

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
E.T.S. INGENIERÍA Y DISEÑO INDUSTRIAL

## INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

### TRANSPARENCIAS TEMA 3: Sensores Reactivos

1

## *Sensores reactivos. Objetivos*

- Conocer el funcionamiento y limitaciones de los sensores capacitivos.
- Distinguir los distintos tipos de sensores inductivos.
- Conocer las limitaciones de medida de los puentes de alterna.
- Aplicar los distintos circuitos específicos para acondicionamiento de sensores reactivos.

2

## ***Sensores reactivos. Contenidos***

### PARTE I: SENSORES REACTIVOS

#### 1.- Sensores capacitivos.

1.1.- Condensador variable.

1.2.- Condensador diferencial.

#### 2.- Sensores inductivos.

2.1.- Sensores basados en variación de reluctancia.

2.2.- Sensores basados en corrientes de Foucault.

2.3.- Transformadores diferenciales (LVDT).

2.4.- Sensores magnetoelásticos.

## ***Sensores reactivos. Contenidos (II)***

### PARTE II: SENSORES REACTIVOS

#### 3.- Medida de impedancia.

#### 4.- Puentes de alterna.

3.4.1.- Sensibilidad y linealidad.

3.4.2.- Linealización analógica de puentes capacitivos.

3.4.3.- Amplificadores de alterna. Desacoplo.

#### 5.- Acondicionadores específicos para sensores capacitivos.

## Sensores reactivos

1. Sensores capacitivos.
  - 1.1.- Condensador variable.
  - 1.2.- Condensador diferencial.
2. Sensores inductivos.
3. Medida de impedancia.
4. Puentes de alterna.
5. Acondicionamiento de sensores capacitivos.

## Sensores capacitivos

### Condensador variable

- Un condensador (dos conductores separados por un dieléctrico) puede ser utilizado como sensor.
- La capacidad es:

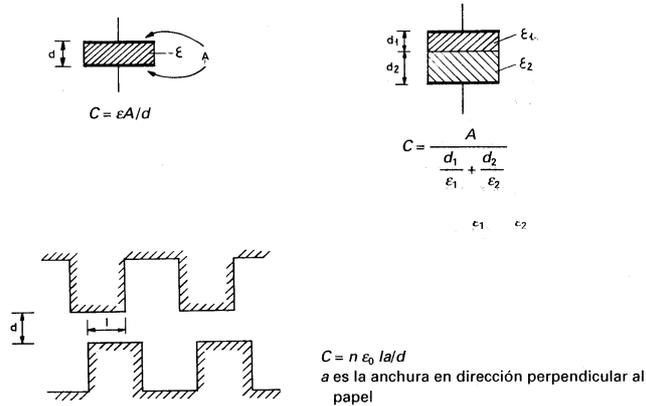
$$C = \frac{Q}{V} \Rightarrow C = C(\varepsilon, G) \quad \varepsilon = \text{permitividad}$$

$$G = \text{geometría}$$

- Cualquier cambio en el dieléctrico o en la geometría puede emplearse para la detección de la magnitud que lo provoca.

## Sensores capacitivos. Modelo

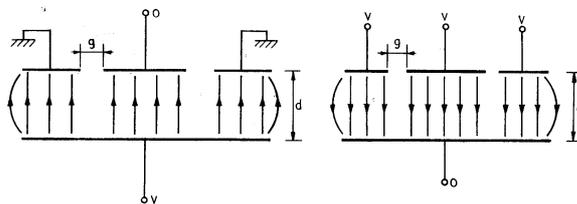
- Diversas configuraciones de sensores



7

## Sensores capacitivos. Guardas.

- Uso de guardas para reducir el efecto de bordes

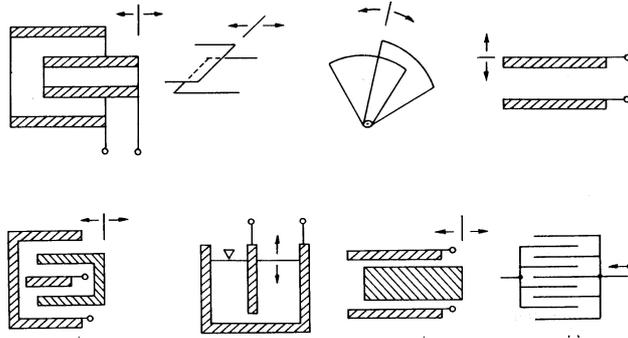


8

# Sensores capacitivos.

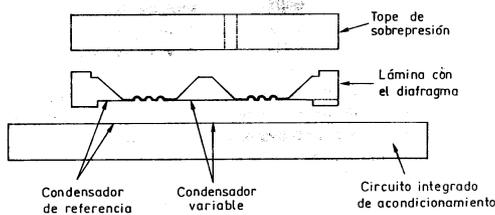
## Construcción.

