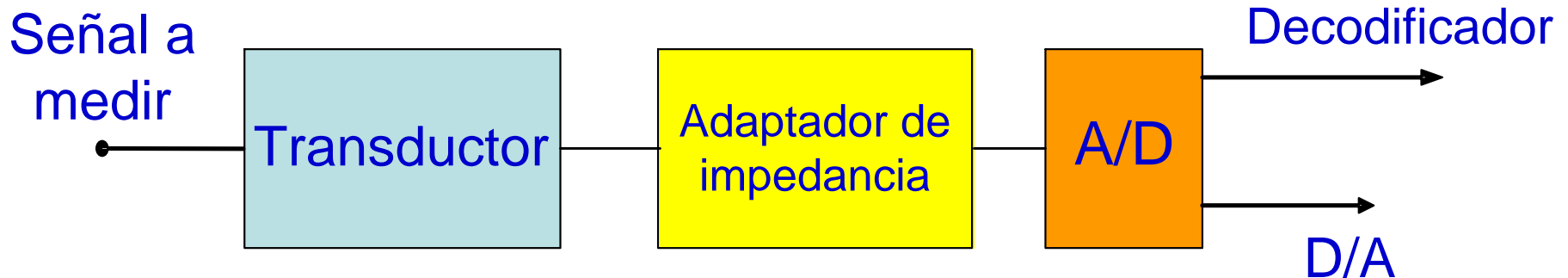


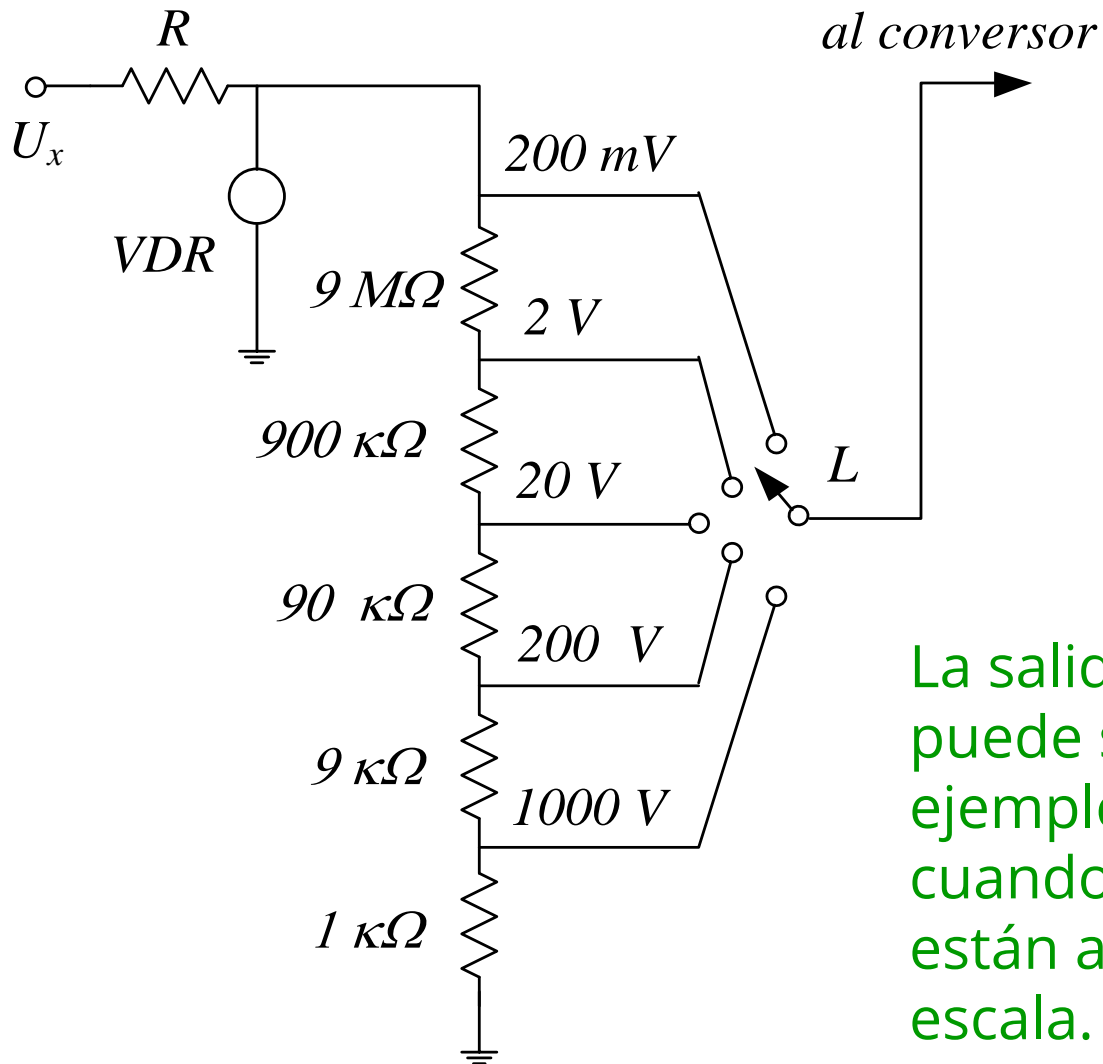
# Instrumentos Digitales para la Medición de Fenómenos Lentos

