principal: la diferencia de altura del fluido verde representa la **presión dinámica**.



# Presión en un gas



Pressure is dependent on Volume

Boyle's Law (1662):

$$P \cdot V = \text{constant} \text{ (at constant } T, n)$$

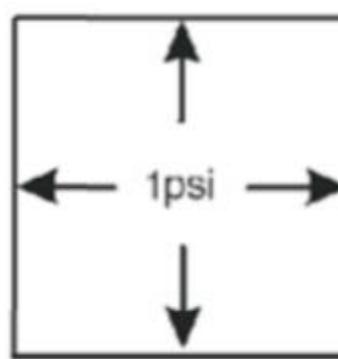
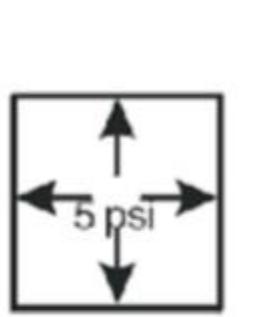
Pressure is dependent on Temperature

Charles' Law (1787):

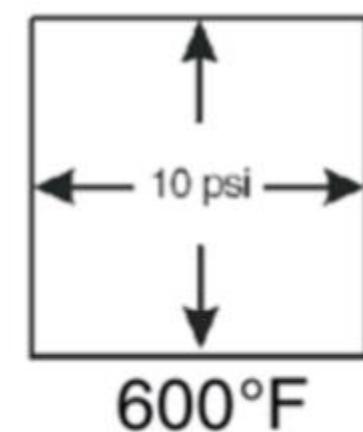
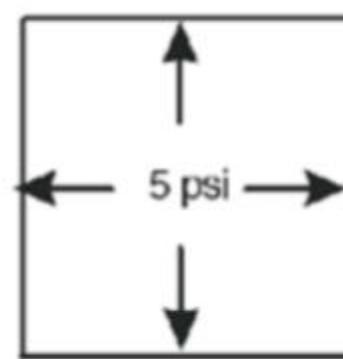
$$V = \text{constant} \cdot T \text{ (at constant } P, n)$$

# Presión en un gas: ley de gases ideal

Boyles Law



Charles Law



Volume Increases - Pressure Decreases

Temperature Increases - Pressure Increases

Ideal Gas Law

$$PV = nRT$$

# Unidades de presión típicas en la industria

- La unidad SI es el **Pascal** con símbolo *Pa*. 1 Pascal se define como 1 **Newton por metro cuadrado**:

$$1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

- La unidad **Bar** cuyo símbolo es *bar* equivale:

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

- Finalmente, la unidad **libras-por-pulgada cuadrada** con símbolo *psi* no es una unidad SI, pero muy común en países de habla inglesa.

$$1 \text{ psi} \approx 6895 \text{ Pa} \quad 1 \text{ bar} \approx 14,5 \text{ psi}$$

# Otras unidades de presión

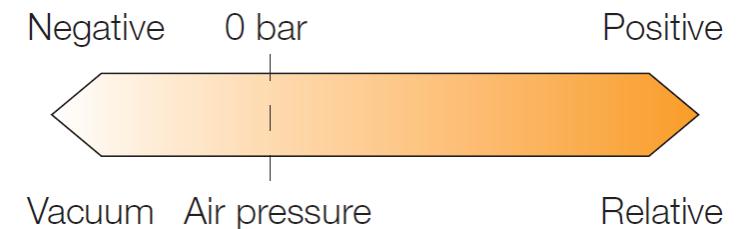
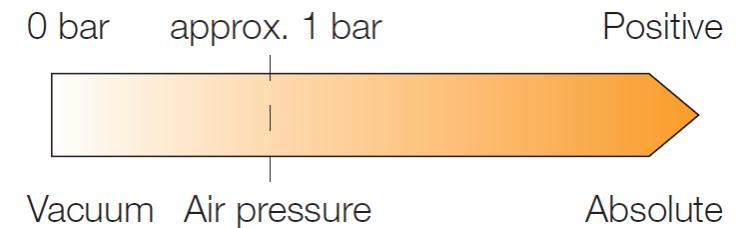
<b>Nombre común de la Unidad</b>	<b>Abrev.</b>	<b>Fórmula</b>	<b>Presión Atmosférica Normal</b>
Pascal	Pa	N/m <sup>2</sup>	101325 Pa
Atmósfera	atm		1 atm
Libra	psi	lb/in <sup>2</sup>	14.7 psi
Torricelli	Torr	mm(Hg)	760 Torr
Columna de Agua	m.c.a.	m(H <sub>2</sub> O)	10.332 m
Kilo	Kg	kg/cm <sup>2</sup>	1.033 kg/cm <sup>2</sup>
Bar	Bar	Bar	1.01325 bar

# Unidades de presión: conversiones

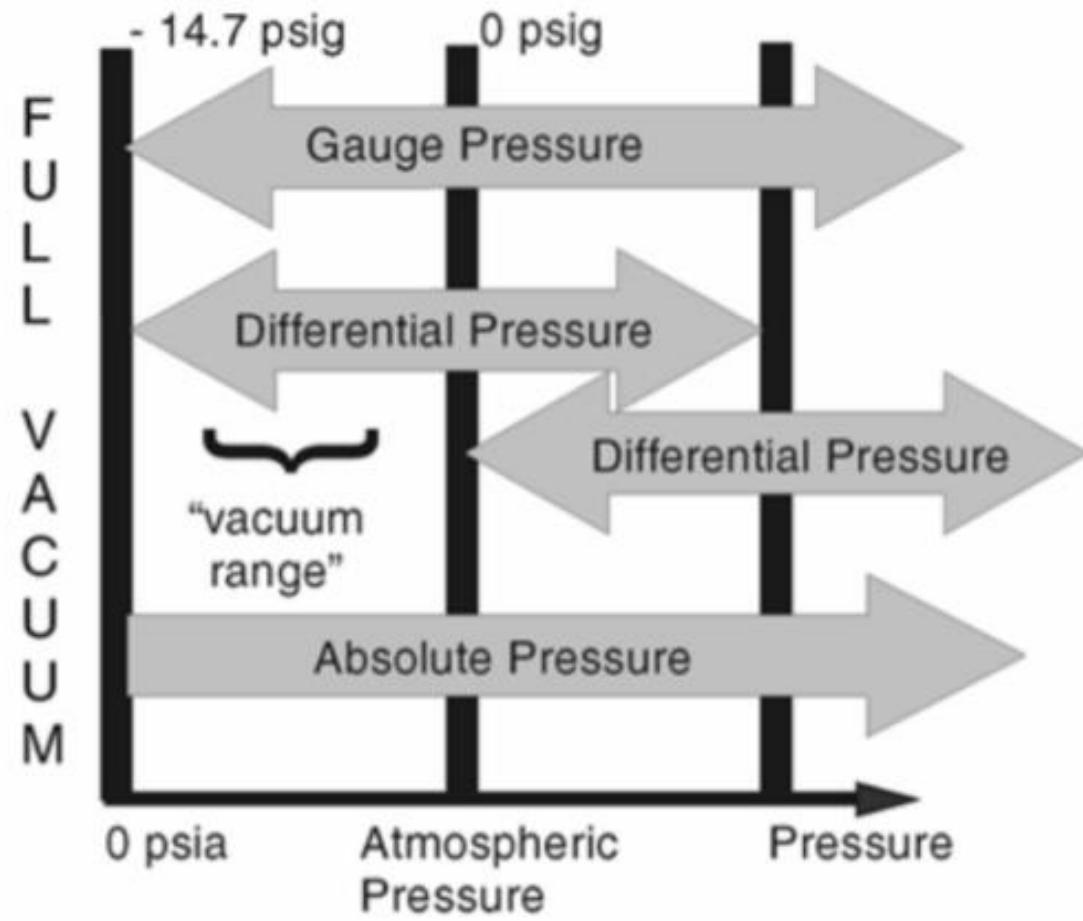
From \ To	Pa ( $\text{N/m}^2$ )	kPa	MPa	bar	mbar	mm H <sub>2</sub> O	kg/cm <sup>2</sup>	atm	inch Hg	mm Hg	inch H <sub>2</sub> O	psi
Pa ( $\text{N/m}^2$ )	1	$10^3$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-2}$	0.1020	$1.020 \times 10^{-5}$	$9.869 \times 10^{-6}$	$2.953 \times 10^{-4}$	$7.501 \times 10^{-3}$	$4.016 \times 10^{-3}$	$1.451 \times 10^{-4}$
kPa	$10^3$	1	$10^{-3}$	$10^{-2}$	10	102.0	0.0102	$9.869 \times 10^{-3}$	0.2953	7.501	4.016	0.14505
MPa	$10^6$	$10^3$	1	10	$10^4$	$1.020 \times 10^5$	10.20	9.869	295.3	7501	4016	145.05
bar	$10^5$	100	0.1	1	$10^3$	$1.020 \times 10^4$	1.020	0.9869	29.530	750.1	401.6	14.505
mbar	100	0.1	$10^{-4}$	$10^{-3}$	1	10.20	$1.020 \times 10^{-3}$	$9.869 \times 10^{-4}$	0.0295	0.7501	0.4016	0.0145
mm H <sub>2</sub> O	9.807	$9.807 \times 10^3$	$9.807 \times 10^6$	$9.807 \times 10^5$	$9.807 \times 10^2$	1	$10^4$	$9.678 \times 10^5$	$2.891 \times 10^3$	0.0734	0.0394	$1.4224 \times 10^3$
kg/cm <sup>2</sup>	$9.807 \times 10^4$	98.07	0.0981	0.98077	980.7	$10^4$	1	0.9678	28.910	734.2	393.7	14.224
atm	$1.013 \times 10^5$	101.3	0.1013	1.013	1013	$1.033 \times 10^4$	1.033	1	29.922	760.1	406.7	14.68
inch Hg	$3.386 \times 10^3$	3.386	$3.386 \times 10^3$	0.0339	33.864	345.9	0.0346	0.0334	1	25.40	13.62	0.4912
mm Hg	133.3	0.1333	$1.333 \times 10^4$	$1.333 \times 10^3$	1.333	13.62	$1.362 \times 10^3$	$1.316 \times 10^3$	0.0394	1	0.5362	0.0193
inch H <sub>2</sub> O	249.1	0.2491	$2.491 \times 10^4$	$2.491 \times 10^3$	2.491	25.40	$2.54 \times 10^3$	$2.458 \times 10^3$	0.0734	1.8650	1	0.0361
psi	$6.895 \times 10^3$	6.895	$6.895 \times 10^3$	0.0689	68.948	704.3	0.0704	0.0680	2.036	51.71	27.73	1

# ¿Qué es la Presión Absoluta, Diferencial y Relativa?

- La Presión Absoluta es la presión medida en referencia al vacío. Es siempre positiva.
- La Presión Relativa es la que se mide en referencia con la Presión Atmosférica.
- La Presión Diferencial es la que se mide en referencia a una Presión Arbitraria



# ¿Qué es la Presión Absoluta, Diferencial y Relativa?



Atmospheric pressure =  $14.7 \text{ psia} \pm 0.3 \text{ psi}$

# Tecnologías de sensores de presión

Podemos agrupar las tecnologías de sensado en dos grandes grupos, de acuerdo al principio de funcionamiento en el que se basan:

Mecánicos:

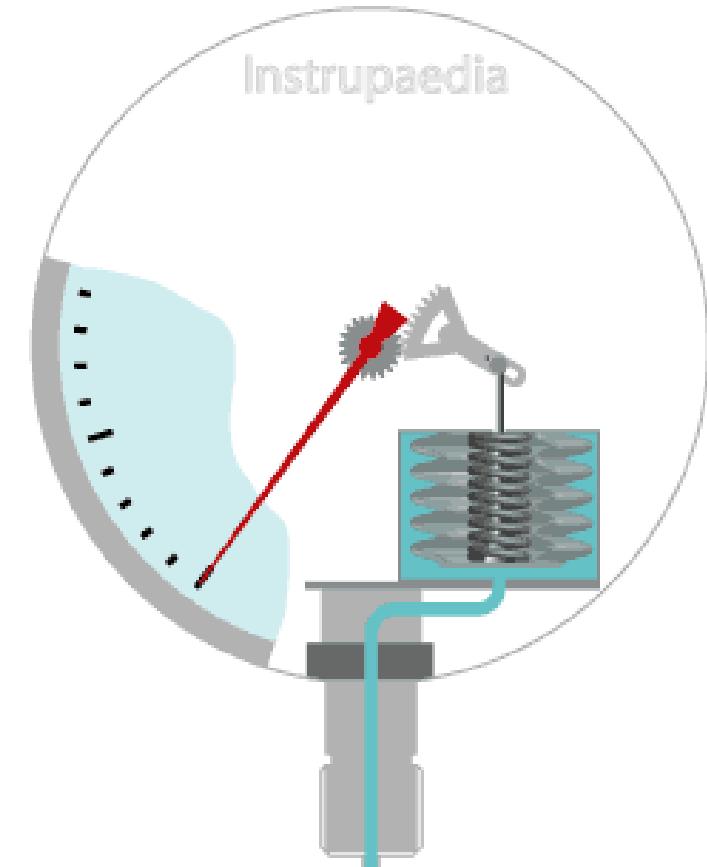
- Fuelle
- Tubo Bourdon
- Diafragma

Eléctricos:

- Capacitivos
- Resistivos
- Otros

# Sensores de presión tipo fuelle

- Consiste en un fuelle fabricado con tubos sin costura de paredes delgadas prensados hidráulicamente.
- Al aplicarse presión, el fuelle se comprimirá y de desplazará hacia arriba, transmitiendo mecánicamente el valor de presión medido.
- El fuelle posee varias convoluciones: a mayor cantidad, mayor rango de medición.



# Sensores de presión tipo fuelle

Ventajas:

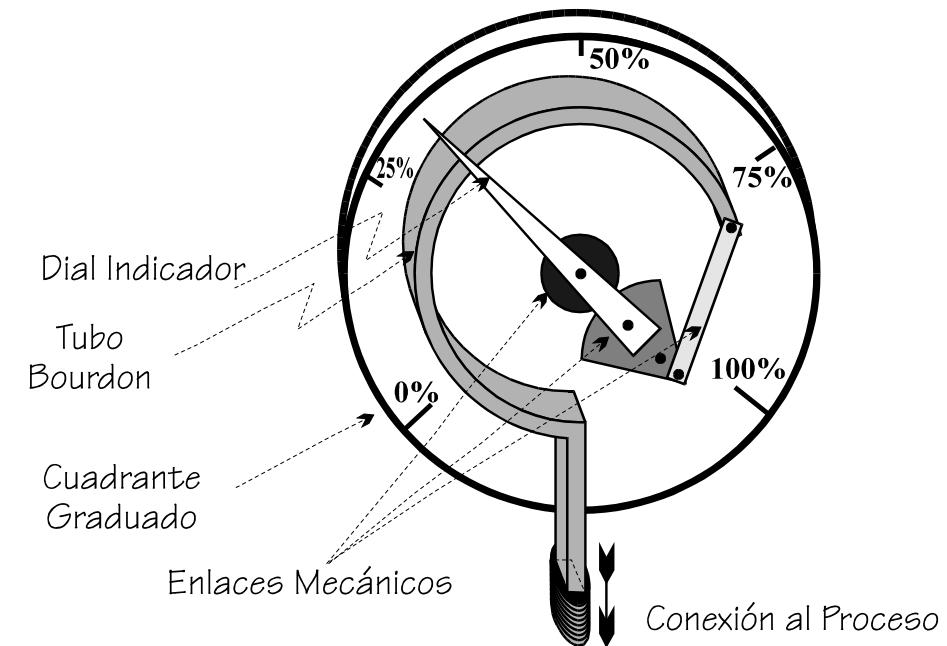
- Soportan fuerzas elevadas.
- Permite medir presiones absolutas y diferenciales.

Desventajas:

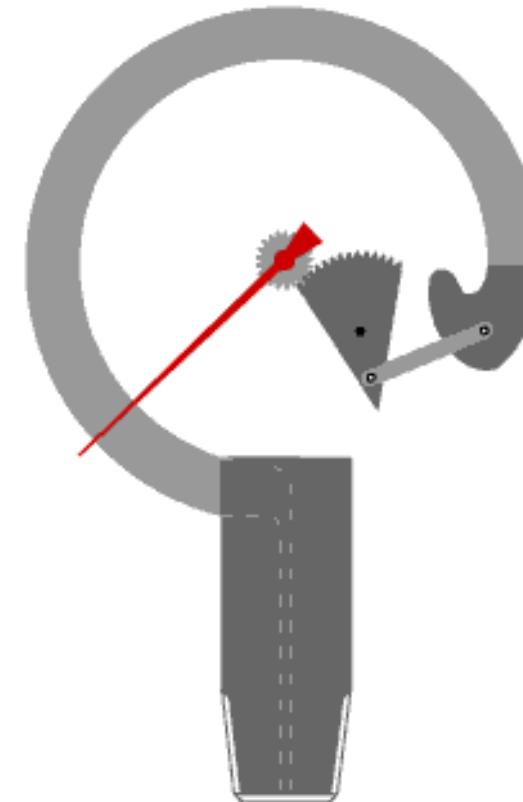
- Diseñados para medición de presiones bajas.
- Sensibles a cambios de temperatura, endurecimiento, fricción y vibraciones.

# Sensores de presión tubo Bourdon

- Los sensores Bourdon consisten generalmente en tubos curvados (tipo C) en arco de sección oval.
- A medida que se aplica presión al interior del tubo, éste tiende a enderezarse.
- El trayecto del movimiento se transmite a un mecanismo y es la medida de presión que se indica mediante una aguja.
- Si un tubo Bourdon se somete a presión superior a la de su límite y a presiones mayores que las que actuó sobre él, puede producirse una deformación permanente



# Sensores de presión tubo Bourdon



# Sensores de presión tubo Bourdon

Ventajas:

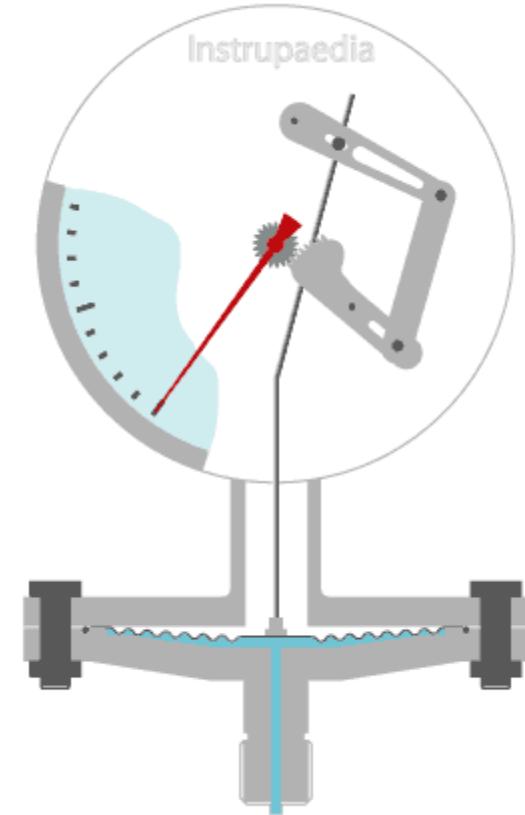
- Bajo costo.
- Construcción sencilla.
- Amplios rangos de medición (hasta 7000 bar).

Desventajas:

- Poco precisos.
- Sensibles a shocks y vibraciones.

# Sensores de presión de diafragma

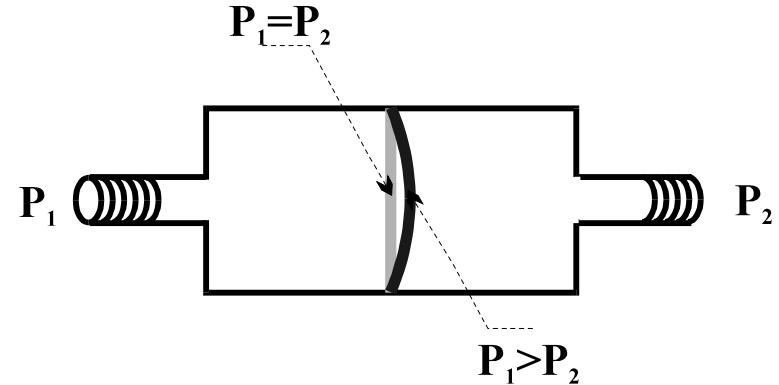
- Este sensor posee dos cámaras separadas por una membrana o diafragma flexible, típicamente hecha de una lámina delgada de acero, sensible a pequeños cambios de presión.
- El diafragma se vincula mecánicamente al mecanismo de transmisión, el cual amplifica las pequeñas deflexiones del diafragma para su correcta visualización.



# Sensores de presión de diafragma

## Principio de funcionamiento

$$F = (P_2 - P_1) A$$



$$M = \frac{\text{Esfuerzo}}{\text{Deformación}} = \frac{F/s}{\Delta x/l}$$

$$\Delta x = \frac{P_2 - P_1}{S/A \ M/l} = k \Delta P$$

# Comparación tubo Bourdon y diafragma



# Sensores de presión de diafragma

Ventajas:

- Pequeño desplazamiento.
- Posibilidad de recubrimientos (ej. Teflón).
- Protección ante sobrecargas.

Desventajas:

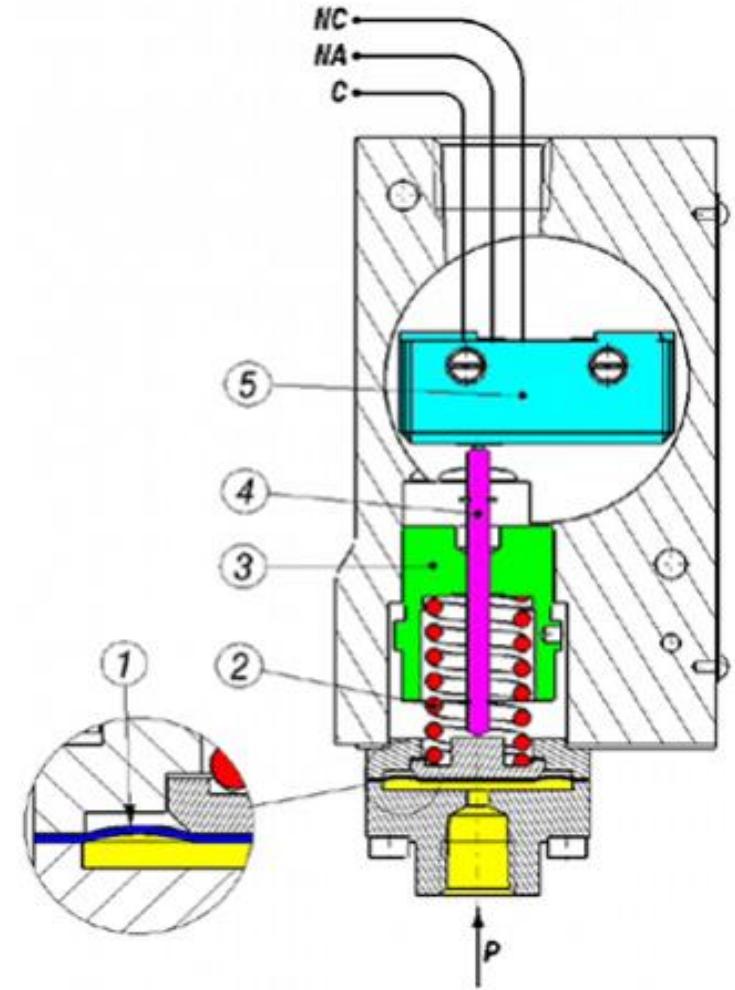
- Mantenimiento complejo.
- Rangos limitados de presión (típicamente menos de 100 bar)

# Evolución de sensores de presión

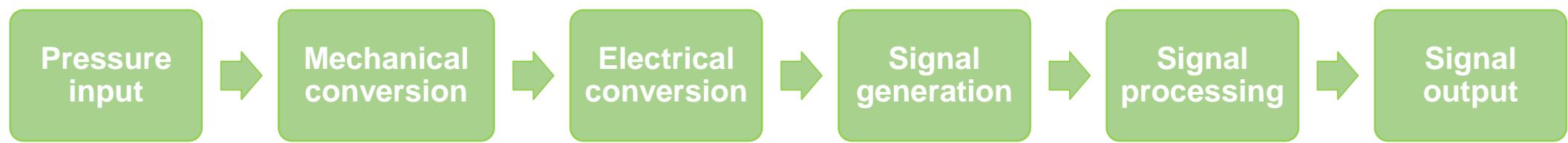


# Presostatos

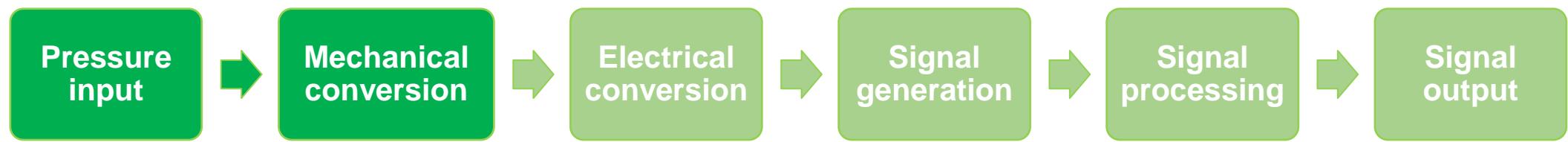
- El Presostato es un interruptor de presión que cierra o abre un circuito eléctrico en función de la presión.
- La presión que actúa sobre el sensor ejerce un empuje sobre el actuador, que queda contrarrestada por la fuerza del resorte.
- Cuando el empuje alcanza el valor necesario para vencer la fuerza producida por el resorte, el actuador hace un pequeño desplazamiento accionando el switch.
- Cuando la presión vuelve a los valores anteriores al de intervención, acciona nuevamente el switch, restaurando automáticamente el circuito a la configuración original.



# Conversión de presión a señal eléctrica

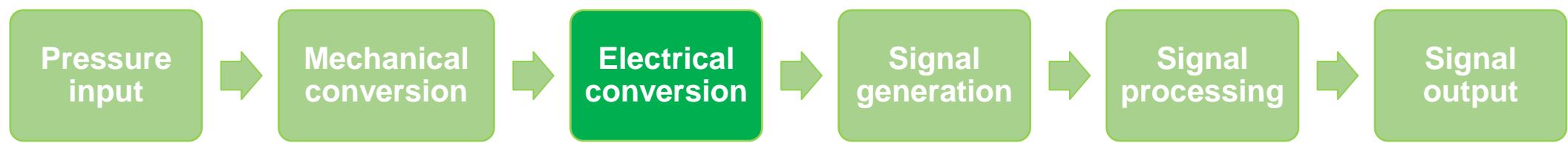


# Conversión de presión a señal eléctrica



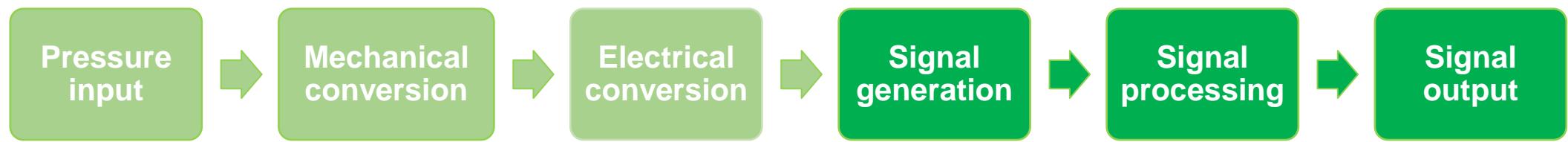
La presión causa una deformación mecánica en el elemento sensor, como por ejemplo una membrana o galga extensométrica.

# Conversión de presión a señal eléctrica



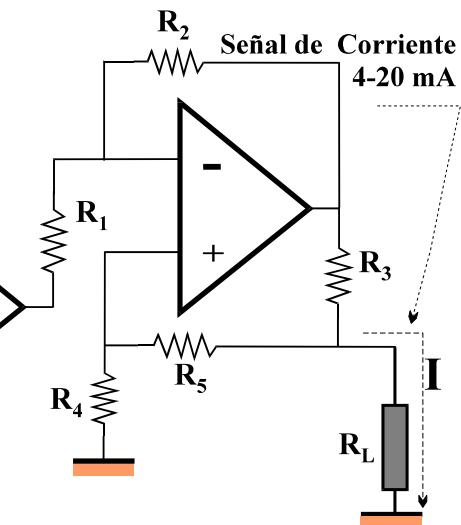
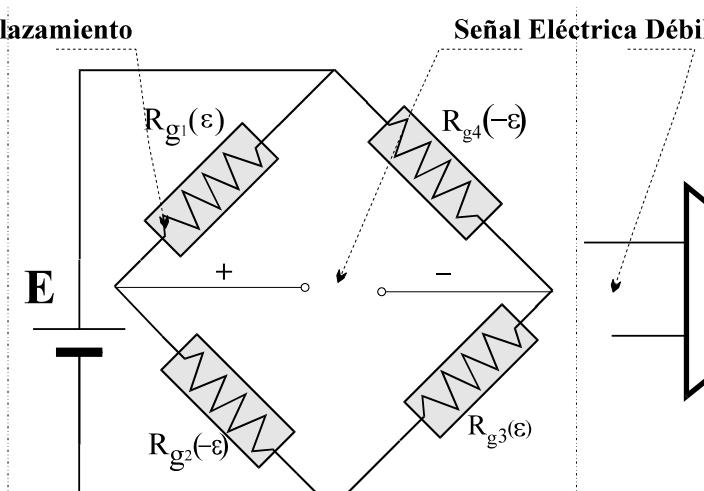
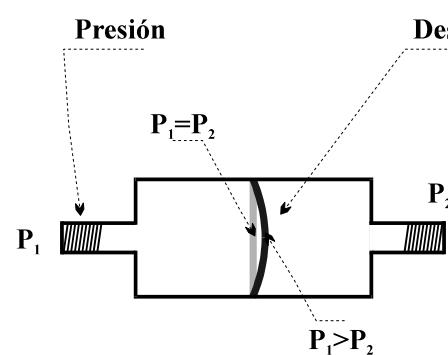
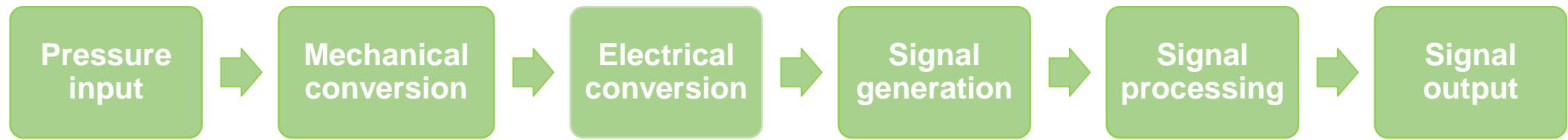
- Esta deformación se convierte en una señal eléctrica mediante el uso de diversas técnicas de medición, que consisten en utilizar el efecto que dicha deformación tiene en el cambio de alguna variable física:
  - Resistencia.
  - Capacidad.
  - Inductancia.

# Conversión de presión a señal eléctrica



La señal eléctrica se amplifica, linealiza y se compensa térmicamente.

