



SENSORES Y ACONDICIONADORES

TEMA 6

SENSORES CAPACITIVOS

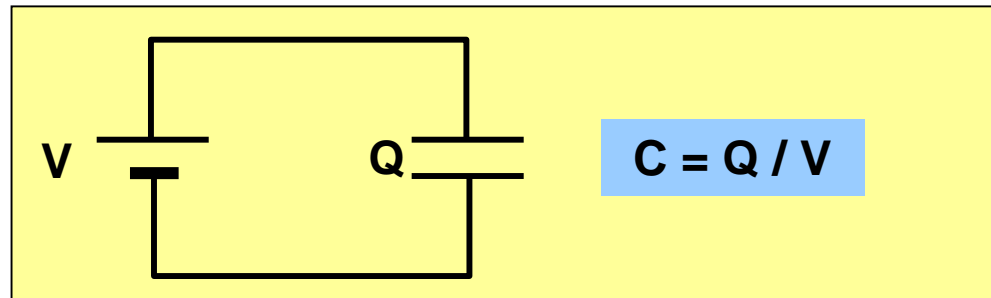
Profesores: Enrique Mandado Pérez
Antonio Murillo Roldan



SENSORES DE CONDENSADOR VARIABLE

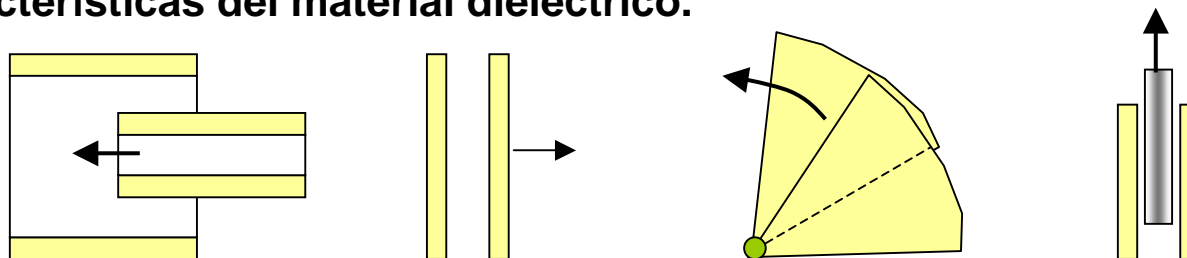
Sensores basados en la variación de la capacidad de un componente eléctrico o electrónico en respuesta a la variación de alguna magnitud física.

[PALL 98 pag. 173]
[PERE 94 pag. 285]



Un condensador es un dispositivo eléctrico que está formado por dos conductores separados por un material aislante (dieléctrico). Se caracteriza por almacenar cargas cuando se aplica una tensión entre los dos conductores y la relación entre la cantidad de cargas almacenadas y la tensión aplicada recibe la denominación de **capacidad**.

El valor de la capacidad depende de la disposición geométrica de los conductores y de las características del material dieléctrico.





SENSORES DE CONDENSADOR VARIABLE

CONSIDERACIONES IMPORTANTES

- Se utilizan para medir desplazamientos lineales y angulares, detectar objetos próximos, medir el grado de humedad, de presión, de nivel y aceleración, etc.
- En general no les afectan las variaciones de temperatura (excepto si el dieléctrico es agua), son muy estables en entornos hostiles y tienen muy bajo consumo.
- Necesitan circuitos de acondicionamiento especiales.

Los principales sensores capacitivos son:

- **Sensores de condensador variable**
- **Sensores de condensador diferencial**
- **Sensores de diodos de capacidad variable**



SENSORES DE CONDENSADOR VARIABLE

CONDENSADORES DE PLACAS PLANAS PARALELAS

La capacidad C depende del área A de las placas, de la distancia d entre ellas y de la constante dieléctrica ϵ (permitividad) del aislante, y viene dada por la expresión:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}$$

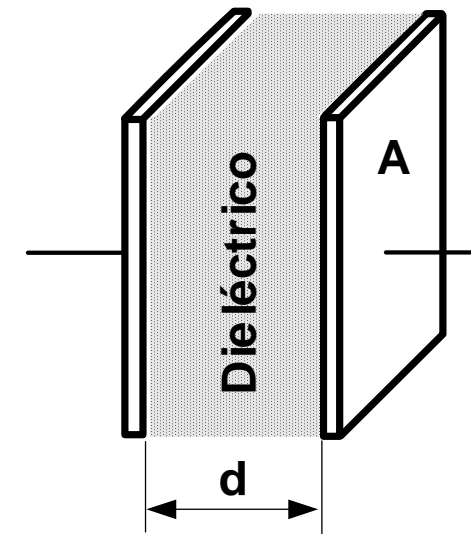
en la cual $\epsilon_0 = 8,85 \text{ pF/m}$ es la permitividad del vacío.

La impedancia Z del condensador es:

$$Z = \frac{1}{\omega C} = \frac{d}{\omega \epsilon A}$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$$



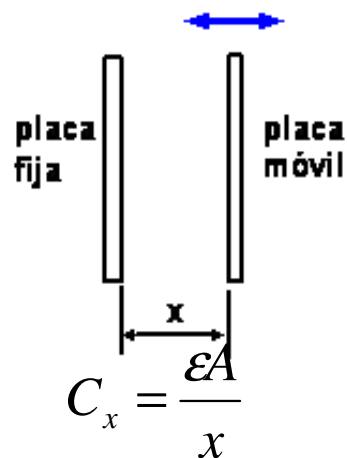


SENSORES DE CONDENSADOR VARIABLE CONDENSADORES DE PLACAS PLANAS PARALELAS

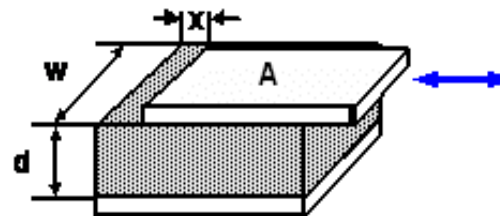
Según se mida la impedancia o la admitancia y en función del parámetro que se modifica, los sensores de condensador plano son o no lineales.

Si se mide la admitancia (proporcional a la capacidad C) se obtiene:

- Un sensor no lineal si se hace variar la distancia x entre las placas.
- Un sensor lineal si se modifica el área A de las placas.
- Un sensor lineal si se modifica la constante dieléctrica ϵ .

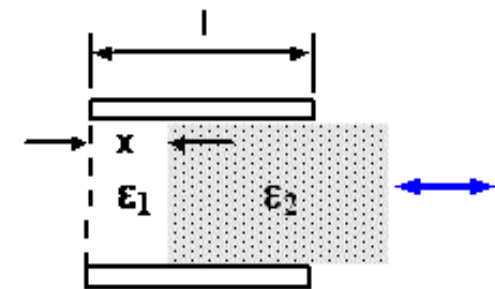


a)



$$C_x = \frac{\epsilon}{d} (A - wx)$$

b)



$$C_x = \frac{\epsilon_0 w}{d} [\epsilon_2 l - (\epsilon_2 - \epsilon_1) x]$$

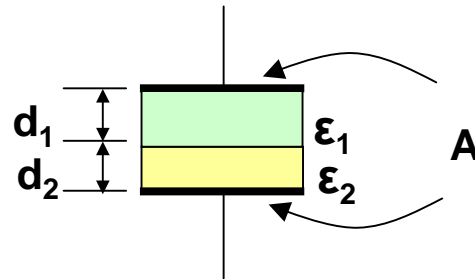
c)



SENSORES DE CONDENSADOR VARIABLE

CONDENSADORES DE PLACAS PLANAS PARALELAS

Es usual que existan condensadores con dos o más dieléctricos:



$$C = A / (d_1 / \epsilon_1 + d_2 / \epsilon_2)$$

La ϵ_r del aire se considera igual que la del vacío “1”. La ϵ_r del agua pura varía con la temperatura y su valor es: $\epsilon_r = 88$ a 0°C y $\epsilon_r = 55,33$ a 100°C . Dicha diferencia se puede utilizar para medir el nivel de agua de un depósito, el grado de humedad o la temperatura ambiental.