Los conversores A/D que hemos analizado tienen una característica en común: *miden Tensiones Continuas.*

⇒ Si se desea medir alguna otra magnitud, será necesario previamente convertirla en una señal de tensión continua que le sea proporcional



# Voltímetro de Continua Multialcance



La salida al conversor puede ser, por ejemplo,  $200\text{ mV}$ , cuando las entradas están a fondo de escala.



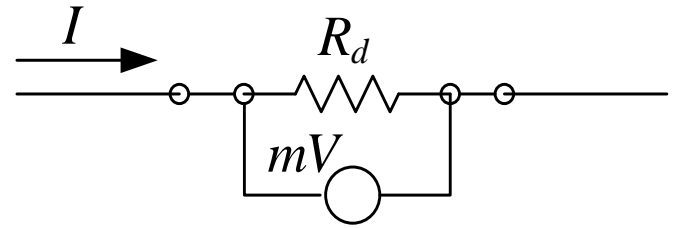
Multímetro Digital  
YOKOGAWA  
TY720  
(4 ¾ dígitos)

## Multímetro Digital YOKOGAWA, TY720 (4 ¾ dígitos)

### DC Voltage Measurement V

Range	Resolution	Accuracy	Input Resistance	Maximum Input Voltage
		TY710, TY720		
50mV	0.001mV	0.05+10	Approx. 100MΩ	1000V DC
500mV	0.01mV	0.02+2		
2400mV	0.1mV			
5V	0.0001V	0.025+5	10MΩ	1000V rms AC
50V	0.001V	0.03+2		
500V	0.01V			
1000V	0.1V			

