

Unidad Temática N° 2

Estudio de un voltímetro digital.
Errores de forma de onda.

Gabinete del Trabajo Práctico N° 2

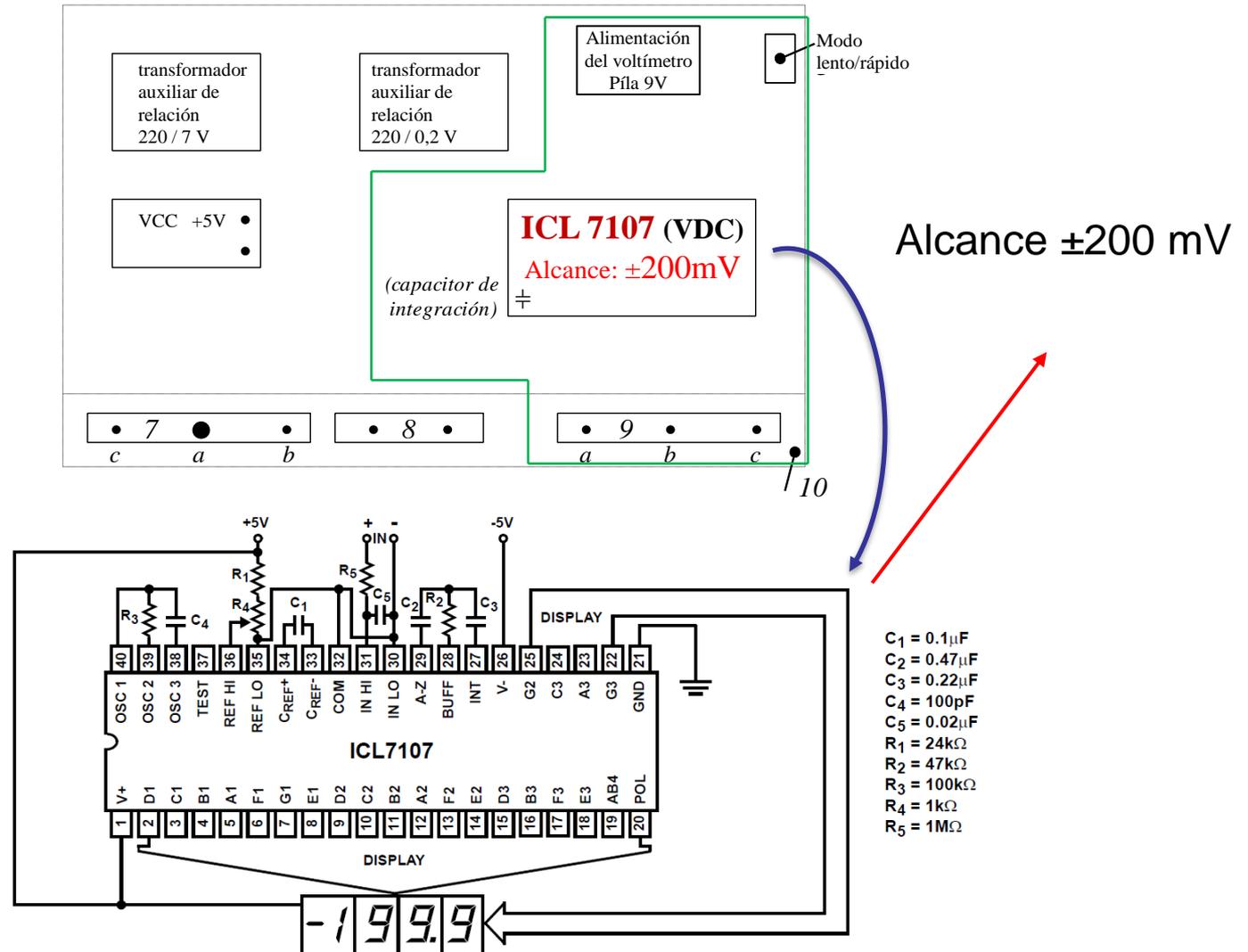


Parte 1.

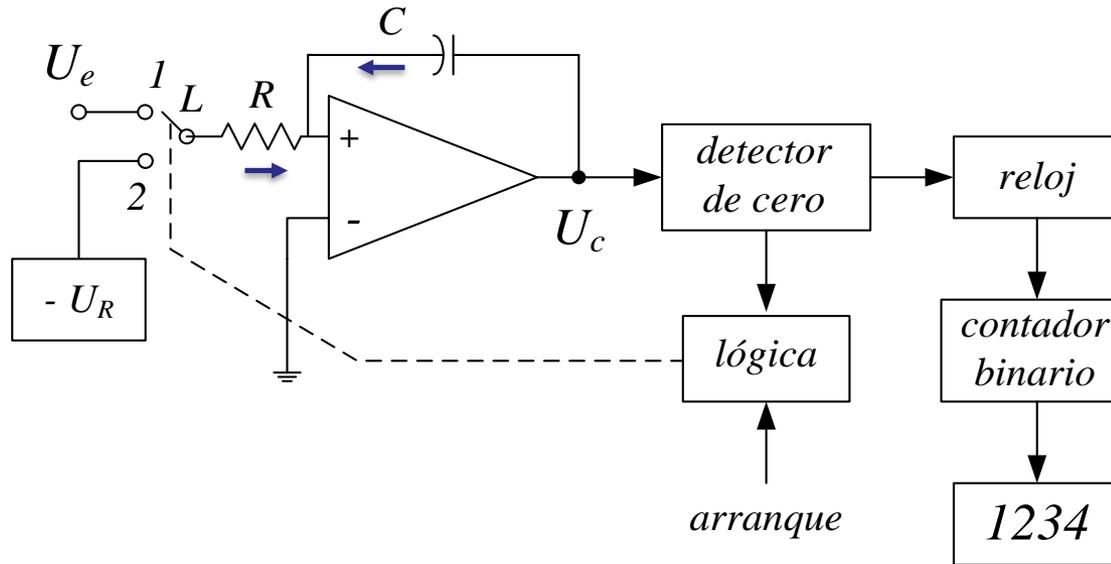
Voltímetro digital, con conversor A-D del tipo doble rampa:
Efecto de las tensiones de modo común y modo serie.

Se determinará el rechazo de modo normal a una señal parásita de 50 Hz, y el rechazo de modo común a una tensión continua.

Voltímetro digital, con convertor A-D del tipo doble rampa:



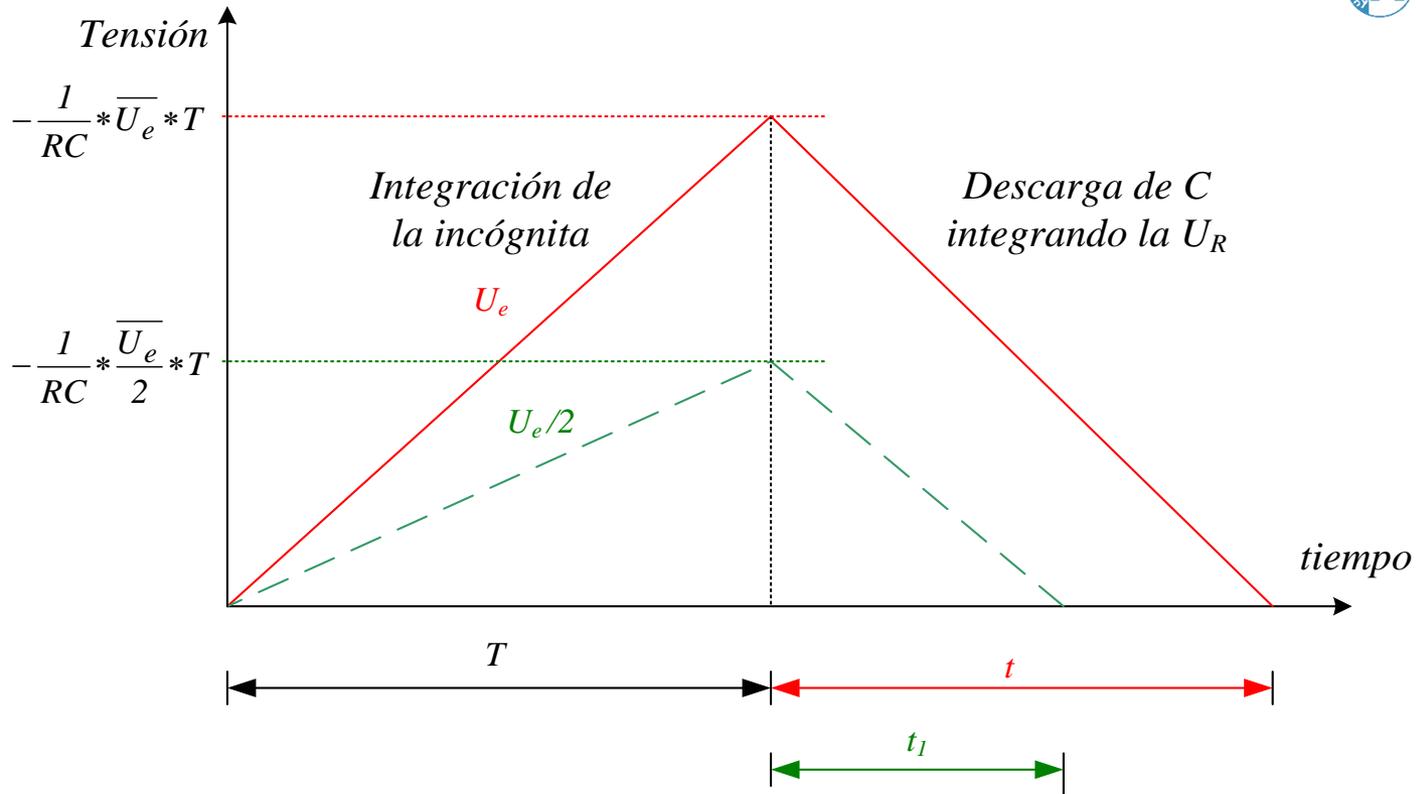
Repasemos el circuito del conversor doble rampa:



$$U_c = \frac{1}{C} \int i_c dt \quad i_c = -i_R = -\frac{U_e}{R} \quad \Rightarrow \quad U_c = -\frac{1}{RC} \int U_e dt$$