Si el dieléctrico es un **material ferroeléctrico** y su temperatura es superior a la temperatura de Curie, la ϵ_r es proporcional al recíproco de la temperatura, de acuerdo con la expresión:

$$\epsilon_r = \frac{k}{T - T_c}$$

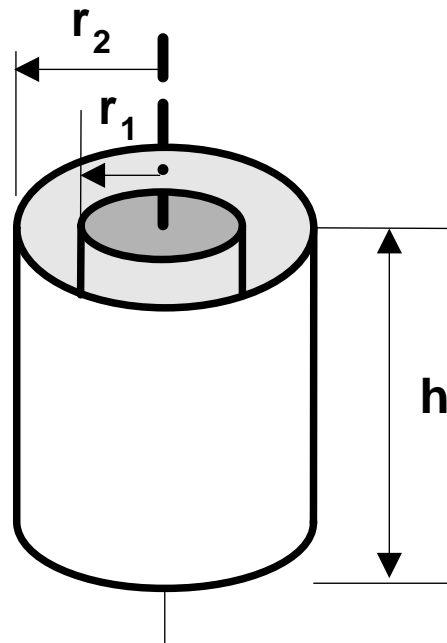
en la cual T es la temperatura del dieléctrico, T_c es la temperatura de Curie y k es una constante. En este caso, la variación de la temperatura produce un cambio de la capacidad del condensador



SENSORES DE CONDENSADOR VARIABLE

CONDENSADORES CILINDRICOS (COAXIALES)

La capacidad C depende de los radios interno r_1 y externo r_2 de las dos placas del condensador, de la altura de las mismas y de la constante dieléctrica ε del material aislante colocado entre ellas, y su valor se obtiene mediante la expresión:



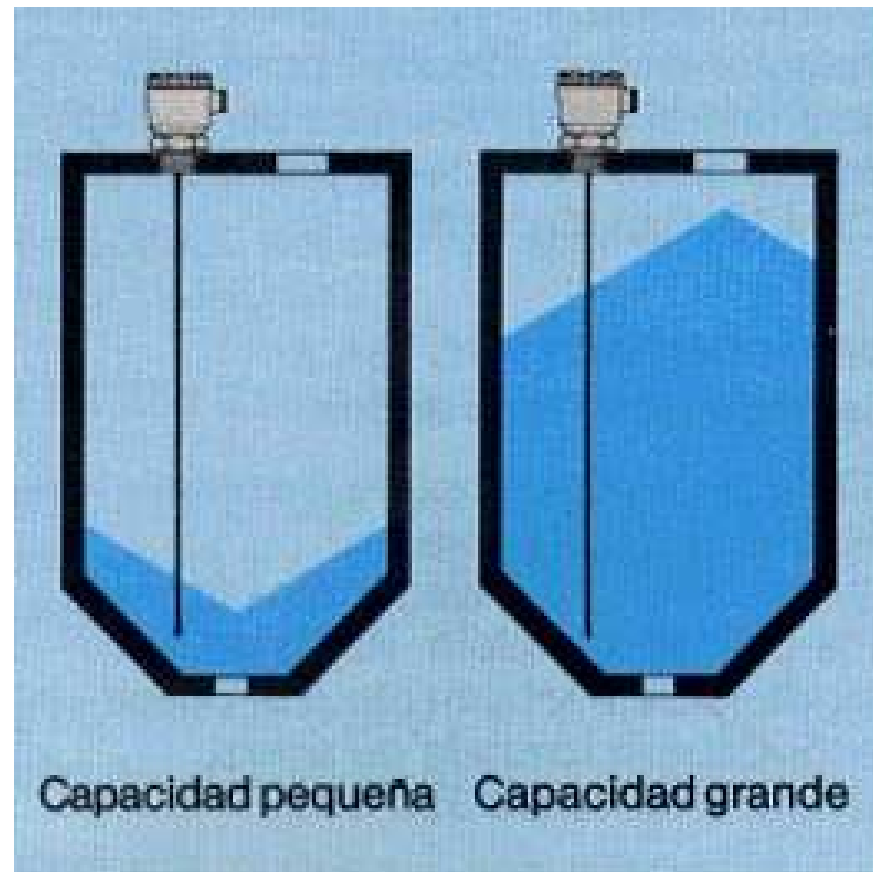
$$C = \frac{2\pi\varepsilon h}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$



SENSORES DE CONDENSADOR VARIABLE

CONDENSADORES CILÍNDRICOS (COAXIALES)

Ejemplo: Medida del nivel de áridos o granos





SENSORES DE CONDENSADOR VARIABLE

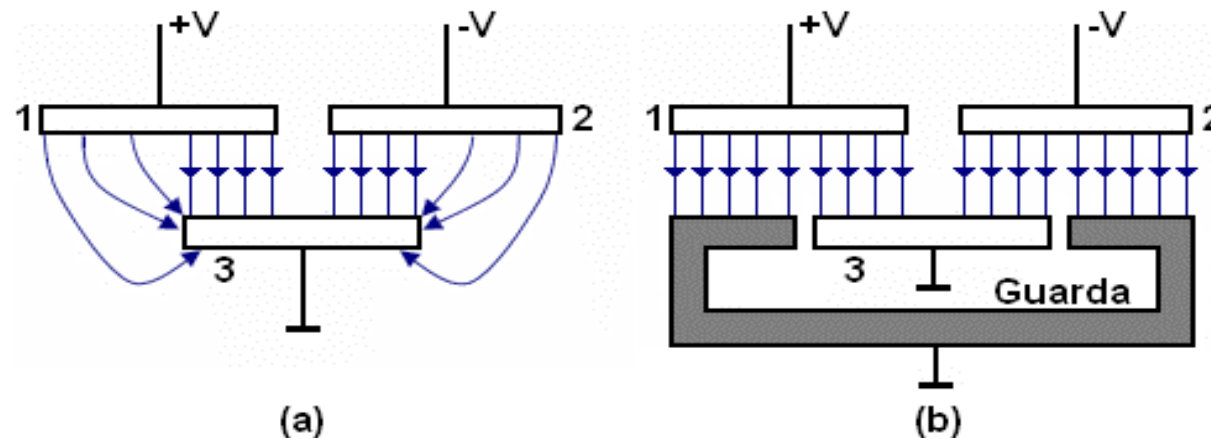
El empleo como sensor de un condensador variable tiene algunas limitaciones:

1ª limitación: No siempre se pueden despreciar los efectos de los bordes

La dispersión del campo en los bordes de los electrodos hace que la diferencia entre C_1 y C_2 no sea proporcional a x .

Para evitar este efecto se utiliza un electrodo de guarda que rodea al electrodo 3, está al mismo potencial que él y se desplazan conjuntamente.

Se consigue así que el campo eléctrico entre las placas de medida sea uniforme.



$$C = \epsilon \frac{A}{d} + 2 \epsilon \frac{a}{\pi} \ln \frac{\pi a}{d}$$



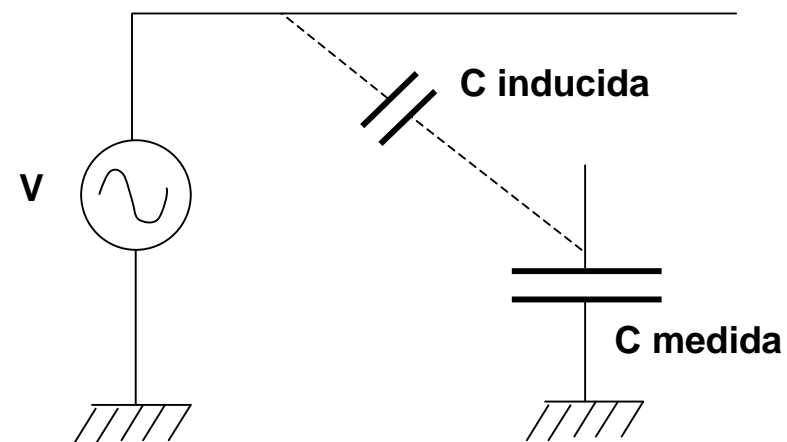
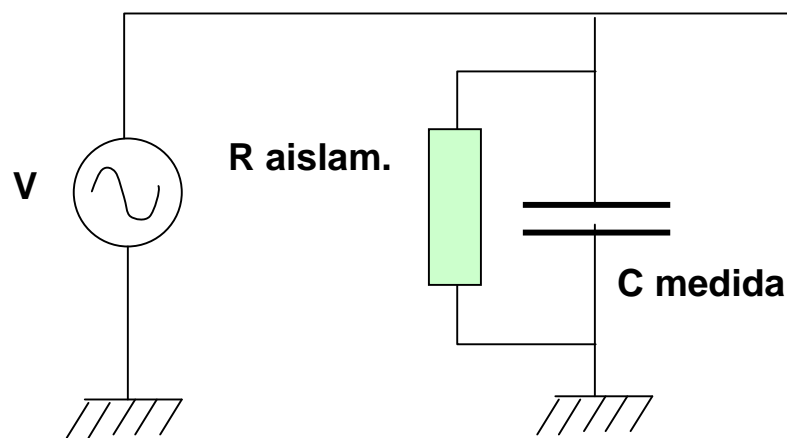
SENSORES DE CONDENSADOR VARIABLE

2ª Limitación: El aislamiento entre las placas debe ser elevado y constante

La humedad da lugar a la existencia de resistencias parásitas en paralelo con C y a variaciones parásitas de la impedancia del condensador.

