

**Tema 5**  
**SENSORES CAPACITIVOS**  
**PARTE 1**

# Introducción

## ¿Qué es un sensor capacitivo?

Un sensor capacitivo es aquél en el que se observan cambios en una capacidad.

Eso significa que, excitados por una señal alterna, la salida mostrará cambios en la amplitud y la fase.

## Tipos de sensores

- **Sensores con distancia variable**  
Peso, micrófonos
- **Sensores con permitividad variable**  
Medidores de nivel, humedad
- **Sensores con superficie variable**  
Acelerómetros, MEMS, etc.
- **Sensores diferenciales**  
MEMS

**Ideas aplicables a inducciones (menos comunes)**

# Introducción

## ¿Qué estrategia hay que seguir para la medida?

- Las capacidades afectan a la respuesta en alterna de señales sinusoidales (amplitud y fase), frecuencia de osciladores o respuesta ante pulsos cuadrados.
- Se necesitan señales sinusoidales fiables. Van a desempeñar el papel de las referencias de tensión en DC.
- Hay que saber medir correctamente:
  - Amplitudes de señales sinusoidales
  - Desfases
  - Frecuencias
  - Tiempos de carga/descarga de condensadores
- A partir de estos conocimientos generales, hay que buscar circuitos cuya configuración nos permita estimar el valor de las capacidades desconocidas.

# Ideas previas

## ¿Cómo podemos medir una capacidad?

En un circuito, un condensador introduce cambios en la amplitud y fase de una señal alterna.

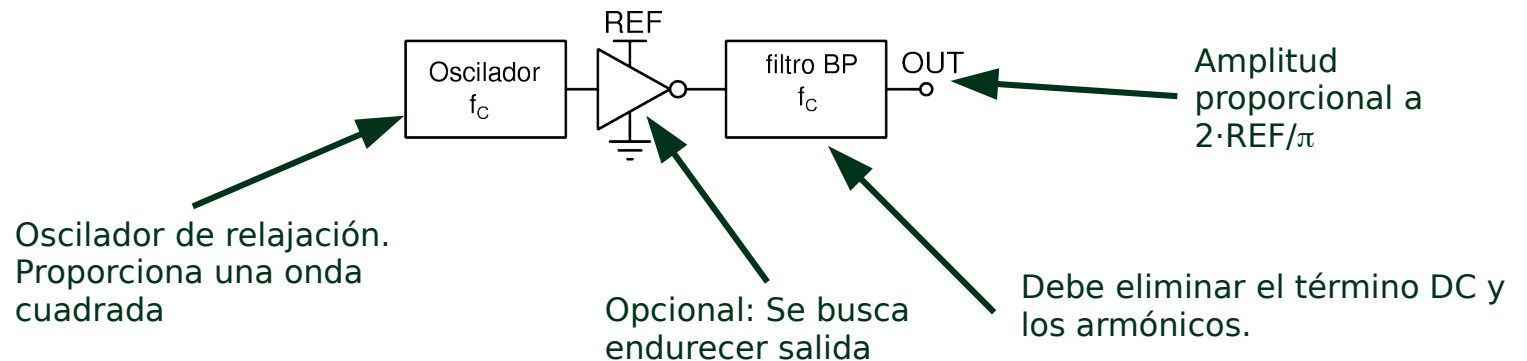
Por otro lado, determina la frecuencia de trabajo de un oscilador.

También determina el tiempo de carga de un condensador.