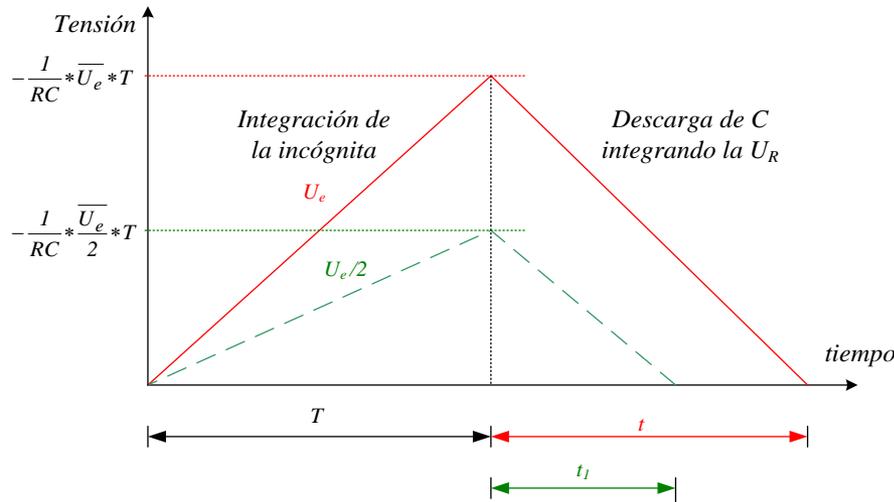
1) U_e conectada durante un tiempo fijo T $\Rightarrow U_c = -\frac{1}{RC} \int_0^T U_e dt = -\frac{1}{RC} \cdot \overline{U_e} \cdot T$

2) detecta polaridad y conecta U_{ref} $\Rightarrow U_c = \frac{1}{RC} \int_T^{T+t} U_R dt' = \frac{1}{RC} * U_R * t$



$$\frac{1}{RC} \cdot \overline{U_e} \cdot T = \frac{1}{RC} \cdot U_{ref} \cdot t$$

$$\overline{U_e} = U_{ref} \cdot \frac{t}{T}$$



$$\overline{U_e} = U_{ref} \cdot \frac{t}{T}$$

La idea del conversor es transformar **una tensión continua** a un valor digital.

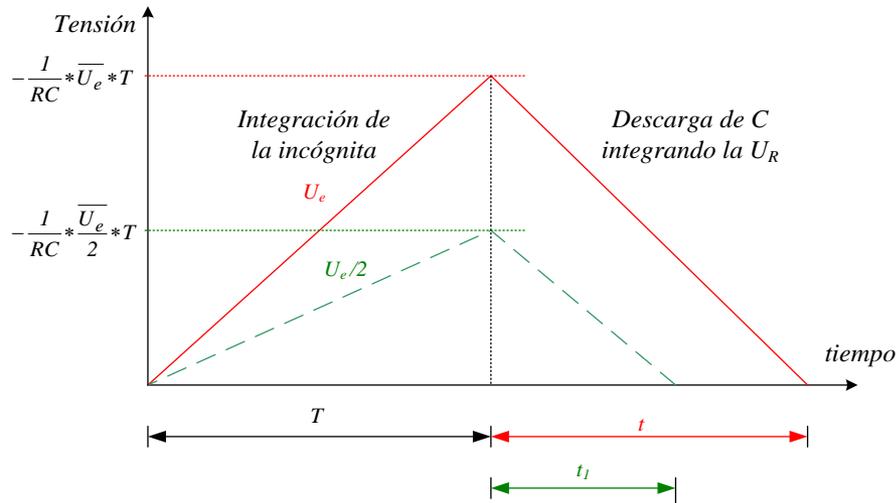
El valor digital es el **estado** (cuenta) del contador en t

Ejemplo (medición en el laboratorio)

1.- La “doble rampa” se visualiza en un osciloscopio, para una tensión de entrada conocida (ej. 110 mV).

2.- Se mide T y t en la pantalla del osciloscopio.

Ej: $T = 270 \text{ ms}$; $t = 300 \text{ ms}$ $U_{ref} = 270/300 \cdot 110 \text{ mV} = 100 \text{ mV}$



$$\overline{U_e} = U_{ref} \cdot \frac{t}{T}$$

Ej: $T = 270 \text{ ms}$; $t = 300 \text{ ms}$ $U_{ref} = 270/300 \cdot 110 \text{ mV} = 100 \text{ mV}$

Notar que “ $T + t$ ” $\approx 570 \text{ ms}$, y si medimos U_e máx, “ $T + t$ ” $\approx 840 \text{ ms}$

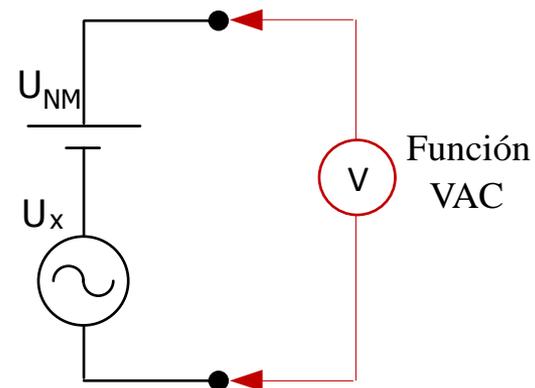
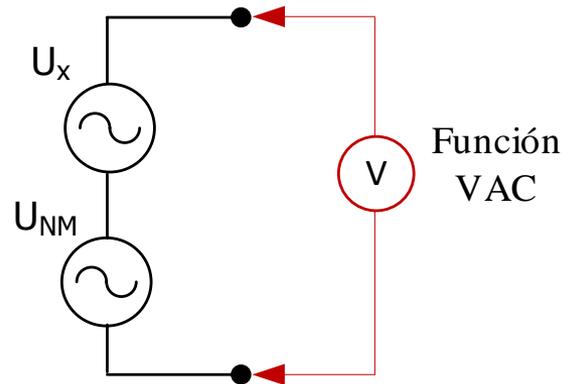
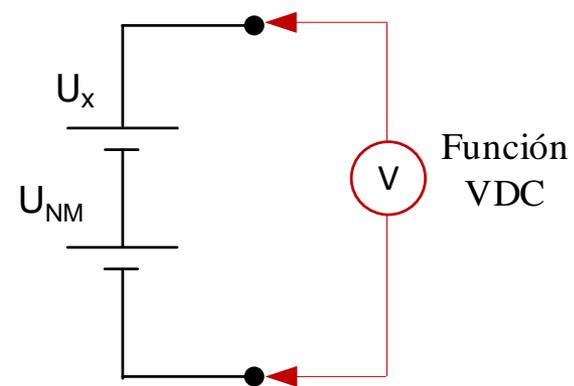
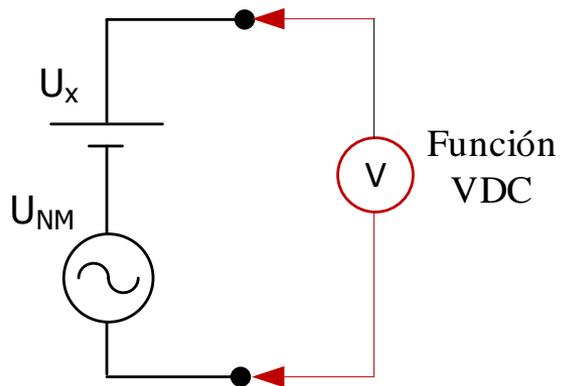
Da un ciclo de medición por segundo (no es un conversor “rápido”).

U_e debería ser constante durante T

Señal de Modo Serie o Normal:

Señal superpuesta a la de interés.

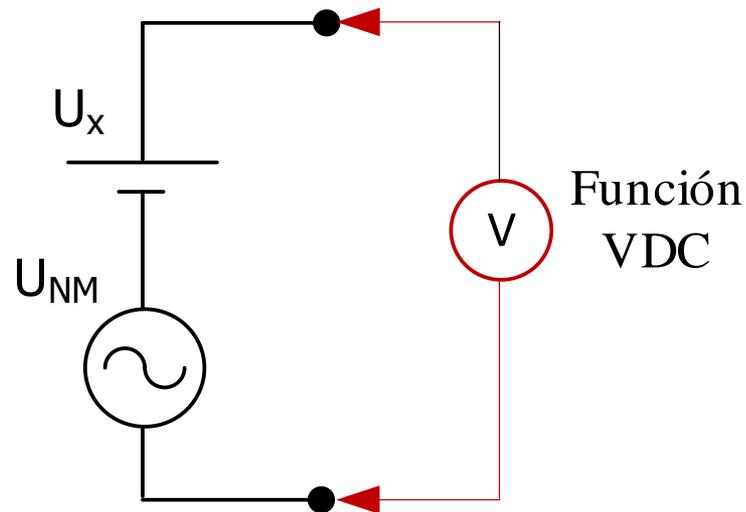
Algunos ejemplos con los que nos podemos encontrar al usar multímetros:



Señal de Modo Serie o Normal:

Señal superpuesta a la de interés.

Algunos ejemplos con los que nos podemos encontrar al usar multímetros:



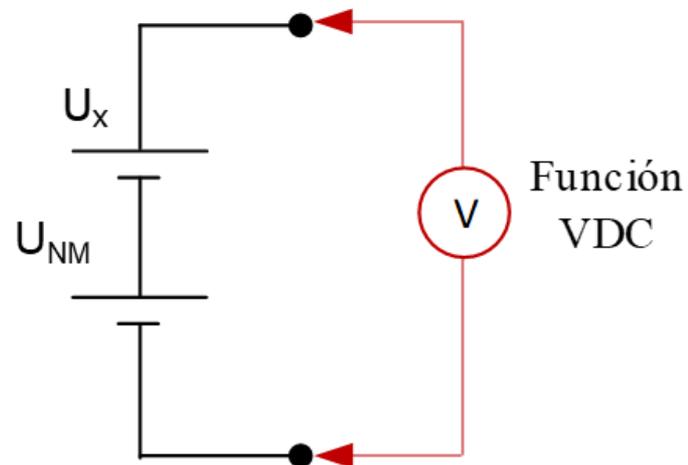
Es el caso usual. Queremos medir continua y tenemos superpuesta una tensión alterna (ripple, señal de red).