- Sensores capacitivos basados en variación de área, distancia entre placas y de dieléctrico

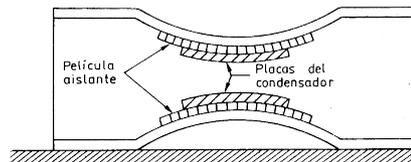


# Sensores capacitivos. Aplicaciones.

- Ejemplos de uso de sensores capacitivos.



– Medida de presión.

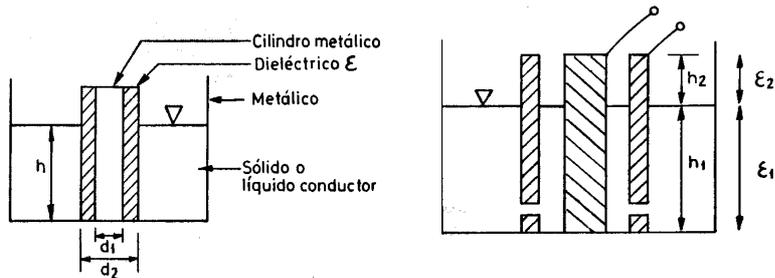


– Galga.

Pieza sobre la que se cementa la galga

## Sensores capacitivos. Aplicaciones.

- Medida del nivel de líquidos



– Nivel de líquido conductor

– Nivel de líquido no conductor

11

## Sensores capacitivos. Condensador diferencial

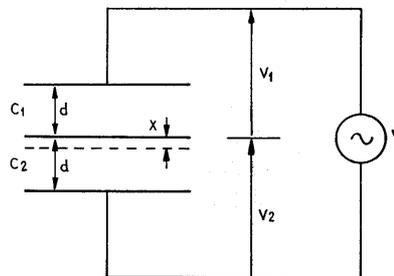
- Un condensador diferencial está formado por dos condensadores variables que experimentan el mismo cambio pero en sentidos opuestos.

$$V_1 = \frac{V}{Z_1 + Z_2} Z_1 = \frac{V}{\frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega C_2}} \frac{1}{j\omega C_1} = V \frac{C_2}{C_1 + C_2}$$

$$V_2 = \frac{V}{Z_1 + Z_2} Z_2 = \frac{V}{\frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega C_2}} \frac{1}{j\omega C_2} = V \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

$$V_1 - V_2 = V \left( \frac{d+x}{2d} - \frac{d-x}{2d} \right) = V \frac{x}{d}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{C_1}{C_2} = V \frac{d-x}{d+x}$$

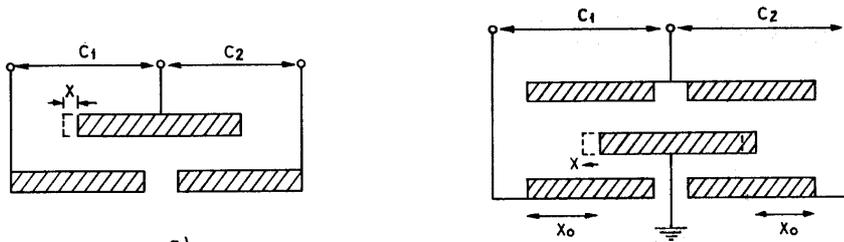


12

## *Sensores capacitivos.*

### *Condensador diferencial.*

- Condensador diferencial basado en la variación de área.



$$C_1 = \epsilon \frac{a(x_0 - x)}{d} = \epsilon \frac{a}{d} x_0 \frac{x_0 - x}{x_0} = C_0 \frac{x_0 - x}{x_0}$$

$$C_2 = \epsilon \frac{a(x_0 + x)}{d} = \epsilon \frac{a}{d} x_0 \frac{x_0 + x}{x_0} = C_0 \frac{x_0 + x}{x_0}$$

13

## *Sensores reactivos*

1. Sensores capacitivos.
2. Sensores inductivos.
  - 2.1.- Sensores basados en variación de reluctancia.
  - 2.2.- Sensores basados en corrientes de Foucault.
  - 2.3.- Transformadores diferenciales (LVDT).
  - 2.4.- Sensores magnetoelásticos.
3. Medida de impedancia.
4. Puentes de alterna.
5. Acondicionamiento de sensores capacitivos.