3ª Limitación: Existencia de interferencias capacitivas debido a que solo se puede poner a masa una de las dos placas

Para evitarlas se puede apantallar eléctricamente la placa y los cables conectados a ella con respecto al entorno del sensor.





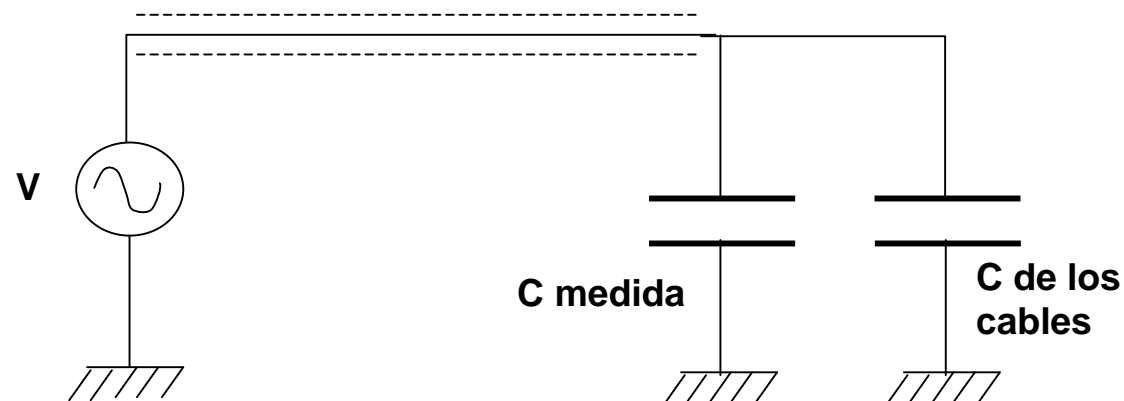
SENSORES DE CONDENSADOR VARIABLE

4ª Limitación: Apantallamiento de los cables

Al apantallar los cables de conexión, para evitar interferencias capacitivas, se introduce una capacidad en paralelo con el condensador. Esto disminuye la sensibilidad porque la magnitud a medir solo hace cambiar la capacidad del sensor, que es una parte de la capacidad total.

5ª Limitación: La posición relativa entre los conductores del cable y el dieléctrico

Constituye una fuente de error adicional que puede ser muy grave si las variaciones de geometría son importantes.

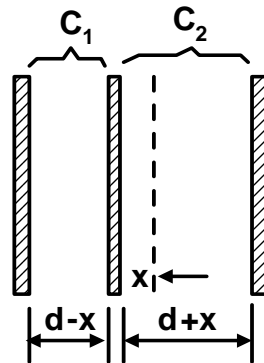




SENSORES DE CONDENSADOR VARIABLE DIFERENCIAL

Un **condensador diferencial** está formado por dos placas metálicas fijas entre las que se puede desplazar paralelamente otra placa de tal modo que forman dos condensadores variables que experimentan el mismo cambio de su capacidad pero en sentidos opuestos. Mediante un circuito de acondicionamiento adecuado que proporcione una tensión de salida en función de la diferencia de capacidades se obtiene una salida lineal y un aumento de la sensibilidad.

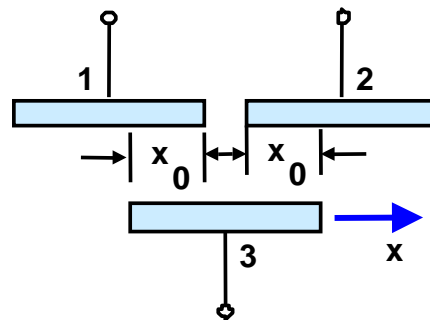
Cambio de la distancia entre placas



$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{\epsilon A}{d-x} \\ C_2 &= \frac{\epsilon A}{d+x} \end{aligned} \right\} C_1 - C_2 \cong \frac{2\epsilon A}{d^2} x$$

para pequeños valores del desplazamiento x

Cambio del área de una de las placas



$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{\epsilon}{d} w(x_0 - x) \\ C_2 &= \frac{\epsilon}{d} w(x_0 + x) \end{aligned} \right\} C_1 - C_2 = -\frac{2\epsilon}{d} \cdot w \cdot x$$

w: anchura de la placa



VENTAJAS DE LOS SENSORES CAPACITIVOS

- Tienen un **error por carga mínimo**, porque no existe contacto mecánico directo. No hay errores de fricción, ni de histéresis y además, no hay que hacer mucha fuerza para desplazar al elemento móvil.
- La **estabilidad y la reproducibilidad son muy elevadas** porque el valor de C no depende de las propiedades de las placas, ni de los cambios de temperatura. Además los efectos del envejecimiento son mínimos y no existen derivas temporales.
- Si el dieléctrico es aire, la constante dieléctrica **varía poco con la temperatura**.
- Proporcionan elevada **resolución** para medir desplazamientos.
- **No producen campos magnéticos** y los campos eléctricos son pequeños, en contraposición con los sensores inductivos.
- La **energía consumida es mínima**.

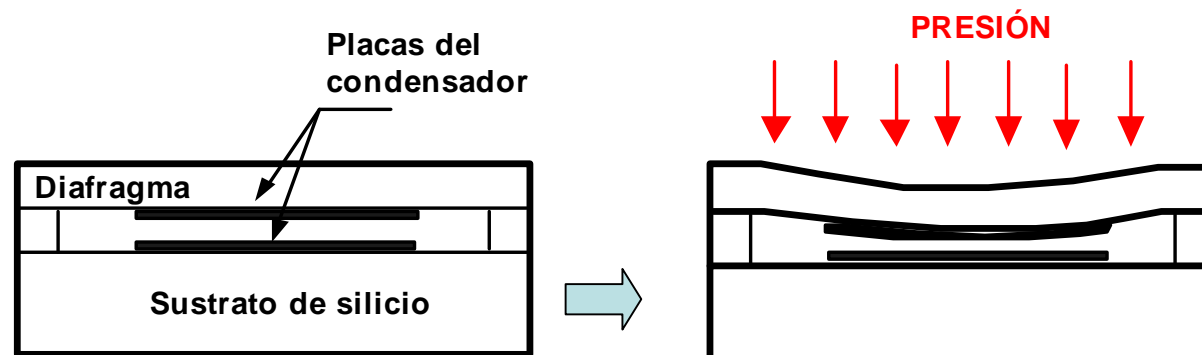


APLICACIONES A LA IMPLEMENTACIÓN DE SENSORES DE MEDIDA

Medida de desplazamientos muy pequeños (hasta 10^{-10} mm), debido a que no hay errores de fricción.

- Medida de variables que se pueden convertir en un desplazamiento como por ejemplo la presión, la fuerza, el par, la aceleración, etc.
- Medida de magnitudes que provocan un cambio de las características de dieléctrico, como por ejemplo la humedad y la temperatura (dieléctrico ferroeléctricos).