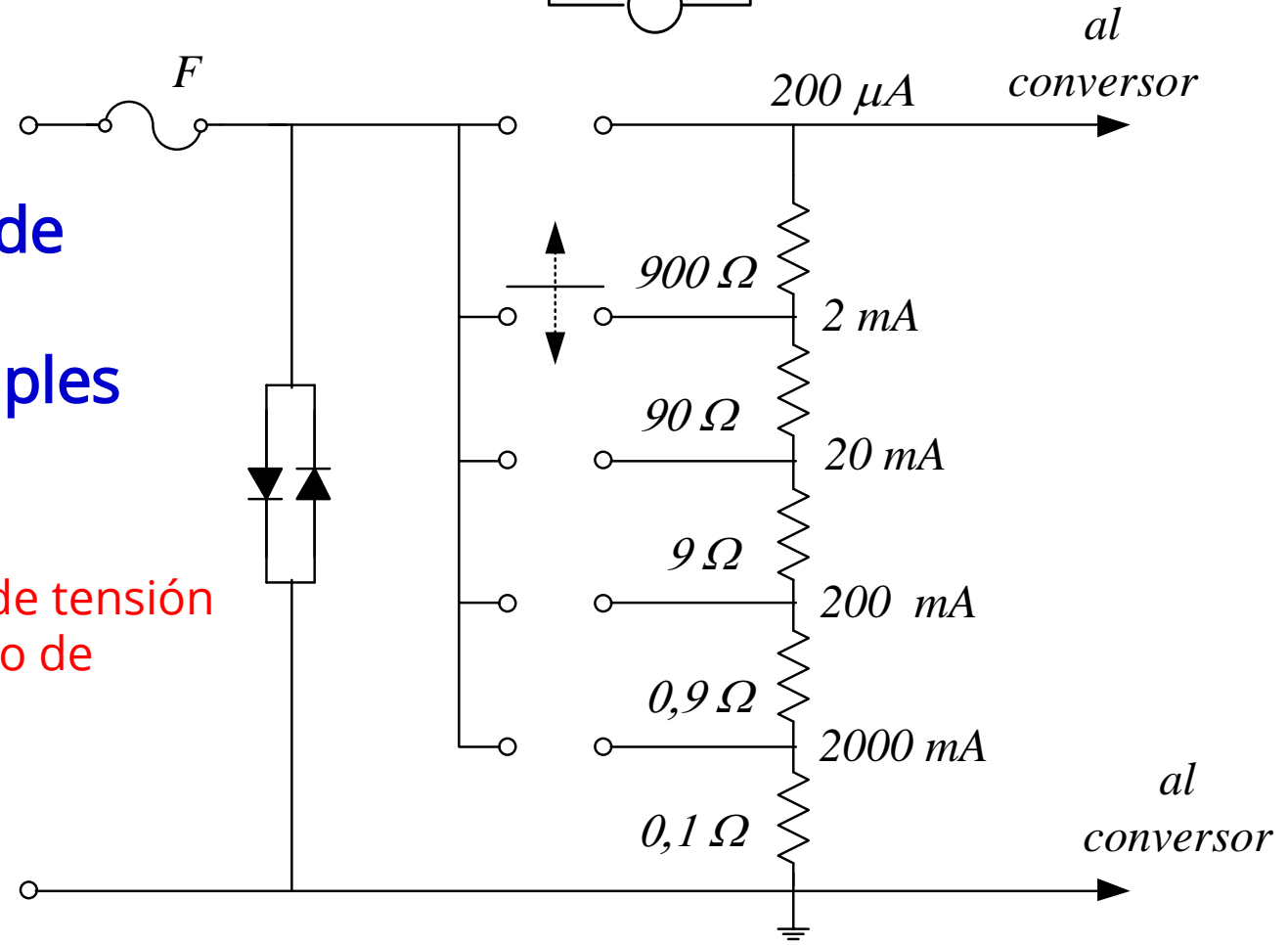
# Amperímetro básico de Continua



# Amperímetro de Continua con Alcances Múltiples

Impedancia de Entrada = Caída de tensión a Fondo de escala

p.ej.:  
200 mV a 20 mA  
⇒ 10 Ω



# Multímetro Digital YOKOGAWA, TY720 (4 ¾ dígitos)

## DC Current Measurement A

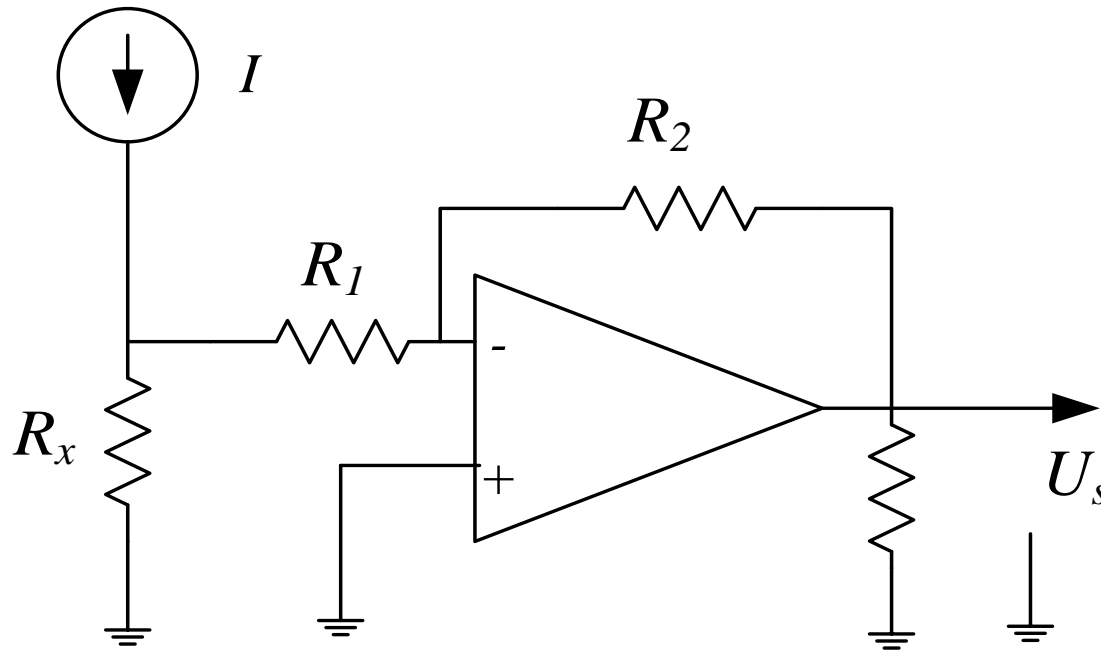
Range	Resolution	Accuracy	Voltage Drop	Maximum Input Current
		TY710, TY720		
500µA	0.01µA	0.2+5	<0.11mV/µA	440mA Protected by a 440mA/1000V fuse.
5000µA	0.1µA			
50mA	0.001mA		<4mV/mA	
500mA*3	0.01mA			
5A	0.0001A	0.6+10	<0.1V/A	10A Protected by a 10A/1000V fuse.
10A	0.001A	0.6+5		

\*3: Maximum measurement current : 440mA at 500mA range

$$R_A < 0,11 \frac{mV}{\mu A} \Rightarrow R_A < 110 \Omega$$

$$R_A < 4 \frac{mV}{mA} \Rightarrow R_A < 4 \Omega$$

**Óhmetro:** Como el aparato básico mide tensiones, se emplea un generador de corriente para obtener sobre la incógnita  $R_x$  una caída de tensión proporcional a su valor.