# Conversión de presión a señal eléctrica



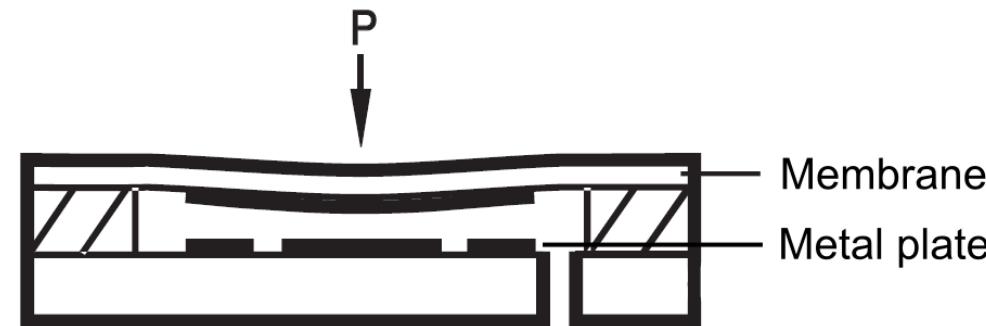
SENSOR

CONVERTIDOR

ACONDICIONADOR DE SEÑALES

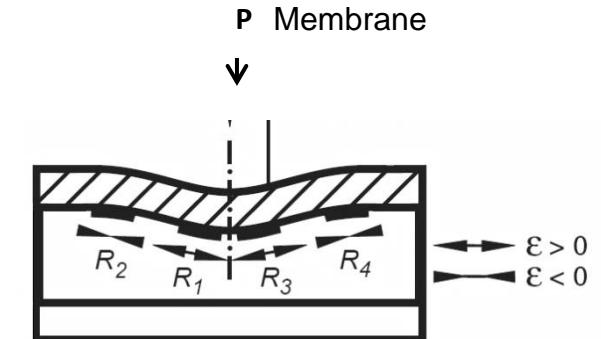
# Sensores de presión capacitivos

- La membrana y una placa metálica forman un capacitor.
- Una deformación en la membrana cambia la distancia entre las placas del capacitor y, por ende, el valor de capacidad.
- Esta tecnología es muy precisa.



# Sensores de presión resistivos

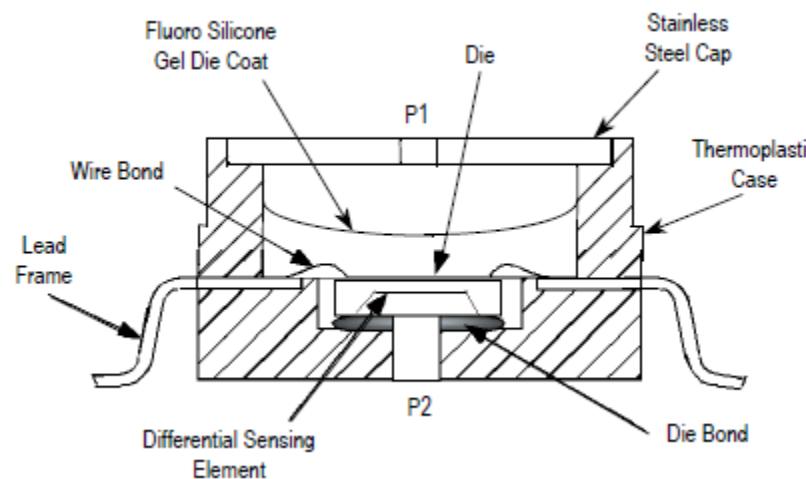
- Los sensores de presión resistivos utilizan una galga extensométrica.
- Una deformación en la membrana causa un cambio en la resistencia eléctrica.
- Este cambio se mide mediante un puente de Wheatstone.
- Familias:
  - Piezorresistiva
  - Película delgada
  - Película gruesa



# Sensores de presión resistivos

## Tecnología piezorresistiva

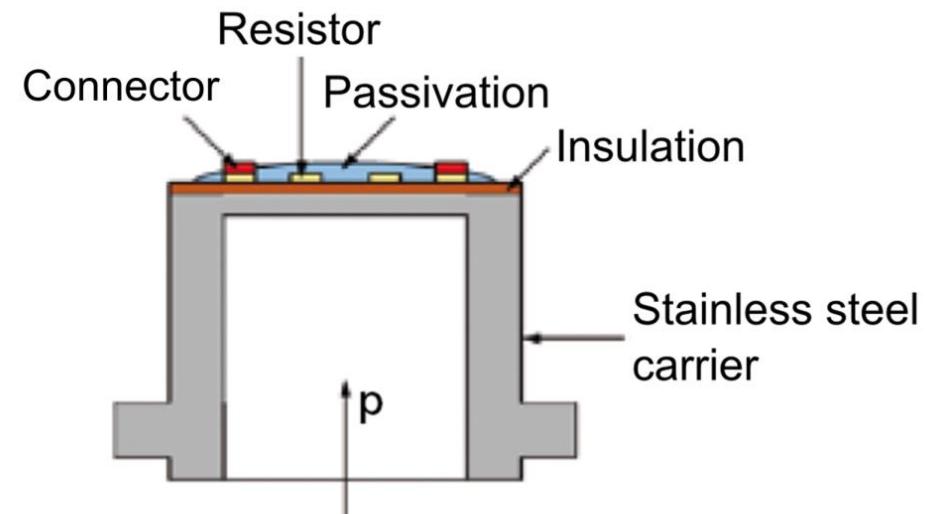
- Se basa en un semiconductor de silicona piezorresistivo.
- El semiconductor está protegido por una membrana de acero inoxidable.
- La presión se transfiere indirectamente vía un líquido (normalmente aceite de silicona).



# Sensores de presión resistivos

## Tecnología de película delgada

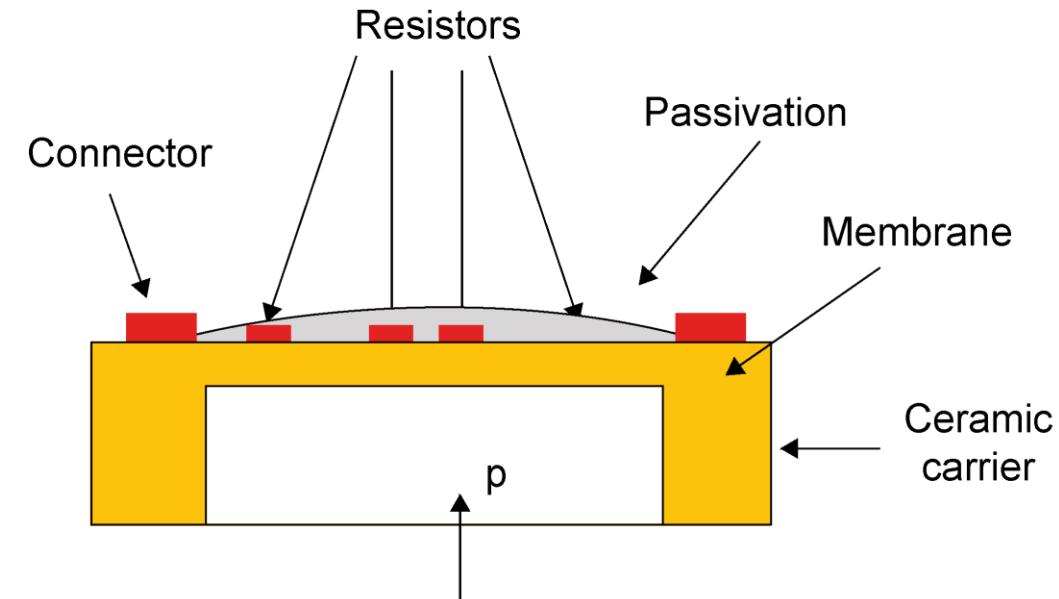
- Celda de medición con una capa de acero inoxidable.
- Las resistencias están colocadas en la membrana usando un proceso de litografía.



# Sensores de presión resistivos

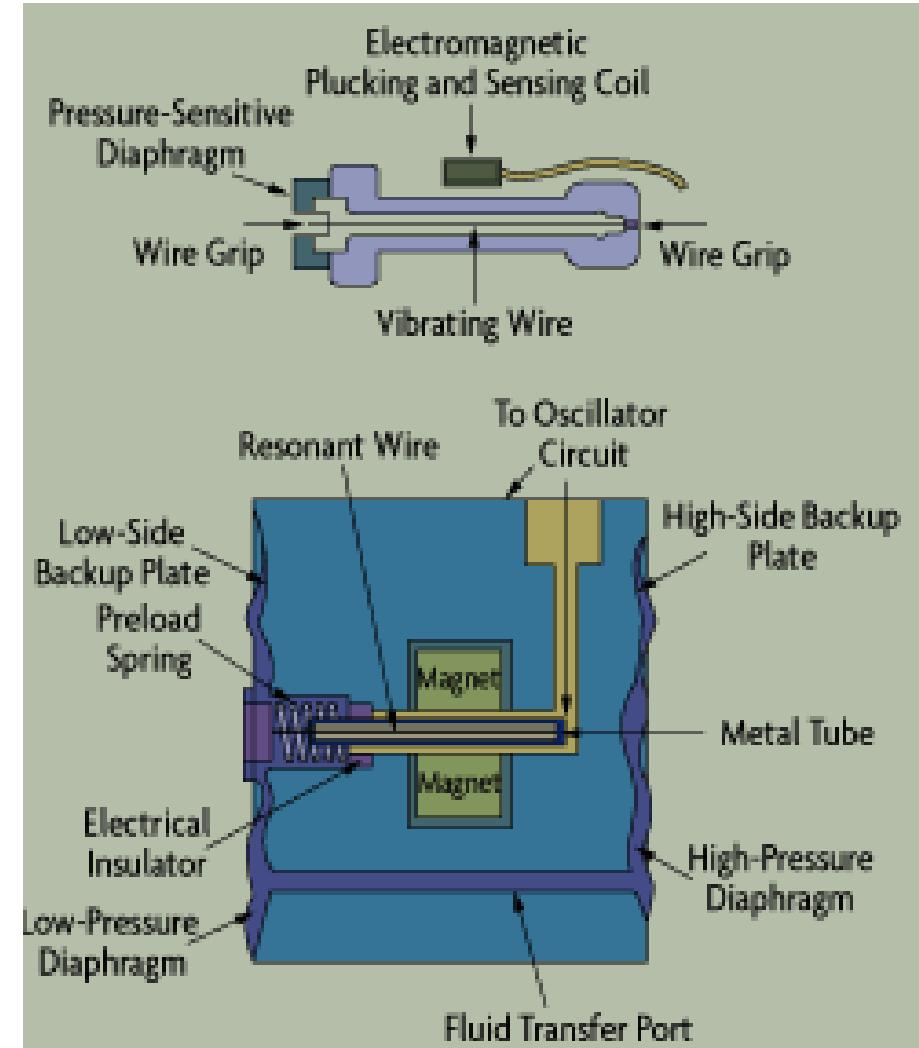
## Tecnología de membrana gruesa

- Celda de medición con una capa cerámica.
- Las resistencias están colocadas en la membrana usando un proceso de recubrimiento grueso.
- Las celdas de medición con capa cerámica presentan estabilidad muy duradera y resistencia a la corrosión.
- No es necesaria la transferencia de fluidos.



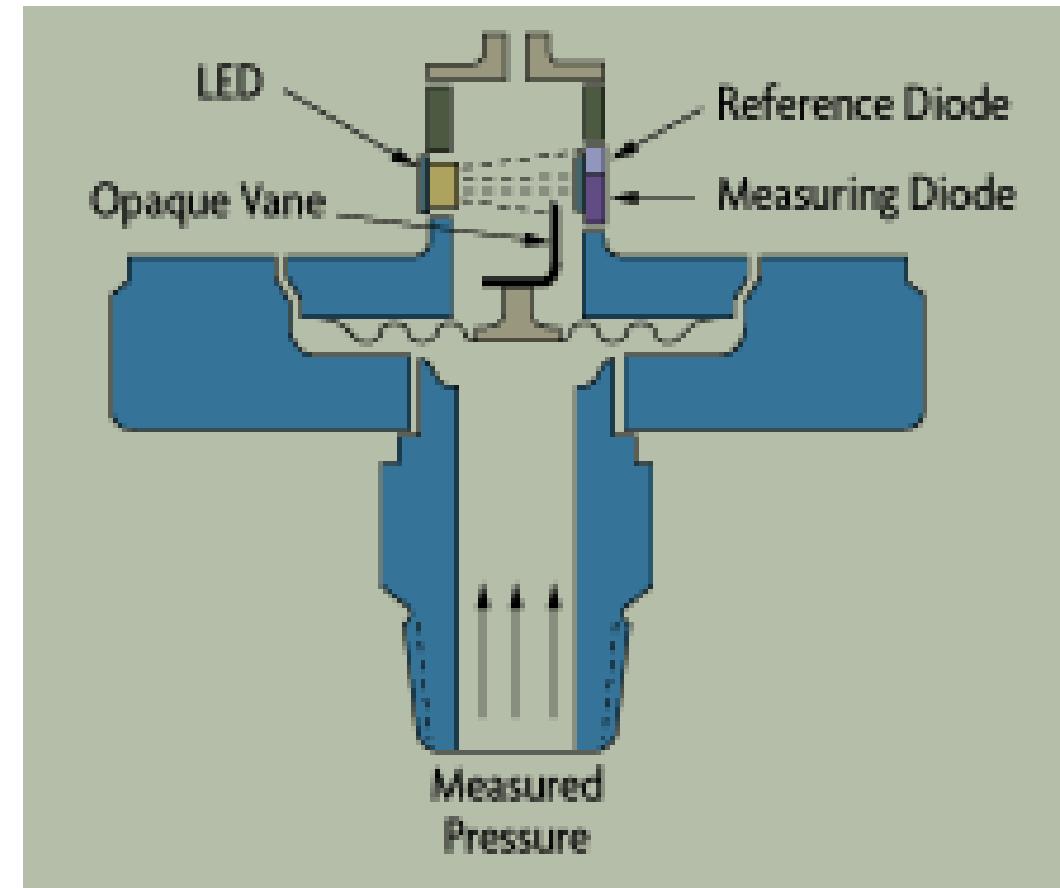
# Sensores de presión de alambre resonante

- Consiste de un alambre firme en un extremo estático y el otro extremo vinculado al diafragma. Un oscilador hace resonar al alambre en su frecuencia de resonancia. El alambre se comprimirá o estirará según la presión aplicada en el diafragma, lo cual modificará su frecuencia de resonancia.
- Útil para presiones muy bajas.
- Salida digital directa.
- Sensible a cambios de temperatura, shocks y vibraciones
- Salida no lineal.



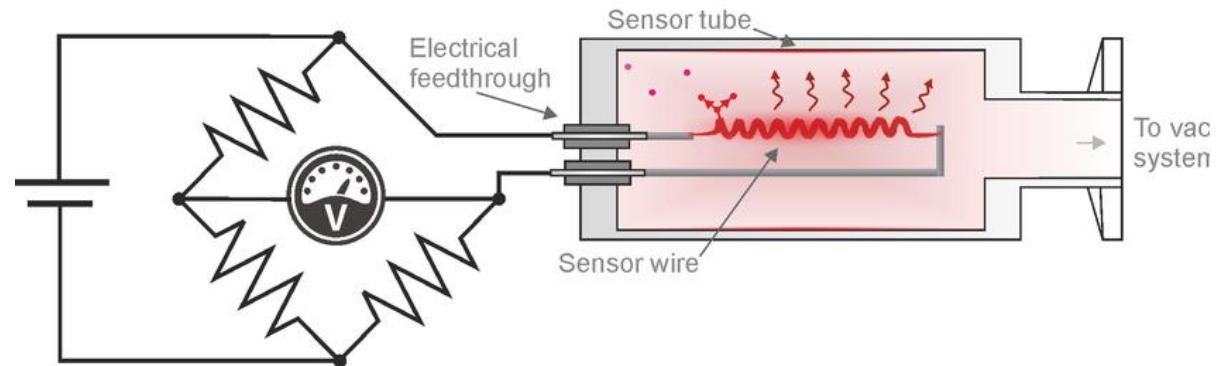
# Sensores de presión de conversión óptica

- Se basan en un principio de emisión fotoeléctrica, cuyo haz se ve perturbado (intensidad, frecuencia, fase o polarización) por efecto de la presión.
- Inmune a cambios de temperatura (Diodos emisor, sensor y de referencia afectados en igual medida).
- Errores de histéresis y repetibilidad casi nulos
- Bajo mantenimiento.



# Sensores de presión térmicos

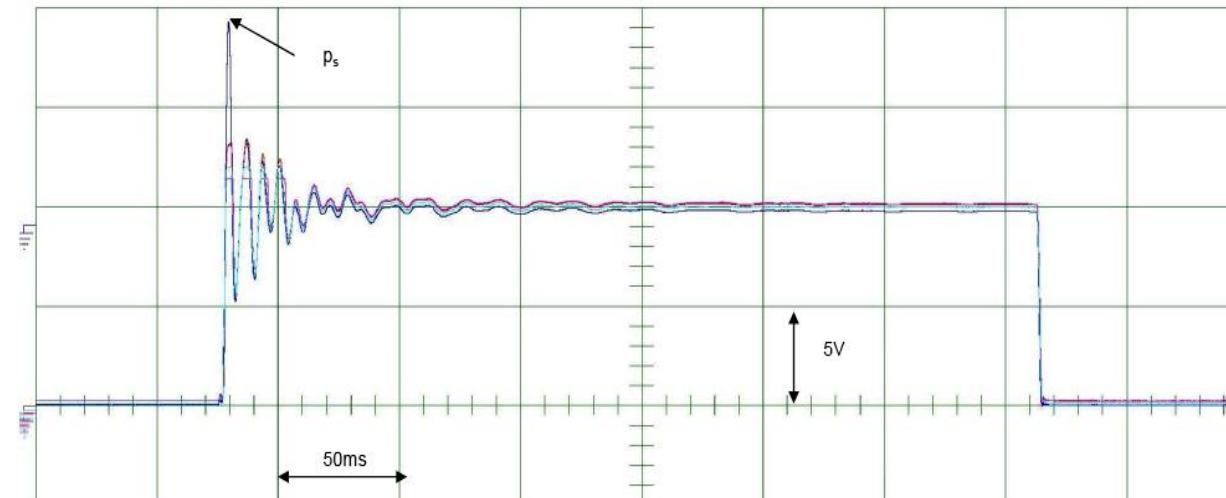
- Miden la presión a partir de los cambios en la conductividad térmica de un gas que se producen como resultado de variaciones en la densidad.
- Sensor más popular es el que utiliza una galga Pirani para medir presiones de vacío.
- Existen versiones modernas basados en un Pirani tipo MEMS (utiliza un resistencia sobre un semiconductor, en lugar de filamento).



# Parámetros característicos de un sensor de presión

## Picos de presión

En aplicaciones hidráulicas pueden existir picos de alta presión, por ejemplo los causados por válvulas de switcheo o cavitación. Para soportar estos picos de presión, los sensores cuentan con un rango de sobrecarga extendido y una presión de ruptura.

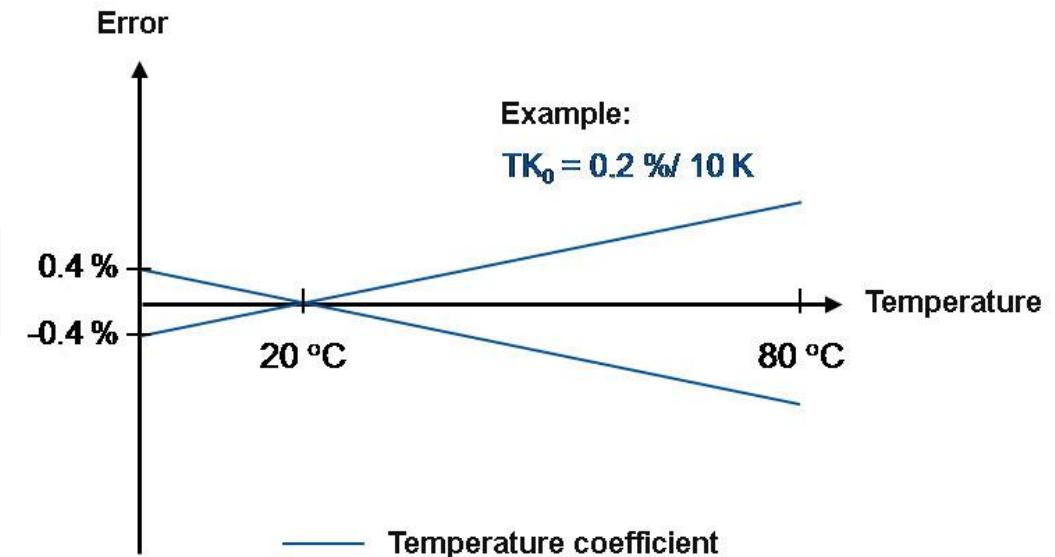


# Parámetros característicos de un sensor de presión

## Deriva térmica

Normalmente expuesto en hojas de datos como TC (Temperature coefficient).

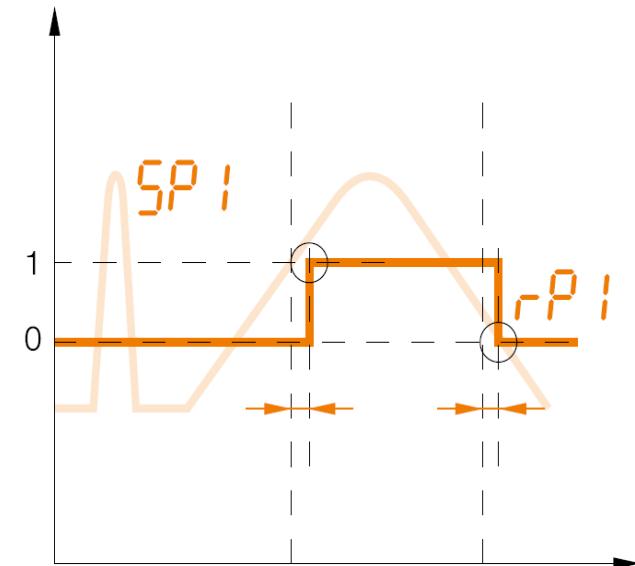
Temperature coefficients (TEMPCO) in the temperature range -20...80° C (in % of the span per 10 K)		
Greatest TEMPCO of the zero point		0.2
Greatest TEMPCO of the span		0.2
Kompenzierter Temperaturbereich °C 0 ... +80 Erweiterte Temperaturbereiche auf Anfrage.		
Temperaturkoeffizienten im kompensierten Temperaturbereich ■ Mittlerer TK des Nullpunktes ■ Mittlerer TK der Spanne		
% d. Spanne	Typisch $\leq \pm 0.2 / 10 \text{ K}$	max. $\leq \pm 0.4 / 10 \text{ K}$
% d. Spanne	Typisch $\leq \pm 0.15 / 10 \text{ K}$	max. $\leq \pm 0.25 / 10 \text{ K}$
Temperature coefficients within rated temperature range ■ Mean TC of zero ■ Mean TC of span		
	% of span	$\leq 0.2 / 10 \text{ K}$
	% of span	$\leq 0.2 / 10 \text{ K}$



# Parámetros característicos de un sensor de presión

## Retardo de tiempo

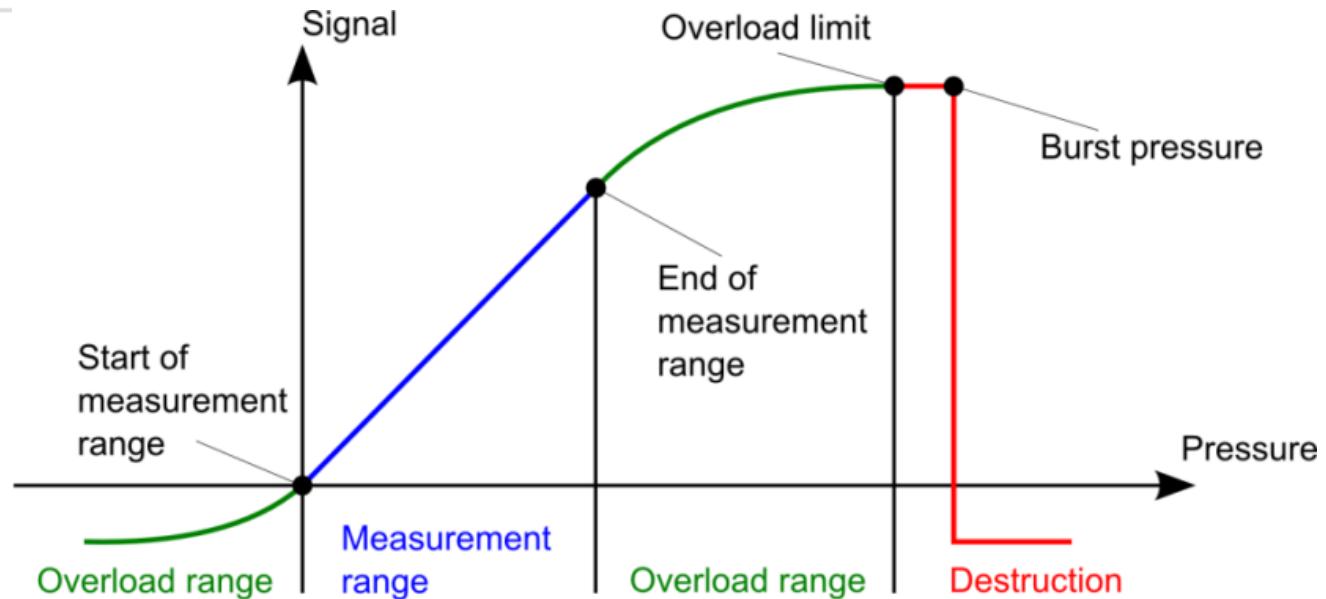
- Se utiliza para filtrar picos indeseados de presión que ocurren momentáneamente.
- El estado de la salida no cambia inmediatamente cuando el evento ocurre, sino cuando el evento ocurre, sino cuando este se mantiene (según se configure).
- Si el evento no se mantiene el tiempo programado el estado actual de la salida no cambia.



# Rangos de presión

## Range/Distance

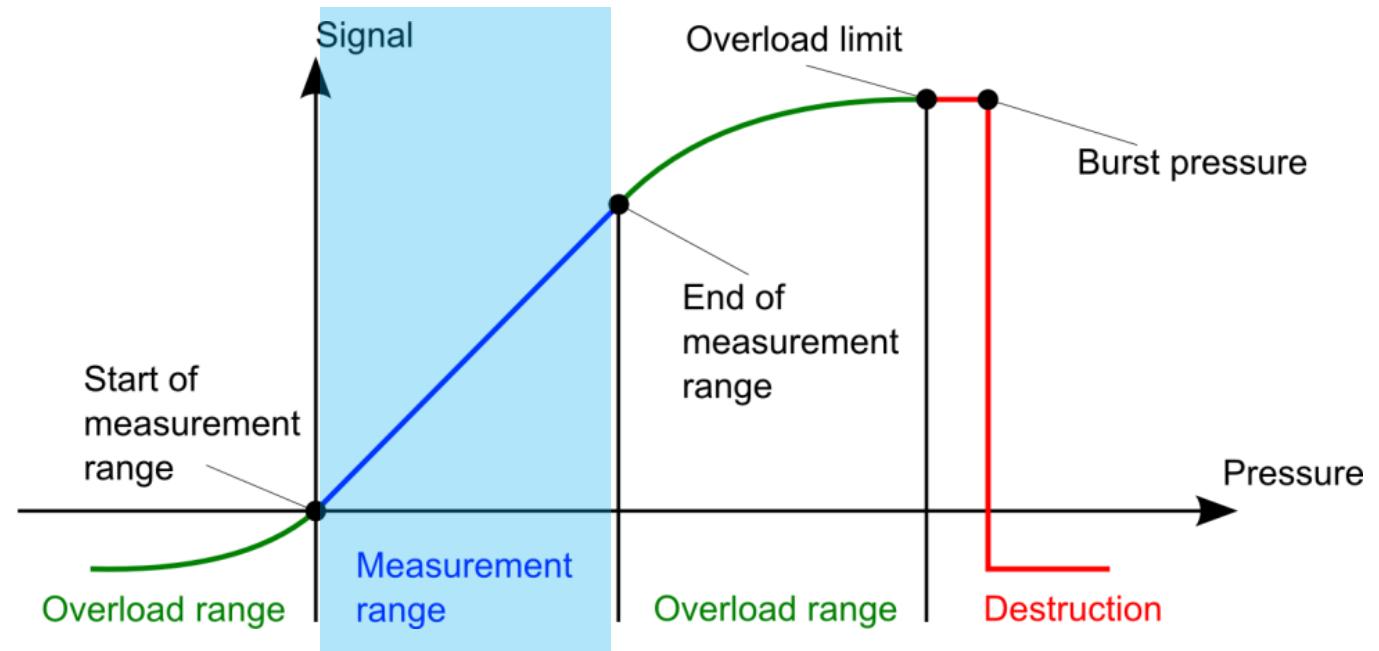
Accuracy	$\pm 0.5\% \text{ FSO BFSL}$
Burst pressure	35.00 bar
Long-term stability max.	0.3 % FSO/year
Measuring range	0...10 bar
Overload pressure	20 bar



# Rangos de presión

## Rango de medición

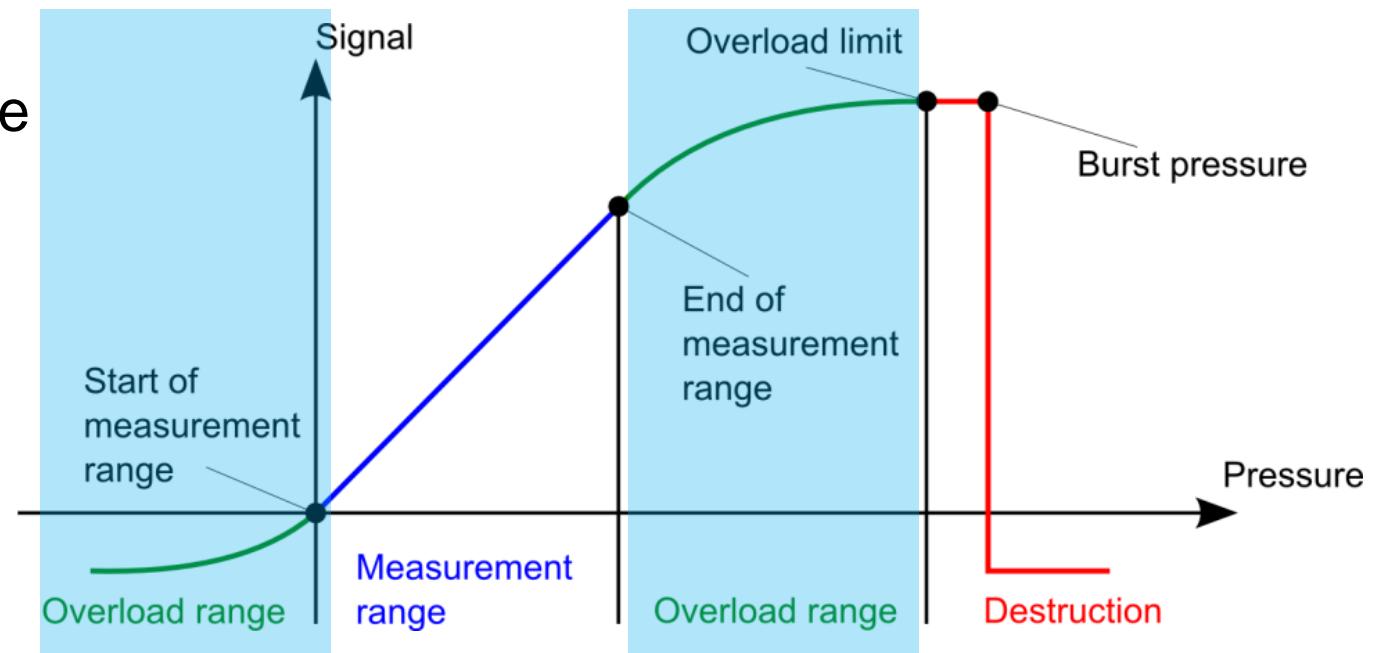
- Rango nominal de trabajo.
- El error de medición se especifica en este rango.