14

## Sensores inductivos

### Inductancia variable

- La inductancia de un circuito indica el flujo magnético que concatena debido a una corriente eléctrica, bien que circula por el propio circuito (autoinductancia) o no (inductancia mutua).

$$L = N \frac{d\Phi}{di}$$

$$\Phi = \frac{M}{R}$$

$$M = N * i$$

$$\dot{i} \} \dot{i} \} \dot{i}$$

$$\dot{i} \Rightarrow L = \frac{N^2}{R} \dot{i}$$

$N$  = número de vueltas del circuito

$i$  = corriente

$\Phi$  = flujo

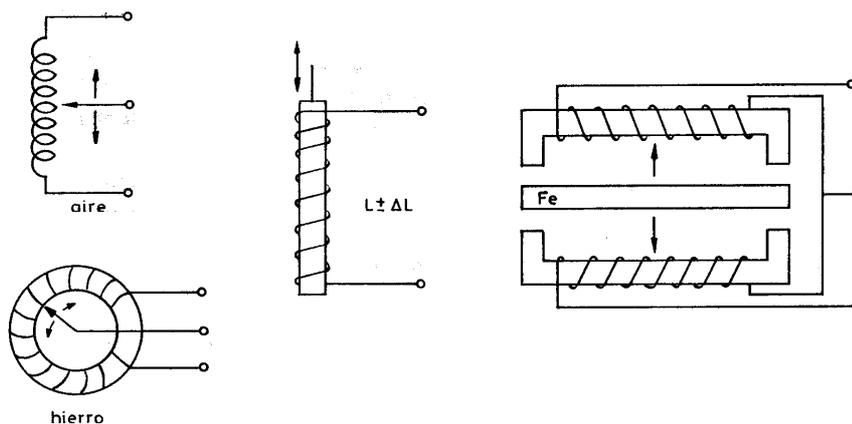
$M$  = fuerza magnetomotriz

$R$  = reluctancia magnética

15

## Sensores inductivos. Constitución.

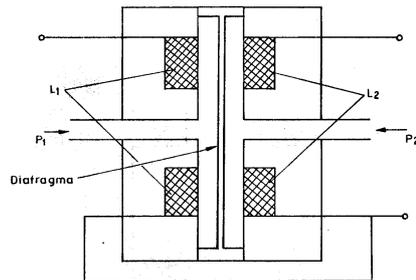
- Diversas configuraciones de sensores



16

## Sensores inductivos. Aplicaciones.

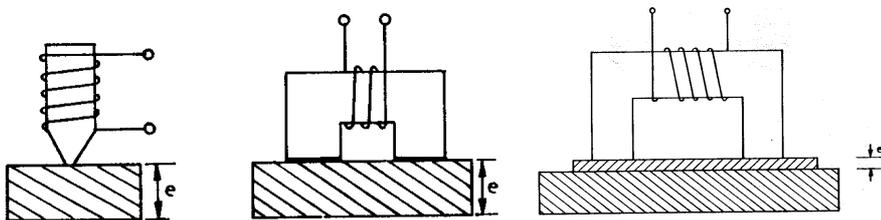
- Medida de desplazamiento y posición.
- Medida de presión:



17

## Sensores inductivos. Aplicaciones

- Medida de espesor

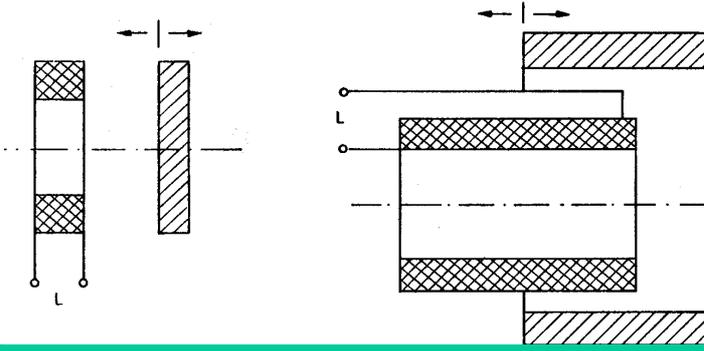


18

## Sensores inductivos

### Sensores basados en corrientes de Foucault

- Corrientes inducidas en un conductor cuando entra en el campo creado por una bobina.
- La impedancia de la bobina se ve alterada.