## Importante: ¿Cómo conseguir una señal sinusoidal fiable?

Descartar osciladores tipo Wien, Colpitts, etc. con amplitud poco controlable

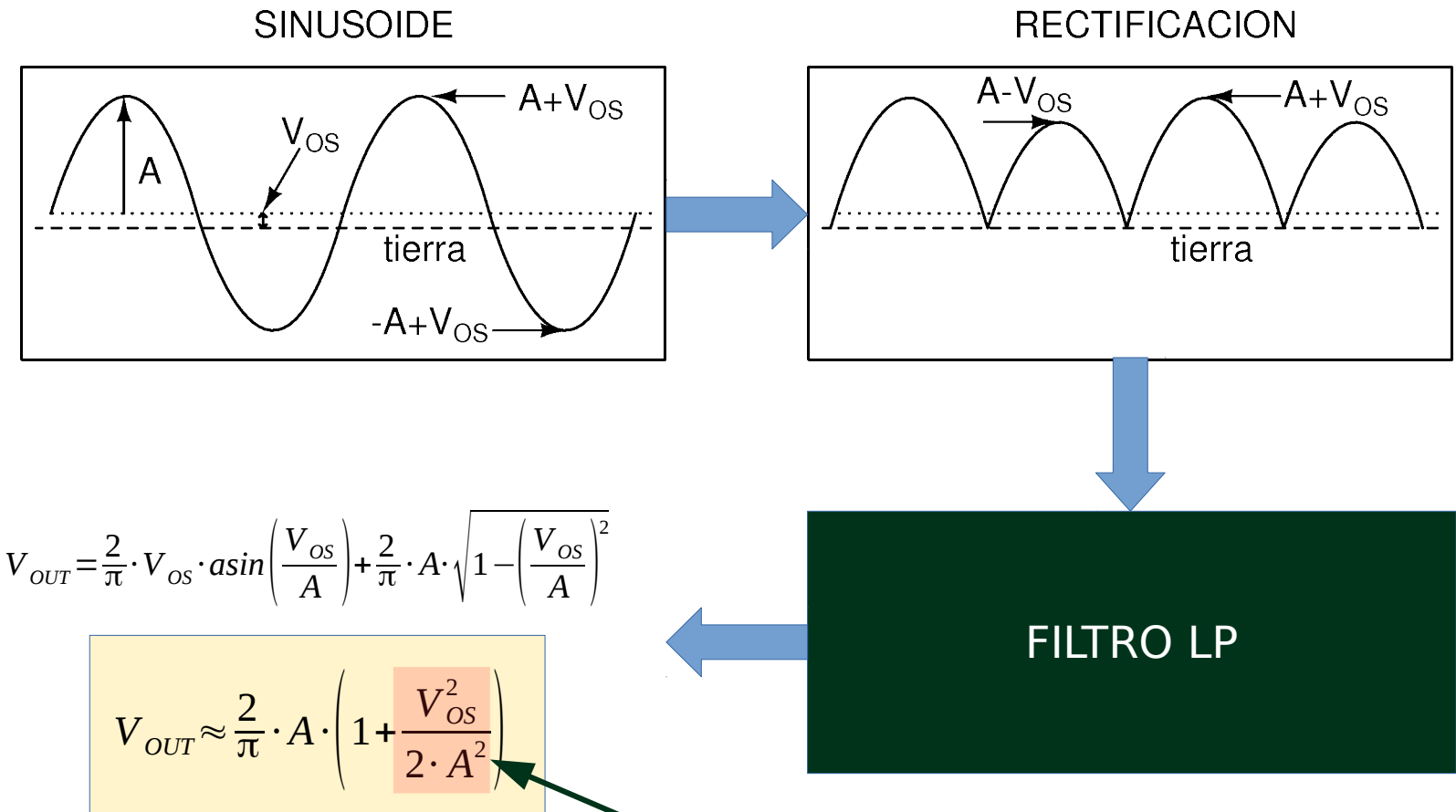
*Solución: Oscilador de relajación + filtro*



# Ideas previas

## ¿Cómo podemos medir amplitudes?

La amplitud de una señal sinusoidal suele hacerse rectificando y rescatando la componente DC.