# Rangos de presión

## Rango de sobrecarga

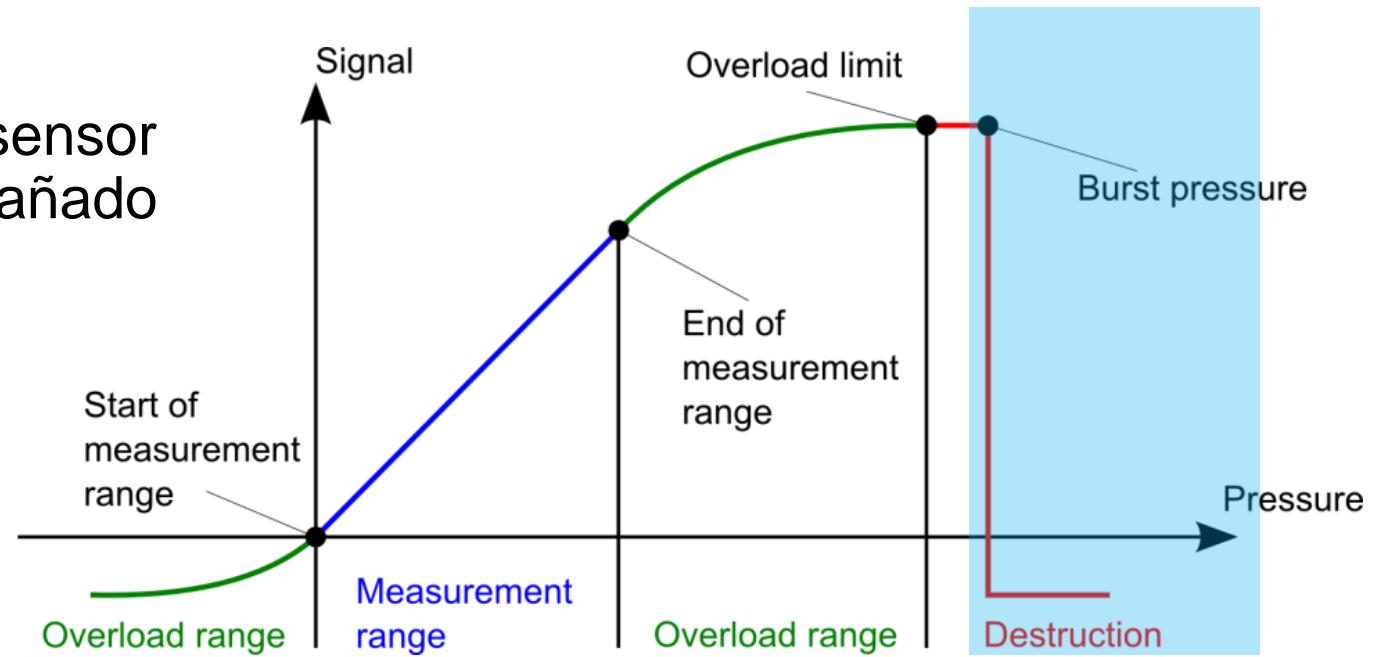
- No habrá daños permanentes en este rango.
- El error puede exceder el límite especificado.



# Rangos de presión

## Destrucción

Mas allá de este punto, el sensor se verá permanentemente dañado o mecánicamente destruido.



# Factores que afectan la medición de presión

- Reference accuracy (under reference conditions)
- Temperature effect on filling oil (oil expands, pushing on diaphragm)
- Ambient temperature effects (circuit effects)
- Linearity (how straight is the output-to-pressure line)
- Hysteresis (is the output “line” the same going up, as coming back down)
- Repeatability (how consistent is the output “line” on each pass)
- Long-term stability (zero drift)
- Static pressure effect (is the DP accuracy diff at diff line pressures)
- Mounting position effects (is the output affected by transmitter orientation)
- Vibration effect (is the measurement stable when the sensor is moving)
- Power supply effect (is the measurement stable when line voltage drops)
- RFI effect (is the measurement stable in the presence of hi freq fields)
- Total Performance (a.k.a. “Total Probable Error”- reference accuracy plus temperature effects plus static pressure effects)

# Factores que afectan el error en la medición de presión

- Reference Accuracy – Accuracy at reference ambient conditions, comprised of linearity, hysteresis and repeatability

+/- 0.075% of set span

- How good is the transmitter under ideal conditions?

- Total Performance – Accuracy over a range of ambient conditions, comprised of reference accuracy and ambient temperature effects

+/- 0.15% of URL

- How good is the transmitter under normal conditions?

- Long-term stability – Measurement of zero-point drift over several years

+/- 0.05% of URL per year

# Factores que afectan el error en la medición de presión

- Reference Accuracy – Accuracy at reference ambient conditions, comprised of linearity, hysteresis and repeatability

+/- 0.075% of set span

- How good is the transmitter under ideal conditions?

- Total Performance – Accuracy over a range of ambient conditions, comprised of reference accuracy and ambient temperature effects

+/- 0.15% of URL

- How good is the transmitter under normal conditions?

- Long-term stability – Measurement of zero-point drift over several years

+/- 0.05% of URL per year

# Error probable total (TPE)

$$\text{Total Probable Error} = \sqrt{\text{Error}_1^2 + \text{Error}_2^2 + \text{Error}_3^2 + \dots}$$

$$\text{TPE} = \sqrt{\text{Reference Accuracy}^2 + \text{Temperature Effect}^2 + \text{Static Pressure Effect}^2}$$

Total Probable Error = Total Performance

A better description of what the user will see, in the process

Example: Foxboro IGP10 doesn't specify TPE, so what is it?

Reference Accuracy = 0.06% of Span

Ambient Temperature Effect = 0.03% URL + 0.06% Span

Assume Span = URL, TD 1:1

## Error probable total (TPE): Ejemplo sensor real

- Model 3051S2T Classic, 150 psig sensor
  - Reference Accuracy = 0.055% of Span for TD < 10:1
  - Ambient Temperature Effect = 0.0125% URL + 0.0625% Span from 1:1 to 5:1
  - Assume TD 1:1

$$TPE = \sqrt{0.055^2 + 0.075^2} = 0.09\% \text{ of Span}$$

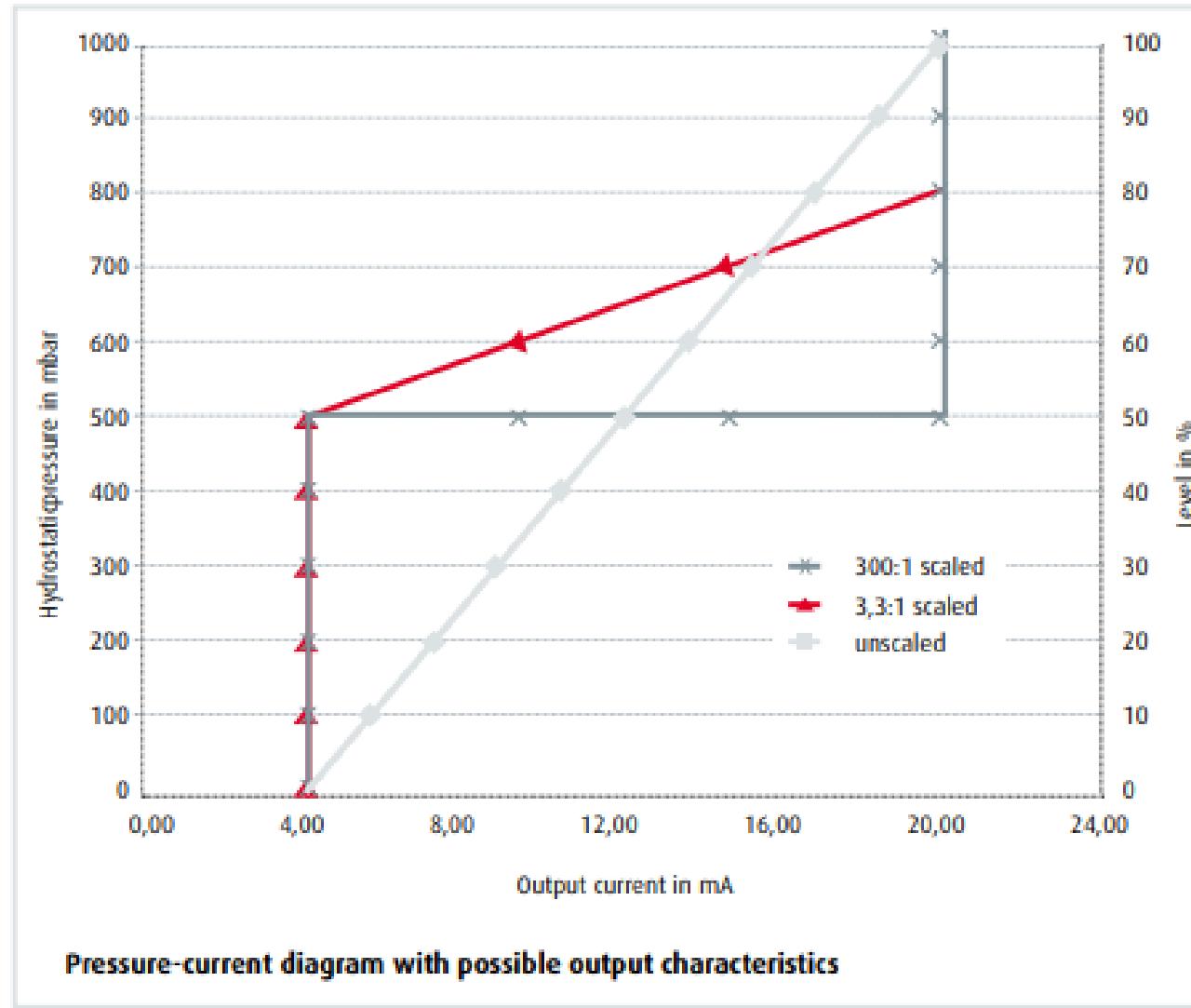
# Error por Turndown

Turndown is a term used to describe how much the Set Span has been reduced from the Full Scale Span of the transmitter sensor.

$$\begin{aligned}\text{Turndown} &= \text{FULL SCALE SPAN} / \text{SET SPAN} \\ &= (\text{URL} - \text{LRL}) / (\text{URV} - \text{LRV})\end{aligned}$$

Generally expressed as a ratio (e.g. 10:1)

# Error por Turndown



# Error por Turndown

Adjustable span transmitters are typically specified with a “maximum turndown ratio”...

For example:

URL = 150 psig      Max TD = 100:1

Minimum span = URL/Max TD = 1.5 psig

BEAR IN MIND: Turndown is a useful feature ... but it isn't “free”

What does turndown “cost” ?

When should turndown be used?

What benefit is a transmitter with 400:1 turndown?

# Error por Turndown: ejemplo

Example of Turndown 100:1

$$\text{Total Performance} = \sqrt{(\text{Accuracy})^2 + (\text{Temperature Coefficient})^2}$$

$$= \sqrt{(0.05\% \text{ of URV})^2 + ((0.08 \times \text{TD} + 0.05)\% \text{ of URV})^2}$$

$$\text{Total Performance} = 8.05\% \text{ of URV}$$

# Error por Turndown

Turndown is a useful feature ... but it isn't “free” ...  
Turndown

---

What does 100:1 turndown “cost” ?

- Increased sensitivity to thermal effects
- Increased non-linearity of output

# Error por Turndown

When should “high” turndown be used?

- As a **stop-gap measure** – replacing a failed transmitter with a transmitter in the storeroom ... while ordering a transmitter with the appropriate measuring range – **PERFECT**
  
- As a way to reduce the number of transmitter types in use in a facility by **standardizing** on fewer measuring ranges –

# Error por Turndown

## ■ Advantages

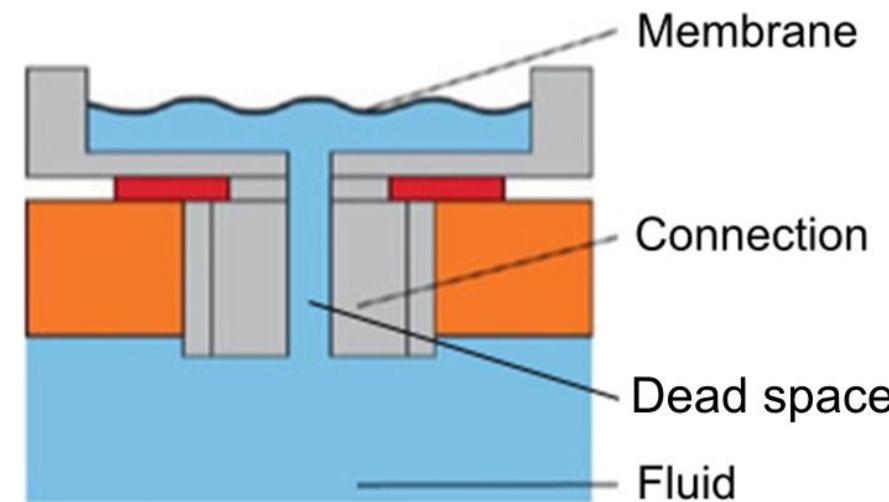
- Use one transmitter for several different ranges -> minimize inventory

## ■ Disadvantages

- Higher reference inaccuracies due to non-linearity
  - Ex. Reference Accuracy =  $0.0075\% \text{ of set span} \times TD$
- Increased sensitivity to thermal effects
  - Ex. Ambient Temperature Effects =  $(0.08 \times TD + 0.05)\% \text{ of URV}$

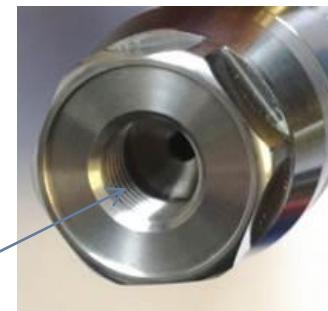
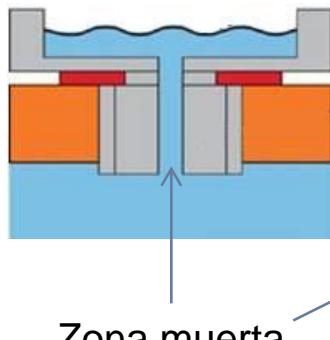
# Zona muerta de un sensor de presión

El espacio muerto o zona muerta es el área existente entre la membrana del sensor de presión y la presión del fluido a medir.

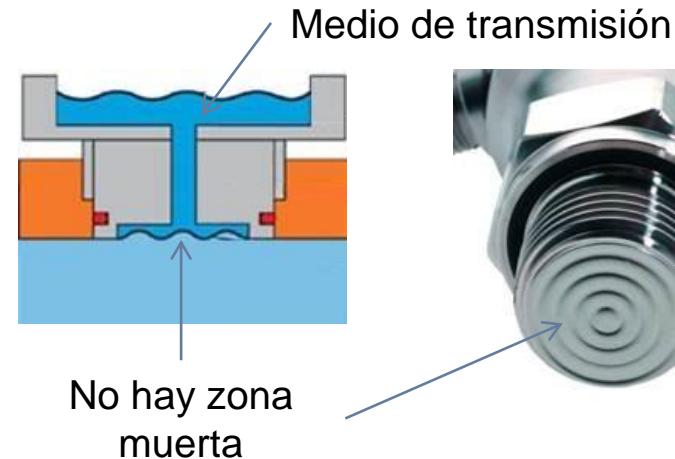


# Diferencia entre un sensor estándar y uno rasado

## Estándar



## Flush (Rasado)



Usado para fluidos habituales que no requieren proceso de limpieza.

Aplicaciones: sistemas hidráulicos, lubricación, sistemas de enfriamiento, etc.

Usado para medios viscosos o que contengan sólidos y que requieran procesos de hygiene. Aplicaciones: Alimentos y Bebidas, pinturas, etc.

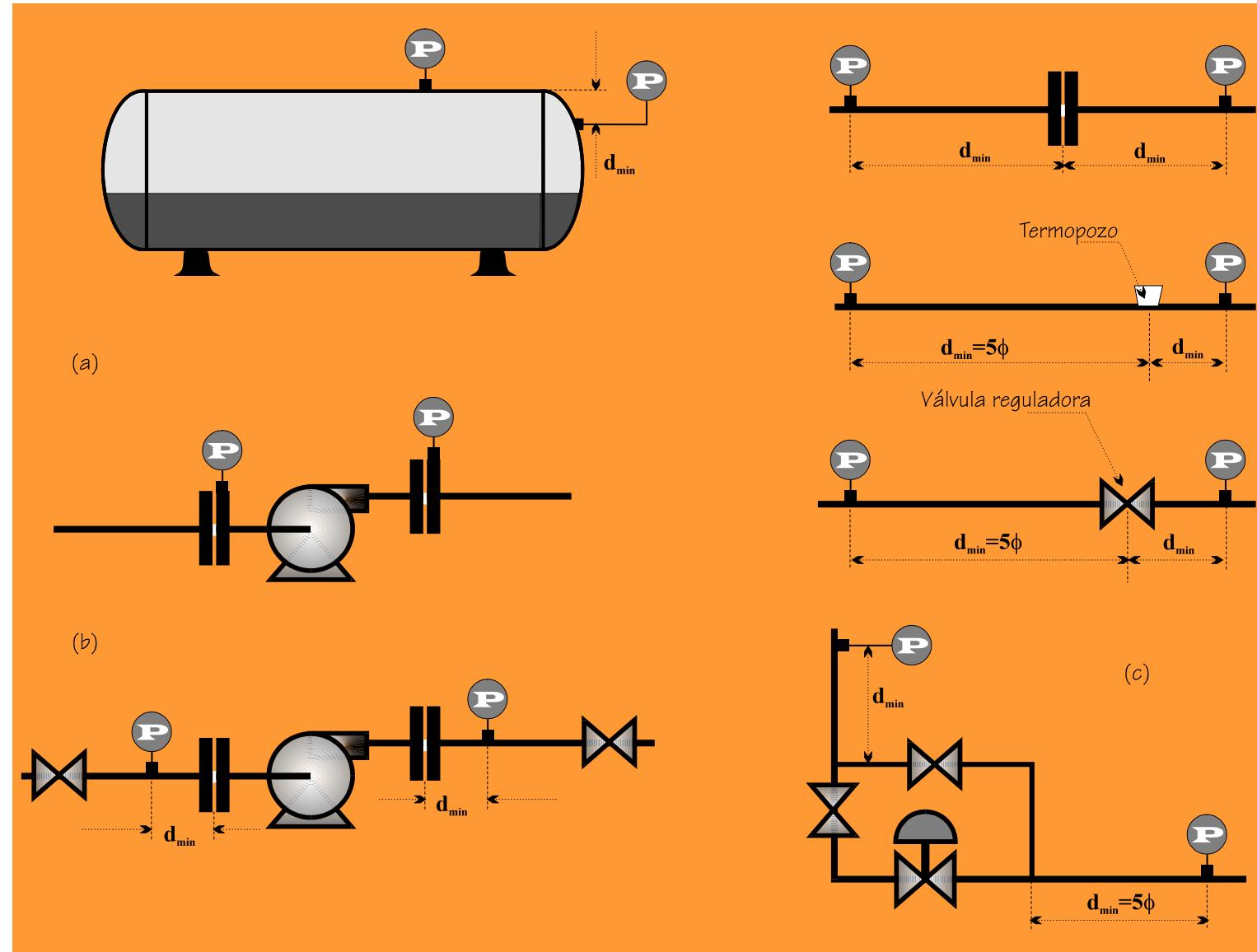
# Sensor de presión rasado



# Instalación mecánica

- **Instalación de sensores de presión de gas**
  - Evitar acumulación de líquidos y sedimentos.
  - Ubicar el sensor por encima de la conexión de proceso.
  - No es necesario compensar la elevación del sensor (en general).
- **Diseño de Cañerías e Instrumentación**
  - Debe satisfacer las especificaciones del diagrama P&I.
  - Debe considerarse el efecto de la presencia del sensor sobre el proceso.
  - Debe resultar legible y accesible para mantenimiento y reparación.

# Instalación mecánica



# Instalación mecánica

- Corrección por la altura del sensor
  - Montaje por debajo del punto de medición
    - Presión = Medición - Supresión de Cero =  $M - y r_{liq}$
  - Montaje por encima del punto de medición
    - Presión = Medición + Elevación =  $M + y r_{liq}$

- Cavitación

- Golpe de Ariete

- Accesorios de instalación

- Amortiguadores (Snubbers)
- Sellos
  - Mecánicos
  - Líquidos
  - Mixtos

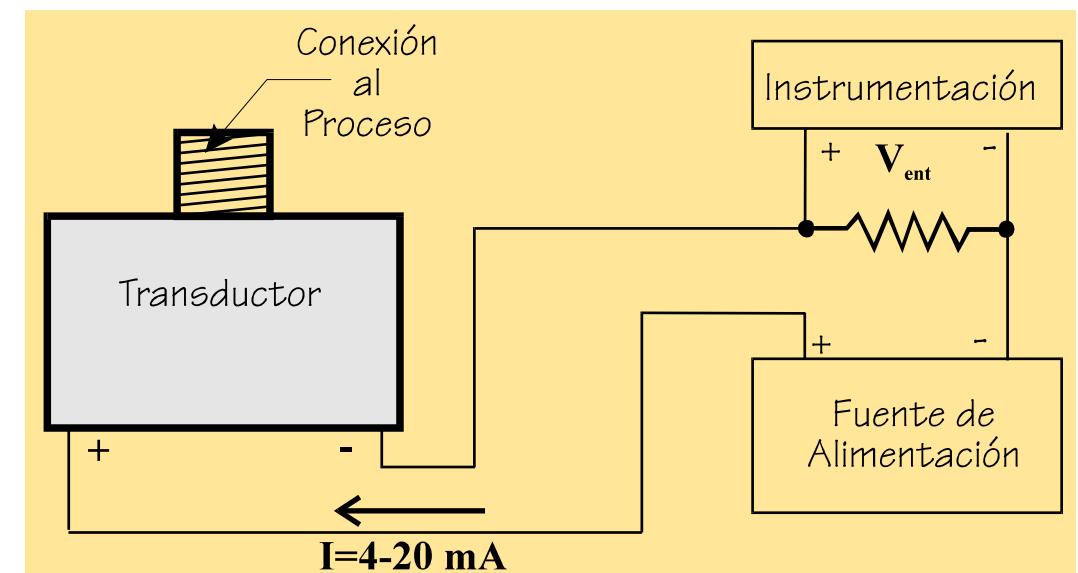
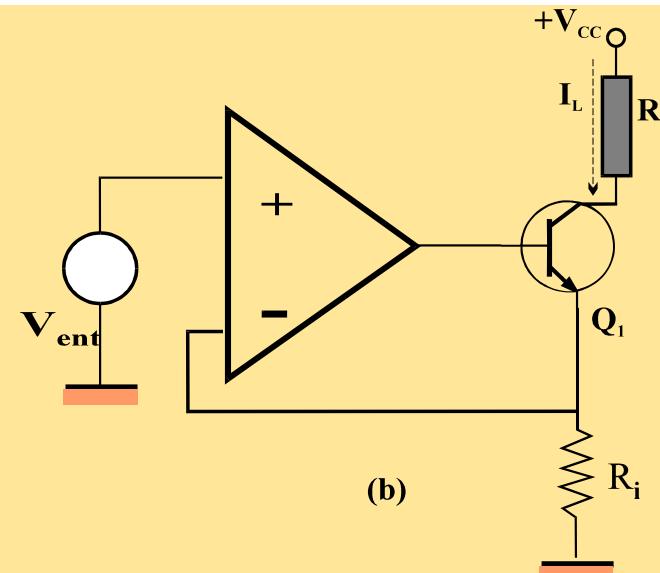
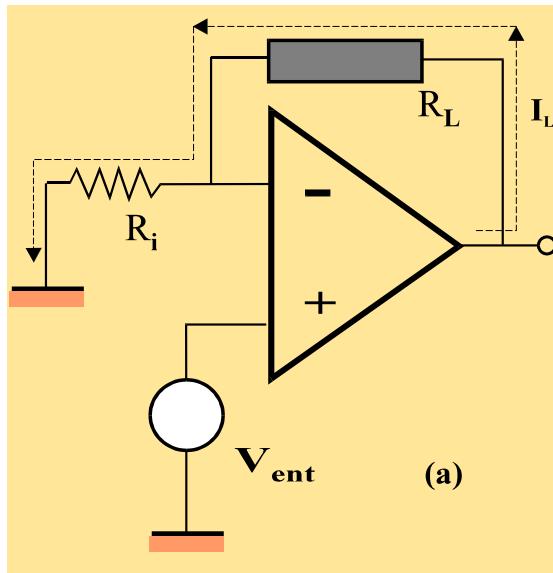


# Instalación de sensor de presión en medios críticos



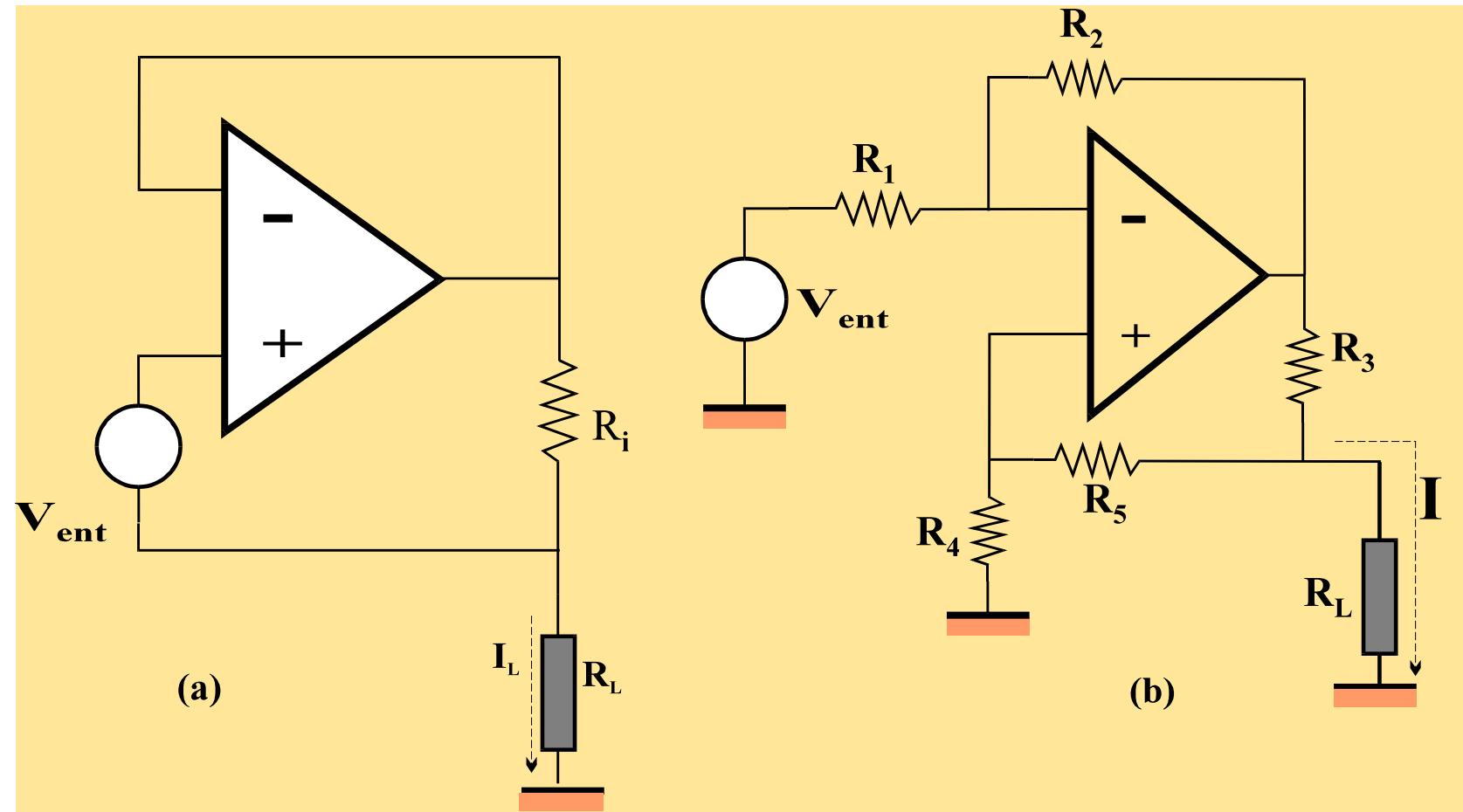
# Instalación eléctrica

- Conexión de un sensor con salida en mA a instrumentación con entrada de tensión:
  - $R = V / I = 5V / 20 \text{ mA} = 250\text{ohm}$
  - $V = R I = 250\text{ohm} * 4 \text{ mA} = 1\text{V}$
- Conexión de sensor con salida en tensión a instrumentación con entrada de 4-20 mA:



# Instalación eléctrica

Conexión de un sensor con salida en tensión a instrumentación con entrada de 4-20mA



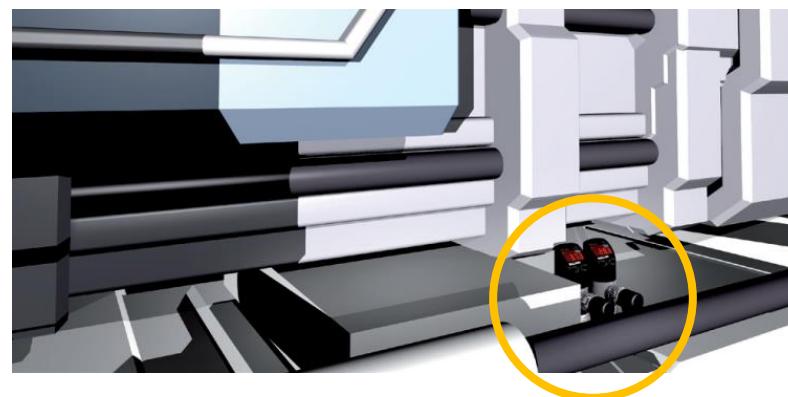
# Criterios de selección

- Requerimientos de presión
  - Rango de presiones previstas para el proceso
  - Presión de rotura del sensor
  - Exactitud
  - Repetibilidad
  - Error
  - Relativo/absoluto/diferencial.
- Rango de temperaturas de trabajo
- Compatibilidad química con el fluido de trabajo
- Tipo de tecnología utilizada para la medición/detección
- Tipo de salida eléctrica:
  - Analógica: Tensión/Corriente
  - Digital
  - Comunicación

# Criterios de selección (continuación)

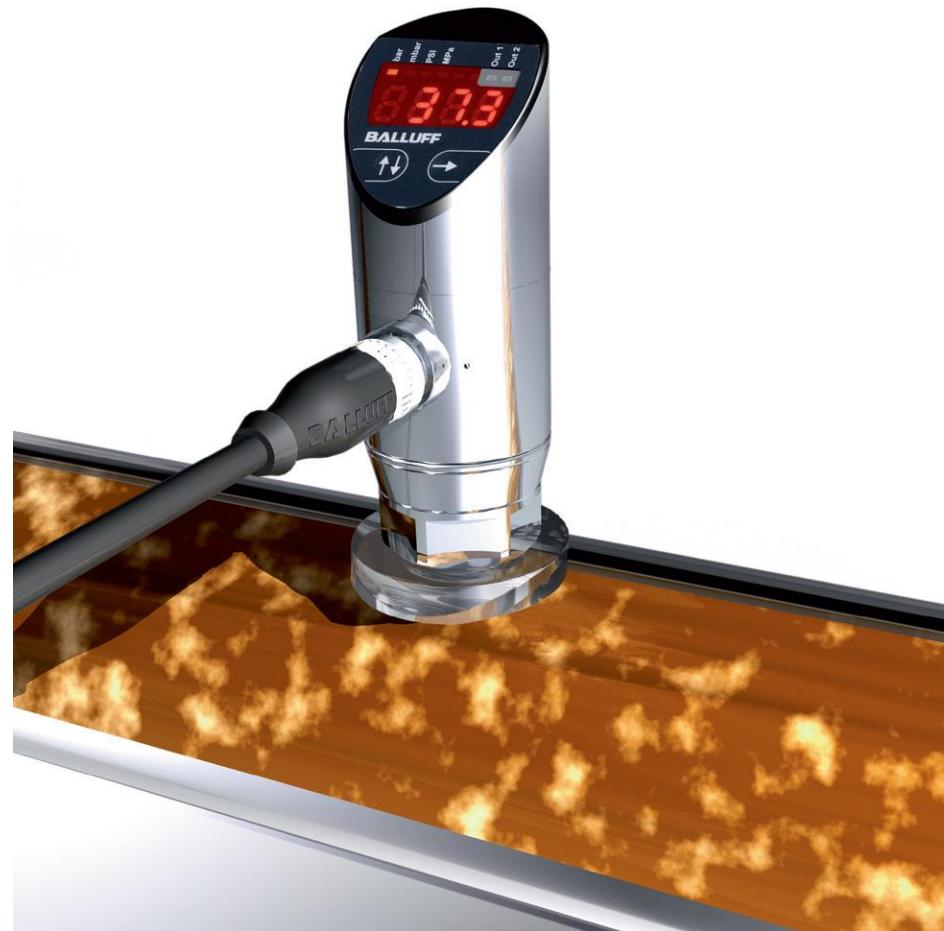
- Tipo de conexión al proceso:
  - Bridas
  - Conexión roscada
  - Terminación en cañería lisa
- Tipo de montaje.
- Tipo de interconexión eléctrica:
  - Bornes
  - Conector standard
  - Alambres simples, para soldar,
  - Terminales del tipo circuito integrado para su montaje sobre plaquetas de circuito impreso.
- Condiciones del ambiente: explosivo, con polvo, área higiénica, inflamable, etc.
- Grado de hermeticidad.