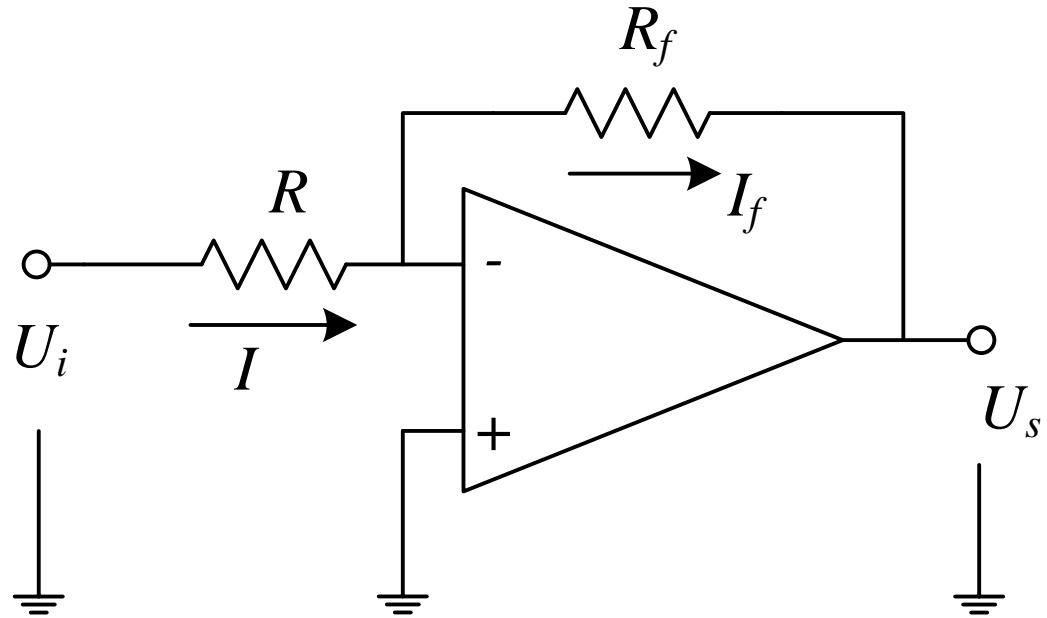


# Aplicación de un Amplificador Operacional como Inversor

$$I = \frac{U_i}{R} = I_f$$

$$U_s = -I_f * R_f$$

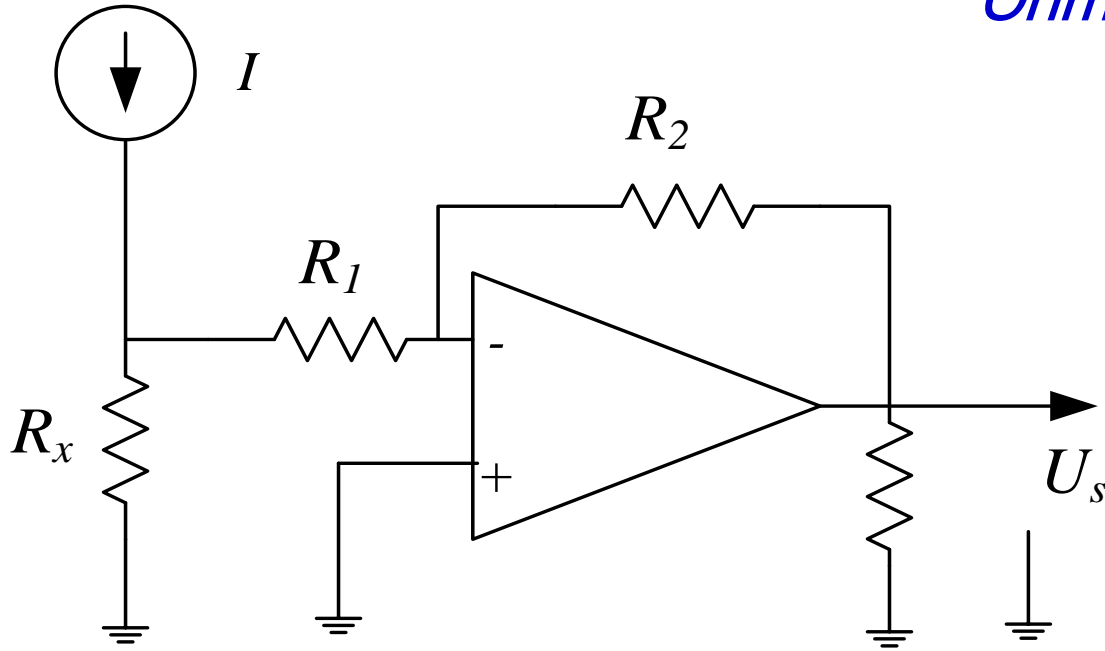
$$= -\frac{U_i}{R} * R_f$$



$$\Rightarrow \frac{U_s}{U_i} = -\frac{R_f}{R}$$

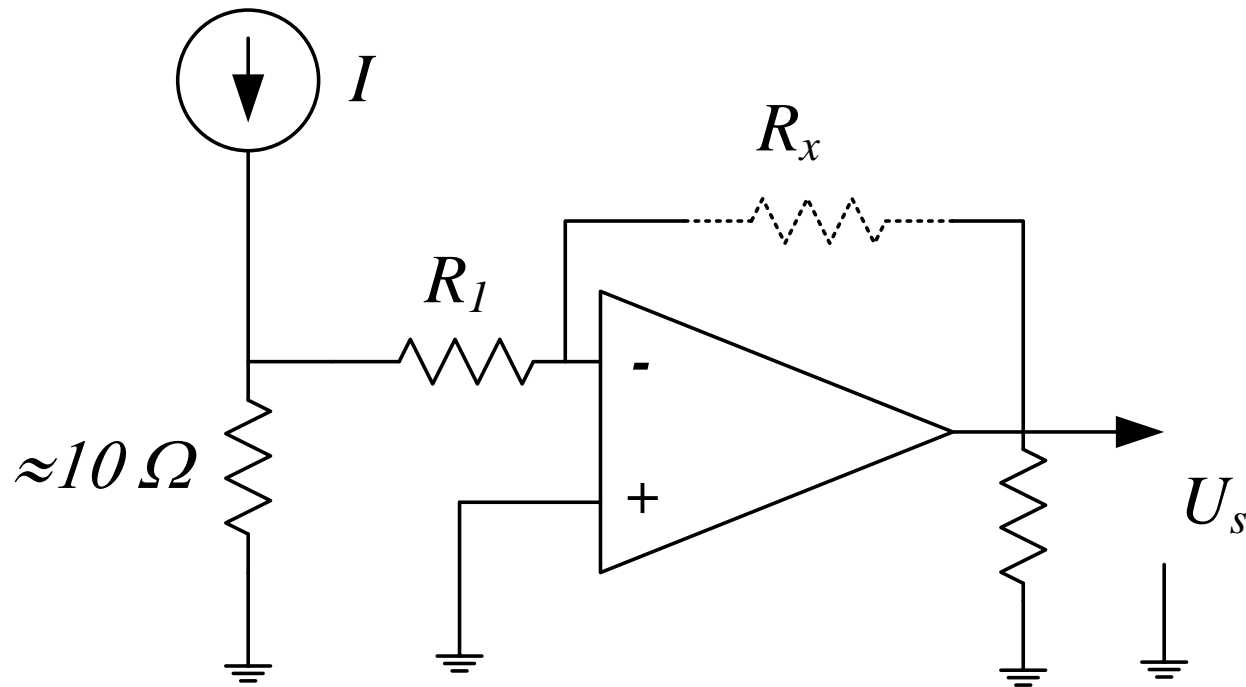


## Óhmetro



$$U_s \approx -\frac{R_2}{R_1} U_{R_x} \quad \Rightarrow \quad R_x \approx -\frac{R_1}{R_2} * \frac{U_s}{I}$$

El esquema anterior presenta problemas si las  $R_x$  a medir son muy altas. Suele usarse en estos casos una variante con la incógnita directamente en el lazo de realimentación del operacional:



$U_s$  proporcional a  $R_x$

## Multímetro Digital YOKOGAWA, TY720 (4 ¾ dígitos)

### Resistance Measurement $\Omega$

Range	Resolution	Accuracy		Maximum Measuring Current	Open-loop Voltage	Input Protective Voltage
		TY710	TY720			
500 $\Omega$	0.01 $\Omega$	0.1+2	0.05+2	<1mA	<2.5V	1000V rms
5k $\Omega$	0.0001k $\Omega$			<0.25mA		
50k $\Omega$	0.001k $\Omega$			<25 $\mu$ A		
500k $\Omega$	0.01k $\Omega$			<2.5 $\mu$ A		
5M $\Omega$	0.0001M $\Omega$	0.5+2		<1.5 $\mu$ A		
50M $\Omega$	0.001M $\Omega$	1+2		<0.13 $\mu$ A		