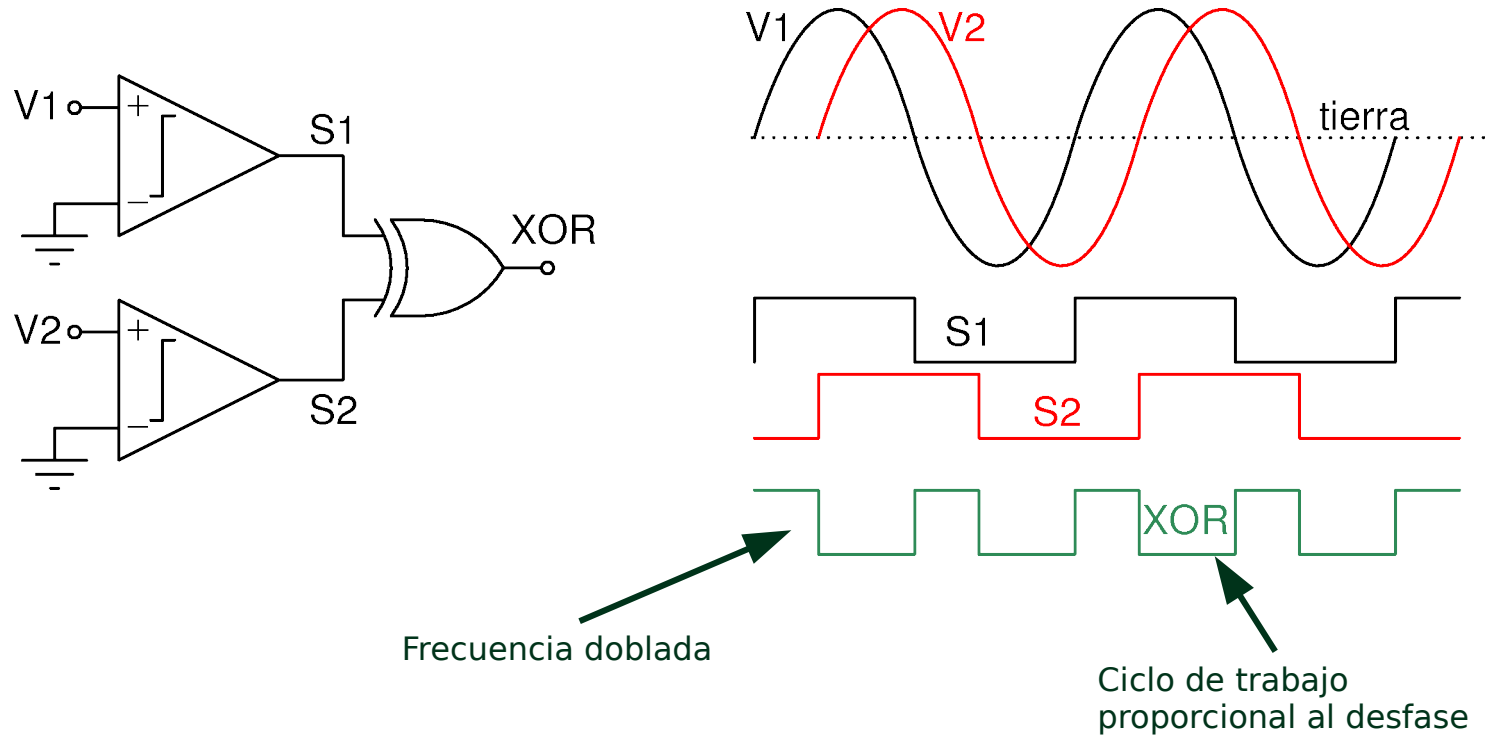


Error menor

# Ideas previas

## ¿Cómo podemos medir desfase entre dos señales?

Habitualmente, se comparan ambas señales con el paso por tierra (o tensión de referencia) y con una puerta XOR se indica el tiempo de divergencia.



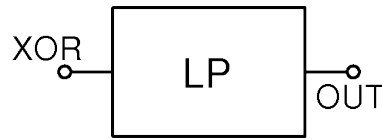
**¿Cómo tratar la señal XOR?: tres opciones al menos**

# Ideas previas

## ¿Cómo podemos medir desfase entre dos señales?

Tres opciones: Filtro LP, integrador, contador

### Filtro LP

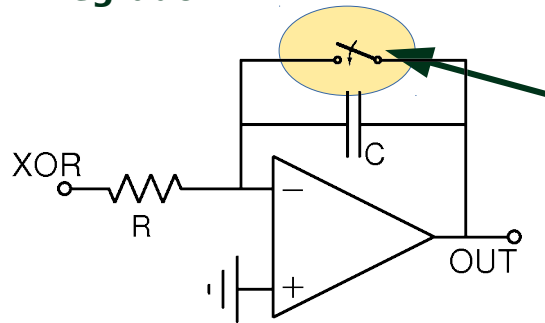


$$V_{OUT} = \frac{V_L}{\pi} \cdot \varphi$$



**Problema:** Si el desfase es pequeño, el primer armónico puede ser comparable

### Integrador

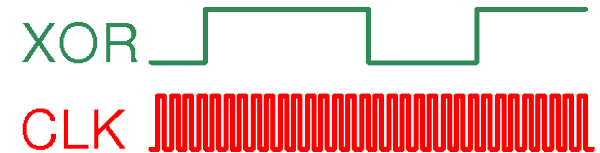


Activar desde microcontrolador al completar **N** periodos de duración **T** de la señal XOR.

$$V_{OUT} = \frac{N \cdot T \cdot V_L}{\pi \cdot R \cdot C} \cdot \varphi$$

Permite medir desfases pequeños. El problema es que se integra el offset del op amp.