# Control de presión en inyectoras



# Medición de nivel

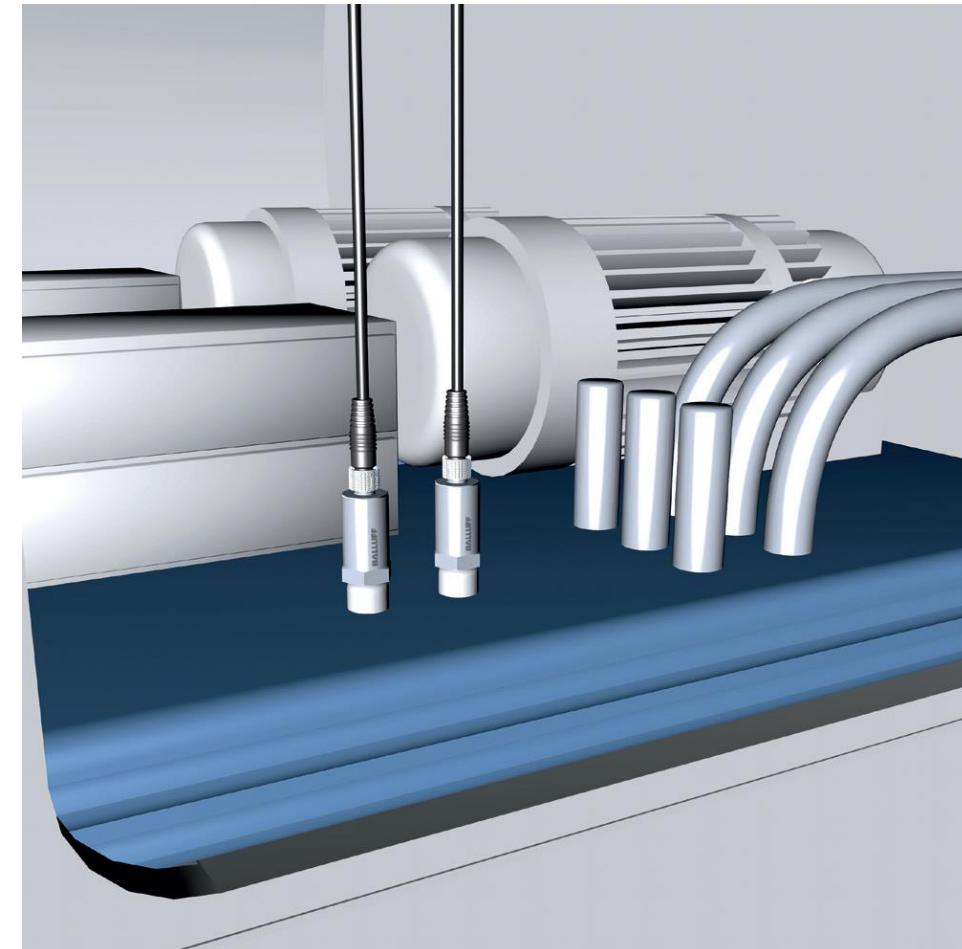
# Medición de presión de fluidos viscosos (pintura)



# Control de presión de lubricante en máquinas herramienta



# Control de centrales hidráulicas

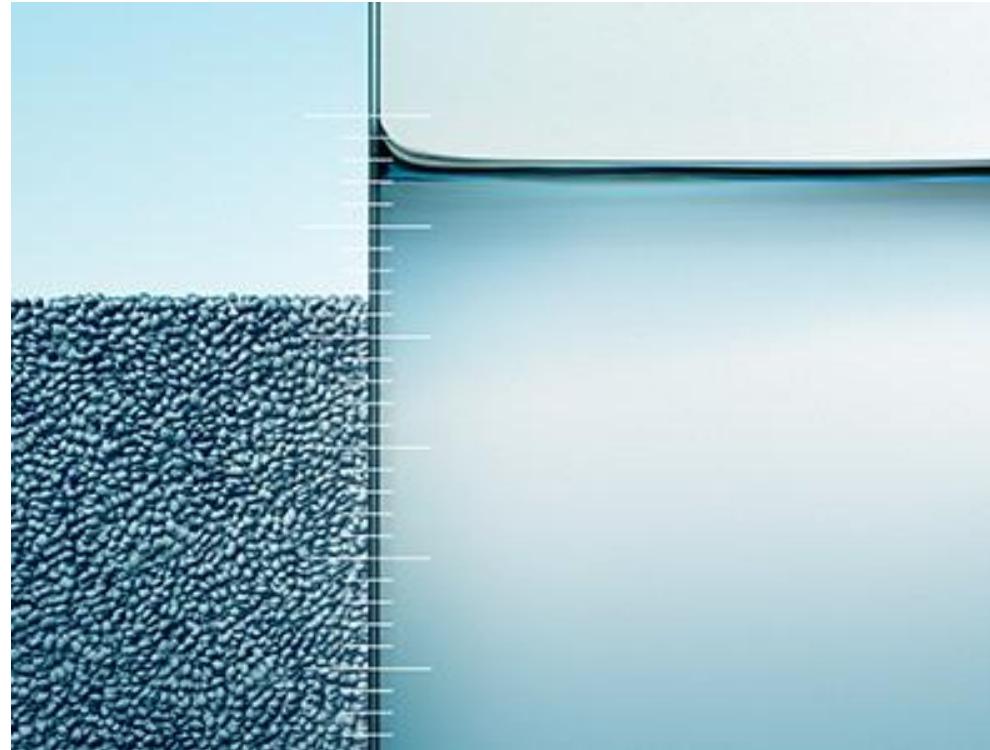


# Control de ventosas en grippers y manipuladores



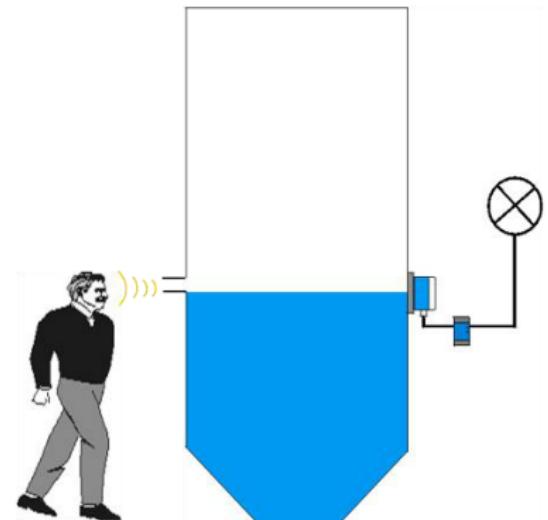
# MEDICIÓN DE NIVEL

## 22.88



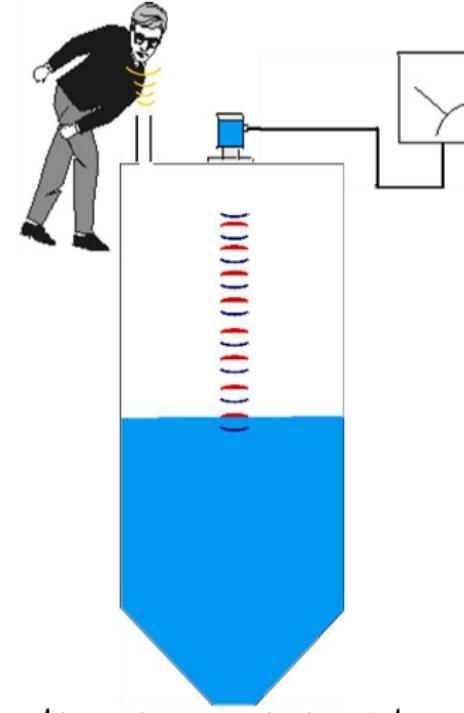
# Medición de Nivel Continua vs Detección de Nivel

**Point Level**



- covered, or uncovered?
- on or off?
- yes or no?
- cannot tell you “how much”

**Continuous Level**



- true measurement
- continuous monitoring
- tells “how much”

# Tubo de medición e indicación visual

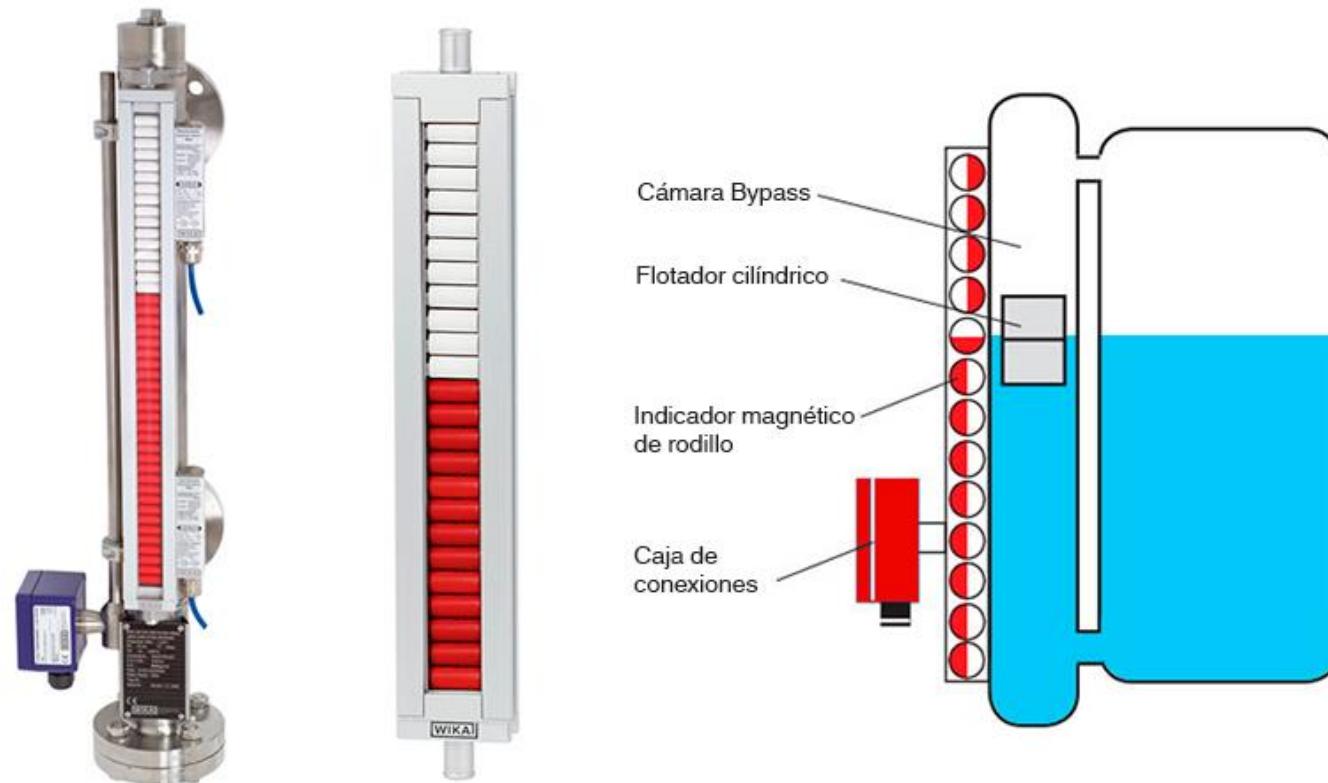
- Este sistema tipo bypass funciona según el principio de los “vasos comunicantes”.
- El tubo permite una eventual instalación de sensores de medición e indicación de nivel sobre el mismo.
- Las turbulencias en el tanque no se transmiten al tubo.
- La temperatura del líquido en el tubo es más cercana a la ambiente.
- Suelen tener una mirilla de vidrio graduada para la indicación visual.
- Mediante válvulas manuales se puede desvincular el tubo del tanque.



<https://youtu.be/IzqYvz6SWrY>

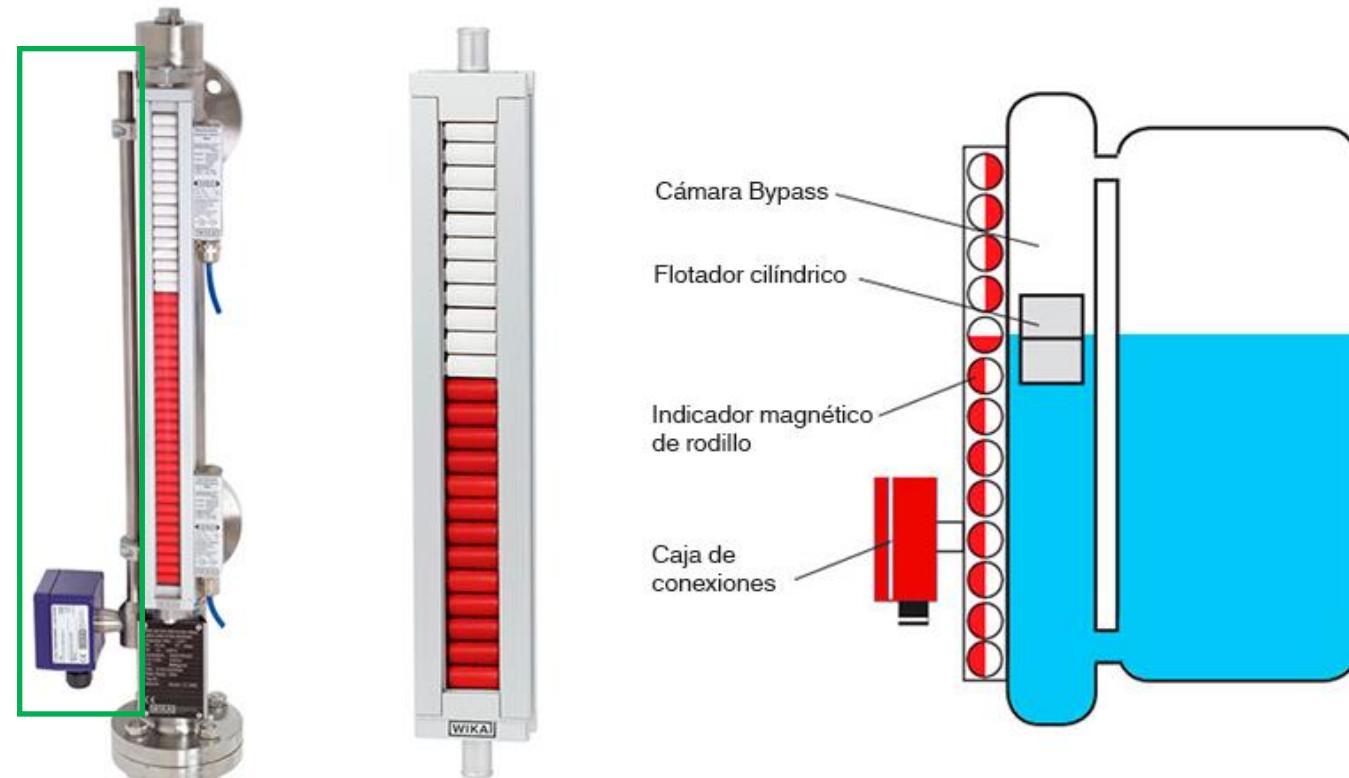
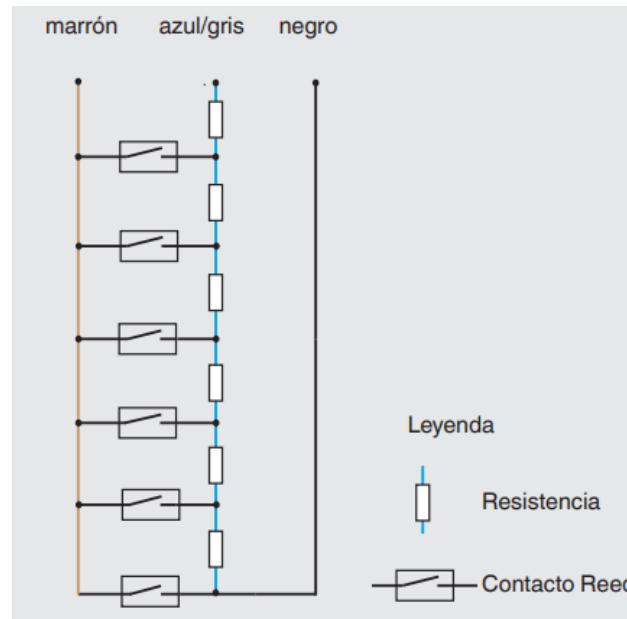
# Tubo de medición e indicación visual con detección magnética

- Dentro del flotador en el tubo se halla un elemento magnético y en el exterior del tubo va montado un indicador visual con rodillos magnéticos.
- Según aumenta o disminuye el nivel del líquido del interior del depósito y por ende de la cámara, el flotador asciende o desciende.
- Los rodillos o banderolas magnéticas del indicador responden al elemento magnético del flotador girándose y presentando otro color, normalmente rojo.



# Tubo de medición + indicación visual + medición y detección magnética

- Se puede acoplar un transmisor de nivel de tipo Reed e interruptores de nivel bajo y alto.
- Circuito interno:



<https://www.youtube.com/watch?v=aTxCSaWUiUU>

# Medición de nivel por presión hidrostática

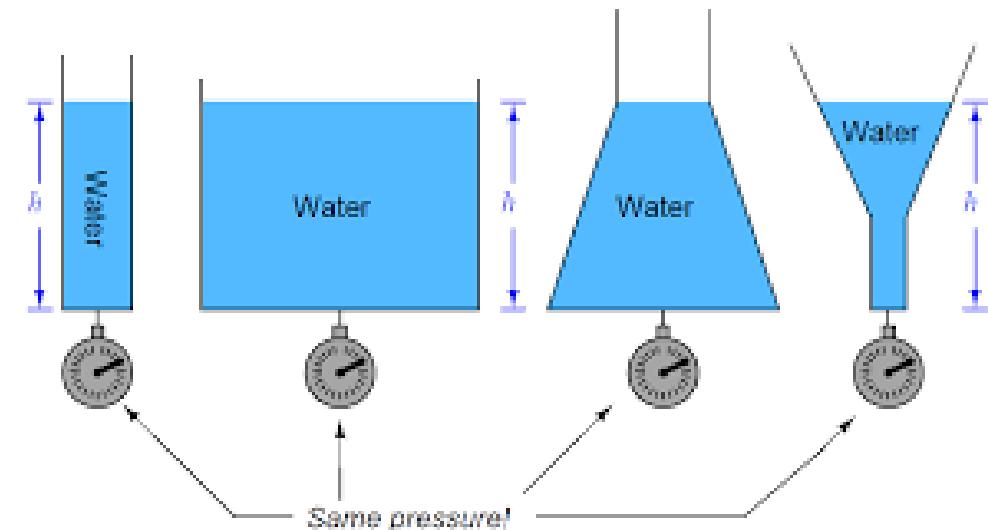
La presión es un fluido en un contenedor abierto depende de la altura en donde se haga la medición. Entre más abajo esté el punto de medición más alta será la presión.

La presión **P** es proporcional a la altura **H**:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot g}{\pi \cdot r^2} = \frac{m \cdot g}{\pi \cdot r^2}$$

$$m = \delta \cdot Vol = \delta \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h \Rightarrow p = \frac{\delta \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h \cdot g}{\pi \cdot r^2}$$

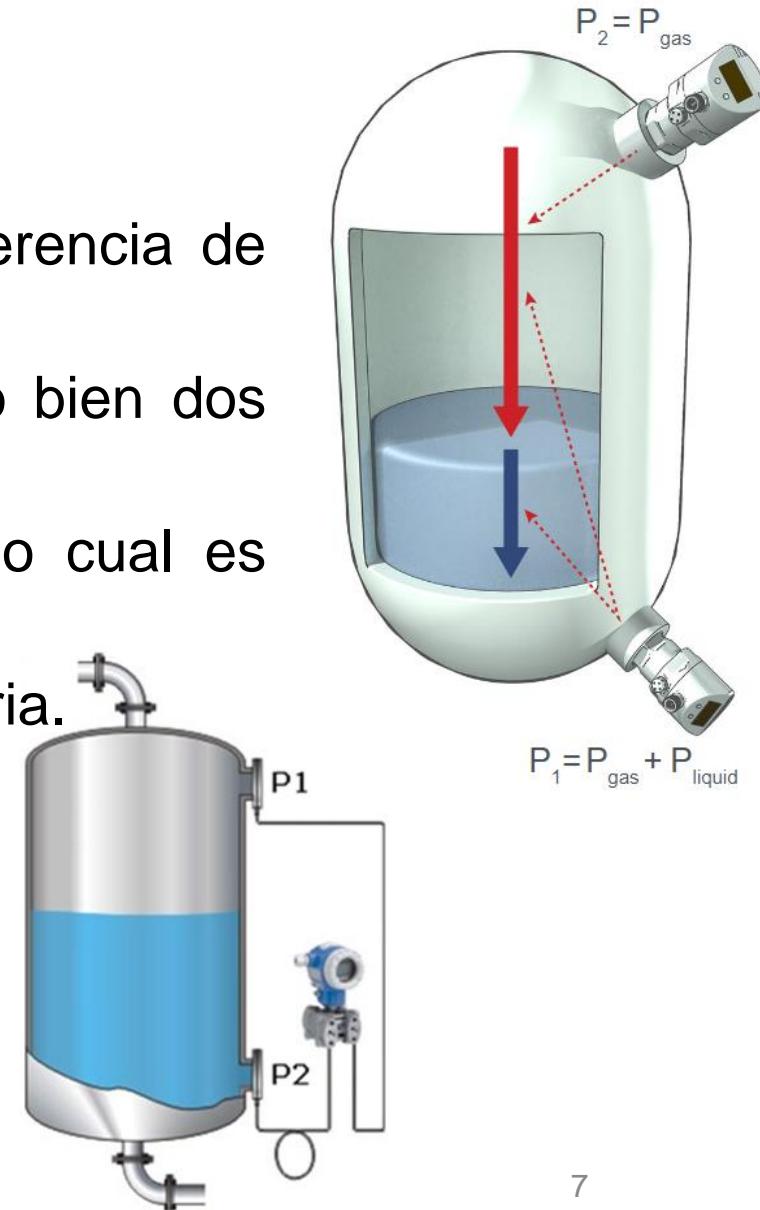
$$p = \delta \cdot g \cdot h$$



# Medición de nivel por presión hidrostática

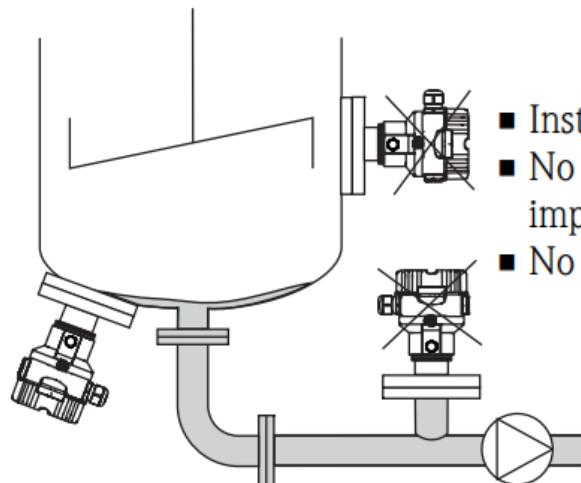
- En tanques cerrados, el nivel será proporcional a la diferencia de presión  $P_1-P_2$ .
- Se deberá utilizar un transmisor de presión diferencial o bien dos transmisores de presión relativa.
- La medición depende de la densidad del líquido, con lo cual es necesaria conocerla a priori.
- Es el principio de medición de nivel más usual en la industria.

<https://www.youtube.com/watch?v=4CA8N6bpPBw>



# Medición de nivel por presión hidrostática

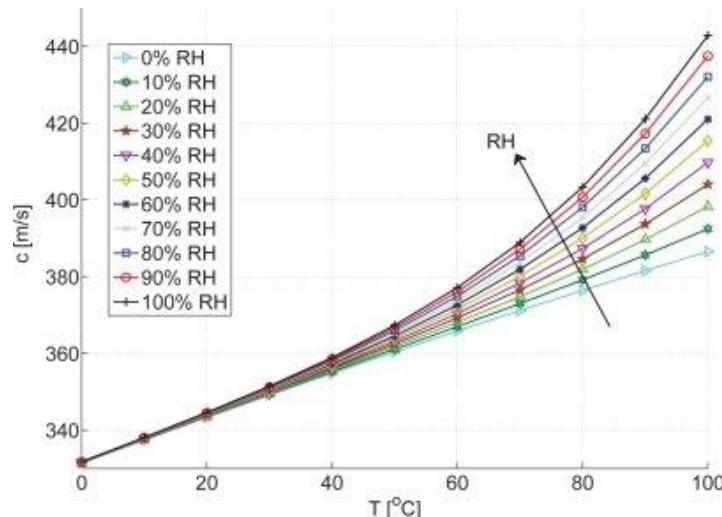
- La medición puede efectuarse desde los laterales, el inferior o desde la tapa del tanque.
- Muy baja influencia de la temperatura
- Bajo mantenimiento
- Rango de medición prácticamente ilimitado.
- No apto para medición de interfase.
- Relación líneal presión-nivel.



- Instale siempre el equipo por debajo del punto de medida más bajo.
- No monte el equipo en una cortina de producto ni en un punto del depósito en el que pueda haber impulsos de presión debidos a un agitador.
- No monte el equipo en el área de succión de la bomba.

# Medición de nivel por ultrasonido

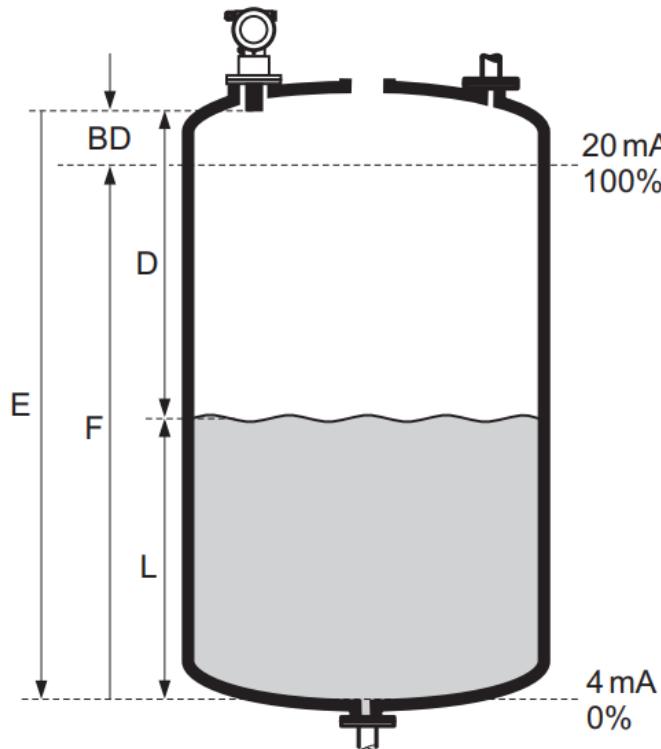
- Principio de medición por Tiempo de Vuelo o Tiempo de Retorno.
- Aplicable a la medición de líquidos y sólidos de todo tipo.
- Medición errática ante la presencia de espuma.
- Sensible a las variaciones en la temperatura y humedad. Los más caros tienen medición de temperatura incorporada.



<https://www.youtube.com/watch?v=mQnhxrgtAME&list=PLQRFGW1Z4TGF-fSOC2yOcJ0rxik24wM2Y&index=12>

# Medición de nivel por ultrasonido

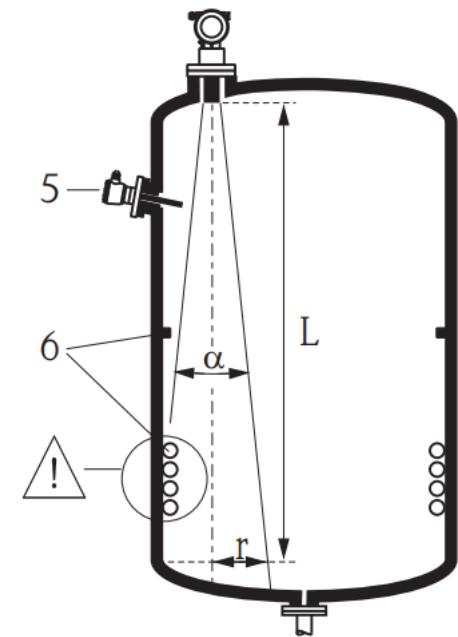
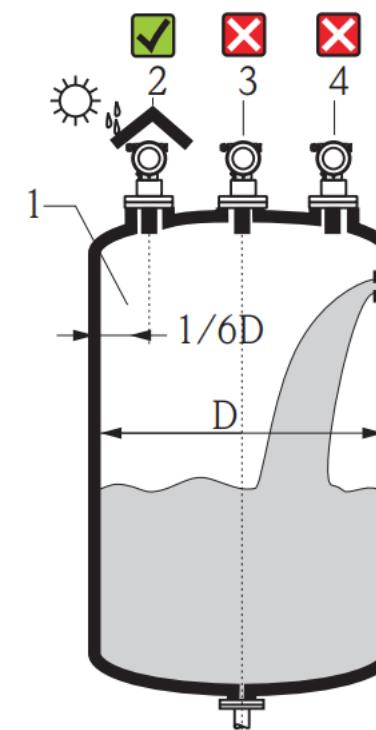
- Es auto-limpiante.
- Ofrece una medición independiente a las propiedades físicas del líquido/sólido.
- El haz suele tener un ángulo  $\alpha$  que va de 6 a 12 grados.
- Rango de medición de unos 25-30m en líquidos y 15-20m en sólidos.
- Sensible a obstáculos como agitadores, camisas o instrumentos. Se suele compensar por software.



E: Empty distance;  
F: Span (full distance);  
D: Distance from sensor membrane - product surface;  
L: Level;  
BD: Blocking distance

$$D = c * t/2$$

$$L = E - D$$



# Medición de Nivel por Radar

Principio de funcionamiento por Tiempo de Vuelo pero utilizando ondas electromagnéticas en el rango de los GHz.