Ejemplo: **Sensor de medida de presión.**

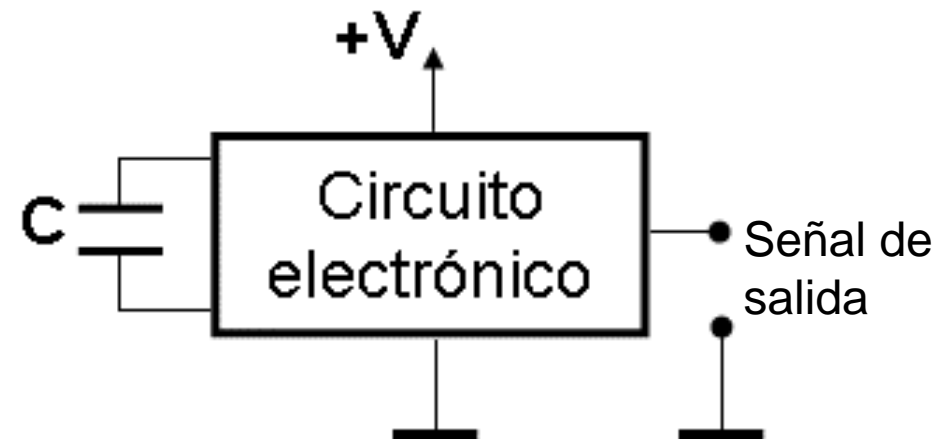




CIRCUITOS DE ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES CAPACITIVOS

Convierten la variación de capacidad en la variación de un parámetro de una señal eléctrica: amplitud de una señal senoidal de frecuencia constante, frecuencia de una señal senoidal o de una onda cuadrada, anchura de impulsos de frecuencia constante, etc.

Para ello el condensador forma parte de un circuito electrónico.





CIRCUITOS DE ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES CAPACITIVOS

CIRCUITOS DE SEÑALES SENOIDALES DE FRECUENCIA CONSTANTE

Generan una señal analógica alterna que contiene la información en la amplitud:

- **Divisor de tensión alimentado en alterna**
- **Amplificador de alterna**
- **Puente de alterna**

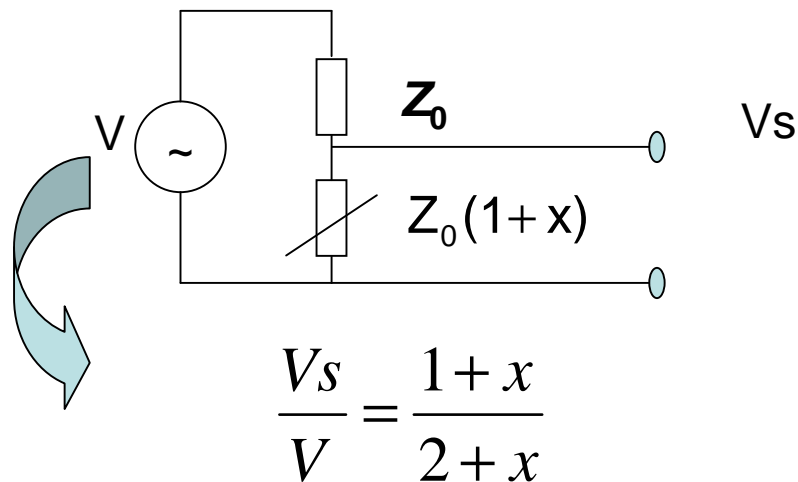


CIRCUITOS DE ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES CAPACITIVOS

CIRCUITOS DE SEÑALES SENOIDALES DE FRECUENCIA CONSTANTE

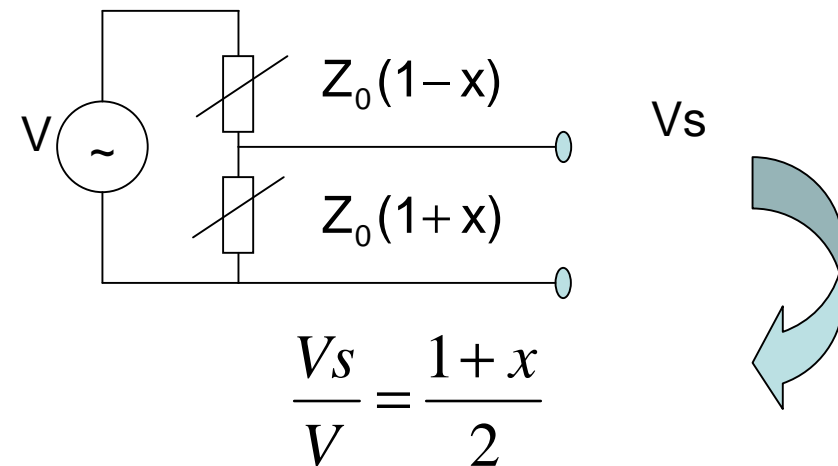
Divisor de tensión alimentado en alterna

Condensador variable



La relación V_s/V no es lineal

Condensador diferencial



La relación V_s/V es lineal



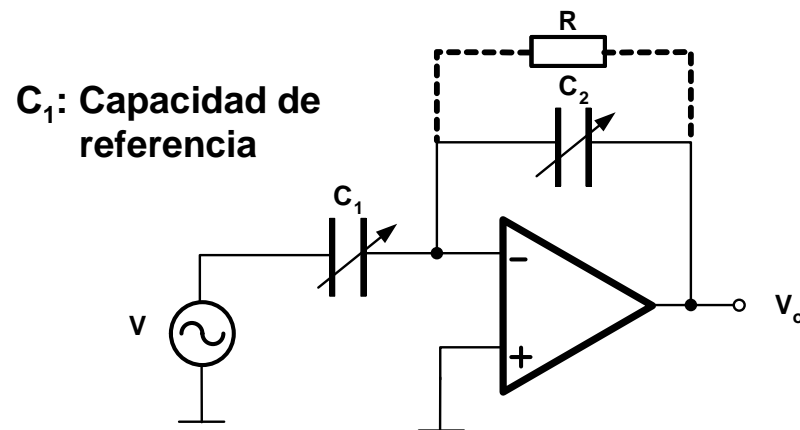
CIRCUITOS DE ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES CAPACITIVOS

CIRCUITOS DE SEÑALES SENOIDALES DE FRECUENCIA CONSTANTE

Amplificador de alterna

El esquema básico de un amplificador de señales analógicas variables se puede utilizar para linealizar la relación entre la tensión de salida y la capacidad de un sensor capacitivo en el que se varía la distancia entre las placas.

En la práctica presenta problemas de estabilidad.



$$V_o = -V \frac{C_1}{C_2}$$

$$C_2 = \frac{\epsilon A}{x}$$

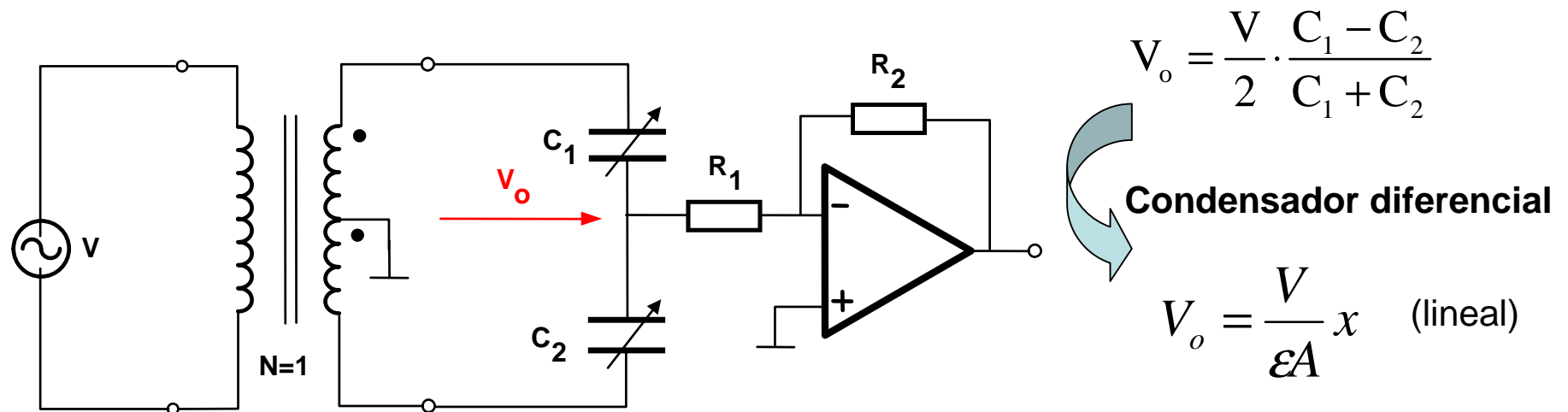
$$V_o = -\frac{VC_1}{\epsilon A} x$$



CIRCUITOS DE ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES CAPACITIVOS

CIRCUITOS DE SEÑALES SENOIDALES DE FRECUENCIA CONSTANTE PUENTE DE ALTERNA

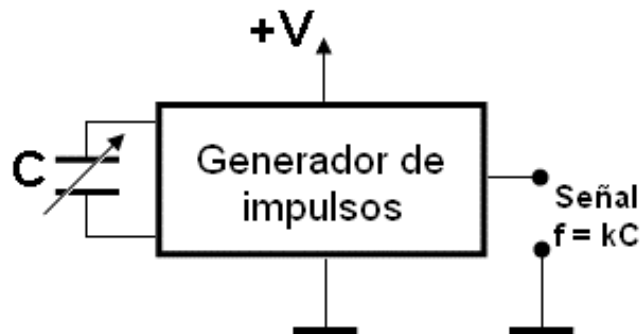
La configuración en puente se emplea para eliminar la tensión fija que aparece a la salida de un divisor de tensión, incluso cuando se basa en un sensor diferencial. Si se utilizan brazos resistivos, sus capacidades parásitas introducen errores. Por ello se utilizan puentes de alterna con transformador, que reducen dichos efectos.