La indicación del instrumento **no debería alterarse por la presencia de la señal alterna.**

Señal de Modo Serie o Normal:

Señal superpuesta a la de interés.

Algunos ejemplos con los que nos podemos encontrar al usar multímetros:

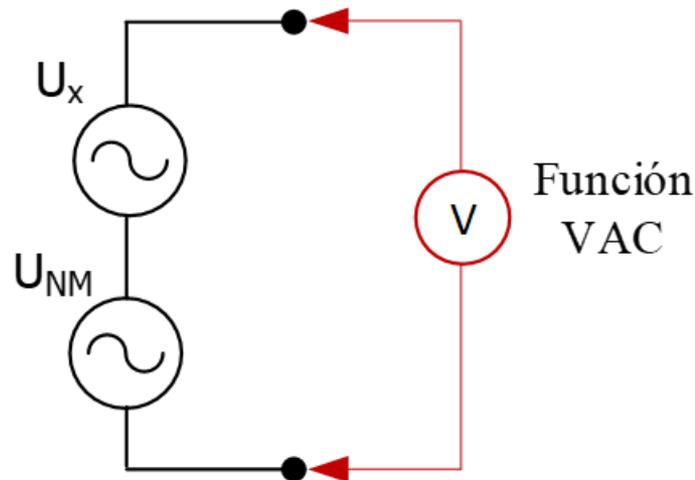


No es una situación común. El instrumento no puede discernir entre la tensión a medir y la espuria. Caso de fem termoeléctricas

Señal de Modo Serie o Normal:

Señal superpuesta a la de interés.

Algunos ejemplos con los que nos podemos encontrar al usar multímetros:

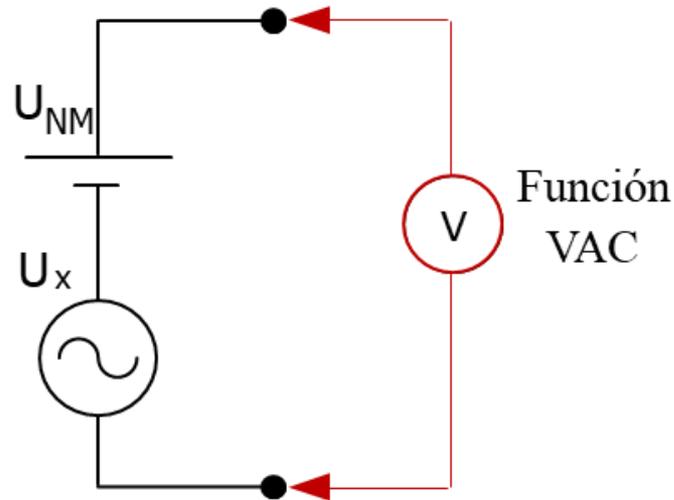


Nuevamente el instrumento no puede discernir entre la tensión a medir y la normal, salvo que tengan diferencias en frecuencia. En tal caso, se podría separar la señal de modo normal usando filtros.

Señal de Modo Serie o Normal:

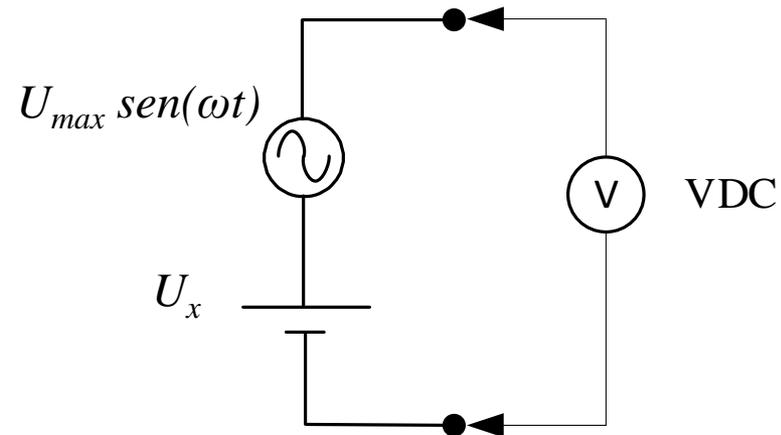
Señal superpuesta a la de interés.

Algunos ejemplos con los que nos podemos encontrar al usar multímetros:

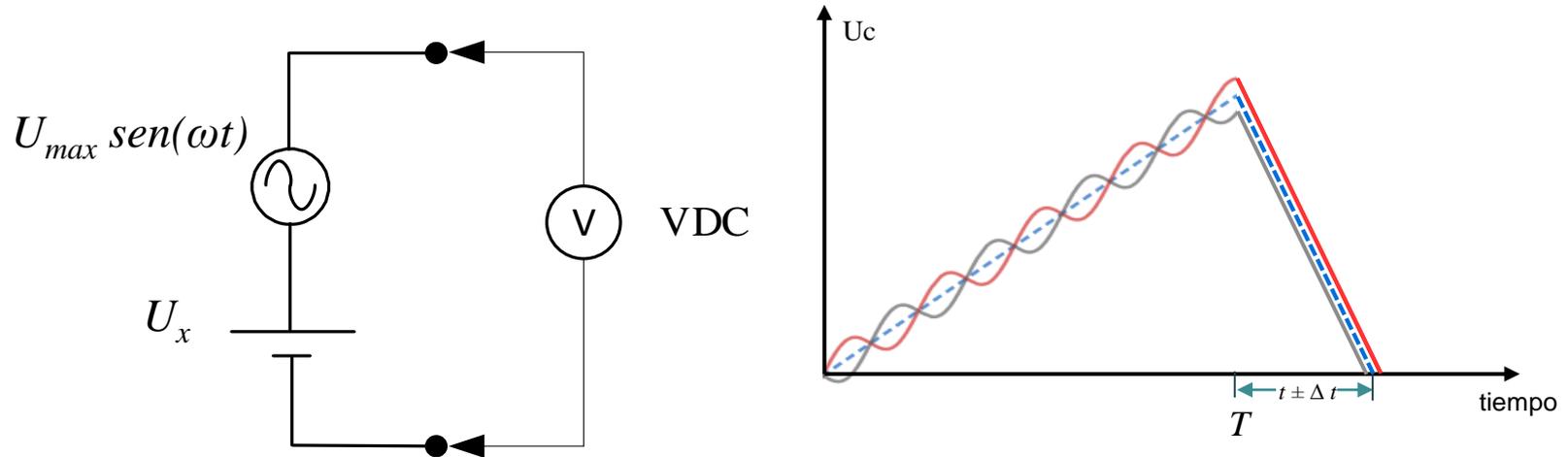


La señal de modo normal es una continua superpuesta a la alterna que queremos medir. Se resuelve con un capacitor en serie (desacople de continua).

Caso particular de una tensión de modo serie o normal:
Señal de modo serie sinusoidal



Interesa que nuestro instrumento **mida solo U_x** y “rechace” la señal de modo serie.

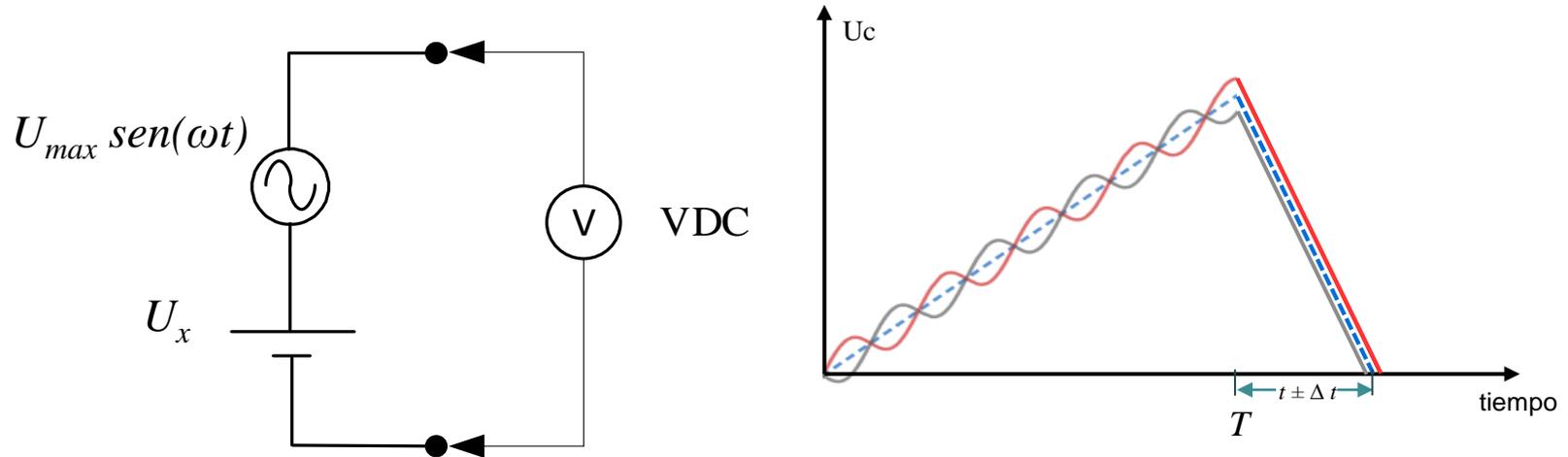


Pensando en un conversor doble rampa, tendremos para la rampa de subida (primera integración):

$$U_c = \int_{t_i}^{t_i+T} (U_x + U_{max} \text{sen}(\omega t)). dt = U_x \cdot T - \frac{U_{max}}{\omega} \cos(\omega t) \Big|_{t_i}^{t_i+T}$$