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{(\mu_0 \cdot \epsilon_0)}}$$

c propagation velocity of electromagnetic wave in vacuum (meter/second)

$\mu_0$  permeability of free space ( $4 \pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ )

$\epsilon_0$  permittivity of free space ( $8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$ )

- Characterization of electromagnetic waves:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

c propagation velocity of electromagnetic wave (meter/second)

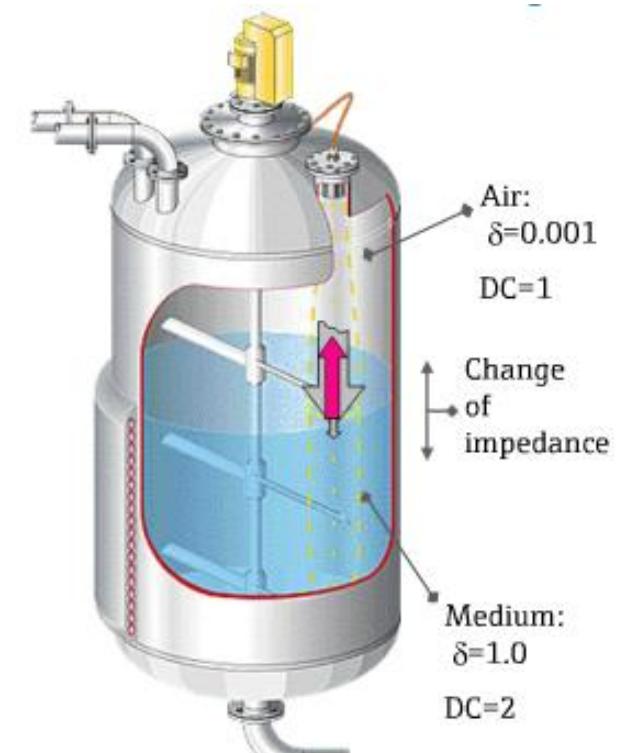
$\lambda$  wave lenght (meter)

f frequency (Hertz)

Medium	$\epsilon_r$	$\mu_r$	$c'$
Air	1.000594	1.000000	299792458
CO <sub>2</sub>	1.000985	1.000000	299644919
O <sub>2</sub>	1.000486	1.000002	299719335
N <sub>2</sub>	1.000528	1.000000	299713344
SO <sub>2</sub>	1.009900	0.999991	298320756

$\mu_r \approx 1$

Para medios no magnéticos la influencia en  $\mu_r$  es despreciable.  $\epsilon_r$  es el factor más importante para la medición por Radar

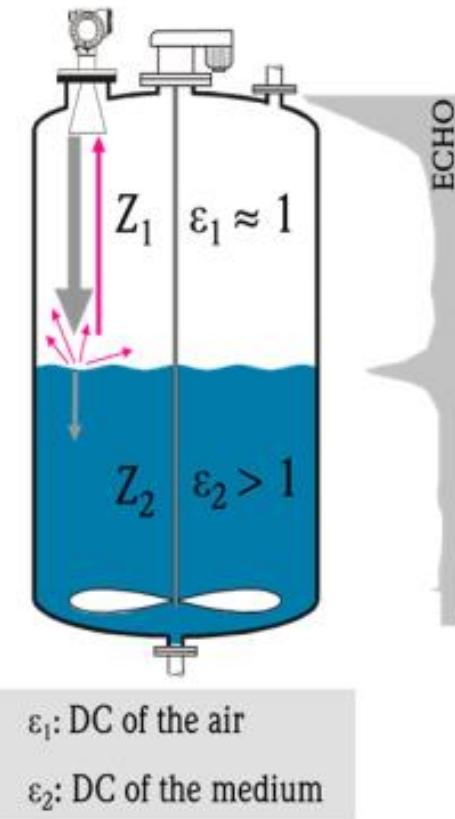


[https://www.youtube.com/watch?v=uxt86zxN\\_B8](https://www.youtube.com/watch?v=uxt86zxN_B8)

# Medición de Nivel por Radar

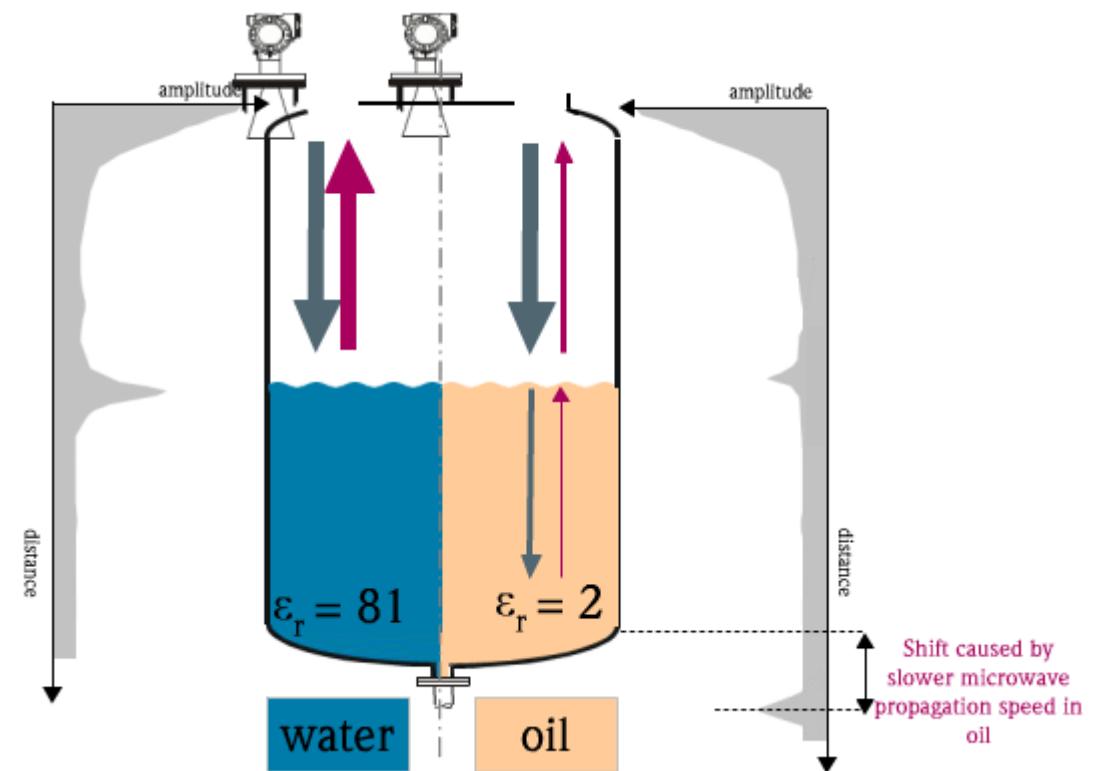
Reflexión debida al cambio de medio ( $\epsilon_r$ )

Media group	Solid		Fluid	
	DC ( $\epsilon_r$ )	Examples [DC]	DC ( $\epsilon_r$ )	Examples [DC]
A	1.4 ... 1.9	plastic granulate [1.8], sugar [1.8], white cement [1.43]	1.4 ... 1.9	non - conductive liquids (e.g. liquefied gas like butane [1.2], chlorine [1.8])
B	1.9 ... 2.5	portland cement [3.8], plaster [1.9]	1.9 ... 4	non - conductive liquids (e.g. oil [3], toluene [2.5])
C	2.5 ... 4	quartz sand [2.6], rice [3.5]	4 ... 10	e.g. hydrochloric acid [4.6], chloroform [5.5]
D	4 ... 7	copper ore [6], phosphorus salt [4], coffee [4.6]	> 10	conductive liquids e.g. petroleum [17.8], water [81]
E	> 7	ferrite [9.3], active coal pellets [14]		



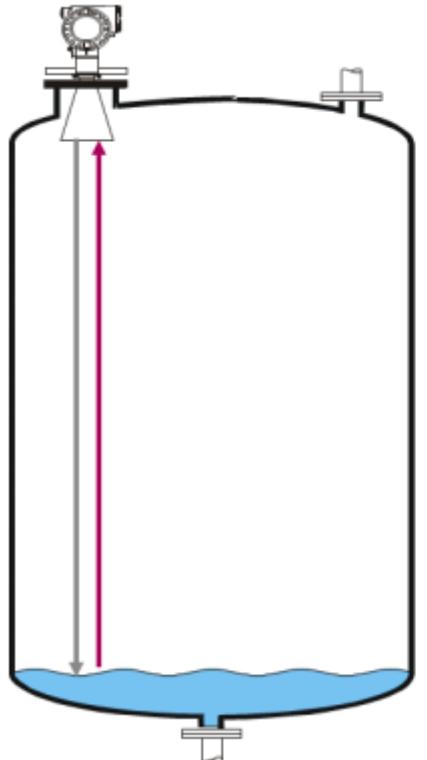
# Medición de Nivel por Radar

- Influencia del tipo de medio sobre la reflexión de la onda.

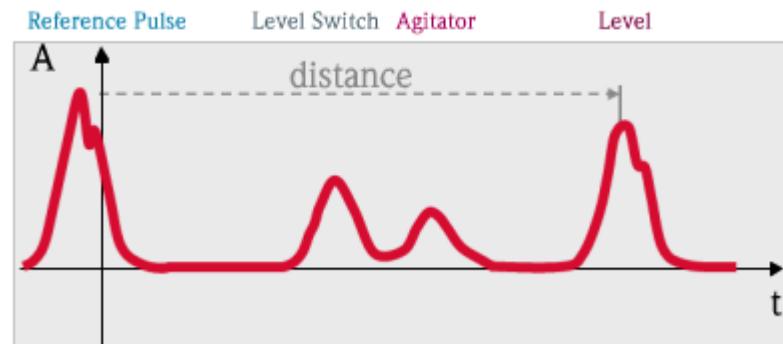
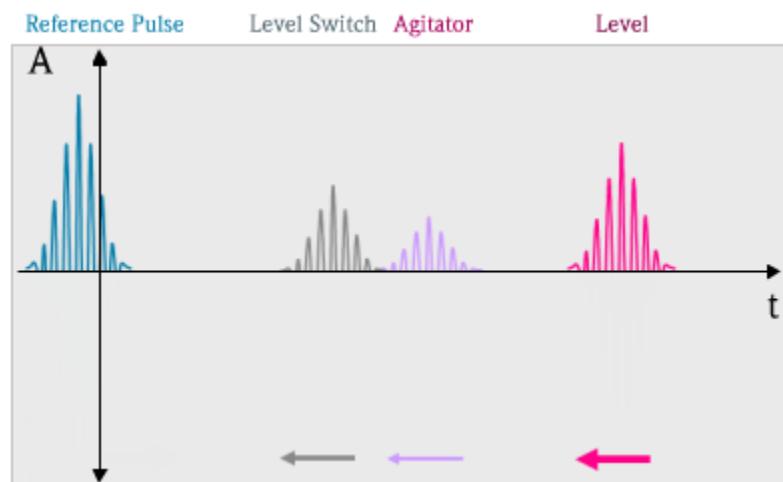
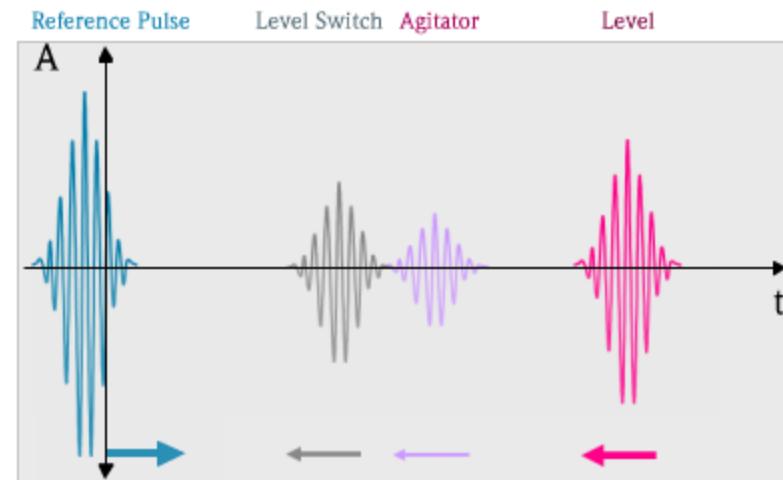
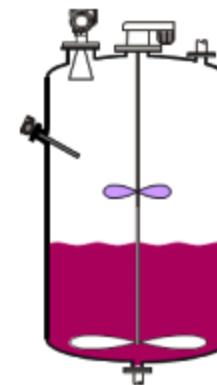
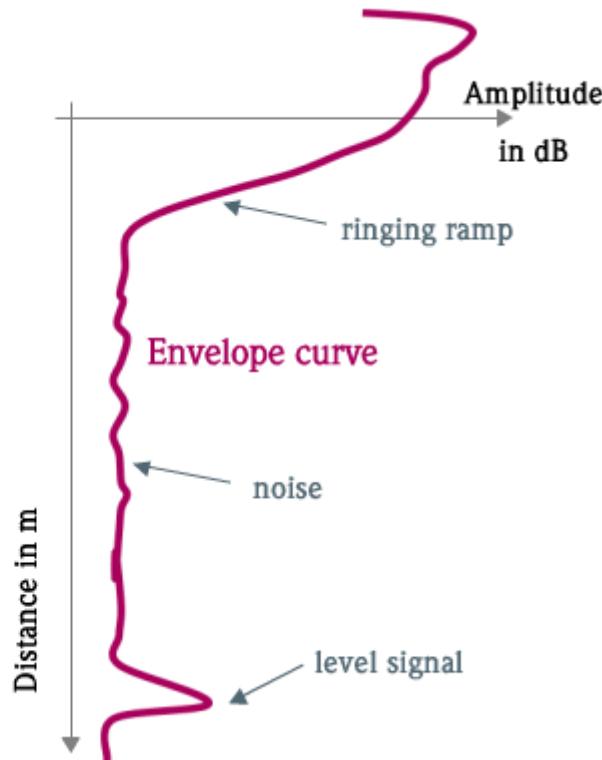


# Medición de Nivel por Radar

- Proceso de medición:
  1. Emisión del pulso de referencia
  2. Amplificación y cálculo logarítmico de las señales recibidas
  3. Rectificación del pulso emitido y las señales recibidas
  4. Generación de envolvente y filtrado
  5. Evaluación de distancia

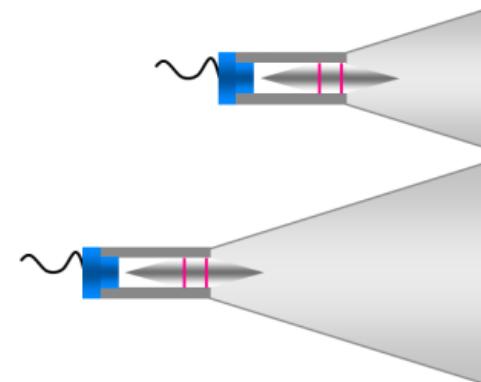
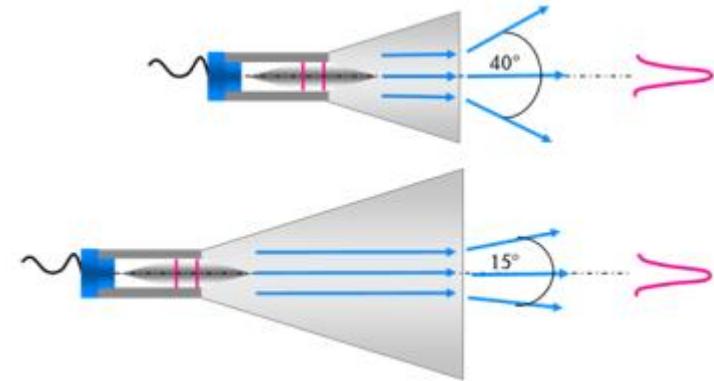
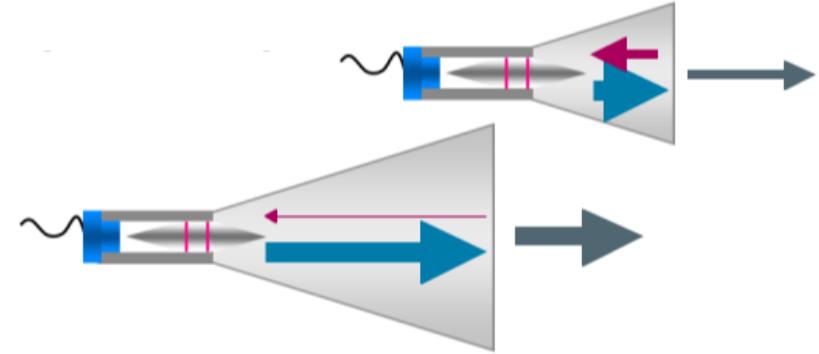


28/04/2020



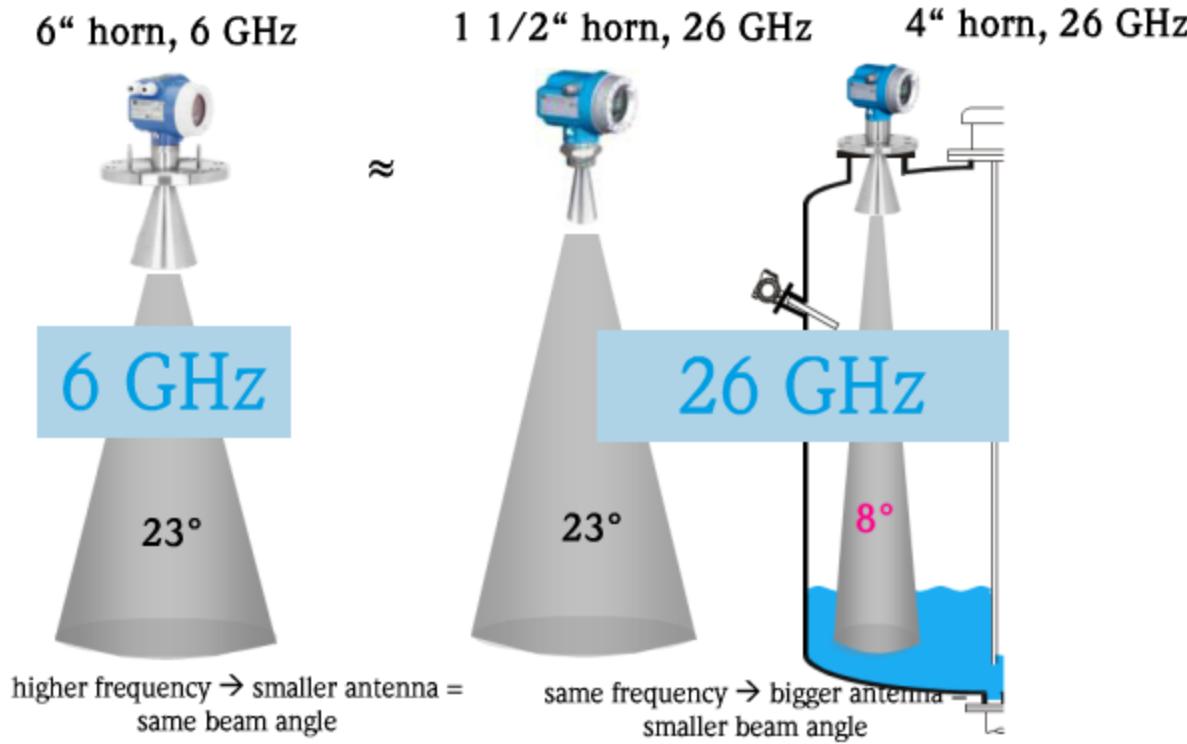
# Medición de Nivel por Radar

- Beneficios de utilizar antenas grandes:
  - Mejor adaptación de impedancias durante la transmisión
  - Menor ángulo del lóbulo por lo tanto mejor foco
  - En la recepción: Mayor área de cobertura → Mayor energía recibida



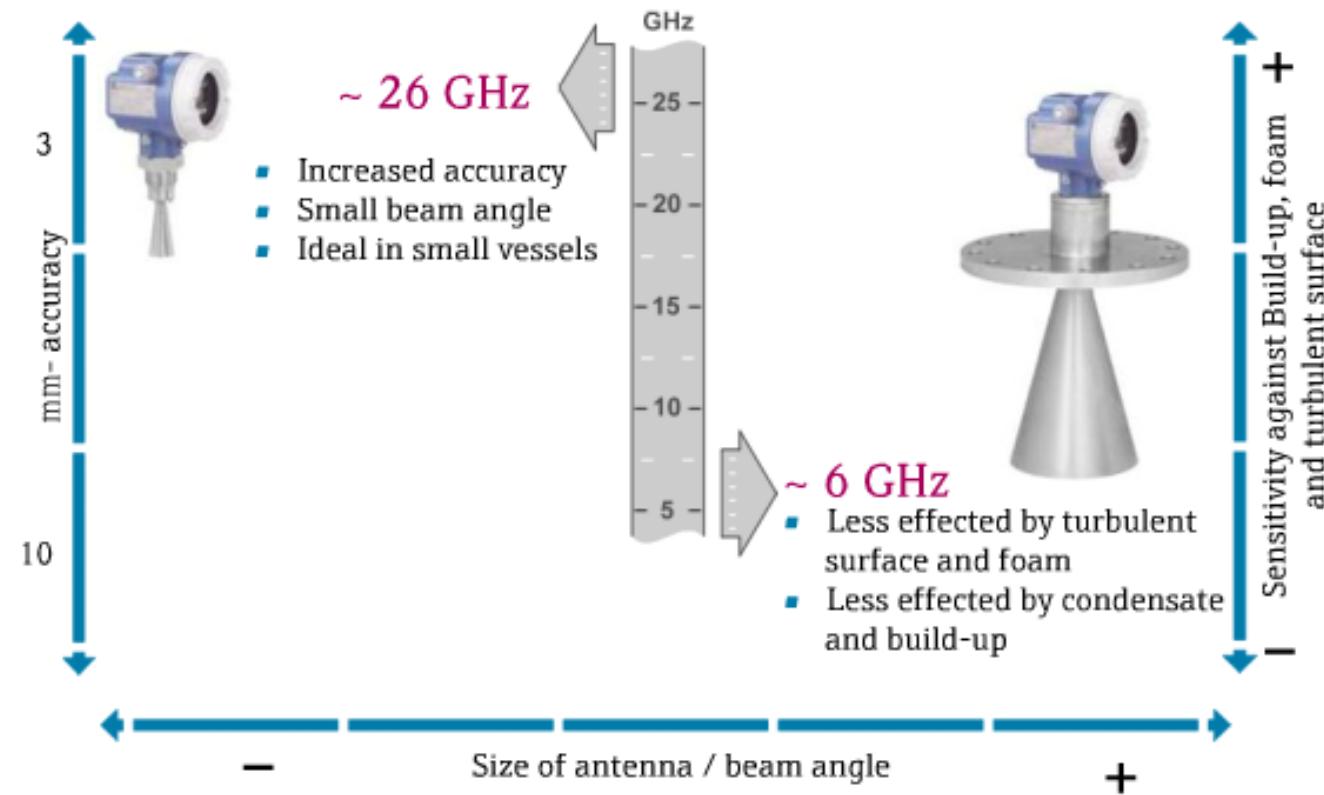
# Medición de Nivel por Radar

- Beneficios de utilizar antenas grandes:



# Medición de Nivel por Radar

- Frecuencias de trabajo: ventajas y desventajas



# Medición de Nivel por Radar

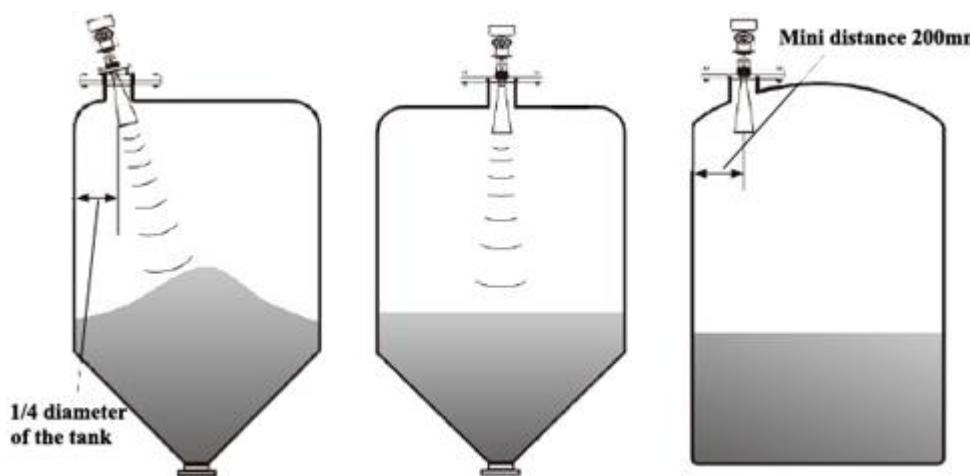
- Aplicable a la medición de nivel de líquidos y sólidos.
- Utilizan frecuencias de transmisión que van de 6 a 100GHz.
- Cuanto mas alta es la frecuencia, mas focalizado es el haz de transmisión. (Ej: haz 4 grados a 26GHz )
- A bajas frecuencias son mas inmunes a la presencia de turbulencias y espuma, así como también a la presencia de agitadores u otros instrumentos en el interior del tanque.
- Si la espuma es densa la medición suele ser errática.



[https://www.youtube.com/watch?v=uxt86zxN\\_B8](https://www.youtube.com/watch?v=uxt86zxN_B8)

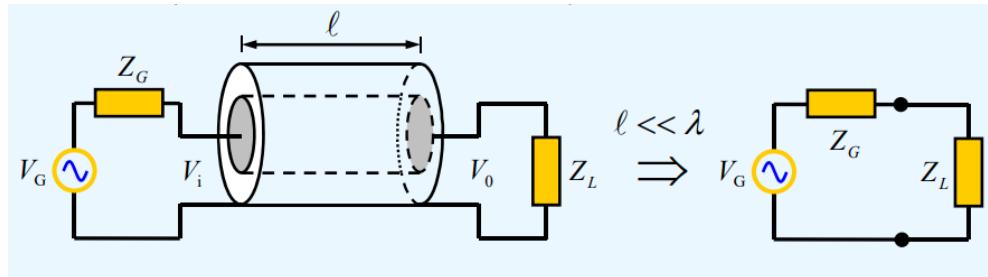
# Medición de Nivel por Radar

- Es posible medir el nivel de tanques plásticos aún desde el exterior.
- En líquidos con baja permeabilidad eléctrica ( $\epsilon$ ) la reflexión es muy débil y por lo tanto el error de medición aumenta.
- Es costoso frente a otras tecnologías como presión hidrostática y ultrasonido.
- Es sensible a la acumulación de material en el cono del radar.
- Al igual que el ultrasónico tiene una zona muerta



# Radar guiado / Onda Guiada

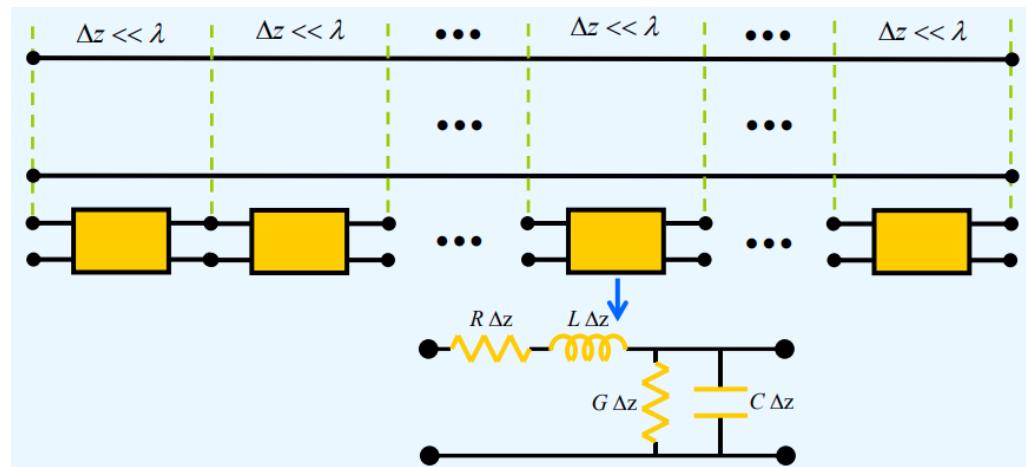
- Modelo circuitual de una línea de transmisión a baja frecuencia ( $L \ll \lambda$ ):



- En aquellos circuitos donde existan elementos de tamaño NO mucho menor que la longitud de onda, no es válida la teoría de circuitos concentrados (leyes de Kirchhoff).
- Estos circuitos se denominan circuitos distribuidos y su análisis requiere de una extensión de la teoría de circuitos convencional que tenga en cuenta de forma explícita los efectos propagativos de las señales.

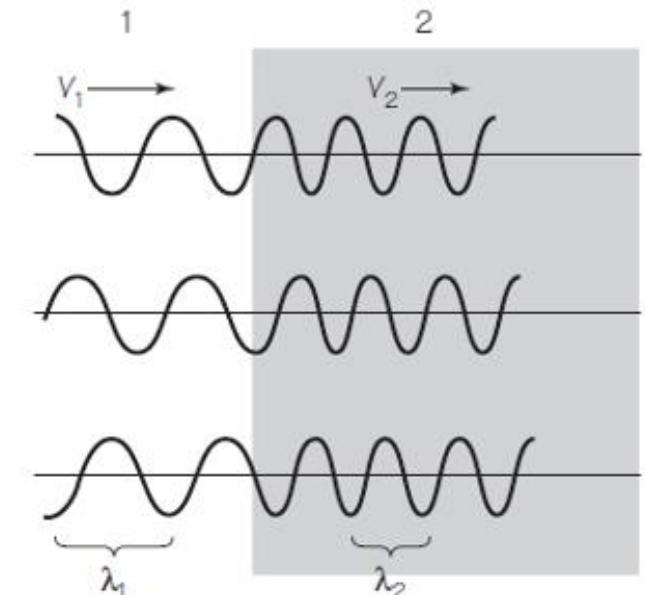
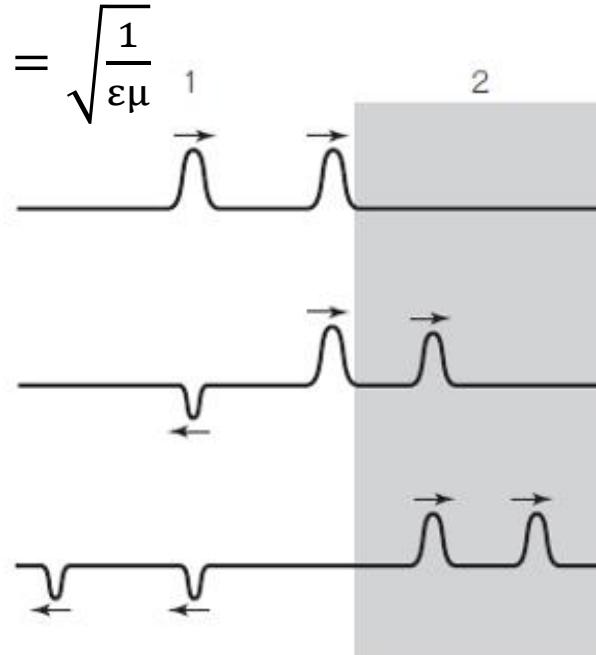
# Radar guiado / Onda Guiada

- Los efectos propagativos pueden, hasta cierto punto, modelarse mediante circuitos equivalentes.
- En el caso de una línea de transmisión, se puede dividir en secciones de longitud  $\Delta z \ll \lambda$  y sustituir cada sección por su circuito equivalente.
- Los parámetros R, L, C, G se denominan **PARAMETROS PRIMARIOS** de la línea. Su valor depende de la geometría y de los materiales de cada tipo de línea.