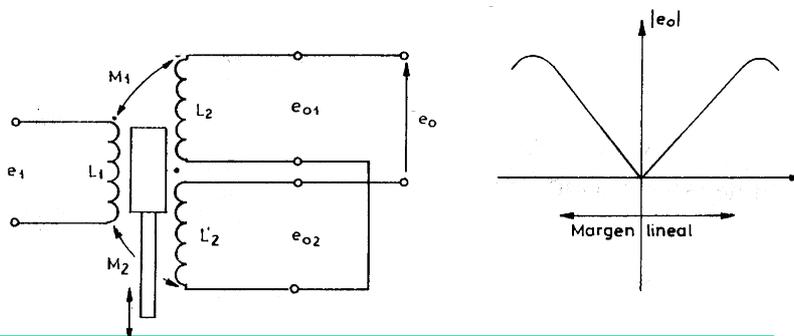


19

## Sensores inductivos

### Transformador diferencial (LVDT)

- Basado en la variación de la inductancia mutua entre un primario y dos secundarios al desplazarse entre ellos un núcleo de material ferromagnético.



20

## Sensores inductivos

### Transformador diferencial. Circuito equivalente

En el primario:

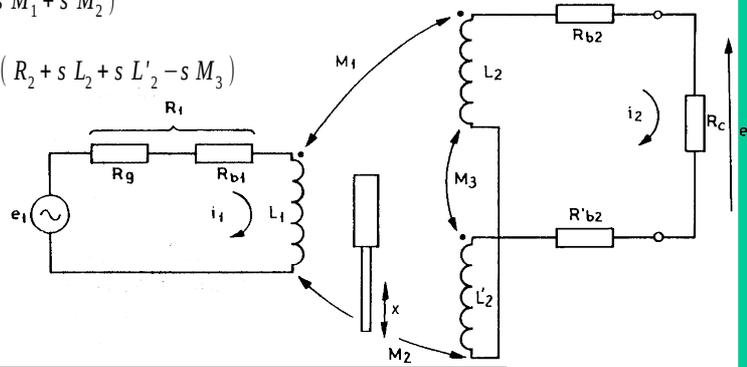
$$E_1 = I_1 (R_1 + s L_1) + I_2 (-s M_1 + s M_2)$$

En el secundario:

$$0 = I_1 (-s M_1 + s M_2) + I_2 (R_2 + s L_2 + s L'_2 - s M_3)$$

con:

$$R_2 = R_{B2} + R'_{B2} + R_C$$



Combinando:

$$I_2 = \frac{-s (M_2 - M_1) E_1}{s^2 [L_1 (L_2 + L'_2 - 2 M_3) - (M_2 - M_1)^2] + s [R_2 L_1 + (L_2 + L'_2 - 2 M_3)] + R_1 R_2}$$

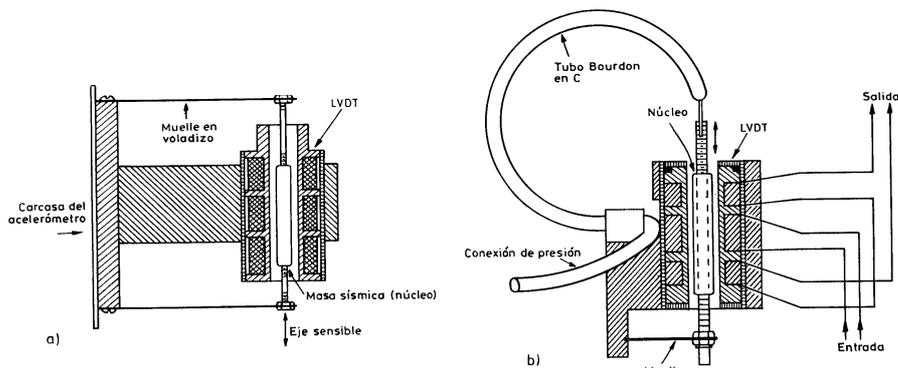
La tensión de salida es:

$$E_0 = I_2 R_C$$

## Sensores inductivos

### Ejemplos de aplicación del LVDT.

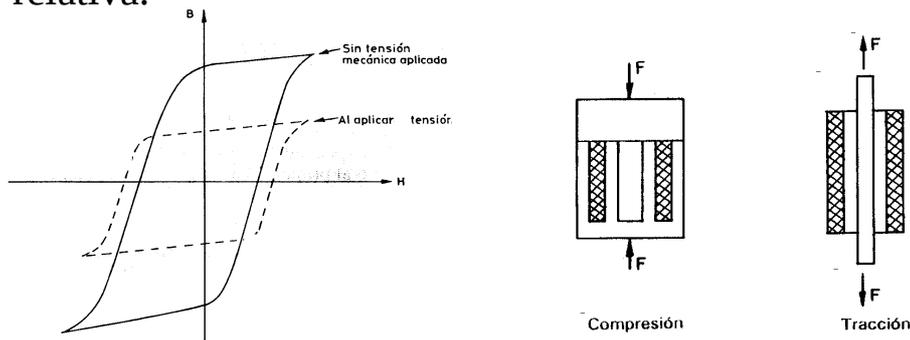
- Medida de aceleración (a) y presión (b)



## Sensores inductivos

### Sensores magnetoelásticos

- Basados en el efecto Villari.
- Un esfuerzo provoca cambios en su curva de magnetización -> se modifica su permeabilidad relativa.



23

## Sensores reactivos

1. Sensores capacitivos.
2. Sensores inductivos.
3. Medida de impedancia.
4. Puentes de alterna.
5. Acondicionamiento de sensores capacitivos.

24

## Medida de impedancia

### Condensador variable

- Los sensores vistos varían su impedancia con la magnitud a medir.
- Para obtener una señal útil necesitamos:
  - Una fuente de tensión alterna para alimentar el componente.
  - Alguna forma de detectar las variaciones producidas.
- Una forma de detectar las variaciones es medir la impedancia.

25

## Medida de impedancia

### Circuito linealizador.

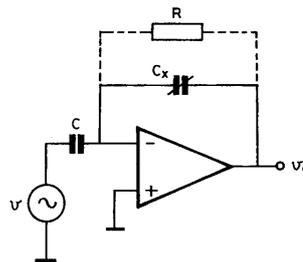
- Excitamos el sensor a corriente constante.

Si  $C_x$  es:

$$C_x = C_0 \frac{1}{1+x}$$

la tensión de salida vale:

$$v_0 = -v \frac{Z_x}{Z} = -v \frac{C}{C_0} (1+x)$$



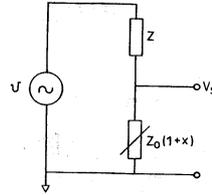
26

## Medida de impedancia

- Divisor de tensión

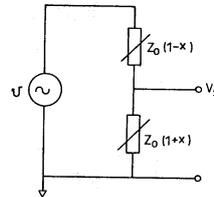
- Sensor simple

$$v_s = v \frac{Z_0(1+x)}{Z + Z_0(1+x)} = v \frac{1+x}{2+x}$$



- Sensor diferencial

$$v_s = v \frac{Z_0(1+x)}{Z_0(1-x) + Z_0(1+x)} = v \frac{1+x}{2}$$



## Sensores reactivos

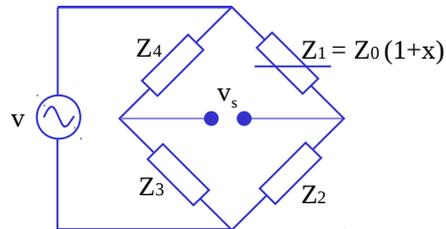
1. Sensores capacitivos.
2. Sensores inductivos.
3. Medida de impedancia.
4. Puentes de alterna.
5. Acondicionamiento de sensores capacitivos.