Para el valor alcanzado de U_c , la segunda rampa será:

$$U_c = U_{ref} \cdot t$$



Podemos pensar las igualdades en la forma:

$$U_x \cdot T = U_{ref} \cdot t \pm a = U_{ref} \cdot (t \pm \Delta t)$$

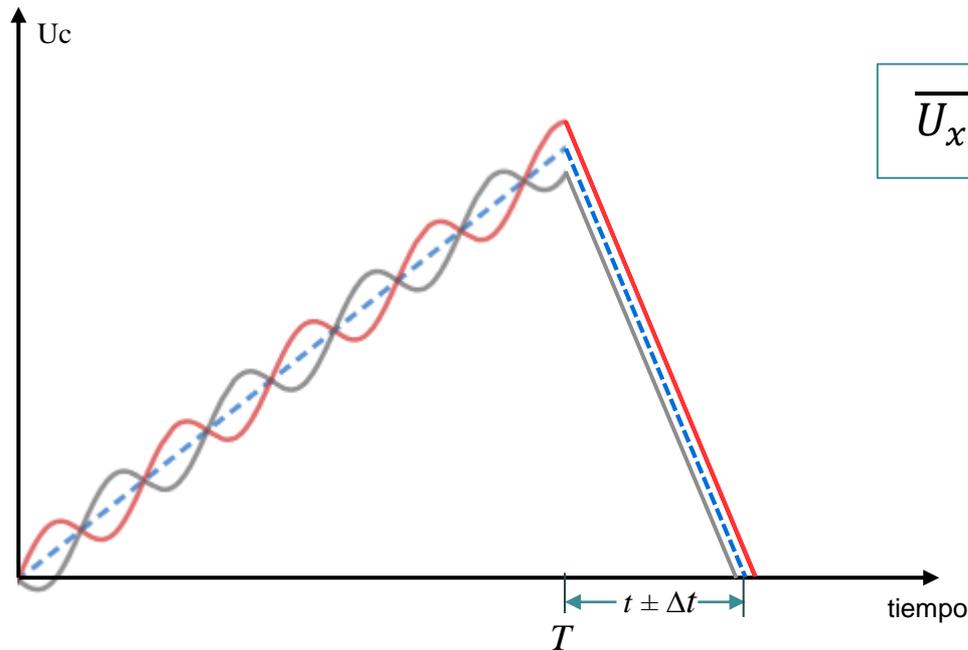
a : es un valor que cambia con cada integración

Y el resultado de la conversión será:

$$\overline{U_x} = U_{ref} \cdot \frac{t \pm \Delta t}{T}$$

En la gráfica se observan dos posibles integraciones de la señal en bornes.

Vemos que el tiempo contabilizado ira variando en las diferentes conversiones, y por ende, también lo hará el valor de tensión indicado.



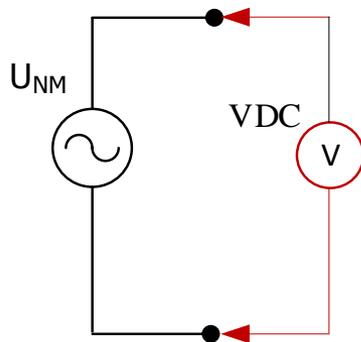
$$\overline{U_x} = U_{ref} \cdot \frac{t \pm \Delta t}{T}$$

Se elige T de tal manera que los errores sean mínimos a frecuencia de red de 50 ó 60 Hz

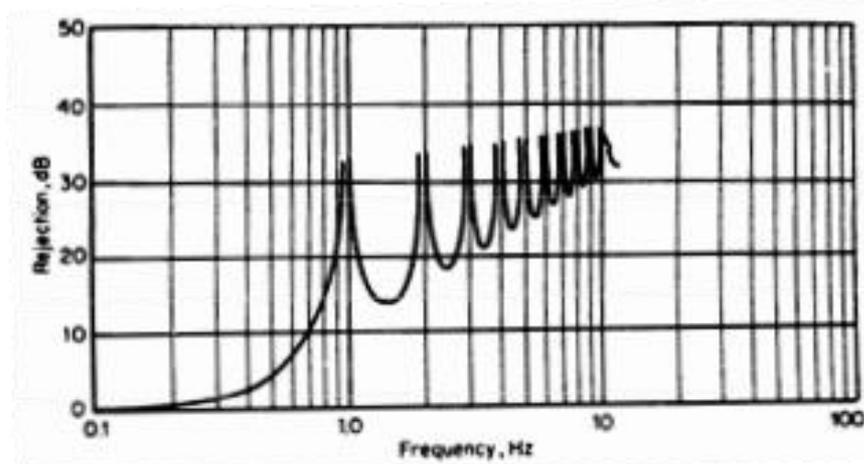


múltiplo del período de la señal de red (100ms ó 300ms, por ej.)

Como las señales de modo normal pueden introducir un error no despreciable en la medida, los fabricantes de los instrumentos informan el comportamiento frente a señales de modo normal de alterna, a través del **NMRR** (Normal Mode Rejection Ratio).



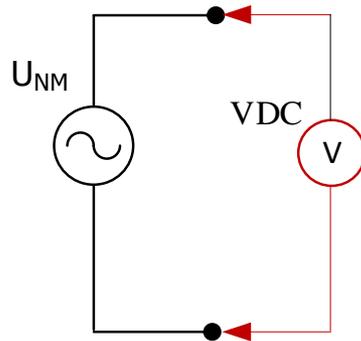
$$NMRR[dB] = 20 \log \frac{\text{valor máximo de la señal de modo normal}}{\text{fracción "vista" por el aparato}}$$



Rechazo teórico para un convertor doble rampa.

$$NMRR [dB] = 20 \log \left(\frac{\pi f T}{\text{sen} \pi f T} \right)$$

Rechazo teórico de nuestro conversor:



$$NMRR [dB] = 20 \log \left(\frac{\pi f T}{\text{sen} \pi f T} \right)$$

$T = 270 \text{ ms}$:

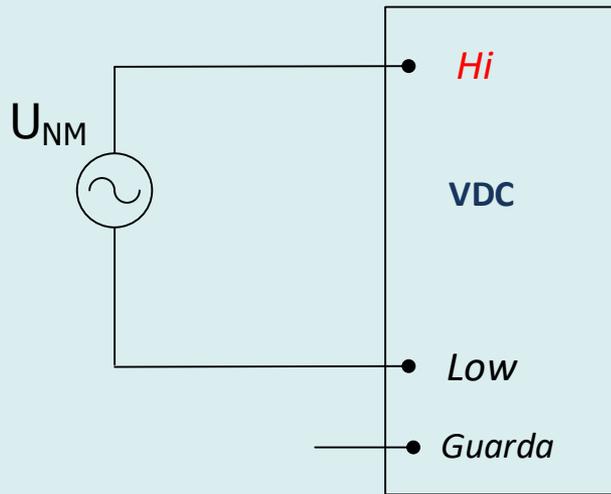
Para una señal NM de 50 Hz:

$$NMRR = 20 \log \frac{\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 270 \text{ ms}}{\text{sen}(\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 270 \text{ ms})} \approx 33 \text{ db}$$

Para una señal NM de 60 Hz:

$$NMRR = 20 \log \frac{\pi \cdot 60 \text{ Hz} \cdot 270 \text{ ms}}{\text{sen}(\pi \cdot 60 \text{ Hz} \cdot 270 \text{ ms})} \approx 39 \text{ db}$$

¿Cómo mediremos el rechazo de nuestro instrumento?



Como el conversor mide continua, esperamos que su indicación sea "0". Lo que marque será la **“fracción vista”**

¿Qué valor de tensión U_{NM} se debe aplicar?

En el laboratorio está previsto aplicar una tensión de 200mV (de alterna por supuesto).

Se obtendrán del transformador colocado para tal fin en la plaqueta experimental.

El voltímetro se ajustará en su modo rápido de conversión.

La indicación no es estable:

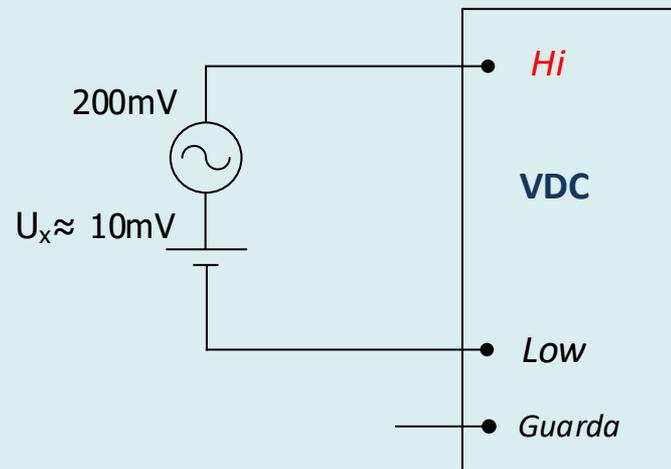
$$U_{\text{indicada}} \begin{cases} + 0,5 \text{ mV} \\ - 0,5 \text{ mV} \end{cases} \quad U_{\text{vista}}: \pm 0,5 \text{ mV}$$

$$NMRR = 20 \log \frac{\sqrt{2} \cdot 200 \text{ mV}}{0,5 \text{ mV}} = 55 \text{ dB}$$

¿Qué sucederá si utilizo modo lento?

$T_{\text{lento}} > T_{\text{rápido}}$, es esperable que mejore el rechazo. Se comprobará en el laboratorio

Ejemplo de medición en presencia de señal de Modo Normal

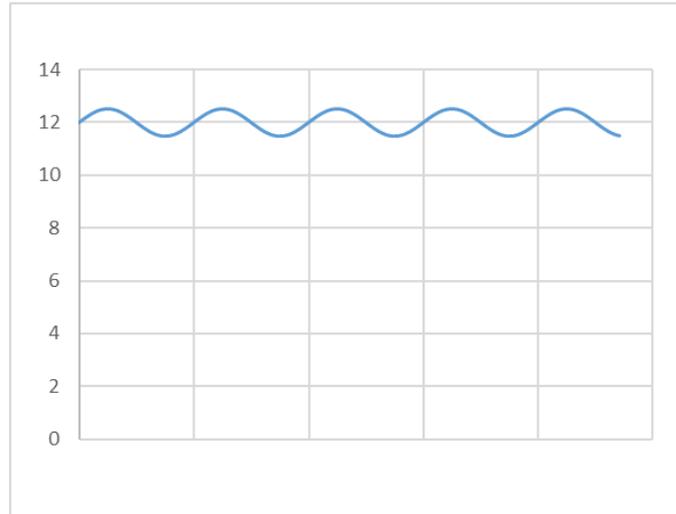
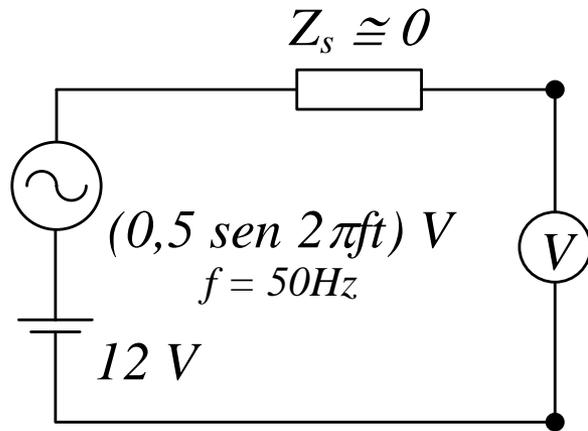


Además, para mejor comprensión, se observará la *forma de onda de tensión sobre el capacitor de integración* del instrumento.