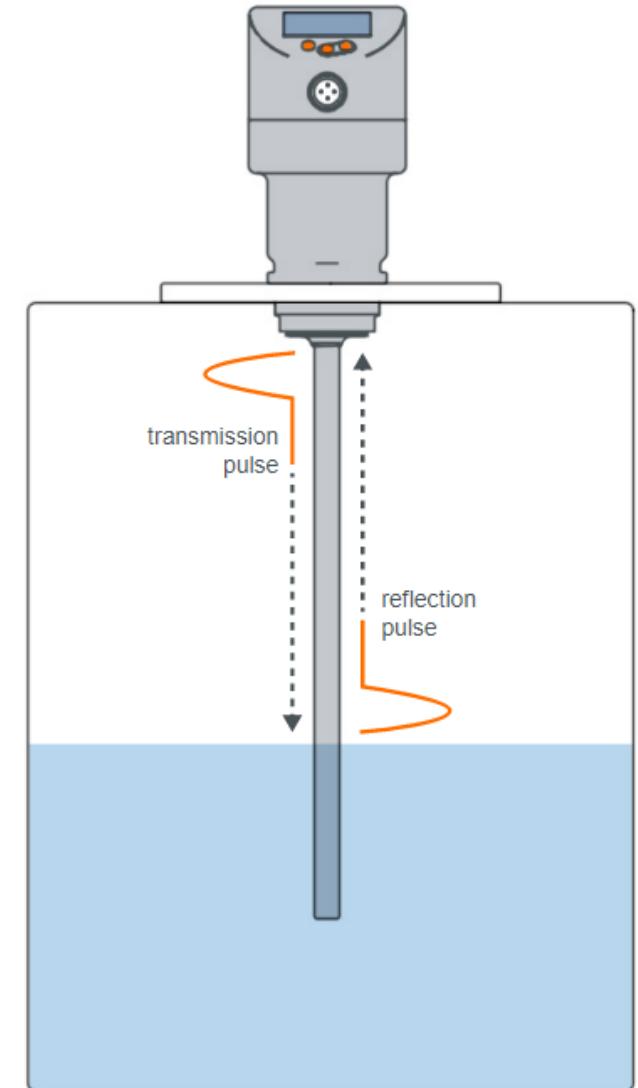
# Radar guiado / Onda Guiada

- En aquellos puntos en los cuales haya un cambio de medio o geometría, la impedancia característica de la línea cambiarán y por lo tanto se producirán reflexiones y refracciones de la señal. Mismo fenomeno estudiado en optica.
- Para las ondas incidentes y transmitidas se puede escribir  $\lambda_1 / \lambda_2 = v_1 / v_2$ .
- La velocidad de propagación de la onda EM siempre será igual a la velocidad de la luz en el medio y se puede calcular como  $c = \sqrt{\frac{1}{\epsilon\mu}}$



# Radar guiado / Onda Guiada

- El medidor radar guiado funciona con pulsos de radar de alta frecuencia que se emiten y guían a lo largo de una sonda, la cual puede ser de tipo varilla o un cable.
- Cuando el pulso llega a la superficie del producto, se refleja una parte debido a un cambio del valor de la constante dieléctrica relativa.
- El Tiempo de Vuelo entre que se emite y recibe el pulso es medido y analizado por el instrumento y constituye una medición directa de la distancia entre la conexión a proceso y la superficie del producto.
- La intensidad de la reflexión depende de la constante dieléctrica del producto. Cuanto mayor sea el valor de la constante dieléctrica, tanto mayor es la reflexión.



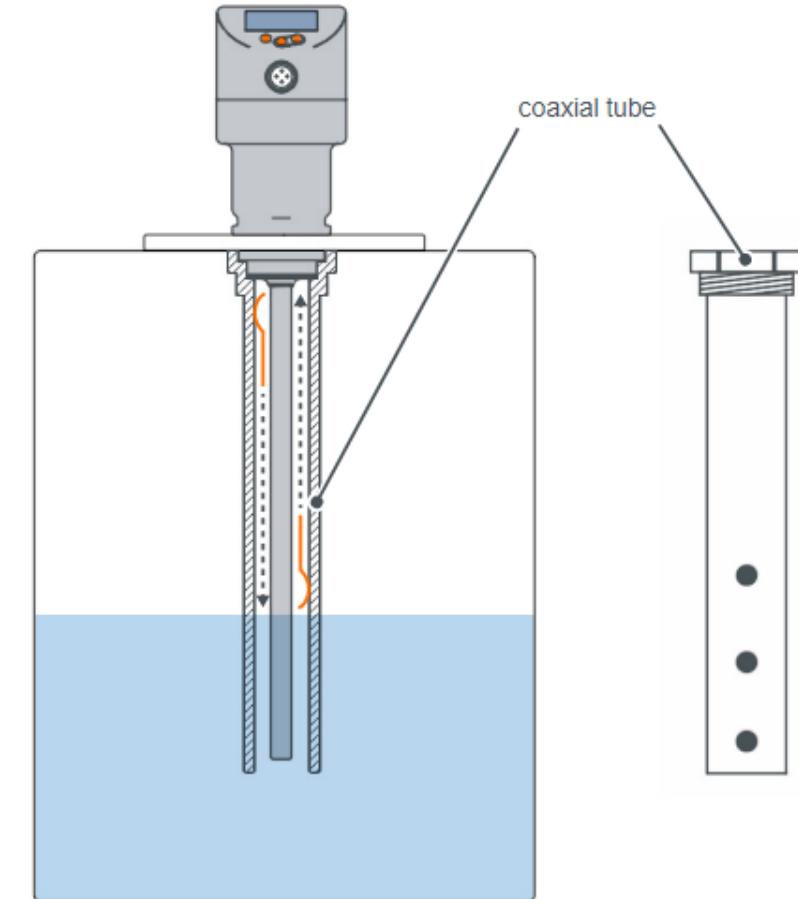
# Radar guiado / Onda Guiada

- Es aplicable a líquidos de cualquier tipo y sólidos granulados.
- Para algunos líquidos con bajas constantes dieléctricas  $\epsilon$ , como por ejemplo aceites, el pulso de radar no es reflejado con suficiente intensidad y por lo tanto es necesaria la utilización de tubos coaxiales para intensificar y contener la señal.

[https://www.youtube.com/watch?v=EO9zOT\\_Ulu8](https://www.youtube.com/watch?v=EO9zOT_Ulu8)

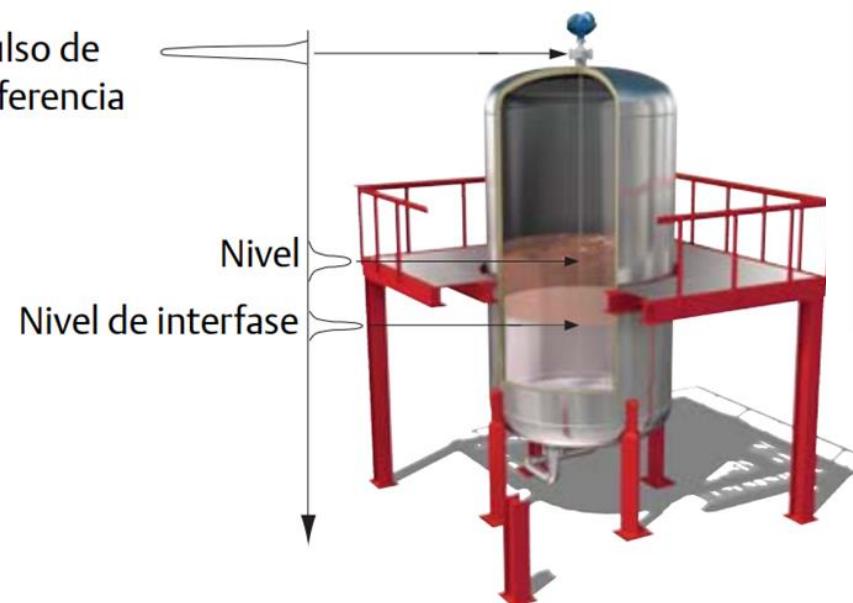
<https://www.youtube.com/watch?v=QqjAYIHOQEY>

Material	$\epsilon_r$
Aire	1
Aceite	2,8
Agua destilada	80
Acetona	191
Nylon	3,5
Titanio	1200



# Radar guiado / Onda Guiada

- Hay modelos a varilla, cable y tubo coaxial. La versión con cable puede medir hasta 75m. La versión con tubo coaxial también anula problemas de reflexiones con materiales dentro del tanque (agitadores, otros instrumentos, etc...)
- Es aplicable tanto a líquidos como a sólidos granulados.
- Se logran precisiones cercanas al milímetro
- Apto para medición de interfase.



# Medición de nivel Capacitiva

- El principio de la medición de nivel capacitiva se basa en el cambio del valor de la capacidad. Una sonda aislada (de varilla o cable) y las paredes del tanque constituyen un capacitor cuya capacidad es proporcional al nivel de producto.
- Cuando el tanque no es metálico se utiliza un tubo perforado metálico como segundo electrodo.
- Se utiliza una doble varilla aislada cuando el líquido es muy corrosivo y el tanque es plástico (por ej. ácidos muy concentrados).
- La medición se realiza a una frecuencia de alrededor de los 500kHz y las capacidades medidas son del orden de los pF.

Doble varilla



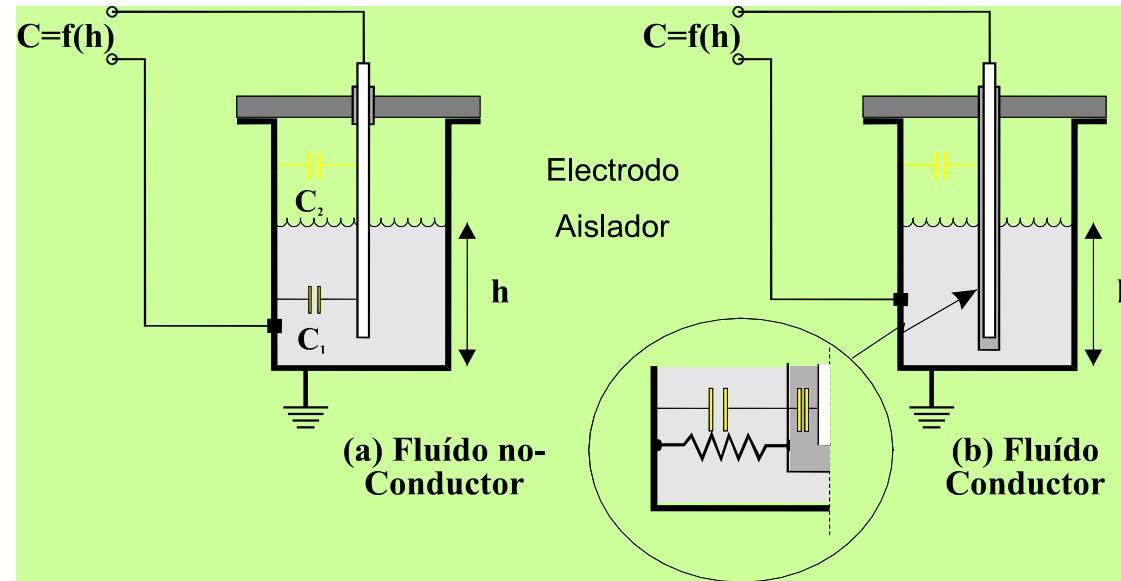
Cable



Varilla



# Medición de nivel Capacitiva



$$C = K \epsilon_0 A / d$$

**Ejemplo 13-2:** debe utilizarse un sistema capacitivo para la medición del nivel de agua en un tanque de 30 cm de altura. Se cuenta con dos electrodos cilíndricos, separados 1 cm entre ellos, con un radio promedio de 5 cm, colocado a lo largo del tanque. Encontrar el rango de variación de la capacidad.

Capacidad del sensor con tanque vacío, de Ec. 11-7:

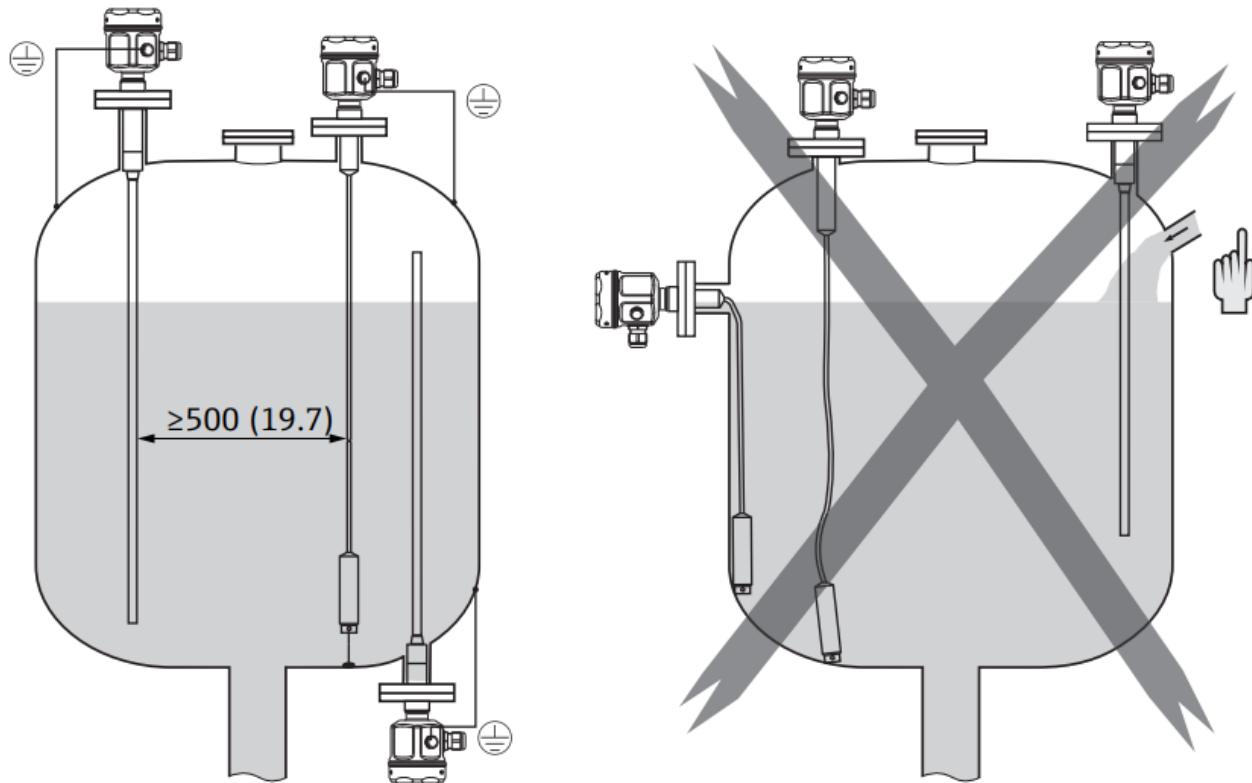
$$C = K \epsilon_0 A / d = 1 * 8.85 \text{ pF/m} * (2\pi 0.05m 0.3m) / 0.01m = 83.4 \text{ pF}$$

Capacidad del sensor con tanque lleno,

$$C = K \epsilon_0 A / d = 78.5 * 8.85 \text{ pF/m} * (2\pi 0.05m 0.3m) / 0.01m = 6548 \text{ pF}$$

# Medición de nivel Capacitiva

- Consideraciones de montaje



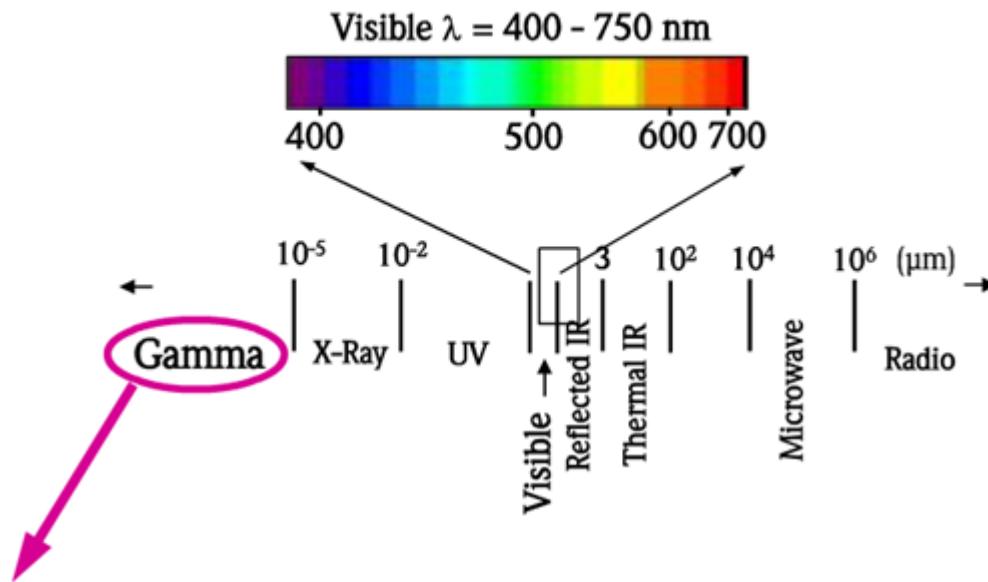
# Medición combinada – Radar Guiado y Capacitivo

- Para la medición combinada de nivel e interfase con presencia de emulsión.
- Fusiona ambas tecnologías (2 sensores en 1) para tener una medición completa.



<https://www.youtube.com/watch?v=YsX98qOFo68&list=PLQRFGW1Z4TGF-fSOC2yOcJ0rxik24wM2Y&index=24>

# Medición y detección de nivel por Radiación Gamma



- short wave length  $\lambda = 10^{-5} - 10^{-7} \mu\text{m}$
- very high frequency
- ionising radiation ( $\lambda < 100 \text{ nm}$ )
- high-energy photons (higher energy than light)

## Source material

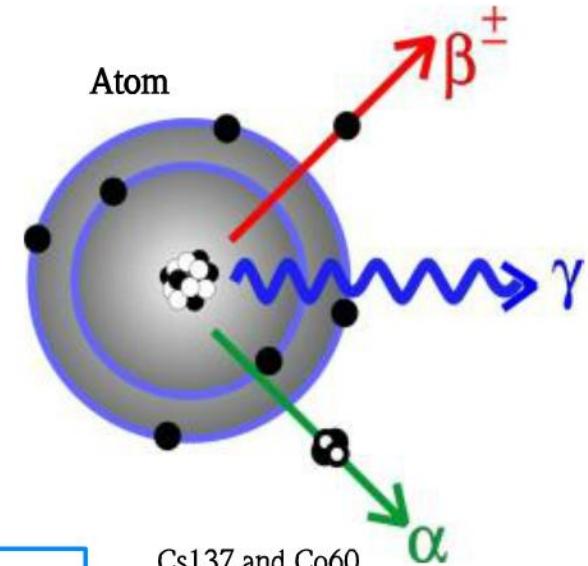
A spontaneous decay of an atom is a radioactive decay, which emits radiation.

## 3 types of radiation

**Alpha** particle radiation

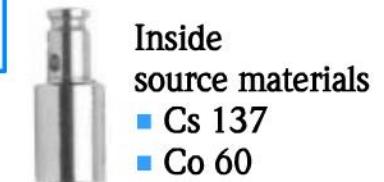
**Beta** particle radiation

**Gamma** electromagnetic wave



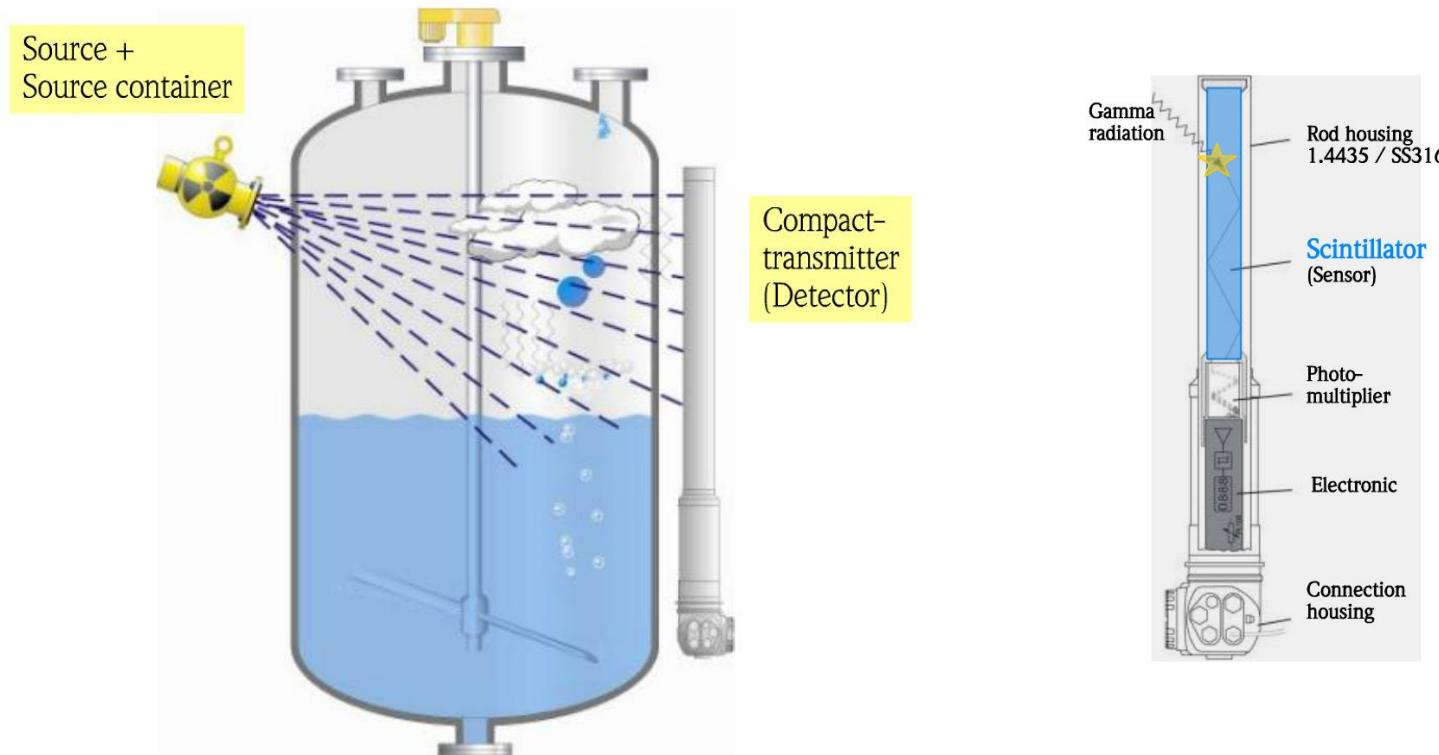
Cs137 and Co60  
no alpha decay

## Source



# Medición y detección de nivel por Radiación Gamma

- La radiación atraviesa metales y concreto → Medición sin contacto / No invasiva
- Nivel de radiación emitida muy baja → No implica riesgo alguno



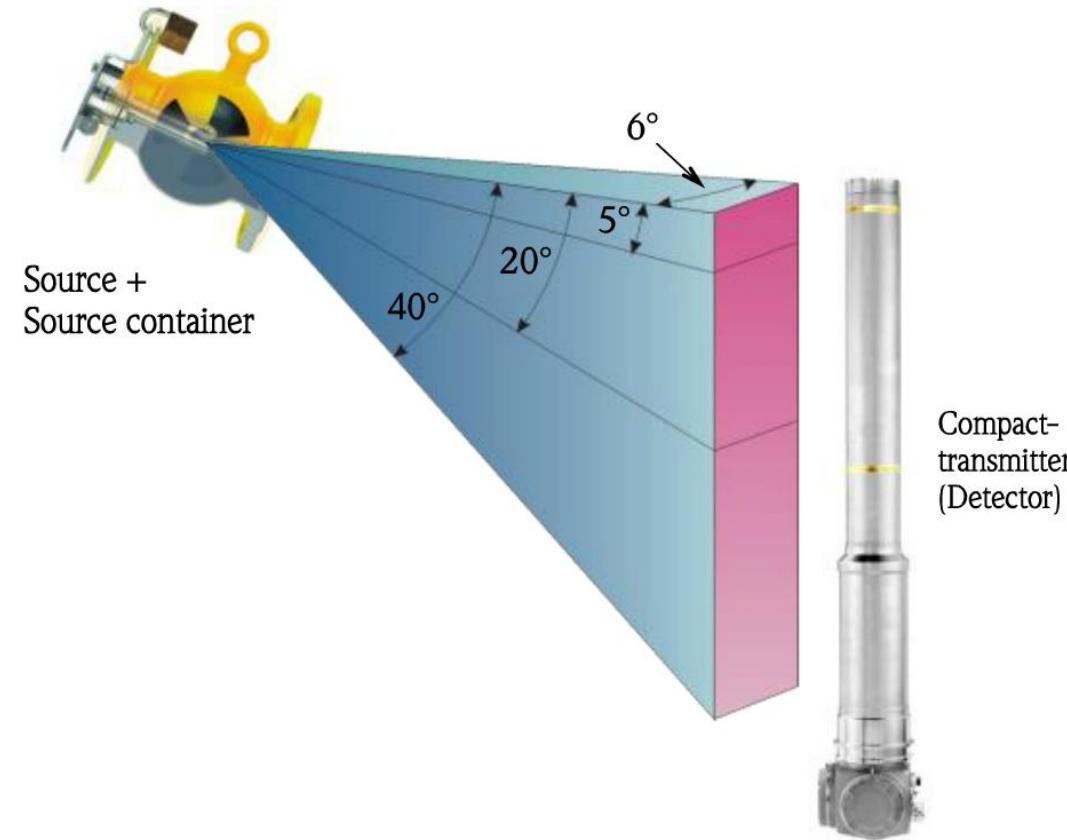
## Funcionamiento:

- La radiación entra al sensor
- La atenuación genera pulsos de luz
- Un foto-multiplicador convierte esa luz a pulsos de corriente
- Se realiza un conteo de los pulsos detectados

<https://www.youtube.com/watch?v=pMbclVYQsoM&list=PLQRFGW1Z4TGF-fSOC2yOcJ0rxik24wM2Y&index=16>

# Medición y detección de nivel por Radiación Gamma

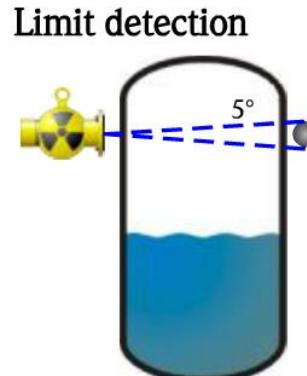
- Haz de radiación



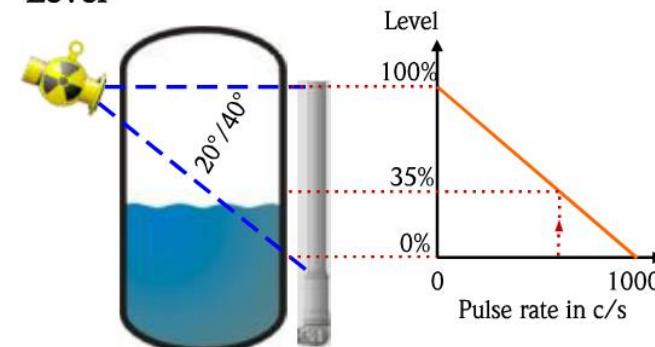
# Medición y detección de nivel por Radiación Gamma

## Aplicaciones:

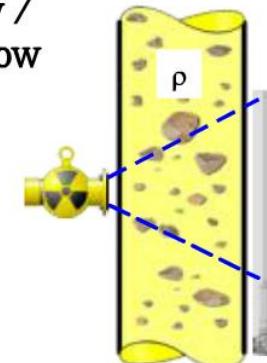
- Permite medir nivel continuo, detección de nivel, medición de densidad y medición de interfase



**Level**

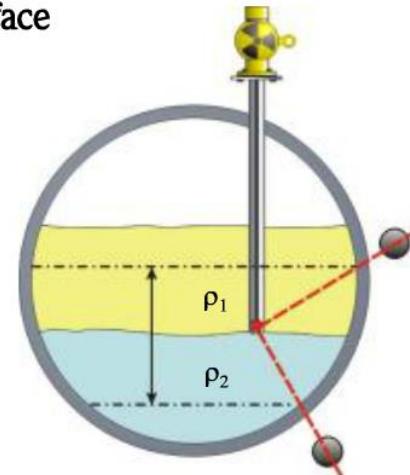


**Density / Mass flow**

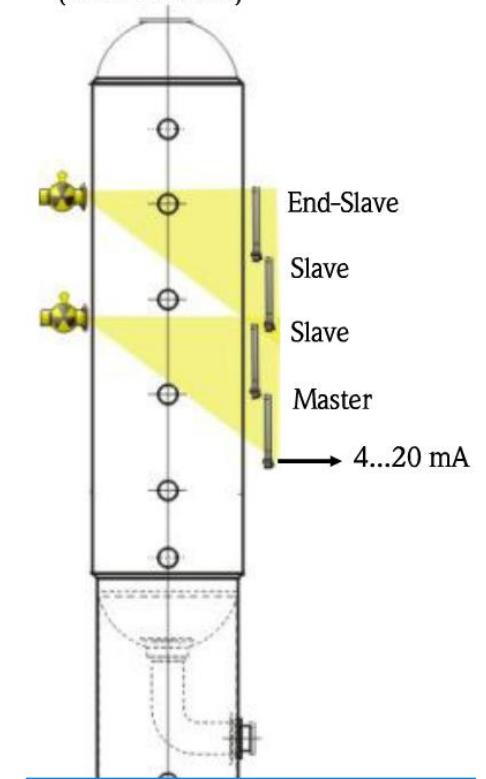


- Density (0.5 ... 3.0 g/cm<sup>3</sup>)
- Concentration
- Solid contents in liquids  
(% Weight, % Volume, weight/volume)

**Interface**



- Large measuring range  
(with cascade)



# Medición y detección de nivel por Radiación Gamma

## Ventajas:

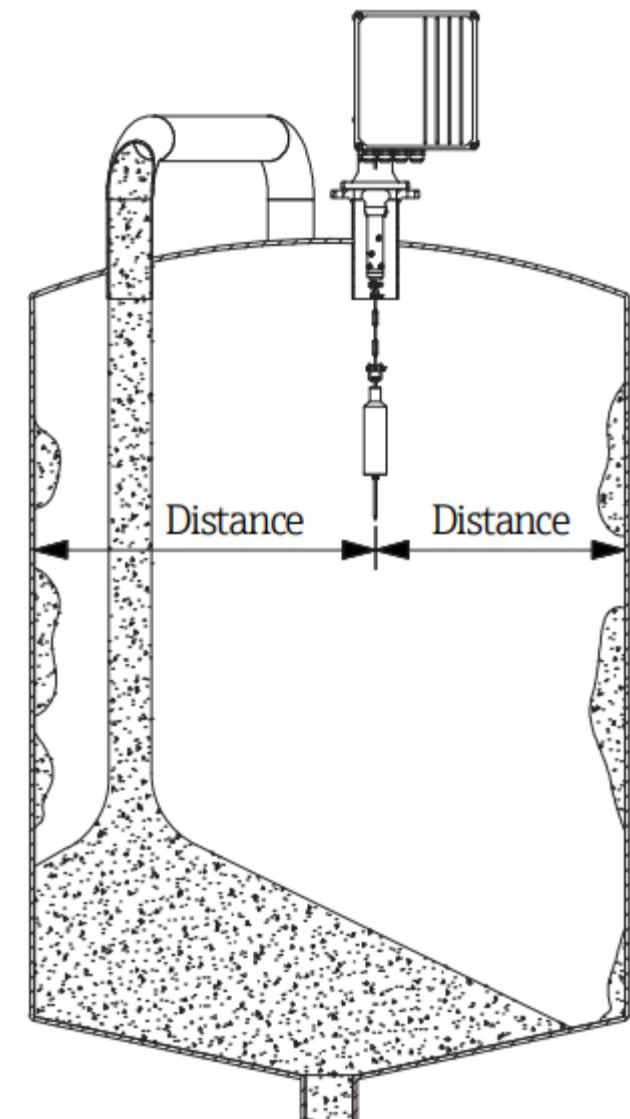
- Utilizable para cualquier tipo de líquidos y sólidos
- Apto para condiciones extremas de presión y temperatura.
- Apto para productos tóxicos, inflamables o muy abrasivos.
- Permite medir nivel continuo, detección de nivel, medición de densidad y medición de interfase



# Medición de nivel electromecánica en silos



- Mediante un pequeño motor se hace descender un contrapeso mediante un cable de acero o una cadena.
- El sensor tiene incorporado una celda de carga, con lo cual, cuando detecta una disminución en el peso medido, calcula la posición del nivel del sólido en función del recorrido.
- Por ultimo se sube el contrapeso nuevamente y el motor es apagado.
- El equipo da una señal 4-20mA y salidas digitales para indicación de nivel máximo.
- Es posible linealizar la salida en función de la forma del silo (cilindro-cónico).