## Medición de Tensiones Alternas

Si se trata de medir tensiones alternas, *cuyo valor medio es nulo*, resulta imprescindible lograr, a partir de ellas, *una señal con valor medio no nulo*, que esté *en relación conocida con algún parámetro típico de la alterna* que nos interese.

$$u(t) = U_{m\acute{a}x} \text{ sen } \omega t$$

Valor Medio	$\frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = 0$
Valor Eficaz	$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \frac{U_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}}$
Valor Máximo	$U_{m\acute{a}x}$

## “Factor de Forma de Onda”:

$$FFO = \frac{U_{ef}}{U_{(1/2 \text{ ciclo})}}$$

(Se ha indicado expresamente que se toma el valor medio de medio ciclo, ya que el valor medio de un ciclo completo es cero)

## “Factor de Cresta”:

$$FC = \frac{U_{m\acute{a}x}}{U_{ef}}$$

*Que para una onda sinusoidal serían:*

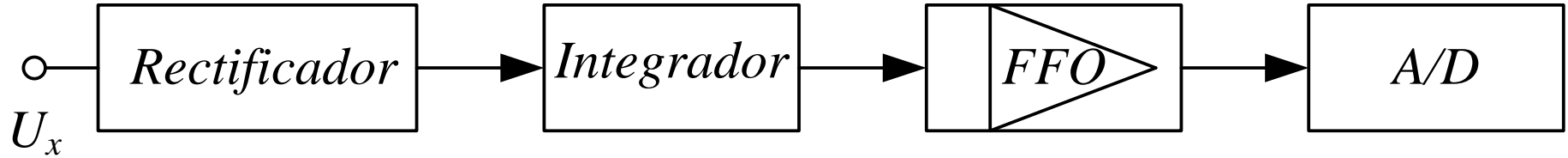
$$FFO = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (U_{m\acute{a}x} \sen t)^2 dt}}{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} U_{m\acute{a}x} \sen t dt} = \frac{U_{m\acute{a}x} / \sqrt{2}}{2U_{m\acute{a}x} / \pi} = 1,11 \quad ; \quad FC = \sqrt{2}$$

(como los valores dependen de la forma de la onda, y no de la frecuencia, se ha trabajado con  $\sen t$  en vez de  $\sen \omega t$ )

Según cómo efectúen el cálculo del valor deseado de la señal alterna, los sistemas de medición empleados se clasifican en los siguientes grupos principales:

- *Detectores de valor medio:* basan su funcionamiento en la obtención del valor medio de la señal a medir rectificadas, y la relación que existe entre éste y el parámetro que se desea encontrar (la mayoría de las veces el valor eficaz).
- *Detectores de valor eficaz verdadero (true RMS):* indican el valor eficaz de la señal, con independencia (dentro de ciertos límites) de la forma de onda de entrada.
- *Detectores de pico o cresta:* obtienen el valor máximo de la señal incógnita, y la indicación que entregan corresponde a este valor o a otro relacionado con él.

## Voltímetros de Valor Medio

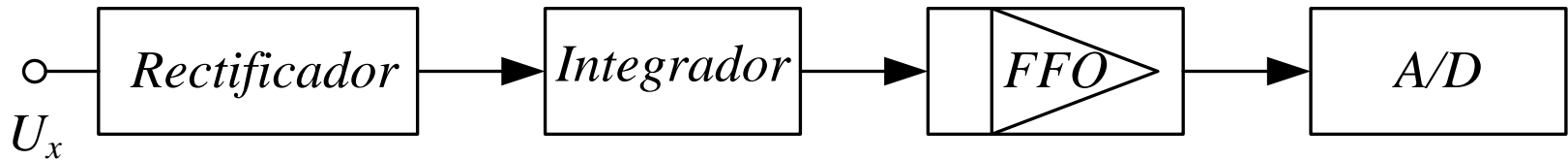


Se han agregado tres bloques a la entrada del A/D:

*Rectificador*: se trata de un rectificador de precisión, casi siempre de onda completa;

*Integrador*: entrega a su salida el valor medio de su señal de entrada (valor medio de la onda rectificada);

*FFO*: amplificador de ganancia igual al FFO de la onda para la que ha sido diseñado el voltímetro.