CIRCUITOS DE ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES CAPACITIVOS

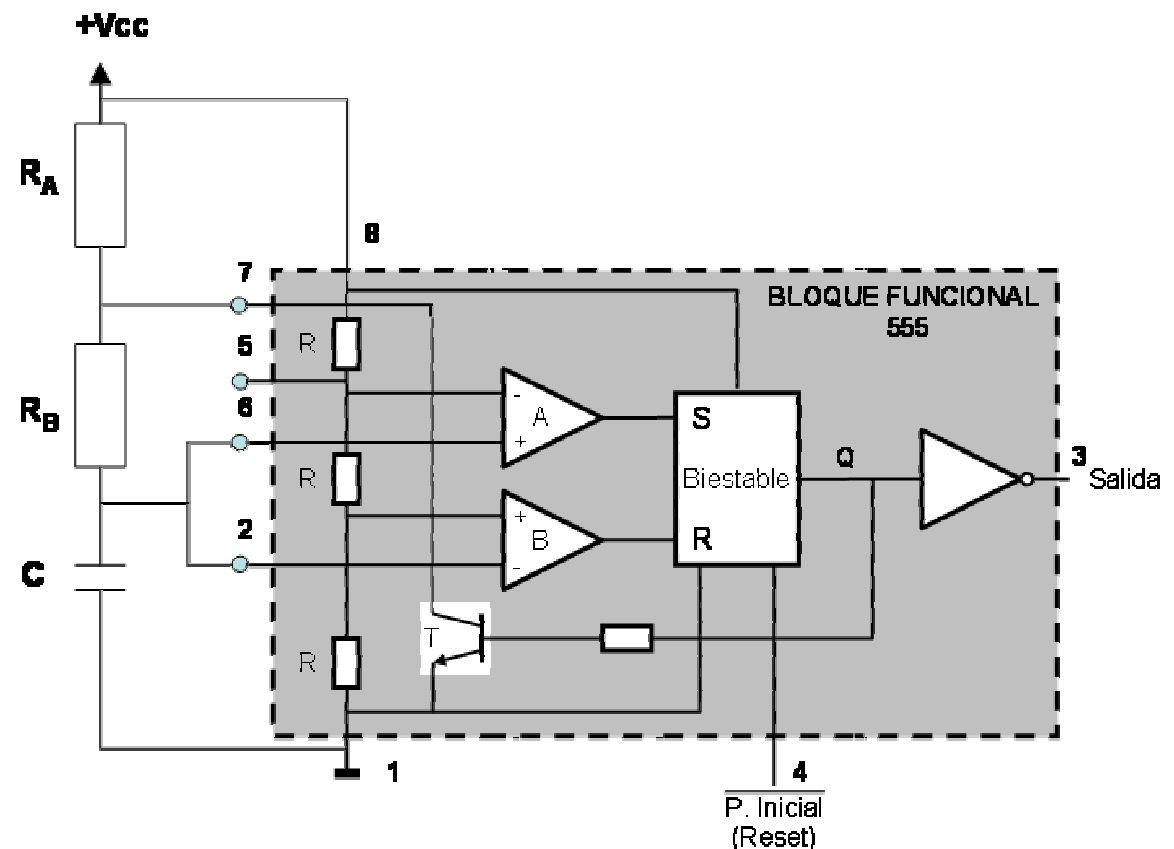
CIRCUITO GENERADOR DE ONDAS CUADRADAS DE FRECUENCIA VARIABLE



Inconvenientes

No se pueden utilizar en sistemas en los que se necesite elevada precisión.

En dicho tipo de sistemas se utilizan demoduladores síncronos (Tema 14)





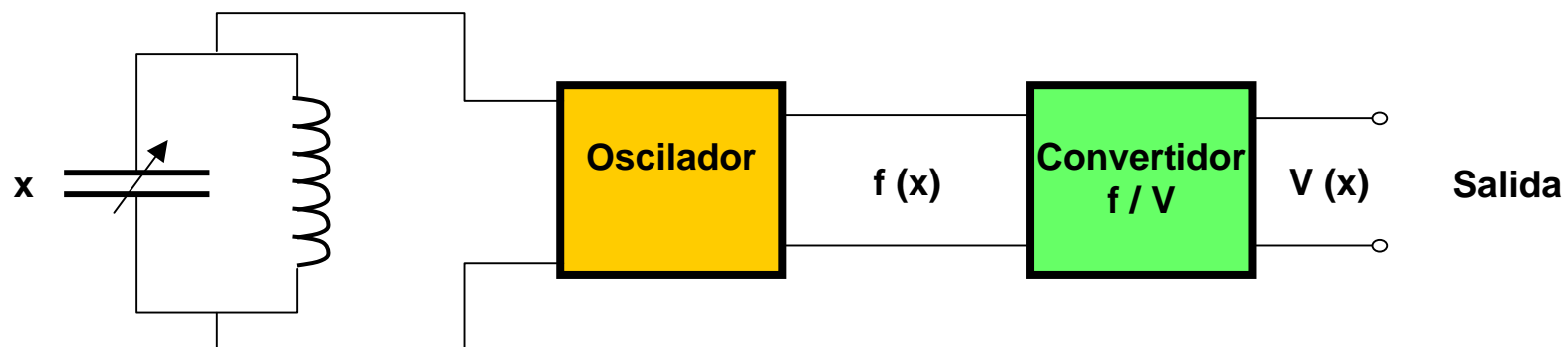
APLICACIONES A LOS SENSORES TODO-NADA

DETECTORES DE OBJETOS (*PROXIMITY DETECTORS*)

[MAND 09 pag. 545]

FUNDAMENTOS

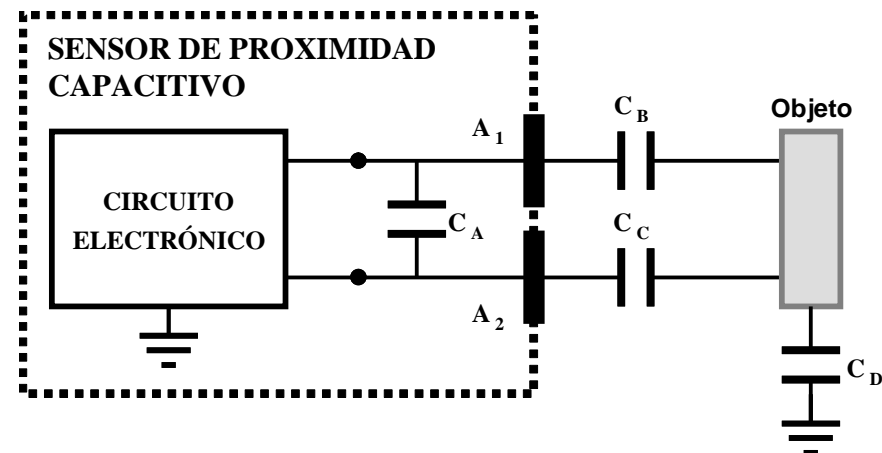
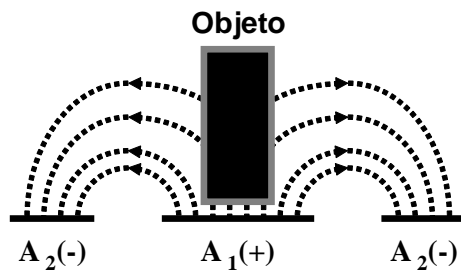
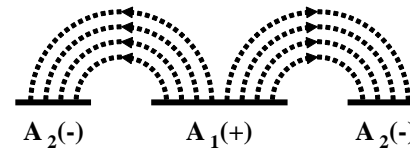
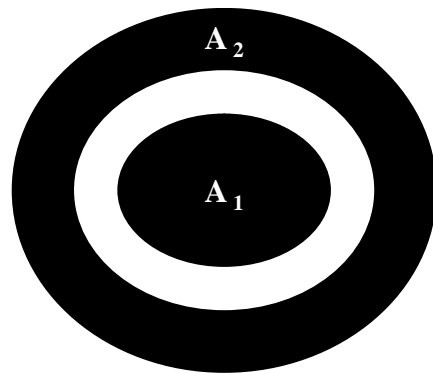
El método más común es utilizar el condensador como elemento modulador de un circuito oscilante que genera una señal alterna cuya frecuencia es función del valor de la capacidad. Esta señal se aplica a un convertidor frecuencia/ tensión que proporciona una señal analógica que lleva la información en su amplitud.