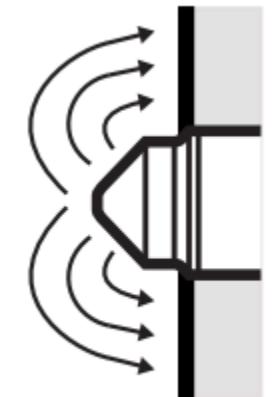


# Detección de Nivel por Espectroscopia de Impedancia

El equipo funciona según el procedimiento de espectroscopia de impedancia. Analiza las características eléctricas de los fluidos que se van a controlar en un rango de frecuencia entre 50 y 200 MHz. Desde la punta de la sonda se forma un campo eléctrico que se ve influído por el nivel. El tipo de fluido, así como las adherencias o la espuma, poseen diversas características eléctricas que se utilizan para la evaluación.

## Aplicaciones:

- Líquidos acuosos
- Líquidos viscosos
- Solidos en polvo o pequeñas partículas



# Detección de Nivel por Espectroscopía de Impedancia

## Principio de Funcionamiento

Cada medio crea un perfil de firma único en este barrido de espectro de alta frecuencia (50 a 200MHz).

En cada punto, se realizan tres mediciones:

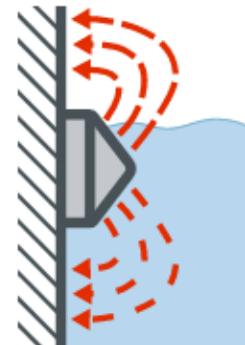
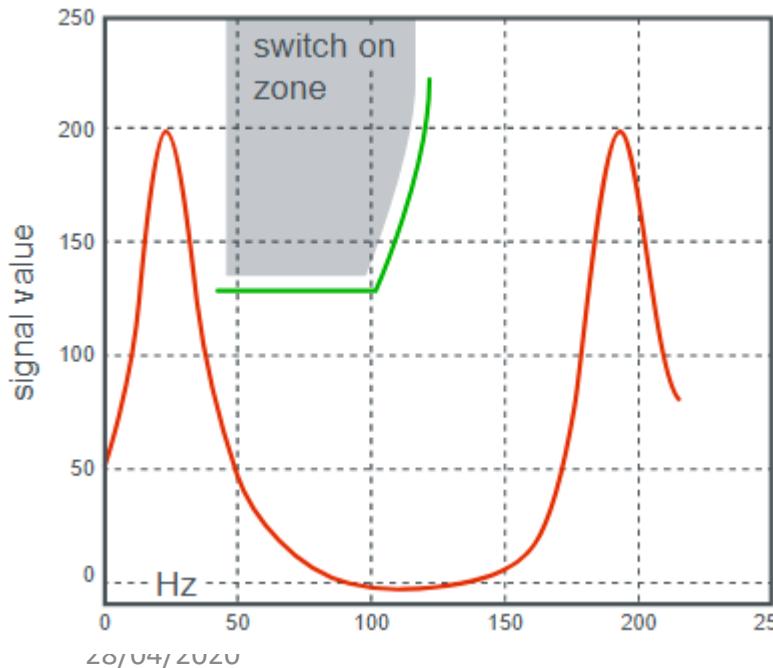
- Atenuación del campo electromagnético ( $\alpha$  [dB/m])
- Conductancia del campo eléctrico ( $\sigma \rightarrow J = \sigma E$ )
- Permeabilidad magnética ( $\mu \rightarrow B = \mu H$ )

# Detección de Nivel por Espectroscopía de Impedancia



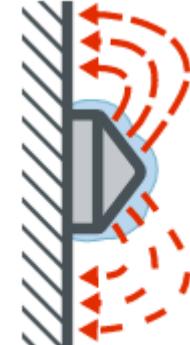
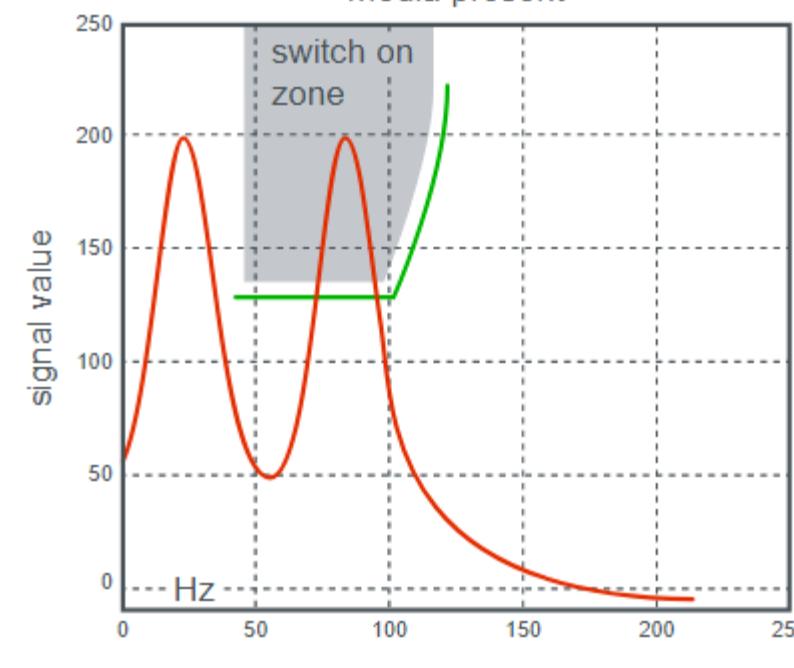
- Baja atenuación
- Baja conductancia
- Baja permeabilidad

no media present



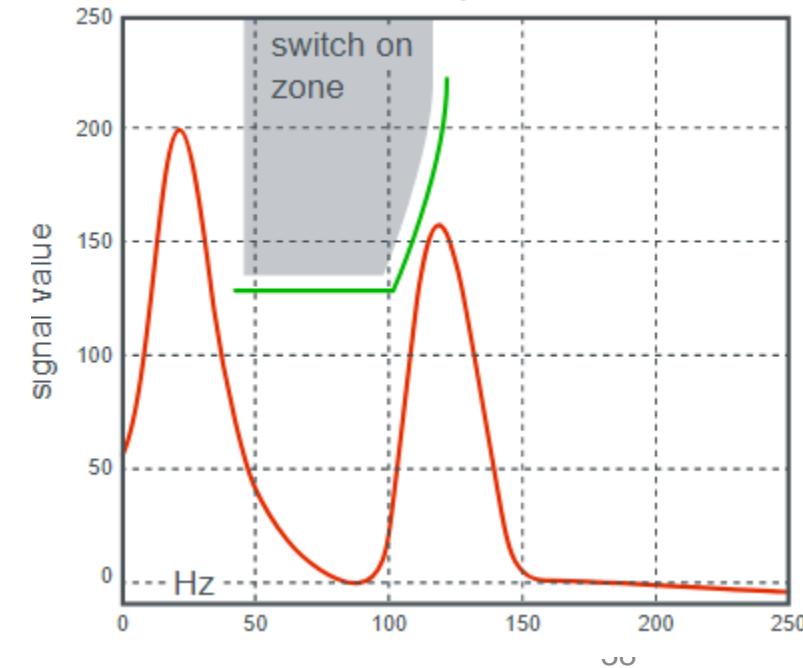
- Alta atenuación
- Alta conductancia
- Alta permeabilidad

media present



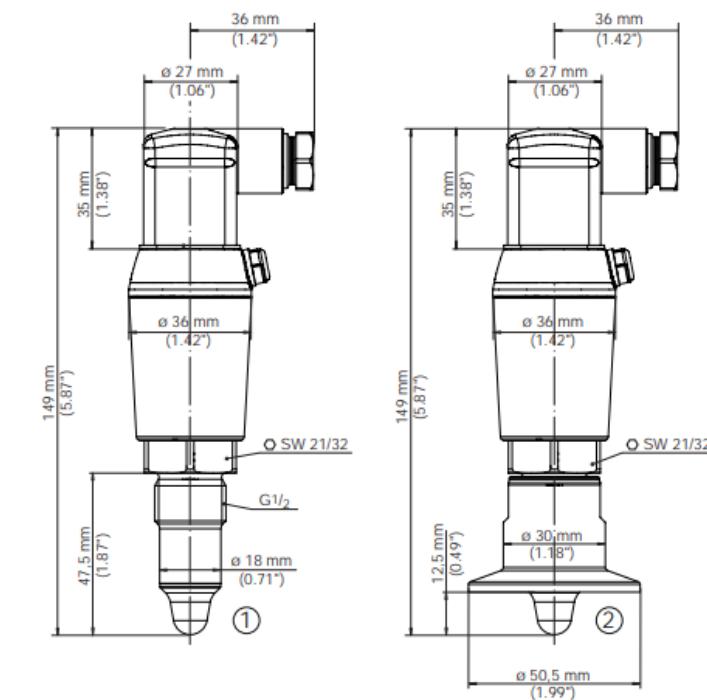
- Baja atenuación
- Alta conductancia
- Alta permeabilidad

residue present



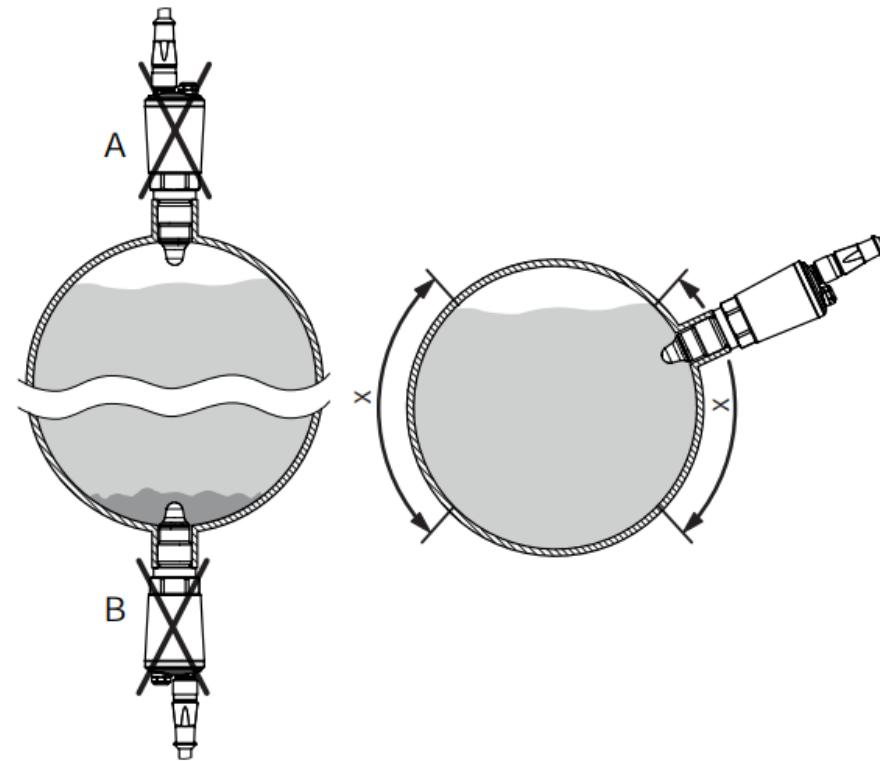
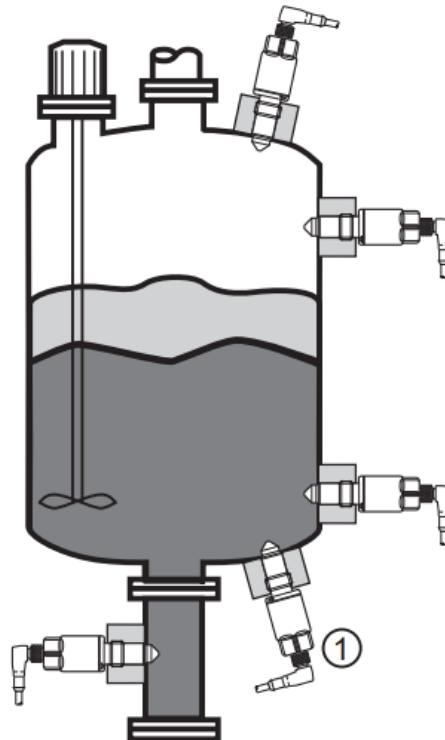
# Detección de Nivel por Espectroscopía de Impedancia

- El equipo no solo permite detección ON/OFF sino que a través de su salida analógica (típicamente por IOLink) permite identificar diversos materiales y conmutar distintas salidas digitales según el material detectado.
- Están reemplazando rápidamente a los sensores por horquilla vibrante.
- Mediante la utilización de accesorios mecánicos se pueden montar de manera tal que sean sanitarios.
- Inmune a presencia de espuma y depósitos.



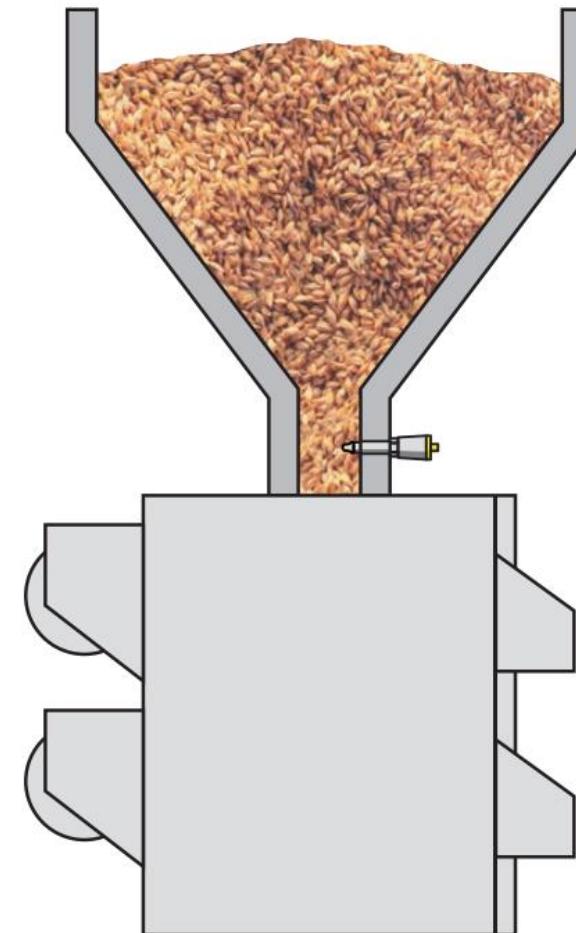
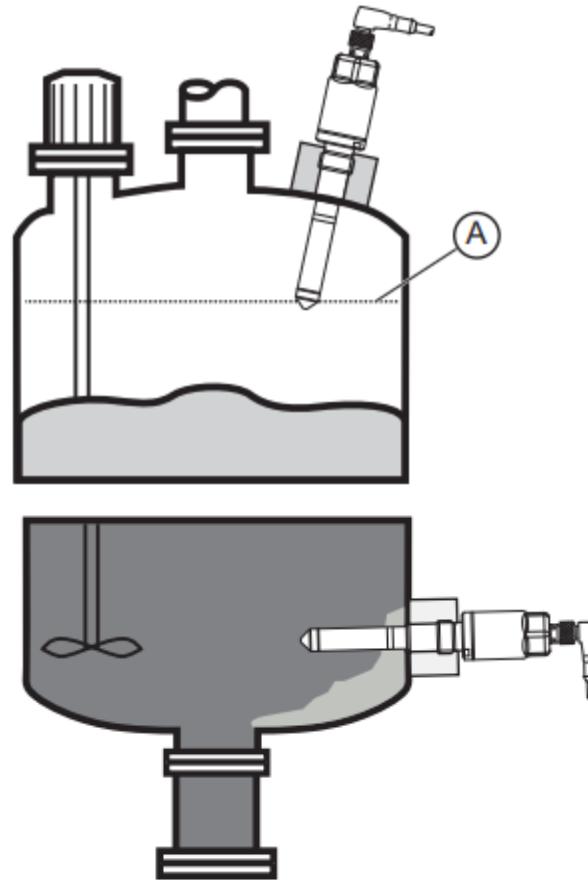
# Detección de Nivel por Espectroscopía de Impedancia

Consideraciones de montaje de sensores de sonda corta



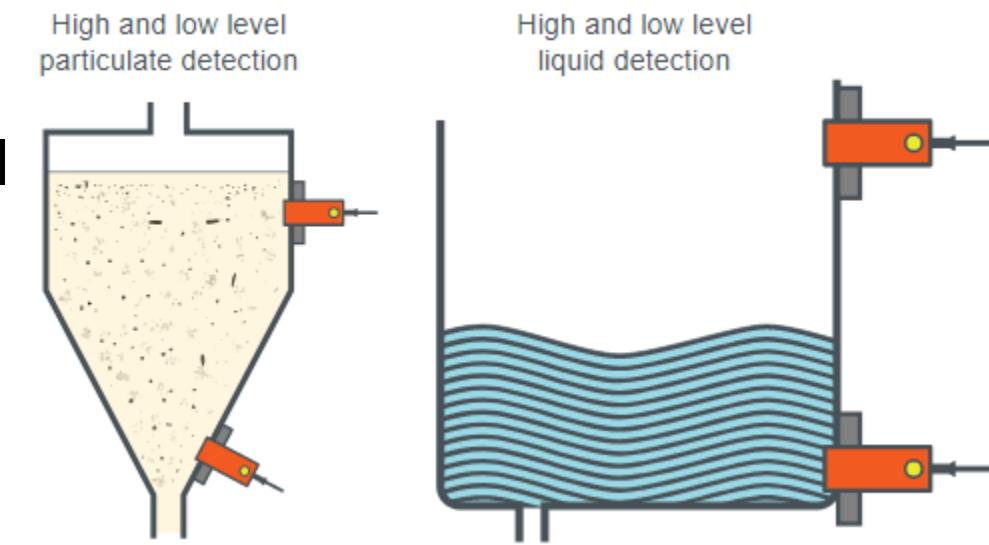
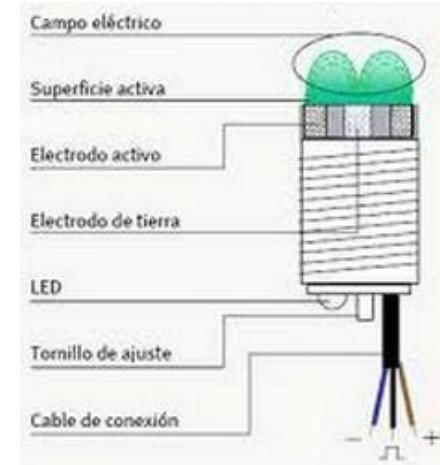
# Detección de Nivel por Espectroscopía de Impedancia

Consideraciones de montaje de sensores de sonda larga



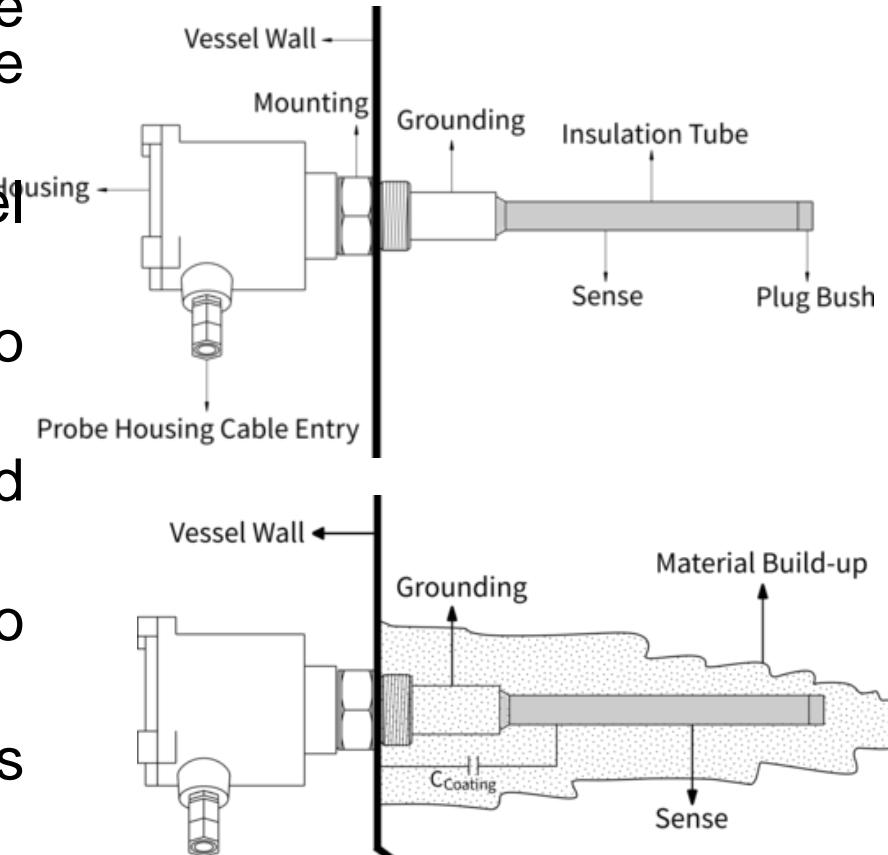
# Detección de Nivel con Sensores de Proximidad Capacitivos

- En determinadas condiciones es posible utilizar sensores de proximidad capacitivos (vistos en la clase de detección de objetos) para detección de nivel.
- Funcionan en líquidos y sólidos granulados
- Tienen ajuste de sensibilidad
- El tanque NO debe ser metálico
- El sensor debe ser colocado en la pared lateral



# Detectores de Nivel Capacitivos – Sonda Estándar

- Mismo principio de operación que los sensores de nivel continuos, midiendo capacidad entre el tanque metálico y una varilla sensora.
- Operan a unos 500kHz midiendo capacidades del orden de los pF.
- La varilla sensora está aislada del housing utilizando aislantes de bajo dieléctrico como el Nylon.
- Cuando el material cubre el sensor, la capacidad aumenta y el sensor comuta.
- Cuando el tanque no es metálico se utiliza un tubo perforado metálico como segundo electrodo.
- **Limitación:** El detector de nivel comienza a dar falsas indicaciones cuando el material se adhiere a la sonda.

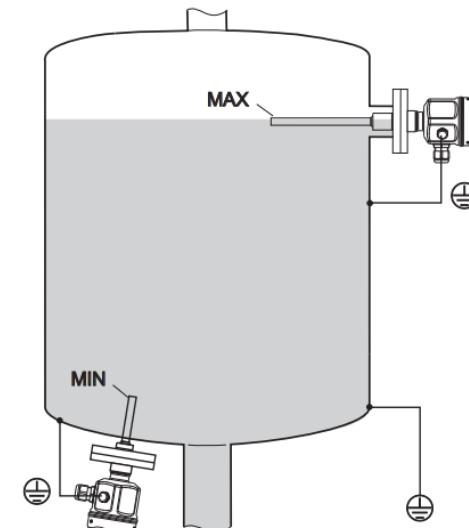
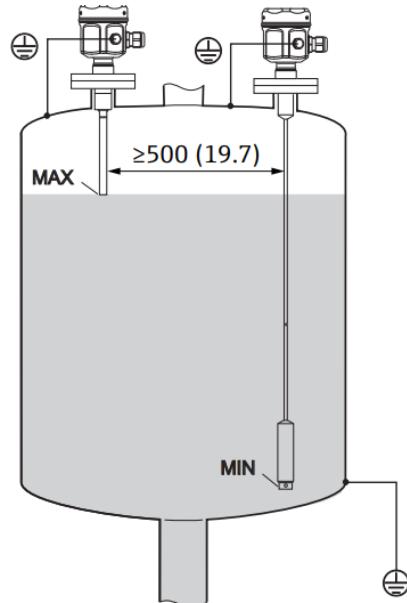


# Detectores de Nivel Capacitivos – Sonda Estándar

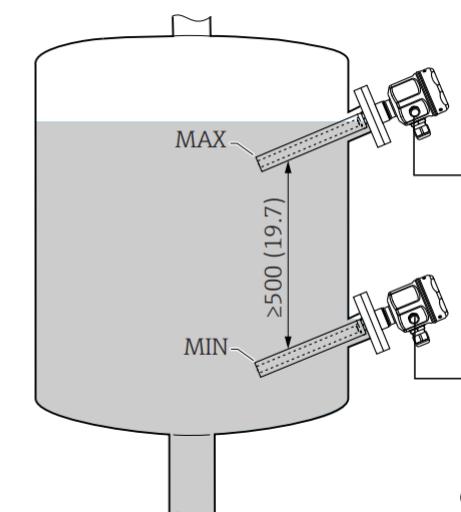
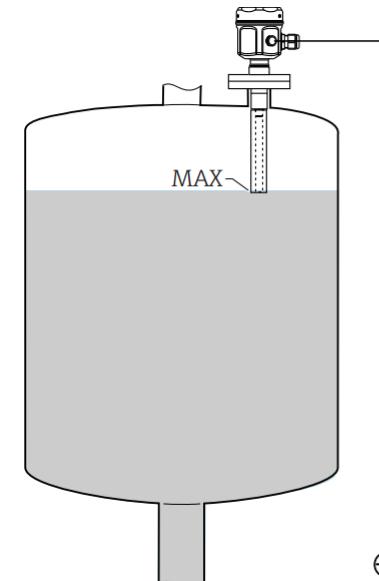
Consideraciones de montaje en tanques:

- La sonda no debe tocar el tanque
- Distancia mínima de 500mm entre sensores
- No instalar debajo de cortinas de agua
- Suficientemente alejados de agitadores

Tanques metálicos



Tanques plásticos o no conductivos



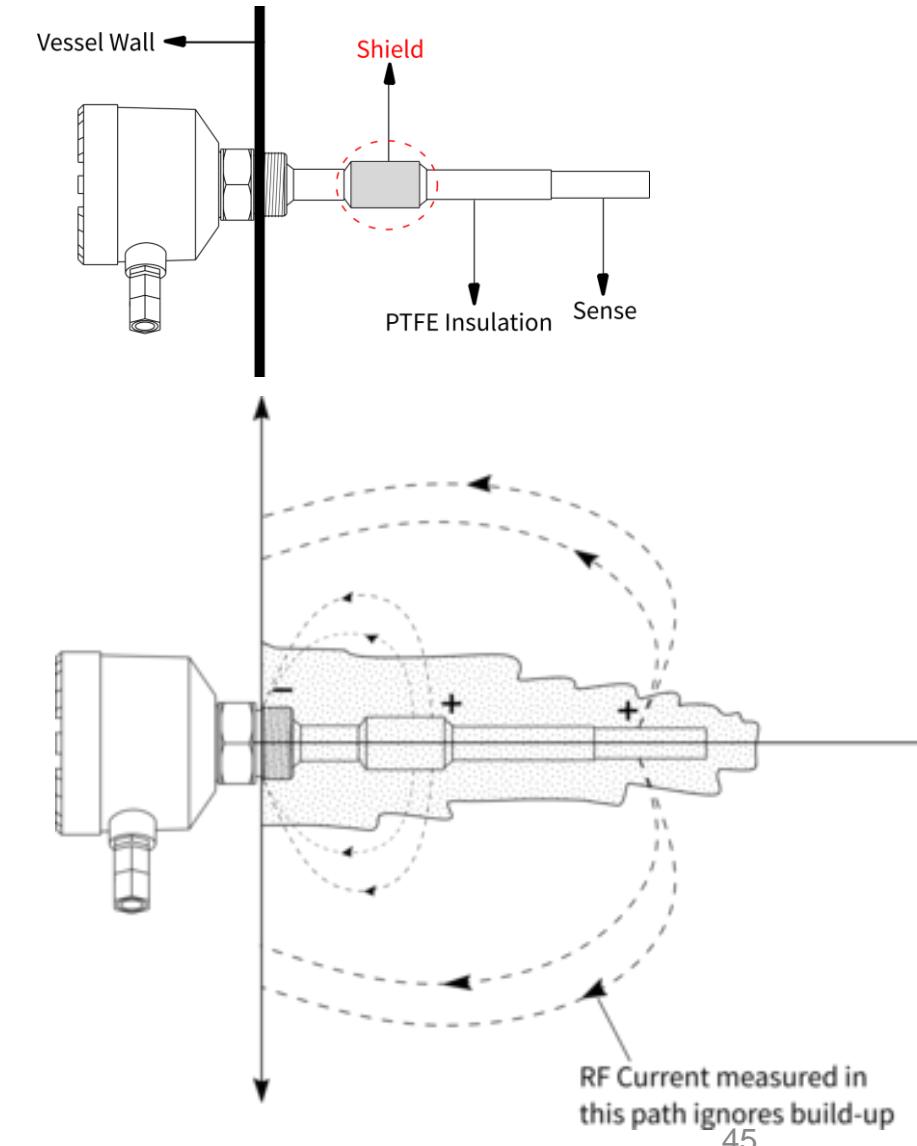
# Detectores de Nivel Capacitivos – Sonda con compensación activa de adherencias

El electrodo sensor y el blindaje están conectados a la misma fuente (equipotenciales) pero aislados eléctricamente entre ellos.

El propósito de agregar el blindaje es impedir que haya circulación de corriente de RF desde la punta sensora y la pared del tanque a través del material residual.

Este diseño ayuda a diferenciar entre la acumulación de material residual y el nivel real.

<https://www.youtube.com/watch?v=kljAjbYsW7Y>



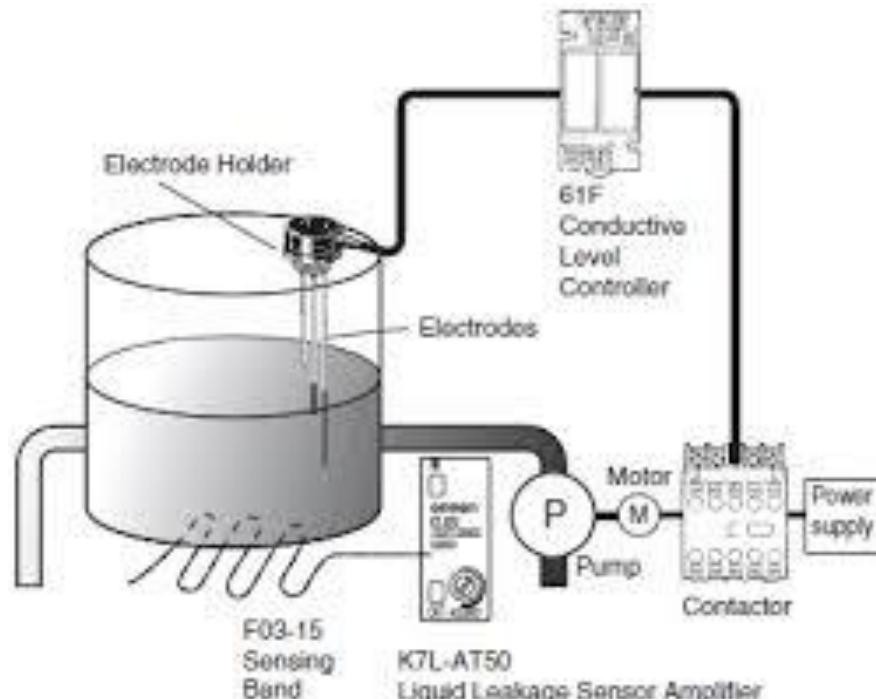
# Detección de Nivel por Conductividad

- La resistencia entre los electrodos de medición cambia con la presencia o ausencia de producto.
- Para uso en aplicaciones con líquidos conductivos (a partir de  $10 \mu\text{S}/\text{cm}$ ).
- Para evitar la electrolisis se utiliza corriente alterna libre de CC.
- Tecnología económica con hasta cinco puntos de detección de nivel con una única sonda.
- Requiere la instalación de “Level control relay”.