## Puentes de alterna

- Podemos utilizar puentes en alterna.
- Puente general

$$v_s = -v \frac{x}{2(2+x)}$$

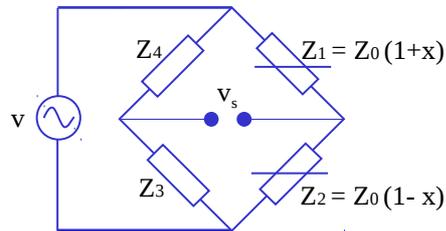
si  $Z_0 = Z_2 = Z_3 = Z_4$



- Puente lineal

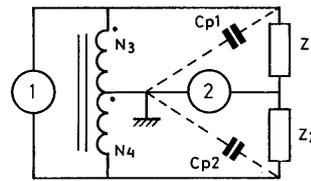
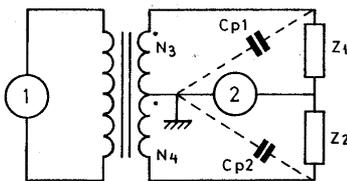
$$v_s = v \frac{x}{2}$$

si  $Z_0 = Z_3 = Z_4$



## Puentes de alterna

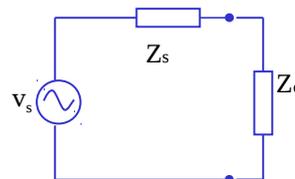
- Puentes de Blumlein, con transformador:



- Circuito equivalente

$$Z_s = Z_1 \parallel Z_2$$

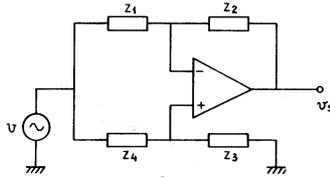
$$v_s = \frac{v}{2} \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$



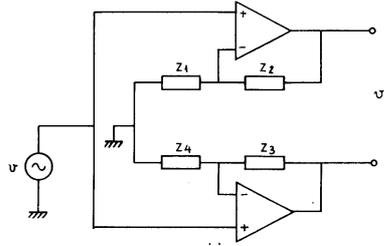
## Puentes de alterna

### Linealización analógica de puentes capacitivos

- Son circuitos menos complejos y más lineales que los puentes. Ejemplos:



$$v_s = v \frac{\frac{Z_3}{Z_4} - \frac{Z_2}{Z_1}}{1 + \frac{Z_3}{Z_4}}$$

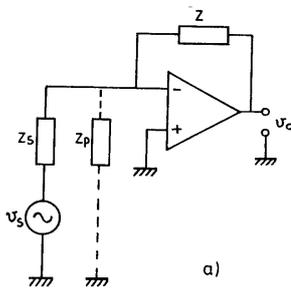


$$v_s = v \frac{Z_2}{Z_1} - \frac{Z_3}{Z_4}$$

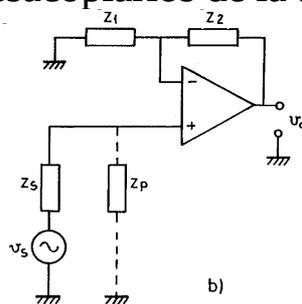
## Puentes de alterna

### Amplificadores de alterna. Desacoplo.

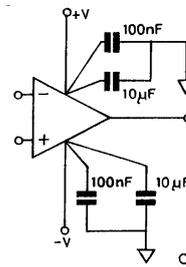
- Permiten amplificar la salida del puente.
- No es necesario que sean diferenciales.
- Es conveniente desacoplarlos de la alimentación.



$$v_0 = -v_s \frac{Z}{Z_s}$$



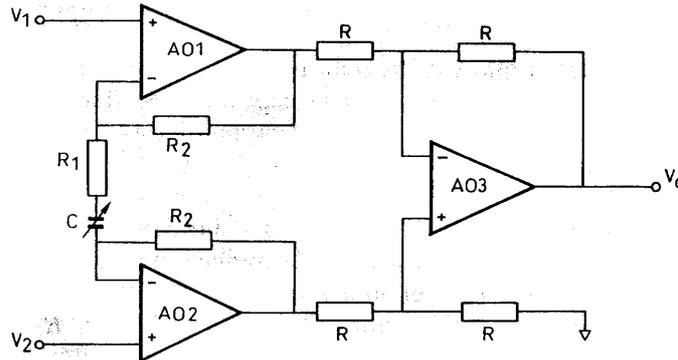
$$v_0 = v_s \frac{Z_p}{Z_s + Z_p} \left( 1 + \frac{Z_2}{Z_1} \right)$$



## Puentes de alterna

### Amplificador sintonizado

- Para variaciones lentas de la magnitud.
- Tiene un ancho de banda estrecho, centrado en la frecuencia de alimentación.