SENSORES TODO- NADA DETECTORES DE OBJETOS

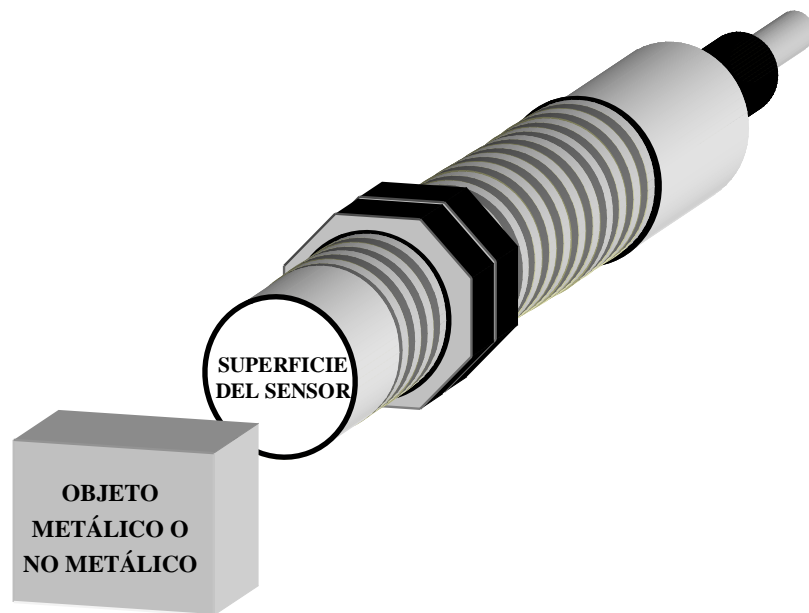
La capacidad entre dos placas conductoras aisladas varía al aproximarse un objeto a ellas





SENSORES TODO- NADA DETECTORES DE OBJETOS

Ejemplo de utilización de un sensor capacitivo

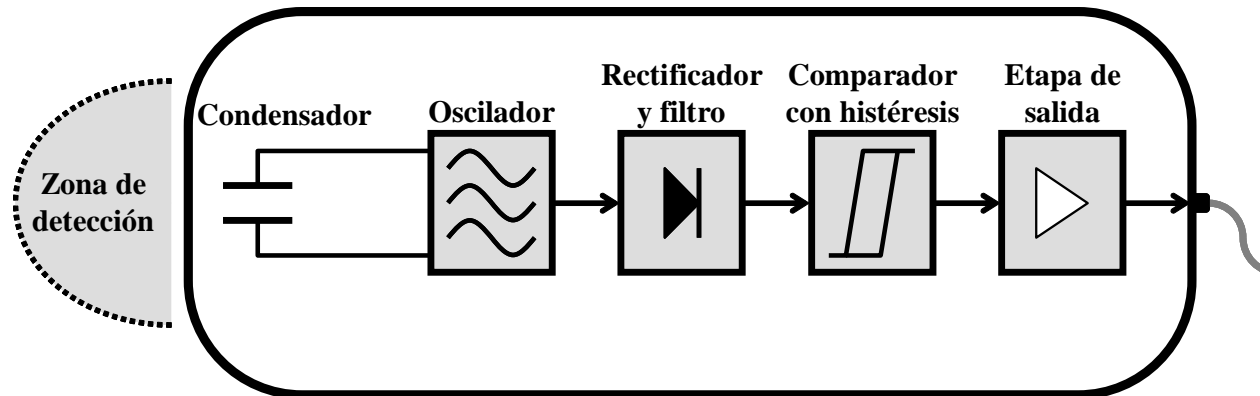


Fotografía de diversos sensores de proximidad capacitivos





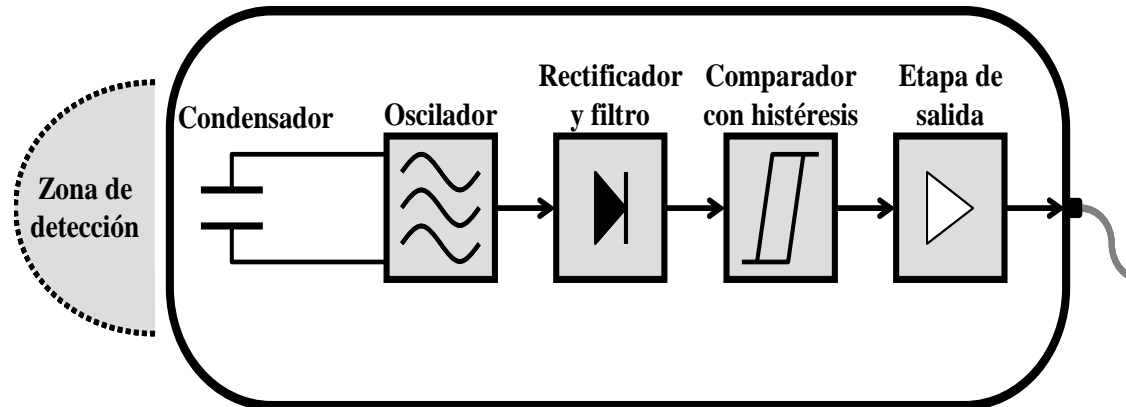
SENSORES TODO- NADA DETECTORES DE OBJETOS



- La cara frontal es metálica y constituye una de las placas del condensador (cabeza sensora).
- El condensador forma parte del bucle de realimentación de un oscilador de alta frecuencia.
- Cuando no hay objeto, la capacidad es baja y la amplitud de la oscilación es pequeña. Cuando se aproxima un objeto aumenta la capacidad y con ello la amplitud de la oscilación.



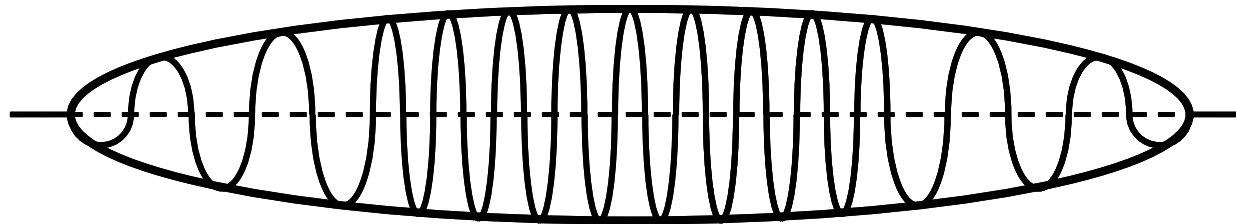
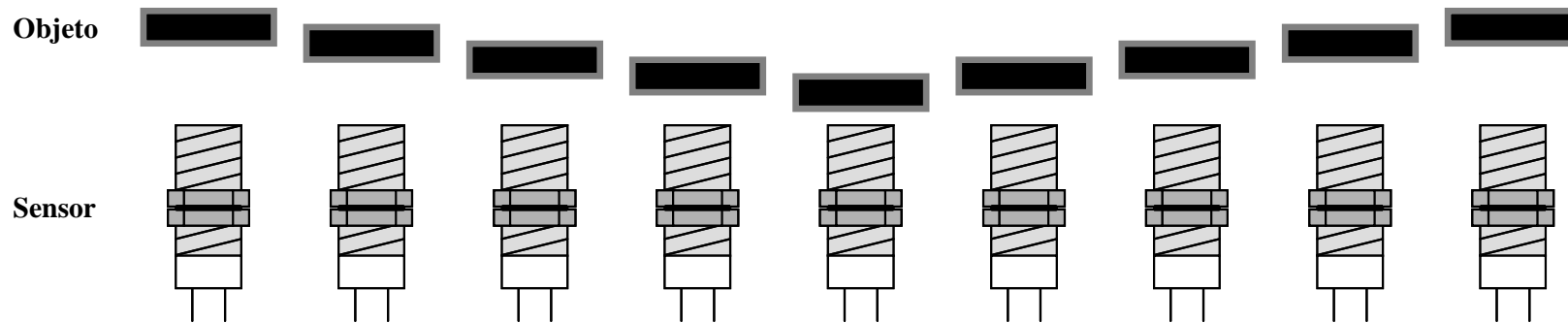
SENSORES TODO- NADA DETECTORES DE OBJETOS