### Contador



Con un reloj de alta frecuencia, se puede medir de algún modo la duración del ciclo de trabajo.

Contadores, microcontroladores, ...

Lo que crea interesante el diseñador.

NOTA: CLK preciso, no  $V_L$ .

# Ideas previas

## ¿Cómo se puede medir la frecuencia de un oscilador?

Otro modo de medir un condensador consiste en colocarlo en un oscilador de relajación cuyo periodo es siempre proporcional a su valor.

El problema se transforma entonces en la medida de una frecuencia.

- **Solución 1:** Usar la técnica de los contadores, ya mostradas en la página anterior.
- **Solución 2:** Usar un monoestable de duración conocida disparado por la señal digital de interés. Con un filtro LP, se obtiene una señal DC proporcional a la frecuencia.
- **Solución 3:** Si el ciclo de trabajo es constante, se puede usar un generador de rampa integrando y luego entrando en un filtro LP.
- **Solución 4:** Usar directamente un tipo de IC llamado “*conversor F/V*”.

**Hay otras técnicas  
¡y nunca olvidemos el ingenio del propio diseñador !**



# Medir capacidades

## Técnica del oscilador de relajación

En un oscilador de relajación (p.e., báscula de Schmitt, LM555, etc.) el periodo depende de un producto **R·C**.

**Bastaría con usar una resistencia precisa y medir el periodo**

Si queremos medir una magnitud **x** tal que **C(x) = C<sub>0</sub> + a·x**

$$T \propto R \cdot C(x) = K \cdot R \cdot C(x) = K \cdot R \cdot C_0 + K \cdot R \cdot a \cdot x = T_0 + \alpha \cdot x$$

Con la técnica del contador muestreando con un periodo **T<sub>s</sub>**, se deduce que, si se registra un número natural **N = N<sub>0</sub> + Δn**:

$$x = \frac{T_s}{\alpha} \cdot \Delta n = \frac{T_s}{K \cdot R \cdot a} \cdot \Delta n \qquad \Delta x = \frac{T_s}{K \cdot R \cdot a} \qquad \text{¡N es un número natural!}$$

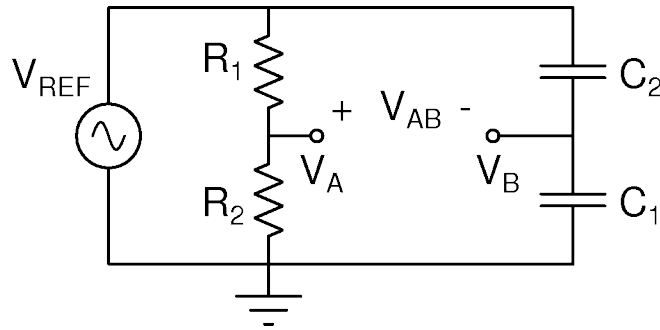
Si se usa un monoestable de duración **T<sub>M</sub>**, se cumple que:

$$V_{OUT} = \frac{V_L \cdot T_M}{T} = \frac{V_L \cdot T_M}{T_0 + \alpha \cdot x} \approx \frac{V_L \cdot T_M}{T_0} - \frac{\alpha \cdot V_L \cdot T_M}{T_0^2} \cdot x$$

# Medir capacidades

## Técnica del puente de admitancias

Similar al puente de Wheatstone, pero con brazos de distinto carácter.



$$V_A = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{REF}$$

$$V_B = \frac{C_2}{C_1 + C_2} \cdot V_{REF}$$

- Señal en alterna.
- Frecuencia suficientemente elevada como para despreciar resistencias parásitas en paralelo.
- Ambas tensiones están **en fase**.

$$V_{AB} = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{C_2}{C_1 + C_2} \right) \cdot V_{REF}$$

En esta estructura, ambas señales están en fase y se deben restar con algún amplificador diferencial visto anteriormente.