Para esto utilizaremos un Osciloscopio digital, instrumento que estudiaremos en detalle más adelante.

Ejemplo de aplicación del NMRR

Medición de una fuente de tensión continua con “ripple”



Voltímetro:

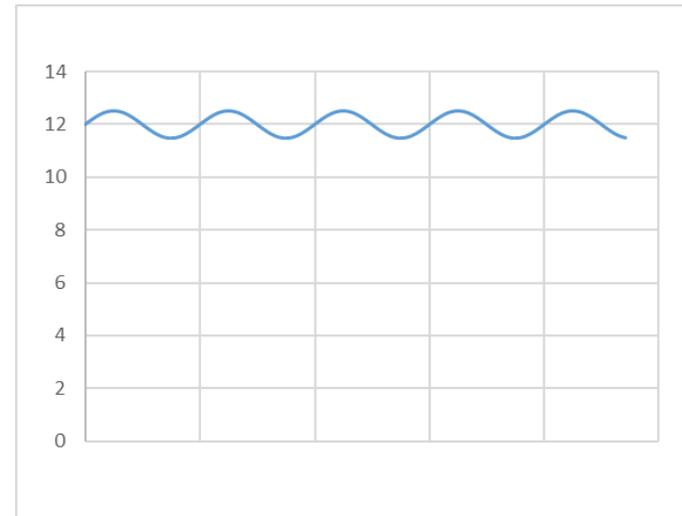
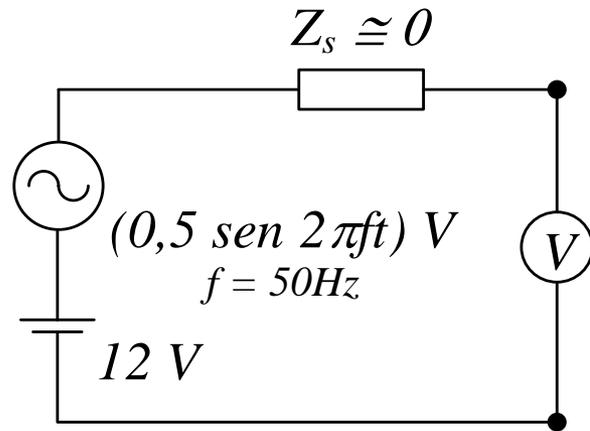
50.000 cuentas, alc. 50 V, $E_u = \pm[0,025\% U_m + 2 \text{ dig}]$

NMRR > 60 dB, a 50 ó 60 Hz

$$E_u = \pm[0,025\% 12\text{ V} + 0,002] = \pm 0,005\text{ V}$$

Ejemplo de aplicación del NMRR

Medición de una fuente de tensión continua con “ripple”



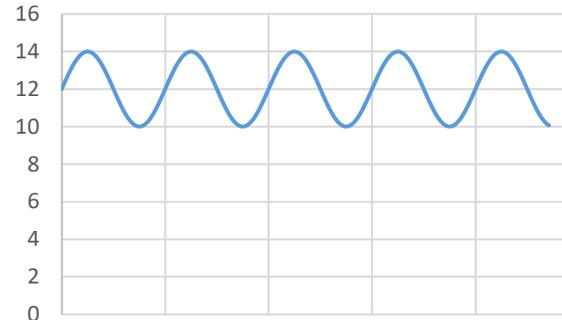
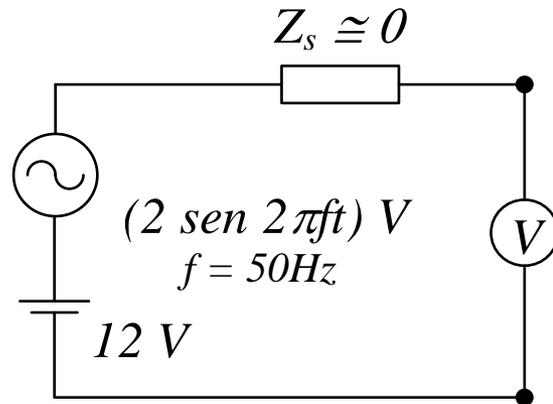
$$Eu = \pm [0,025\% \cdot 12 \text{ V} + 0,002] = \pm 0,005 \text{ V}$$

$$\text{NMRR}[\text{dB}] = 20 \log \frac{\text{valor máximo de la señal de modo normal}}{\text{fracción "vista" por el aparato}} > 60\text{dB}$$

$$U_{\text{vista}} < \frac{U_{\text{máx}}}{10^{\frac{\text{NMRR}}{20}}} = \frac{U_{\text{máx}}}{1000} = 0,0005 \text{ V} \quad \longrightarrow \quad \text{Despreciable frente a } Eu$$

Ejemplo de aplicación del NMRR

Medición de una fuente de tensión continua con “ripple”



$$Eu = \pm[0,025\% 12 \text{ V} + 0,002] = \pm 0,005 \text{ V}$$

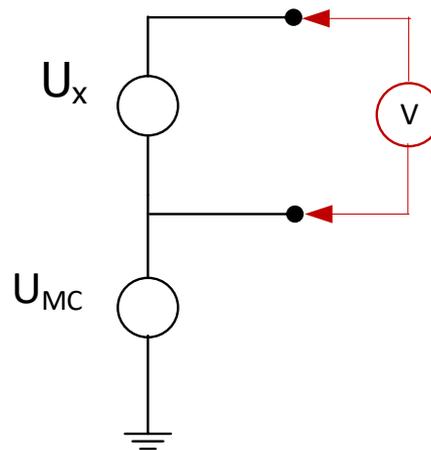
$$U_{vista} < \frac{U_{m\acute{a}x}}{\frac{NMRR}{10^{20}}} = \frac{U_{m\acute{a}x}}{1000} = 0,002 \text{ V} \quad \longrightarrow \quad \text{No es despreciable frente a } Eu$$

Buscamos un instrumento con mejor NMRR

“Empeoramos” nuestra medición y consideramos $Eu = \pm 0,007 \text{ V}$

Señal de Modo de Común:

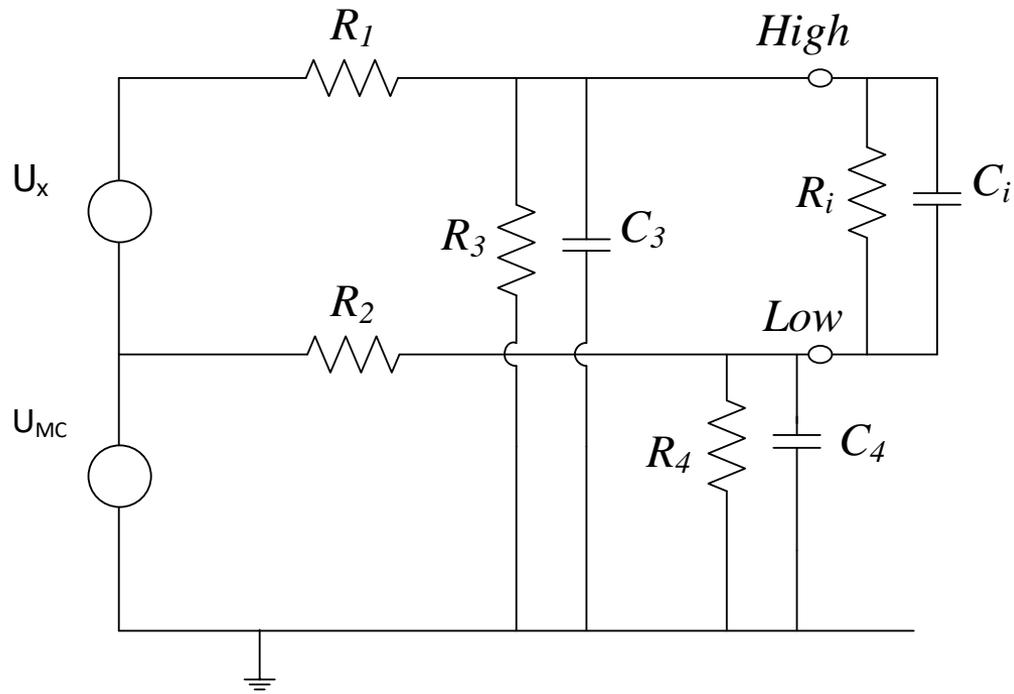
Señal presente en ambos bornes de entrada respecto a una referencia, que usualmente coincide con las puestas a tierra de las fuentes de alimentación.



La señal a medir U_x puede ser tanto de alterna como de continua (voltímetro en su funciones VDC ó VAC).