- La salida del oscilador se aplica a un rectificador+filtro que proporciona una tensión continua. Su salida se conecta a un comparador con histéresis para evitar las oscilaciones de la salida del sensor cuando el objeto se encuentra en el límite de detección.
- El amplificador de salida (*Driver*) puede estar realizado con transistores NPN o PNP tal como se indica en el tema 2, en el que se estudian los circuitos de salida de los sensores todo-nada.



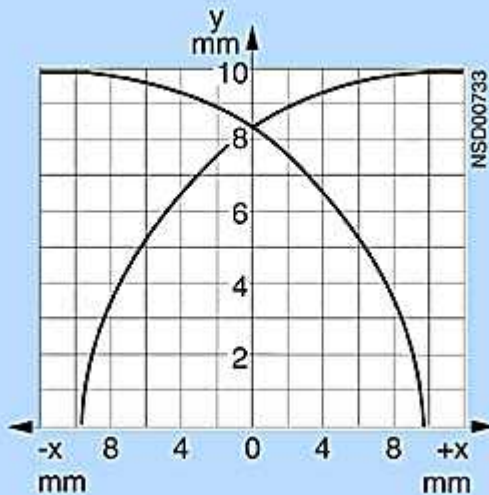
SENSORES TODO- NADA DETECTORES DE OBJETOS





SENSORES TODO- NADA DETECTORES DE OBJETOS

CAMPO DE TRABAJO O REGIÓN DE DETECCIÓN (*SENSING RANGE*)



Zona, situada en las proximidades de la cara activa del sensor, en la que el fabricante garantiza que el sensor detecta un objeto normalizado o patrón que es un cuadrado de acero ST37 conectado a masa de un milímetro de espesor y un lado de longitud igual al diámetro de la cara sensible del sensor o a tres veces la distancia de detección nominal del sensor, el mayor de ambos. Como se puede observar en ella, el campo de trabajo abarca una región espacial delimitada por las dos curvas, y el punto de corte de ambas coincide con la distancia de detección nominal del sensor.



SENSORES TODO- NADA DETECTORES DE OBJETOS

De acuerdo con la forma constructiva los sensores de proximidad capacitivos, al igual que los sensores inductivos, pueden ser:

- Sensores enrasables

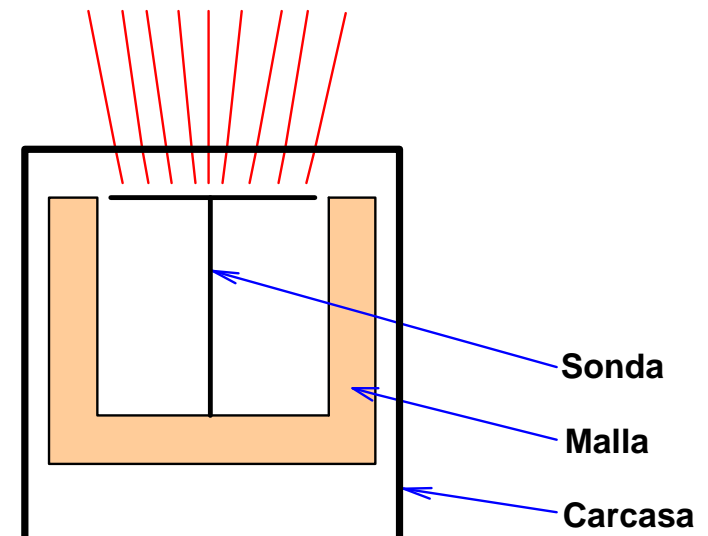
- Sensores no enrasables



SENSORES TODO- NADA DETECTORES DE OBJETOS

SENSORES ENRASABLES

Se fabrican con una malla metálica alrededor de la cara activa del sensor, Esto concentra el campo electrostático del condensador abierto en la parte frontal del sensor, lo que permite montarlo a rás del material que lo rodea sin que el sensor lo detecte. Debido a la alta concentración del campo electrostático, este tipo de forma constructiva es adecuada también para detectar objetos implementados con un material de baja permitividad. Por la misma razón los sensores enrasables son sensibles a la suciedad y a la humedad depositada en la cara activa del sensor, lo que puede dar lugar a activaciones erróneas de la señal de salida del sensor.

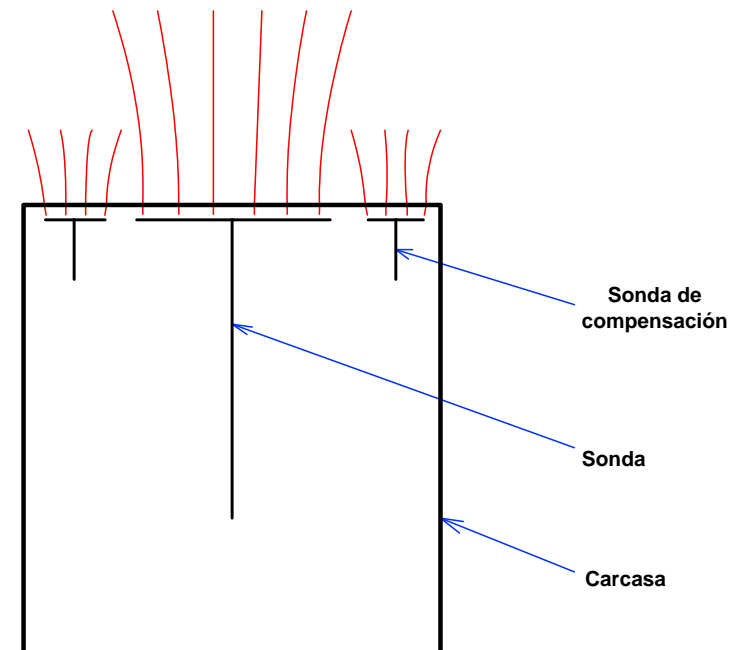




SENSORES TODO- NADA DETECTORES DE OBJETOS

SENSORES NO ENRASABLES

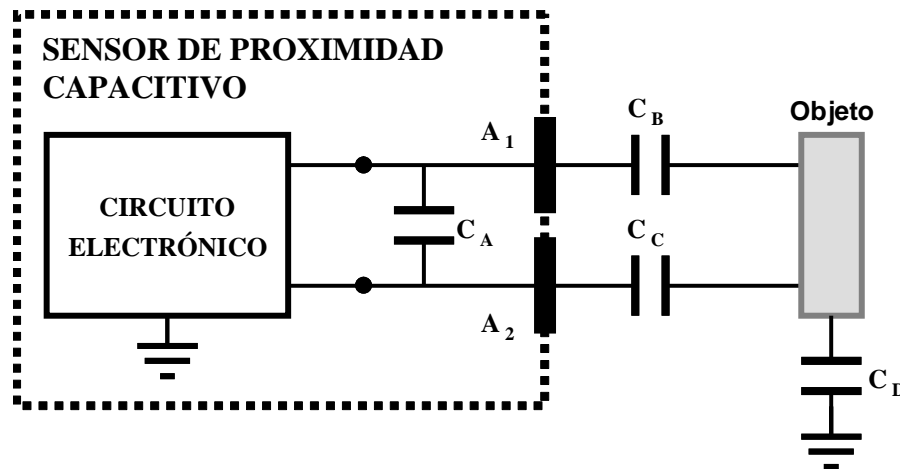
El campo electroestático no está tan concentrado como en los enrasables. Por ello solo son adecuados para la detección de materiales de elevada permitividad y también para discriminar entre materiales de alta y baja permitividad. Este tipo de sensores incluyen frecuentemente un condensador auxiliar que compensa el efecto de las condiciones ambientales que modifican la capacidad del sensor para que funcione correctamente incluso en presencia de agua pulverizada, polvo, suciedad, etc. Además el campo electroestático de compensación es de baja potencia y en consecuencia solo existe en las proximidades de la cara activa del sensor.