Normalmente, se escogen resistencias que guarden cierta relación matemática con las capacidades.

Suponiendo que  $C_1(x) = C_{10} + \alpha \cdot x$ , y haciendo  $R_2/R_1 = C_2/C_{10}$

$$V_{AB} = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{C_2}{C_{10} + \alpha \cdot x + C_2} \right) \cdot V_{REF} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \left( 1 - \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{C_{10} + C_2} \cdot x} \right) \cdot V_{REF}$$

$$V_{AB} \approx \frac{\alpha \cdot C_2 \cdot V_{REF}}{(C_{10} + C_2)^2} \cdot x$$

← Lógicamente, es una amplitud que puede medirse con las técnicas mostradas anteriormente

# Medir capacidades

## Técnica del puente de admitancias (cap. diferencial)

Algunos sensores se pueden modelar como dos capacidades cuya suma es constante.

$$C_1(x) = C_{10} + \alpha \cdot x \text{ y } C_2(x) = C_{20} - \alpha \cdot x \rightarrow C_1(x) + C_2(x) = C_{10} + C_{20}$$

En estas circunstancias, el puente de admitancias adquiere un gran interés pues:

$$V_{AB} = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{C_2}{C_1 + C_2} \right) \cdot V_{REF} = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{C_2 - \alpha \cdot x}{C_{10} + C_{20}} \right) \cdot V_{REF}$$

$$V_{AB} = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{C_2}{C_{10} + C_{20}} \right) \cdot V_{REF} + \frac{\alpha \cdot V_{REF}}{C_{10} + C_{20}} \cdot x$$

Haciendo  $R_2/R_1 = C_2/C_{10}$

$$V_{AB} = \frac{\alpha \cdot V_{REF}}{C_{10} + C_{20}} \cdot x$$

← No es aproximación: ES IGUALDAD

**Pero... ¿y si x es negativo? ¿amplitudes negativas?**

# Medir capacidades

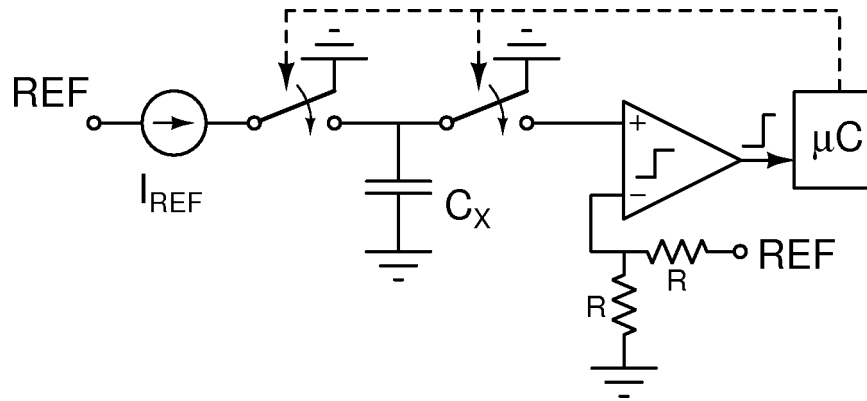
## Notas sobre los puentes de admitancia

- Siempre es conveniente medir el desfase entre la señal del puente de admitancias y la original.
  - Ayuda a distinguir el signo de  $\mathbf{x}$  (0 rad, para  $\mathbf{x} > \mathbf{0}$ ,  $\pi$  rad al contrario).
  - Permite detectar la existencia de parásitos en las capacidades.
- Es extremadamente útil en el caso de los sensores con capacidades diferenciales (p.e., MEMS).
- La frecuencia de trabajo debe ser:
  - Lo suficientemente **alta** para que no se observen las resistencias parásitas en paralelo.
  - Lo suficientemente **baja** como para que no se ejerzan efectos de carga en el generador, que el amplificador diferencial trabaje bien, etc.
- Si el puente de admitancias falla, usar puente de Wien-Maxwell
- Igualmente válidos para **inducciones**. Sin embargo, hay pocos ejemplos prácticos de sensores de este tipo (LVDT)