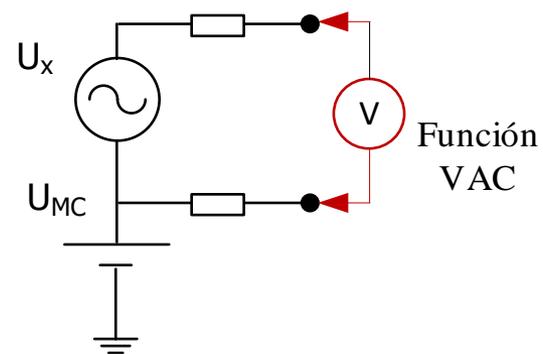
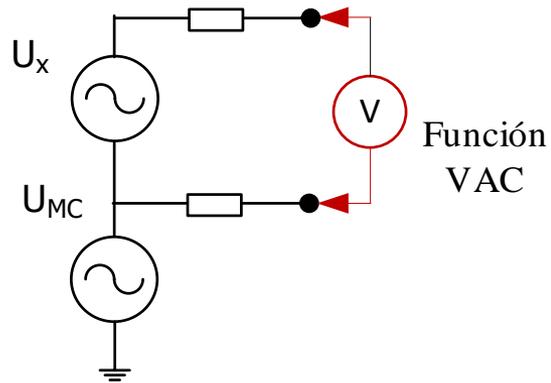
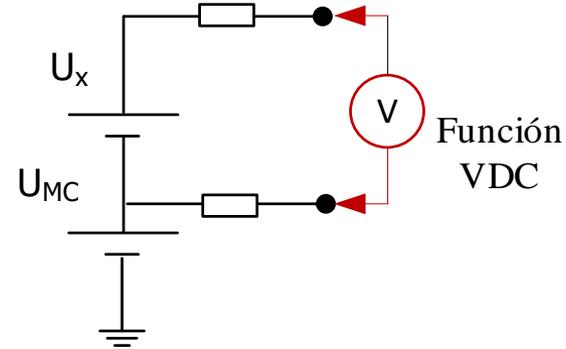
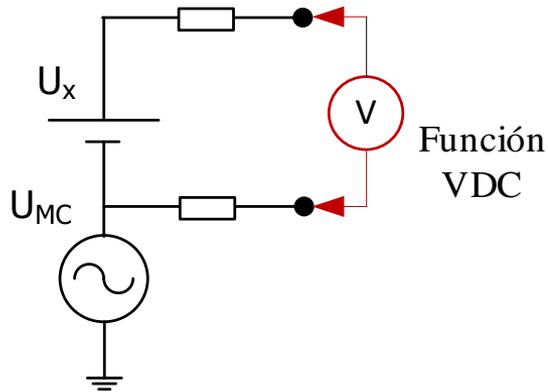
La señal de modo común podría afectar la indicación del instrumento en forma indeseada. Puede ser de cualquier naturaleza (alterna, continua o ni siquiera periódica)

Debido a la imperfecta aislación del aparato, el problema puede agravarse si existen impedancias de desbalance.

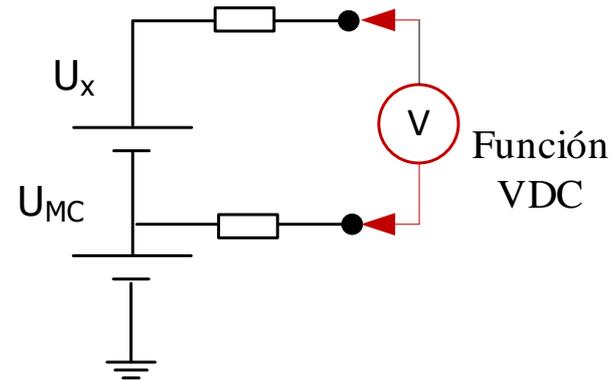
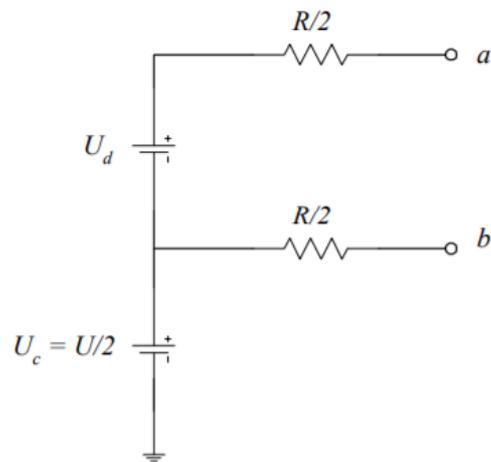
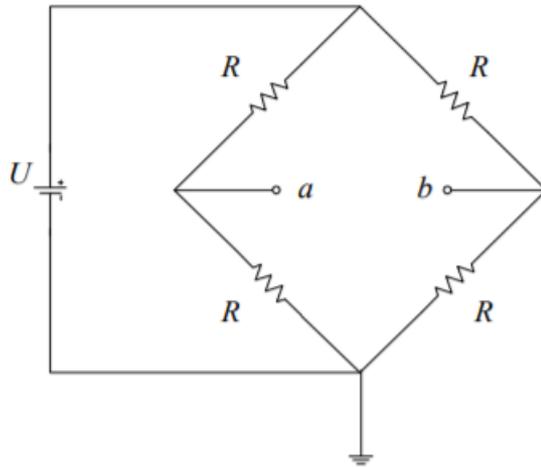


La señal U_{MC} provoca señales de modo diferencial sobre R_1 y R_2 (conversión de modo).

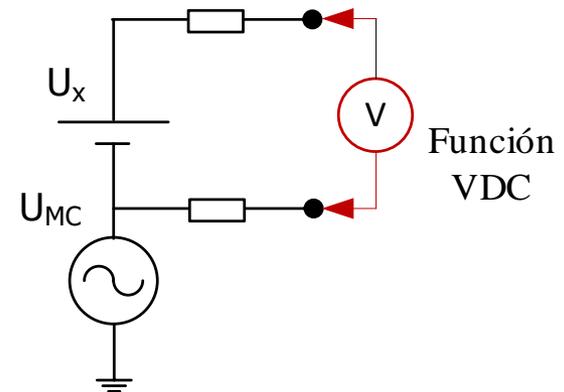
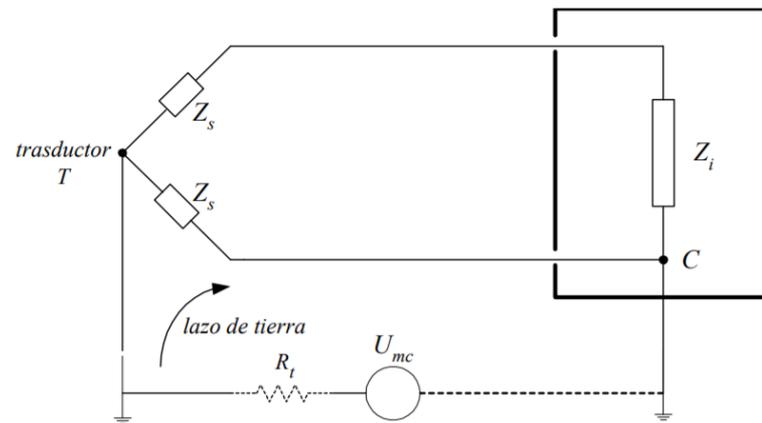
Algunos ejemplos con los que nos podemos encontrar al usar multímetros:



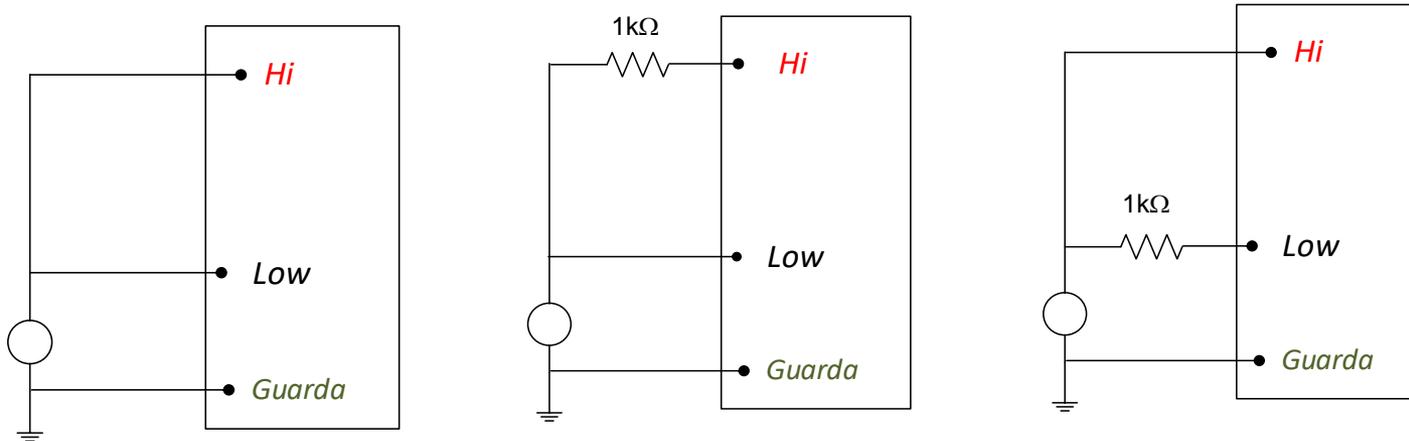
Ejemplo de señal de modo común: detector en circuito puente



Ejemplo de señal de modo común: diferencia entre tierras



Los fabricantes de los instrumentos, informan el comportamiento frente a señales de modo común, a través del **CMRR** (Common Mode Rejection Ratio), utilizando los siguientes circuitos de prueba:



$$CMRR[dB] = 20 \log \frac{\text{valor máximo de la señal de modo común}}{\text{fracción "vista" por el aparato}}$$

Usualmente el CMRR, se adjunta con otros datos de interés:

- función utilizada
- valor y ubicación de la resistencia de desbalance (Hi o Low)
- frecuencia de la señal aplicada

También puede brindar curvas del CMRR en función de la frecuencia de la señal

El instrumento en prueba posee guarda, cosa que no es común en este tipo de instrumento, es al sólo efecto de definir con claridad la referencia.

En un voltímetro convencional deberíamos definir un plano de referencia, por ejemplo plano metálico donde se apoya el instrumento.

¿De qué valor debería ser la tensión U_{MC} a aplicar, y de qué frecuencia?

La frecuencia de la señal dependerá de cuál nos interesa evaluar para una dada aplicación. En nuestro caso la evaluaremos a tensión continua.