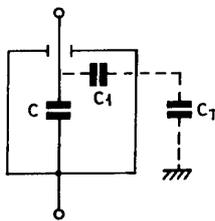


33

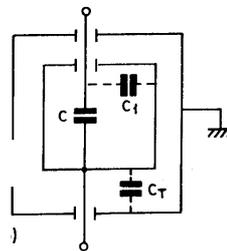
## Puentes de alterna

### Blindajes electrostáticos

- Su objetivo es mantener la capacidad constante, independientemente del entorno.



– Blindaje simple



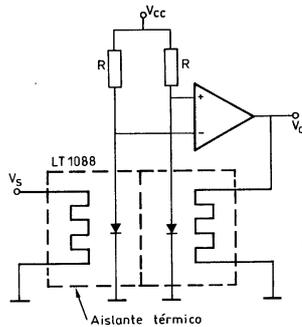
– Blindaje doble

34

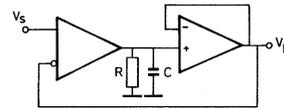
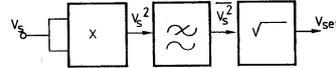
## Puentes de alterna

### Convertidores alterna-continua.

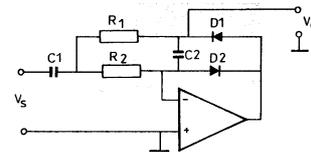
- Permiten obtener un valor continuo significativo a partir de la salida alterna del puente.



– Medida de valor eficaz



– Detector de pico



– Medida de valor absoluto

## Sensores reactivos

1. Sensores capacitivos.
2. Sensores inductivos.
3. Medida de impedancia.
4. Puentes de alterna.
5. Acondicionamiento de sensores capacitivos.

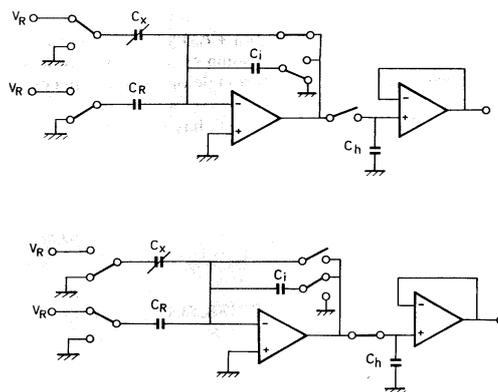
## Acondicionamiento específico de sensores capacitivos

- Podemos integrar en un chip sensores capacitivos, pero no puentes.
- Por ello se han desarrollado circuitos de acondicionamiento específico, que son:
  - Fácilmente integrables.
  - Inmunes a las capacidades parásitas.
- Veamos algunos ejemplos.

37

## Acondicionamiento específico de sensores capacitivos

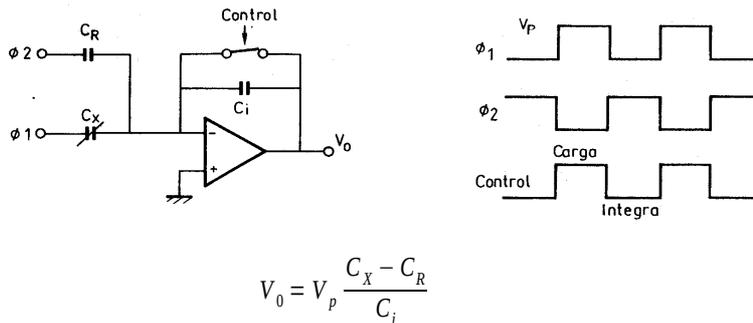
### Método de redistribución de carga



38

## Acondicionamiento específico de sensores capacitivos

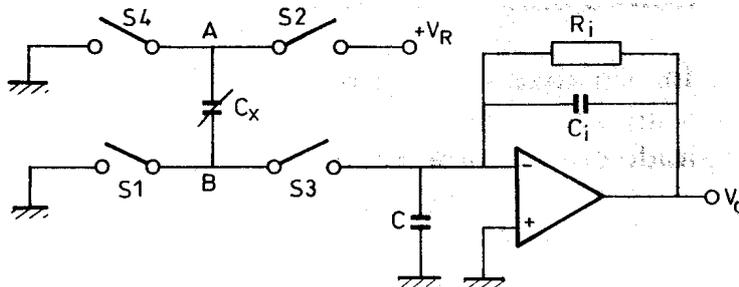
### Integrador basado en condensadores conmutados



39

## Acondicionamiento específico de sensores capacitivos

### Método de transferencia de carga



40