A la entrada del conversor A/D tendremos entonces una señal de continua de valor igual a:

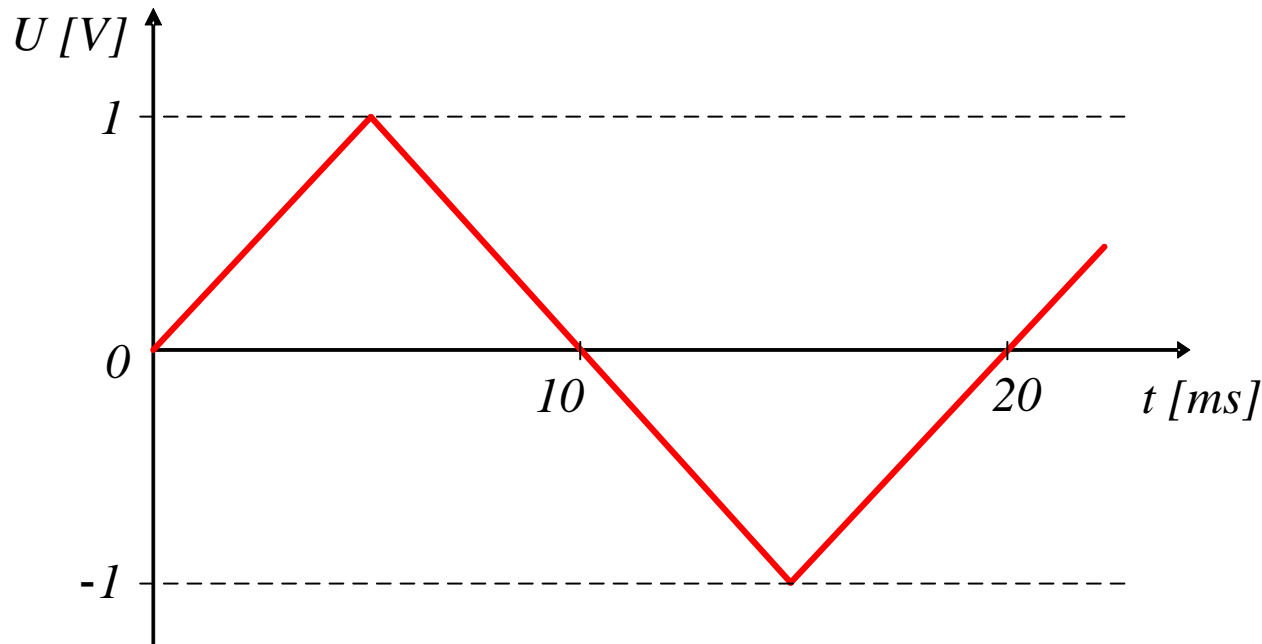
$$FFO * \bar{U} = U_{ef}$$

Válida sólo para la forma de onda de diseño.

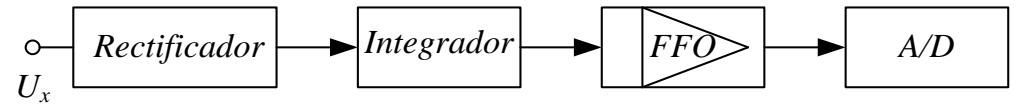
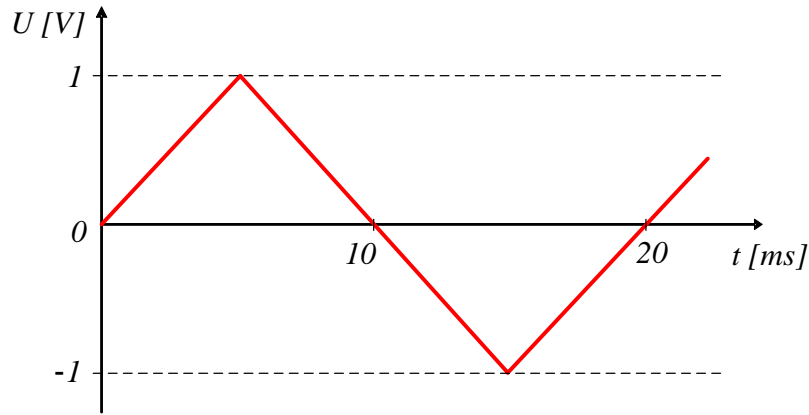
(Dado que la forma de onda sinusoidal es de las más usuales en circuitos eléctricos, es habitual tarar a los voltímetros de alterna de valor medio para que indiquen el valor eficaz de ellas.)



**Ejemplo:** Se tiene un voltímetro de alterna diseñado para indicar el valor eficaz a partir del valor medio de una onda sinusoidal ( $FFO = 1,11$ ). Determinar el error de forma de onda que comete al medir el valor eficaz de una onda triangular como la siguiente, detallando de qué naturaleza es dicho error y si es susceptible de corrección.