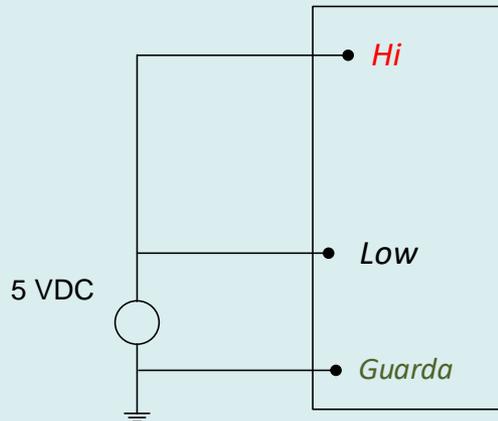
En cuanto al valor, lo más alto posible, ya que se espera que el rechazo sea elevado, no obstante deberá ser menor que el soportado por el instrumento,.

En el caso del laboratorio, por disponibilidad, y precaución, se realizará a una baja tensión (5VDC).

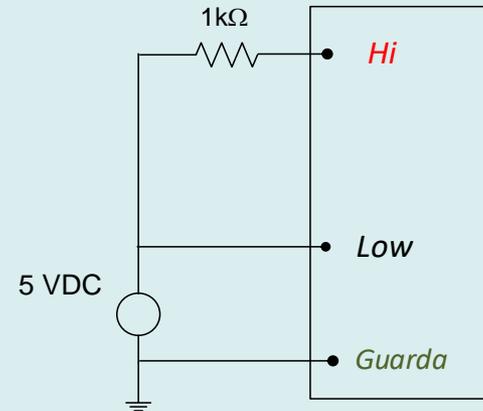
Medición de CMRR

Ejemplo de medición:

CMRR intrínseco del instrumento
(sin desbalance)



CMRR con desbalance en *Hi*



En ambos casos el valor indicado fue: 0,0mV \Rightarrow $U_{\text{vista}} < 0,05 \text{ mV}$

$$CMRR[dB] > 20 \log \frac{5V}{0,05mV} = 100dB$$

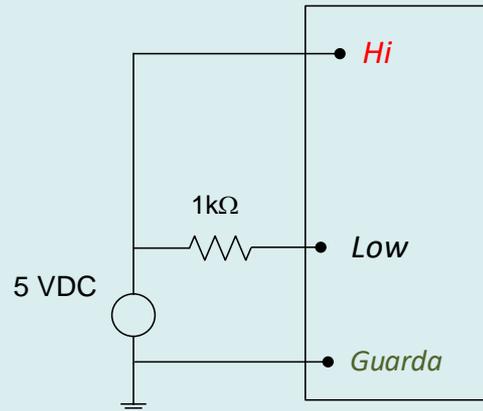
¿Cuál debería ser la polaridad de la fuente?

Cualquiera, los valores obtenidos dependen de resistencias de aislación que no cambian con la polaridad

Medición de CMRR

Ejemplo de medición:

CMRR con desbalance en *Low*



valor indicado fue: 0,5mV



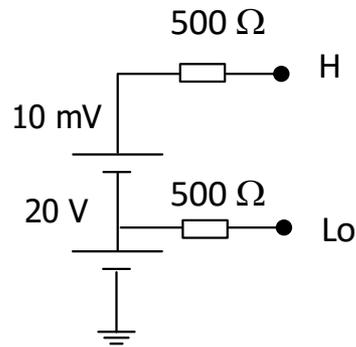
$U_{\text{vista}} = 0,5 \text{ mV}$

$$CMRR[dB] = 20 \log \frac{5V}{0,5mV} = 80dB$$

¿podemos obtener el valor de la resistencia de aislación Low-tierra en base a las mediciones realizadas?

¿Cuál sería el valor indicado si repetimos la prueba con $R_{\text{desbalance}}=2k\Omega$? ¿por qué?

Uso del CMRR en una medición. Función voltímetro de continua



Voltímetro:

50000 cuentas, alc. 50 mV, $E_u = \pm[0,025\% U_m + 2 \text{ dig}]$

NMRR > 60 dB a 50 o 60 Hz

CMRR > 120 dB DC; > 60 dB a 50, 60 Hz

Medimos 10 mV en el alcance 50 mV:

$$E_u = \pm[0,025\% 10 \text{ mV} + 0,002 \text{ dig}] = \pm 0,0045 \text{ mV} \quad e_u = \pm 0,045\% \quad e_s \approx -R_s/R_v = -0,01\%$$

Para $R_{LO} = 1 \text{ k}\Omega$, $\text{CMRR} > 120 \text{ dB} = 20 \log (U_{MC}/U_v)$

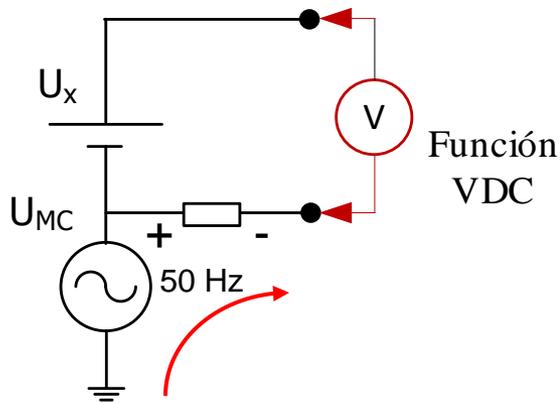
$$U_v < 0,02 \text{ mV}$$

Para $R_{LO} = 500 \Omega$

$$U_v < 0,01 \text{ mV}$$

La fracción vista pesa frente al error, hay que buscar una forma de eliminarla.

Caso particular, rechazo efectivo. Función voltímetro de continua



Voltímetro:

50000 cuentas, alc. 50 mV, $E_u = \pm[0,025\% U_m + 2 \text{ dig}]$

NMRR > 60 dB a 50 o 60 Hz

CMRR > 120 dB DC; > 60 dB a 50, 60 Hz

La fracción vista de modo común se transforma en un caída serie, que es rechazada:

$$CMRR_{efectivo} = CMRR + NMRR = 60 \text{ dB} + 60 \text{ dB} = 120 \text{ dB}$$

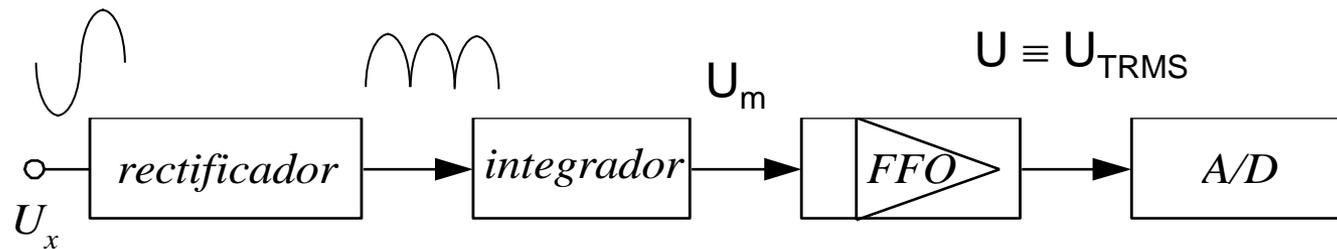
Parte 2.

Multímetros digitales: Errores por forma de onda.

Se analizará el efecto de la forma de onda de las propias señales a medir en los errores de medición.

Instrumento de valor medio

Voltímetro de valor medio:



$$FFO = \frac{U_{ef}}{U_m}$$

$$U_m = \frac{2 U_{m\acute{a}x}}{\pi}$$

$$U_{TRMS} = \frac{U_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}}$$

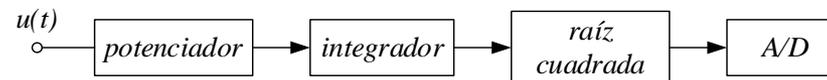
$$FFO = 1,11$$

Instrumento de valor eficaz verdadero

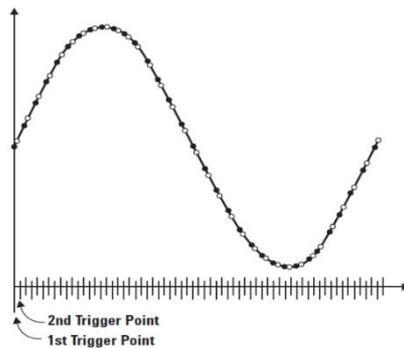
Voltímetro de valor eficaz verdadero (True RMS):

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$$

El valor eficaz se puede calcular mediante la aplicación de su definición matemática.



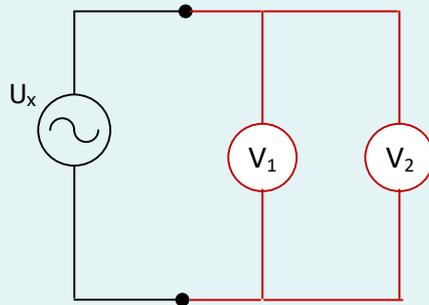
Se puede realizar un procesamiento analógico de la señal que se aplica al conversor A/D.



Digitalmente, se puede muestrear la señal y operar con las muestras tomadas.

Medición del valor eficaz de una onda senoidal

A dos multímetros se les aplicará simultáneamente una tensión alterna de $5V_{\text{pico}} - 50\text{Hz}$



V1: voltímetro de valor medio, HP-972 A

V2 : voltímetro de valor eficaz verdadero, HP-974 A

¿Cuál debería ser el valor indicado por ambos instrumentos?

Esencialmente el mismo: $U_x = \frac{5}{\sqrt{2}}$

Valores indicados: U_{x1} : 3,529 V, voltímetro de valor medio, HP-972A

U_{x2} : 3,5360 V, voltímetro de valor eficaz verdadero, HP-974A

$E_{Ux1} = \pm (1\% 3,529 \text{ V} + 3\text{dig}) = \pm 0,04\text{V}$... alcance 4V

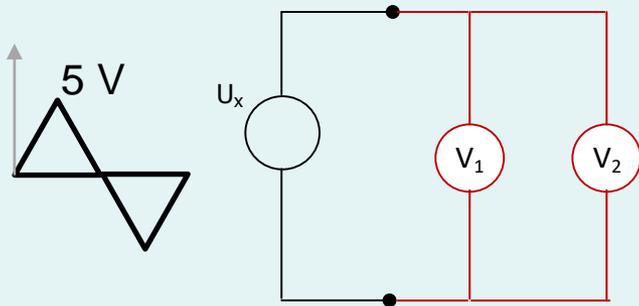
$E_{Ux2} = \pm (0,5\% 3,5360 \text{ V} + 30\text{dig}) = \pm 0,02\text{V}$... alcance 5V

¿A qué se debe las diferentes indicaciones de ambos instrumentos?