# Medir capacidades

## Tiempo descarga/descarga de un condensador

El tiempo que tarda un condensador en cargarse o descargarse es proporcional al valor de la capacidad. Por ejemplo:



- Un microcontrolador activa los dos switches simultáneamente a la vez que arranca un contador interno.
- El condensador  $C_X$  se carga con una fuente de valor conocido.
- Al alcanzar un valor  $REF/2$ , un comparador pasa de bajo a alto haciendo que el microcontrolador pare el contador.
- Si  $N$  es el valor final del contador y  $T$  el periodo del microcontrolador, se cumple que:

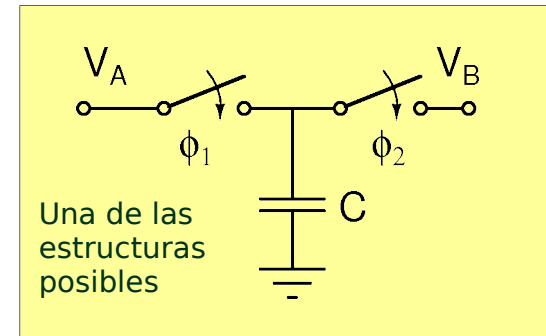
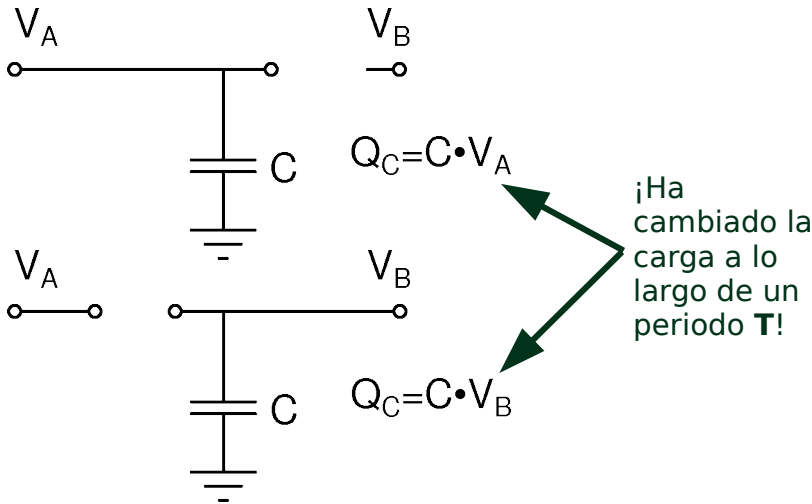
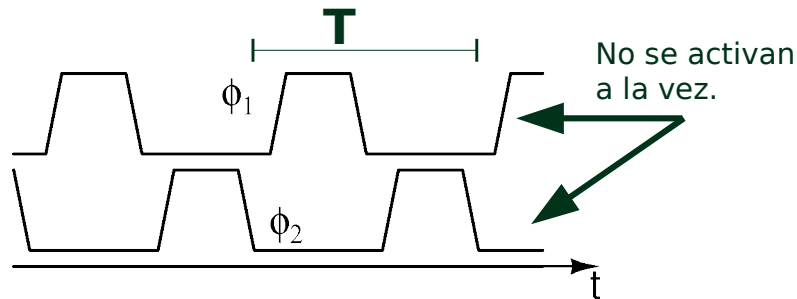
$$\frac{REF}{2} = \frac{I_{REF} \cdot N \cdot T}{C_X}$$

**Fácil pero imprecisa. Puede usarse una red RC.**

# Conversión a resistencia

## Circuitos de capacidades conmutadas

Existe un truco muy simple para obtener el equivalente resistivo de una capacidad:



### ¿Qué ha ocurrido?

En el transcurso de un periodo  $T$ , se ha transferido una carga  $C \cdot (V_A - V_B)$  desde el nudo A al B. Si suponemos que  $T$  es alto, la carga media que se transfiere por unidad de tiempo es:

$$\frac{Q}{T} = C \cdot (V_A - V_B)$$

Es una corriente media proporcional a una diferencia de tensión:

$$R_{EQ} = \frac{T}{C} \leftarrow \text{Problema equivalente.}$$

**Más en próximos temas**  
**Tema 5 - 14/14**