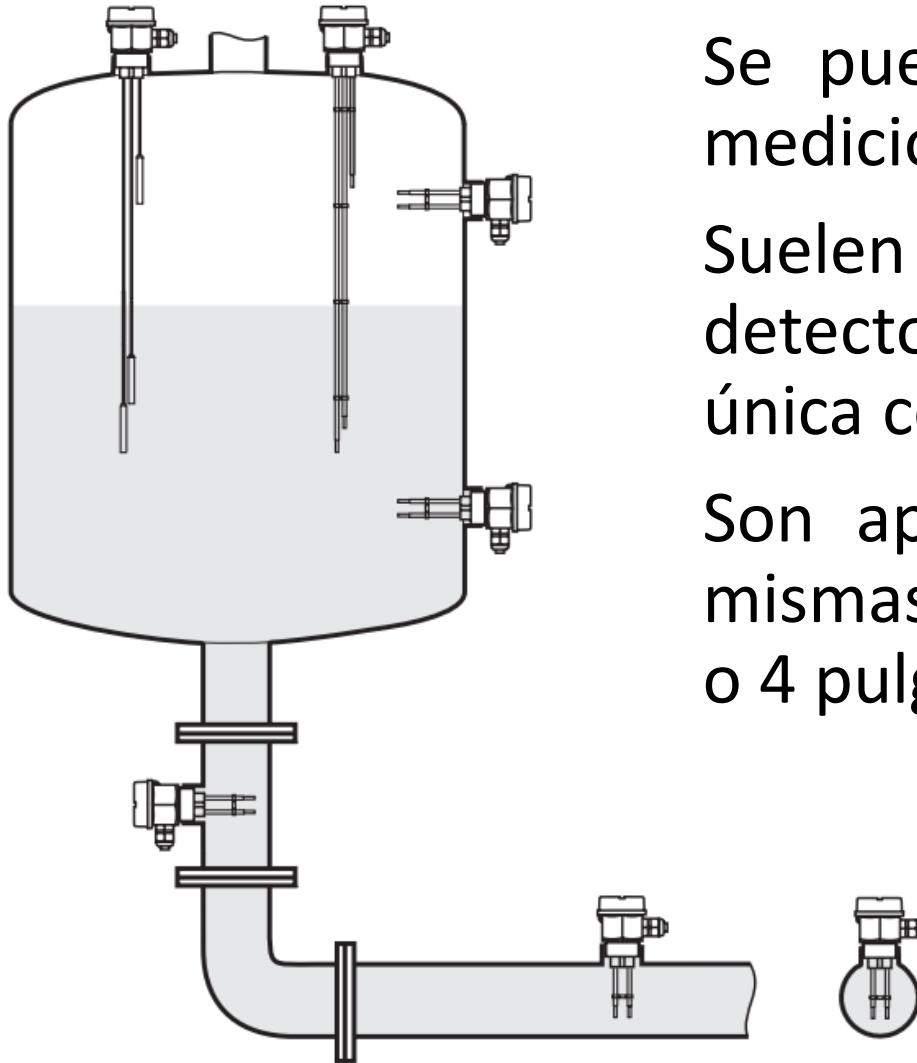


# Detección de Nivel por Conductividad

- En sondas de varilla única, la pared del tanque debe ser conductora de la electricidad para funcionar como contraelectrodo.
- Las sondas pueden ser con varillas o cables. En ambos casos se debe realizar el corte a la medida de detección deseada.



## Detección de Nivel por Conductividad



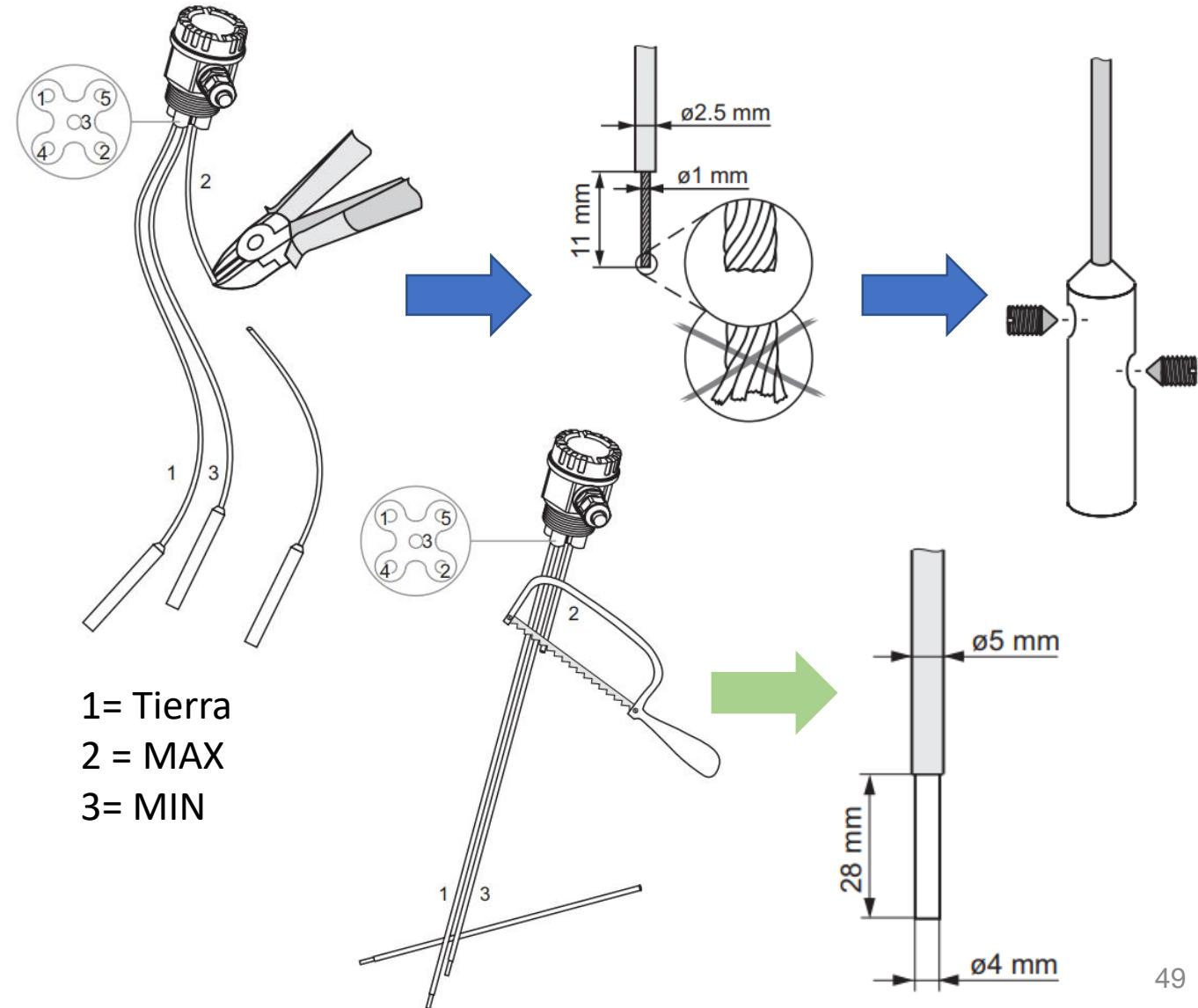
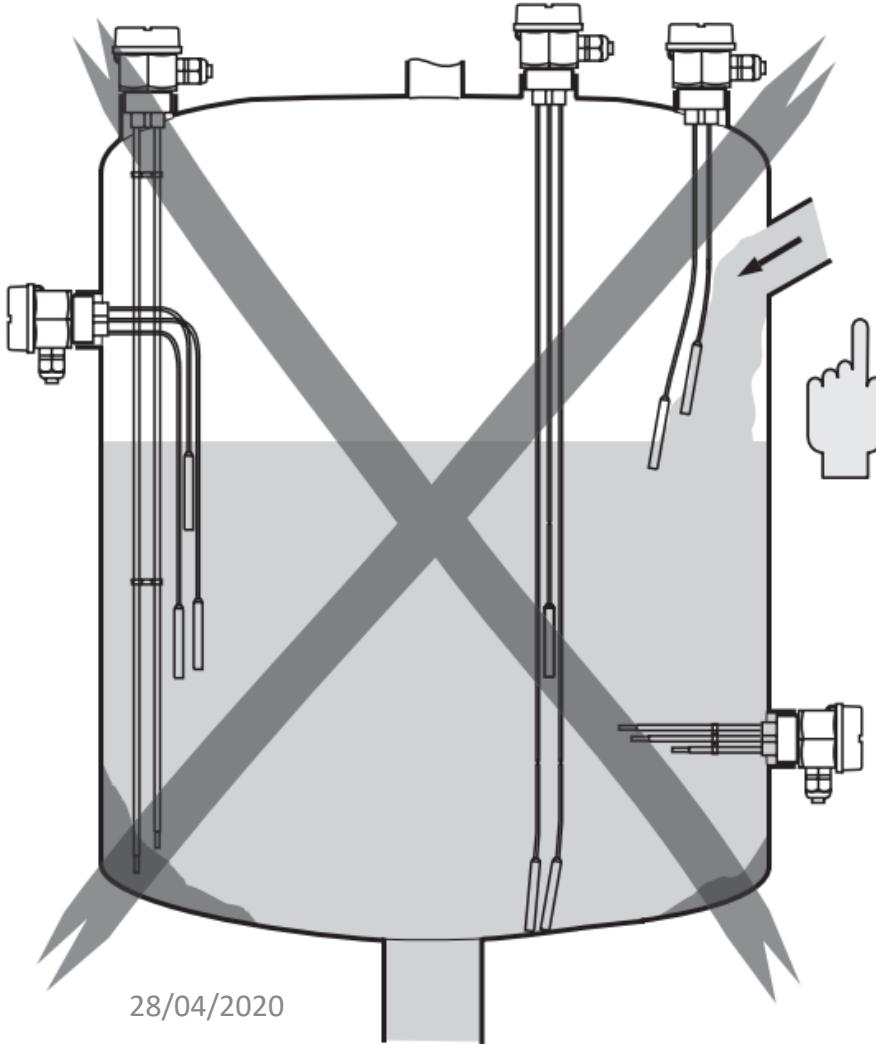
Se pueden montar horizontalmente (solo 1 punto de medición) o verticalmente como es más usual.

Suelen ser sensores económicos. Son los únicos detectores de nivel con medición multipunto desde una única conexión a proceso.

Son aptos para su utilización en cañerías, aunque las mismas deben ser de diámetro (normalmente mayores a 3 o 4 pulgadas).

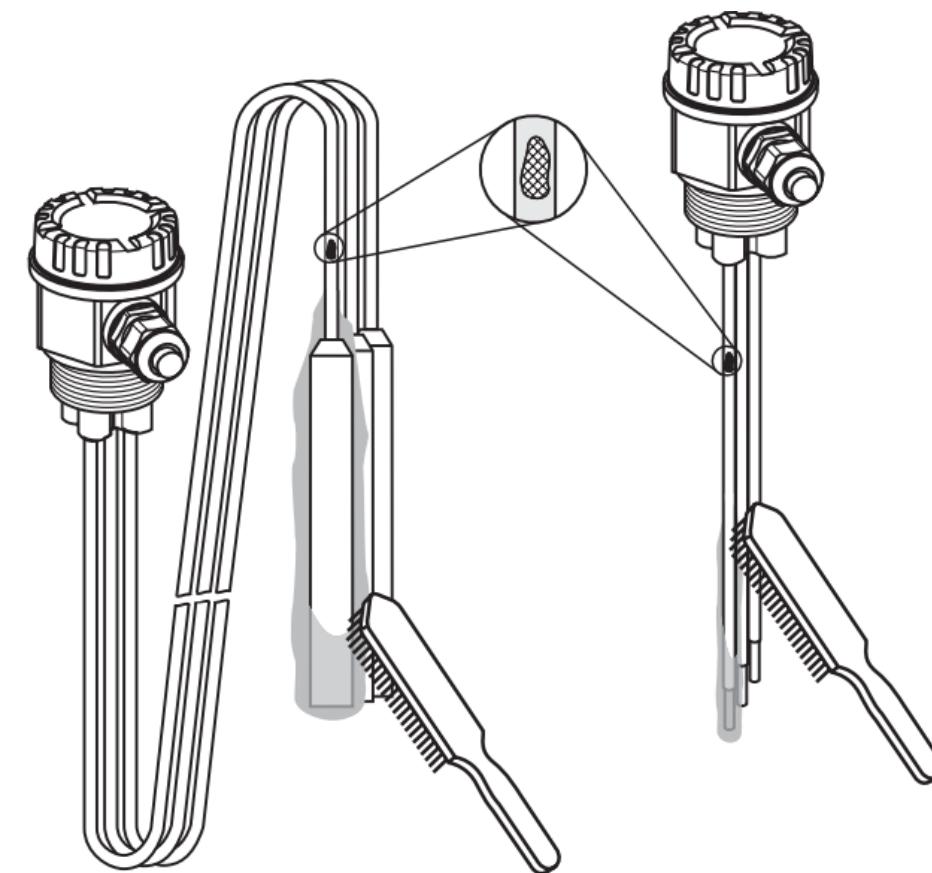
# Detección de Nivel por Conductividad

Ajuste del largo de las sondas de tipo cable y tipo varilla



# Detección de Nivel por Conductividad

Requiere una limpieza periódica de las sondas para eliminar las adherencias.



## Detección de Nivel por Interruptor de Flotador

Se usa predominantemente en depósitos y contenedores como protección para bombas o como alarma de nivel.

Siempre comutan un contacto que puede ser NA o NC en función si se quiere medir un nivel bajo o alto.

Hay versiones para montaje lateral con rosca G1/2 en adelante.

Suelen ser muy económicos.

Pueden trabarse o enredarse si el medio no contiene sólidos en suspensión.



## Detección de Nivel por Paleta Rotativa

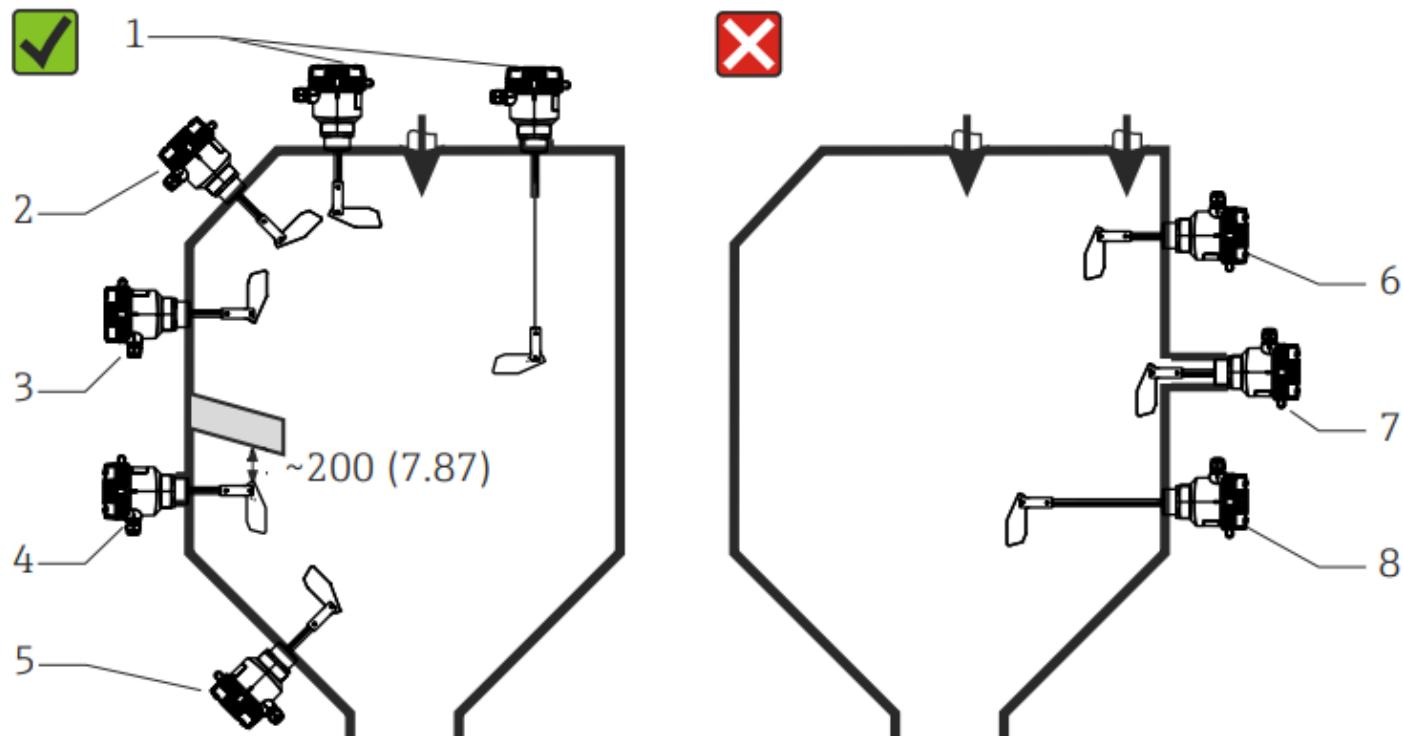
Para la detección de nivel en sólidos granulados.

Un pequeño motor hace girar la paleta. La misma gira libremente cuando no hay producto, mientras que acciona un embrague ante el aumento de toque que requiere la presencia de sólidos. La activación del embrague es detectada por un sensor y se conmuta la salida (NO o NC).

<https://www.youtube.com/watch?v= -kRQVp4NB0>



# Detección de Nivel por Paleta Rotativa



## Orientaciones admisibles

- 1: Vertical desde la parte superior
- 2: En ángulo desde la parte superior
- 3: Desde el lateral
- 4: Desde el lateral con cubierta protectora para proteger de caídas de sólidos
- 5: Desde la parte inferior (el equipo debe estar protegido contra choques)

## Orientaciones no admisibles

- 6: En la dirección del flujo de sólidos
- 7: Casquillo de montaje demasiado largo
- 8: Horizontal con longitudes de eje >300 mm (11.8 in)



# Detección de Nivel por Barrera de Microondas

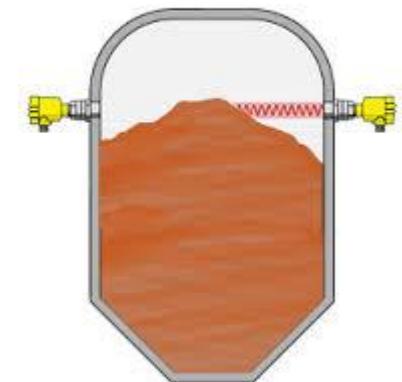
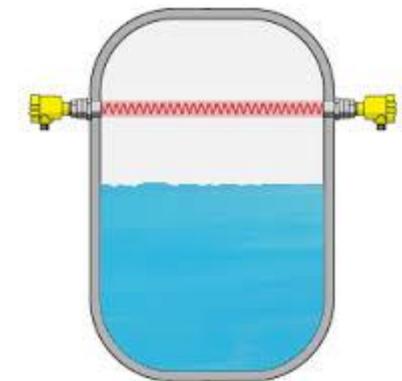
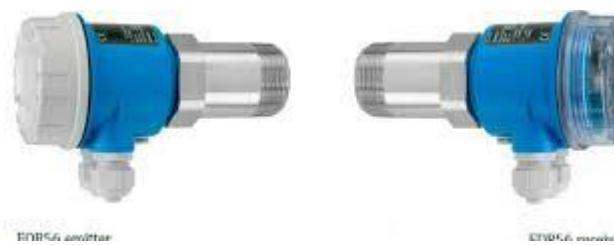
Las barreras de microondas se basan en el fenómeno de absorción de las microondas.

Un emisor y un receptor de microondas forman una barrera de radiación. Un estrecho haz atraviesa el depósito en el nivel deseado.

Tan pronto como el producto entra en el haz de radiación, la señal de las microondas se amortigua, de modo que sólo una parte llega al receptor.

Esta atenuación se detecta y se dispara una señal de comutación.

- Densidad alta = mucha atenuación
- Densidad baja = poca atenuación



# Detección de Nivel por Barrera de Microondas

## Ventajas:

- ✓ Es un método insensible a las condiciones del proceso ya que el montaje es externo. Esto permite su utilización con sólidos abrasivos, aplicaciones con polvo en suspensión con riesgo de explosión, etc...
- ✓ No tiene partes móviles ni desgaste.
- ✓ Aplicable a la medición de líquidos y sólidos de todo tipo
- ✓ Puede dar una señal continua.



# Detección de Nivel por Horquilla Vibrante

detección

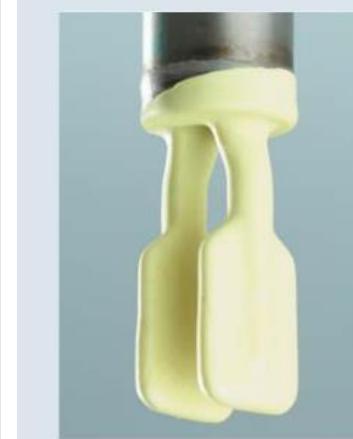
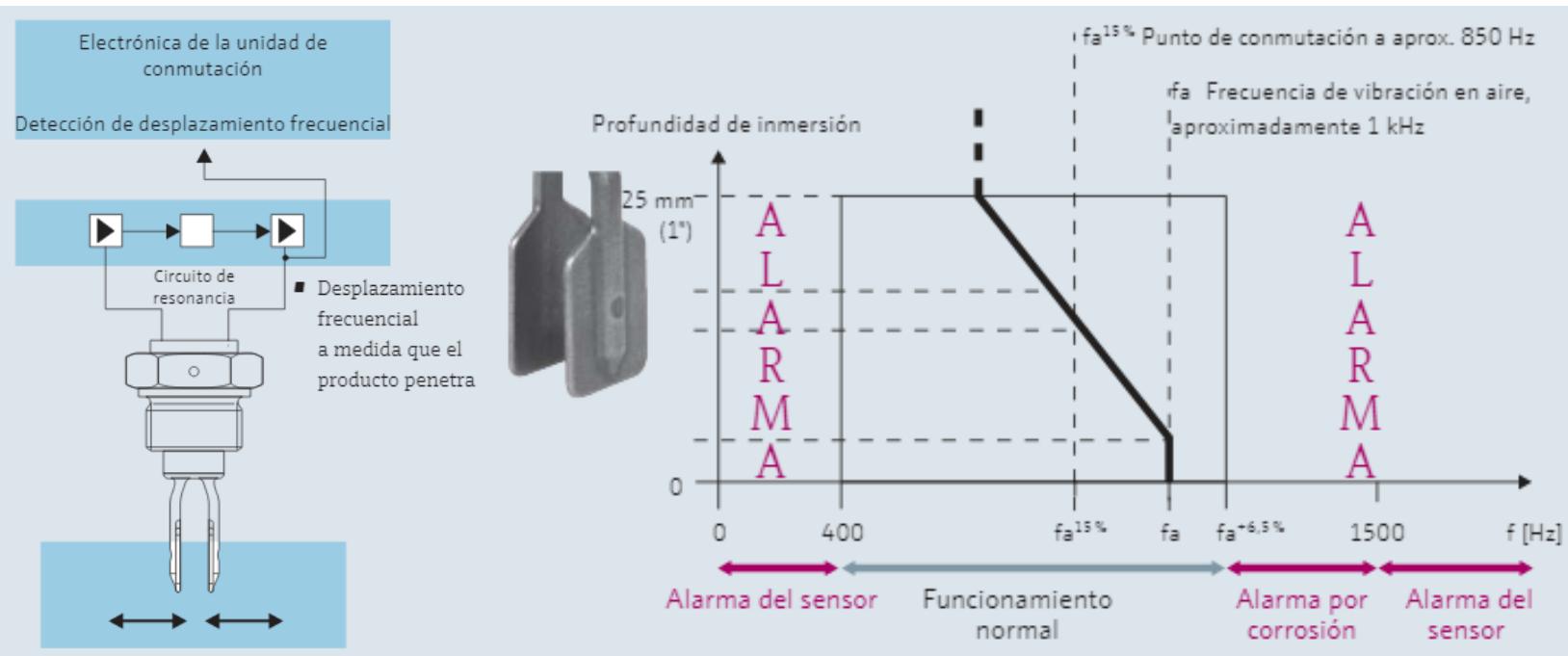
- Para la ~~medición~~ de nivel en líquidos y sólidos granulados.
- Se excita un cristal piezoeléctrico que excita una horquilla de dos clavijas. Cuando están en el aire, las horquillas vibran a su frecuencia natural. Cuando el líquido cubre las horquillas, la frecuencia y la amplitud de la oscilación caen.
- La frecuencia utilizada va de 1 a 1,5kHz.
- Los cambios de frecuencia se monitorizan continuamente a través de los componentes electrónicos del interruptor.
- No se ve afectado por la presencia de espuma y tolera cierto nivel de adherencias.
- El principio de funcionamiento también permite una medida de la densidad.



<https://www.youtube.com/watch?v=FL5Tg4sRrmk>

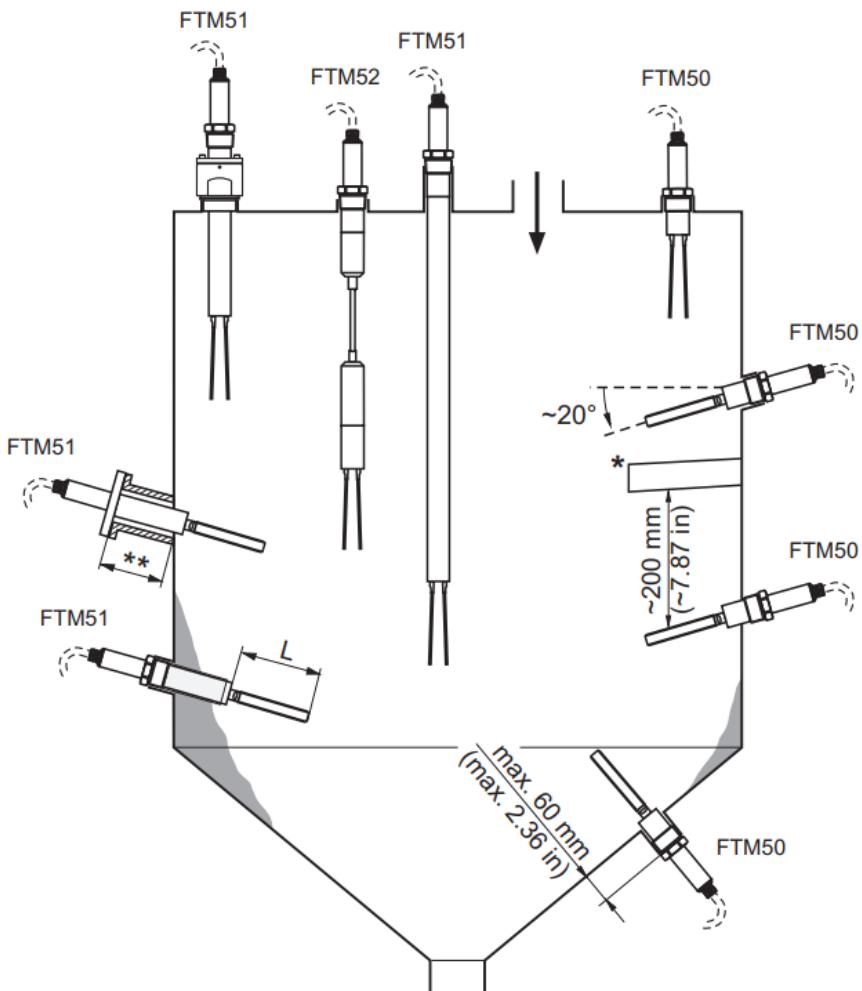
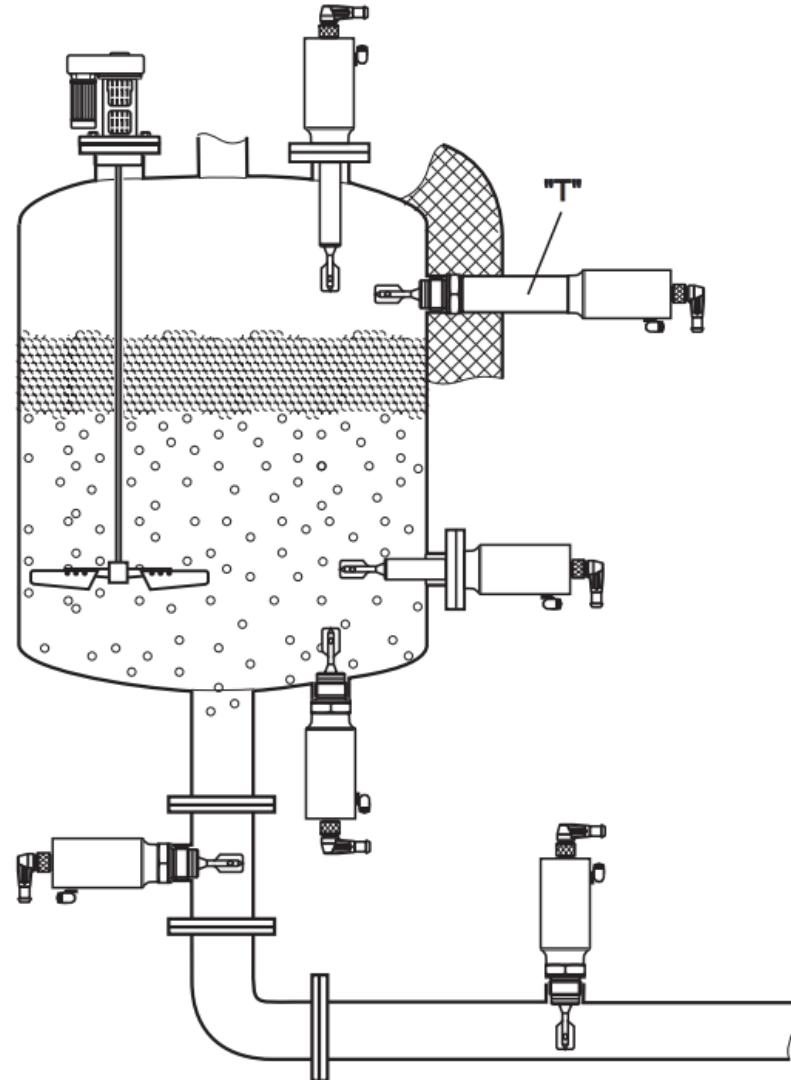
# Detección de Nivel por Horquilla Vibrante

- Mediante un análisis frecuencial los detectores de nivel de horquilla vibrante permiten la posibilidad de detectar fallos de manera preventiva.
- Un cambio de frecuencia más allá de un cierto valor admisible indica una irregularidad en el sistema vibrante, por ejemplo, corrosión o adherencias.



# Detección de Nivel por Horquilla Vibrante

- Consideraciones de montaje para Líquidos y Sólidos



# Detección de Nivel por Horquilla Vibrante

## Ventajas:

- ✓ Uso universal: insensible a las propiedades del producto como la conductividad, la constante dieléctrica, la viscosidad, la presión y la temperatura
- ✓ Sin tareas de calibración ni mantenimiento
- ✓ Punto de commutación preciso
- ✓ Control de la acumulación de suciedad y de la abrasión
- ✓ Utilizable tanto en tanques como en cañerías