Laboratorio

Medición del valor eficaz de una onda triangular

Se utilizarán dos multímetros y se les aplican simultáneamente una tensión triangular de 50Hz y de 5V de pico



V1: voltímetro de valor medio, HP-972 A

V2 : voltímetro de valor eficaz verdadero, HP-974 A

¿Cuál debería ser el valor indicado por ambos instrumentos?

$$U_{x1} = \frac{5}{2} \cdot 1,11 = 2,775 \qquad U_{x2} = \frac{5}{\sqrt{3}} = 2,8867$$

Valores indicados: U_{x1} : 2,773 V, voltímetro de valor medio, HP-972A

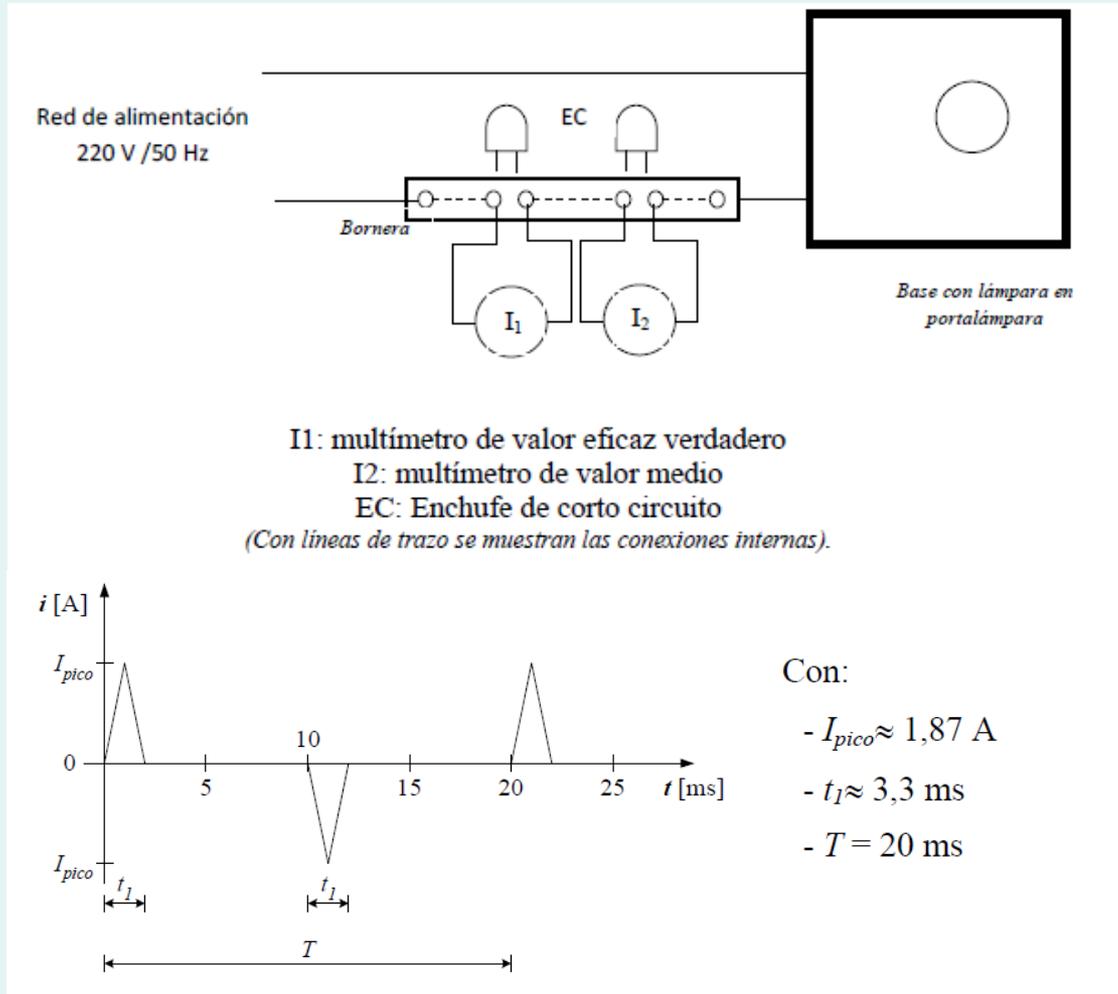
U_{x2} : 2,8883 V, voltímetro de valor eficaz verdadero, HP-974A

La medición U_{x1} , posee un error sistemático (de forma de onda):

$$e_{U_{x1}} = (2,775 - 2,8867)/2,8867 \approx -4\% \quad [\text{además de su error fortuito}]$$

$$E_{U_{x2}} = \pm (0,5\% \cdot 2,8883 \text{ V} + 30\text{dig}) = \pm 0,02\text{V} \quad (\text{alcance } 5\text{V})$$

Medición del valor eficaz de la corriente de una lámpara fluorescente compacta



Medición del valor eficaz de la corriente de una lámpara fluorescente compacta

¿Cuál debería ser el valor indicado por ambos instrumentos?

$$I_{x1} \approx I_{max} \frac{t_1}{T} 1,11 \approx 340mA \qquad I_{x2} \approx \frac{I_{max}}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{2 \cdot t_1}{T}} \approx 620mA$$

Valores indicados: I_{x1} : 0,32 A, amperímetro de valor medio, HP-972A, alcance 10A
 I_{x2} : 0,6446 A, amperímetro de valor eficaz verdadero, HP-974A, alcance 10A

Diferencia entre indicaciones

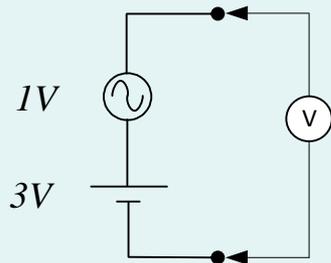
La medición I_{x1} , posee un error sistemático (de forma de onda) de $e_{Ux1} \approx -50\%$... alcance 10 A (por qué no usar alc. 400 mA?)

$$E_{Ix2} = \pm (1\% 0,6446 A + 30\text{dig}) = \pm 0,03A \quad \dots \text{ alcance } 10 A$$
$$I_{x1} = (0,64 \pm 0,03)A$$

Factor de cresta = 3

Laboratorio

Medición del valor eficaz de una señal compuesta por una senoidal con una componente de continua superpuesta



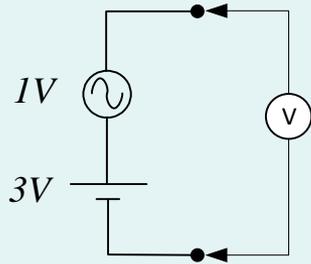
V1: voltímetro de valor medio, HP-972A, en sus funciones de VDC y VAC (se requieren dos mediciones)

V2 : voltímetro de valor eficaz verdadero, HP-974A, en su función VDC+VAC (valor eficaz verdadero de la señal total)

¿Cuál debería ser el valor indicado por ambos instrumentos?

$$U_{x2} = \sqrt{U_{DC}^2 + U_{AC}^2} = 3,1993 \text{ V}$$

Laboratorio



V1: voltímetro de valor medio, HP-972A, en sus funciones de VDC y VAC

Lecturas, HP-972A, alcance 4V, medimos U_{DC} y luego U_{AC} :

$$U_{x1(DC)} : 3,034 \text{ V}, \quad U_{x1(AC)} : 1,015 \text{ V (con desacople de continua)}$$

$$E_{U_{x1(DC)}} = \pm (0,2\% 3,034 \text{ V} + 1 \text{ dig}) = \pm 0,007 \text{ V}$$

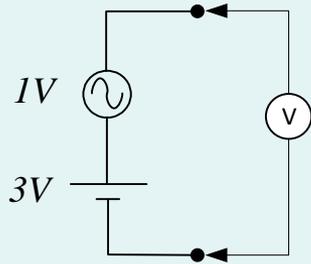
NMRR = 60 dB, fracción vista de 1 V, $U_{\text{vista}} = \pm 0,0014 \text{ V}$ **No es despreciable**

$$e_{U_{x1(DC)}} = \pm (0,007 + 0,0014)/3 = \pm 0,28\%$$

$$E_{U_{x1(AC)}} = \pm (1\% 1,015 \text{ V} + 3 \text{ dig}) = \pm 0,013 \text{ V}$$

$$e_{U_{x1(AC)}} = \pm 1,3\%$$

Laboratorio



$$U_x = \sqrt{U_{DC}^2 + U_{AC}^2} = 3,1993 \text{ V}$$

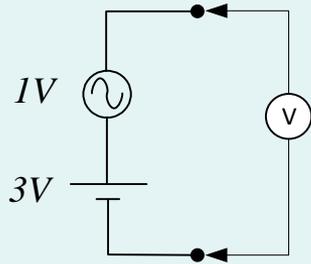
Para obtener el error final debemos propagar

$$e_{U_{x1}} = \frac{U_{DC}^2}{U_{DC}^2 + U_{AC}^2} e_{U_{DC}} + \frac{U_{AC}^2}{U_{DC}^2 + U_{AC}^2} e_{U_{AC}}$$

$$e_{U_{x1}} = 0,9 e_{U_{DC}} + 0,1 e_{U_{AC}} = \pm 0,37\%$$

$$U_x = [3,20 \pm 0,01] \text{ V}$$

Laboratorio



V2 : voltímetro de valor eficaz verdadero, HP-974A, en su función VDC+VAC

Lectura HP-974A, alcance 5V, medimos en función AC+DC:

$$U_{x2}: 3,2004 \text{ V}$$

$$E_{U_{x2}} = \pm (1\% 3,2004 \text{ V} + 30\text{dig}) = \pm 0,033 \text{ V}$$

$$U_{x2} = (3,20 \pm 0,03) \text{ V}$$