SENSORES TODO- NADA DETECTORES DE OBJETOS

En muchas aplicaciones reales los objetos metálicos no se conectan a masa y en múltiples ocasiones los objetos son aislantes. Por ello, es necesario tener en cuenta que en las capacidades indicadas en la figura se producen distintos efectos según el tipo de material con que esté realizado el objeto y si está o no conectado a la masa del circuito. En la práctica se pueden tener tres tipos de situaciones:



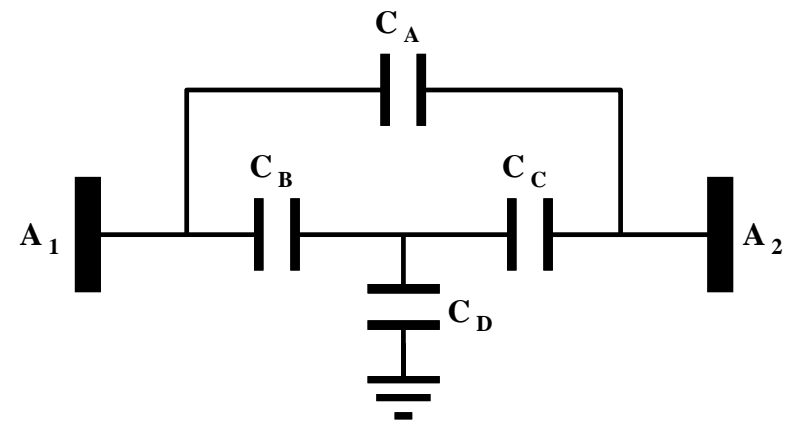
- Objeto metálico flotante
- Objeto metálico conectado a masa
- Objeto aislante.



SENSORES TODO- NADA DETECTORES DE OBJETOS

OBJETO METÁLICO FLOTANTE

En este caso el circuito que forman los condensadores es el de la figura. El objeto hace de la otra cara del condensador de los condensadores C_B y C_C . Esto hace que, debido a que disminuye la distancia entre las placas de los condensadores C_B y C_C , el valor del condensador equivalente aumente a medida que se acerca el objeto al sensor y que disminuya si se aleja.

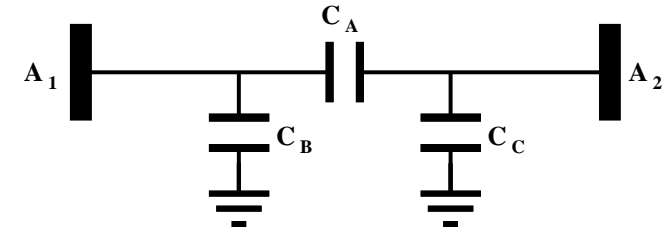




SENSORES TODO- NADA DETECTORES DE OBJETOS

OBJETO METÁLICO CONECTADO A MASA

El circuito que forman los condensadores es en este caso el de la figura. El condensador C_D está cortocircuitado. El condensador C_A disminuye a medida que el objeto se acerca y su efecto se suma al de los condensadores C_B y C_C que aumentan su capacidad a medida que el objeto se acerca. En este caso la variación de capacidad total es máxima y por eso este tipo de objeto se detecta a mayor distancia.



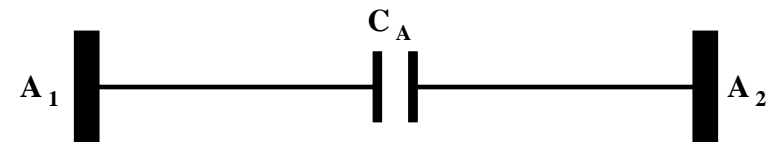


SENSORES TODO- NADA DETECTORES DE OBJETOS

OBJETO AISLANTE (NO CONDUCTOR)

En este caso el condensador C_D es un circuito abierto y el circuito que forman los condensadores es el de la figura. El efecto más importante es el del condensador C_A cuya capacidad aumenta al acercarse el objeto porque se eleva la permitividad del dieléctrico debido a que el aire pasa a ser sustituido por el objeto. Por ello el parámetro que más influye es la permitividad del objeto.

Para detectar objetos realizados con materiales de baja permitividad es necesario realizar un ajuste cuidadoso del oscilador. Si la permitividad es muy pequeña no son detectables.





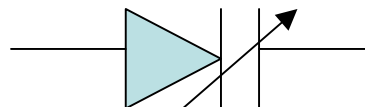
SENSORES DE DIODOS DE CAPACIDAD VARIABLE

FUNDAMENTO

La unión P- N se comporta como un condensador de placas planas paralelas separadas por la zona de transición, cuando se la polariza inversamente. La anchura de la zona de transición depende del valor de la tensión inversa que se aplica a la unión. Se modifica de esta forma la capacidad del condensador.

Los diodos que utilizan este principio se denominan varactores y se les conoce también por su denominación inglesa de *Varicap* (*VAR*iable *CAP*acitor).

Este tipo de sensor se utiliza para desarrollar equipos de radio de sintonía automática mediante un microcontrolador.

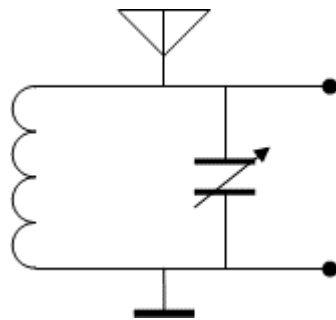




SENSORES DE DIODOS DE CAPACIDAD VARIABLE

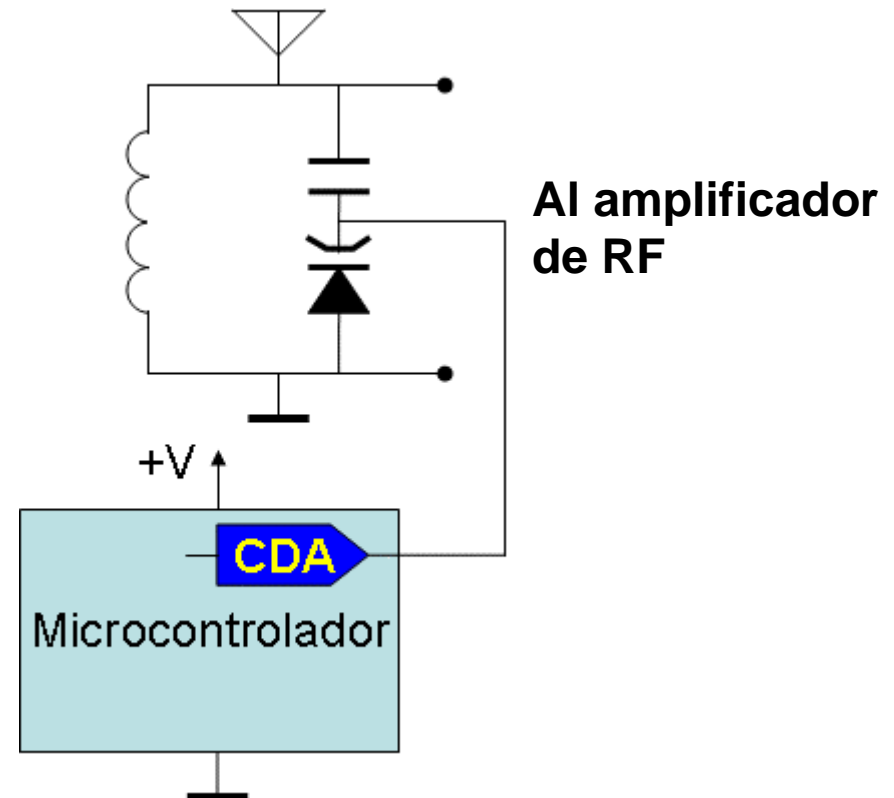
APLICACIÓN

Sintonía automática.



Al amplificador
de RF

Sintonía manual con condensador
variable



Sintonía automática mediante un diodo
varicap y un microcontrolador