Señal triangular con frecuencia fundamental de 50 Hz



El valor medio de medio ciclo (salida del integrador) será:

$$\bar{U} = \frac{10ms * 1V}{2} * \frac{1}{10ms} = \frac{1}{2} V$$

Que multiplicado por el *FFO* del voltímetro (entrada del conversor A/D) dará:

$$U_{ef \text{ medido}} = 1,11 * \frac{1}{2} V = 0,555V$$

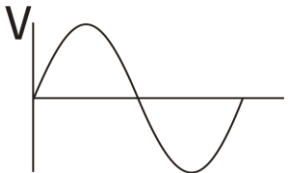
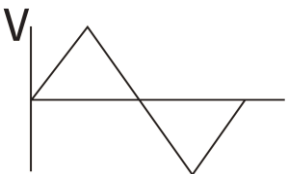
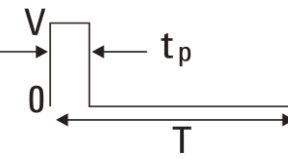
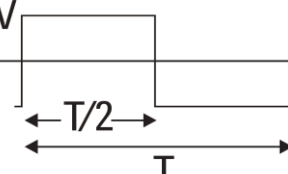
Sin embargo, el valor eficaz verdadero de la onda a medir, es:

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{5 \text{ ms}} * \int_0^5 \frac{t^2}{(5 \text{ ms})^2} dt} = \frac{1}{\sqrt{3}} \text{ V}$$

Con lo cual el error de forma de onda (teórico) se puede calcular como:

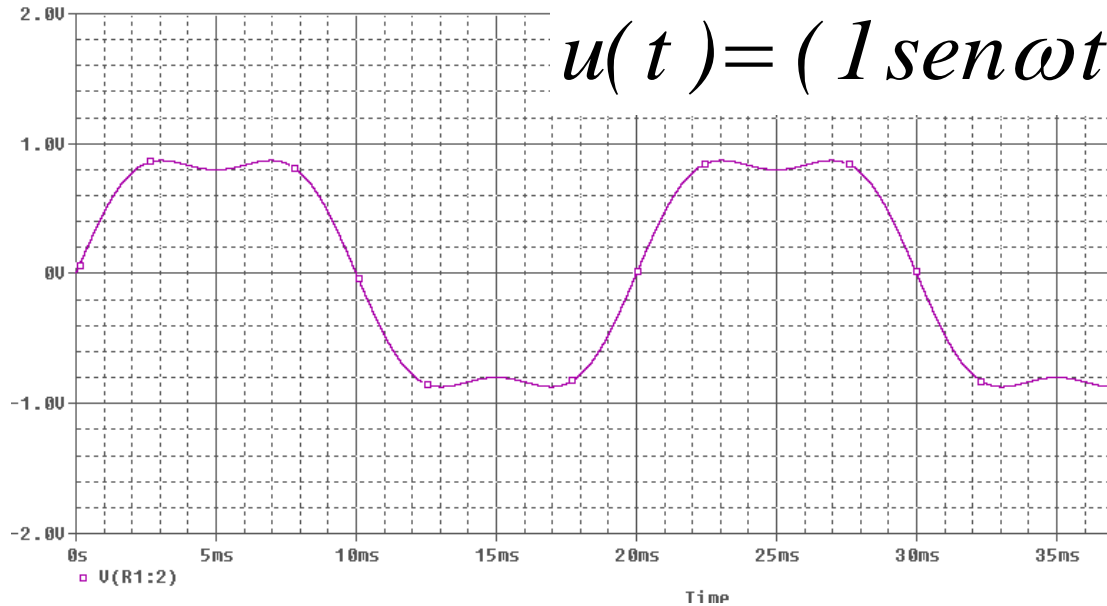
$$\begin{aligned} \text{error de forma de onda} &= \frac{U_m - U_v}{U_v} * 100 \\ &= \frac{1,11 * \bar{U} - U_{ef}}{U_{ef}} * 100 = \frac{0,555 - \frac{1}{\sqrt{3}}}{\frac{1}{\sqrt{3}}} * 100 = -3,9 \% \end{aligned}$$

**Error de Factor de Forma de Onda**, de un voltímetro de valor medio calibrado para onda sinusoidal, para algunas señales típicas:

	<b>Factor de Cresta</b>	<b>Valor Eficaz (AC)</b>	<b>Valor Eficaz (AC+DC)</b>	<b>e<sub>f.f.o.</sub></b> (teórico) Instrumento de Valor Medio
	$\sqrt{2}$	$\frac{V}{\sqrt{2}}$	$\frac{V}{\sqrt{2}}$	0
	$\sqrt{3}$	$\frac{V}{\sqrt{3}}$	$\frac{V}{\sqrt{3}}$	-3,9%
	$\sqrt{\frac{T}{t_p}}$	$V \cdot \sqrt{\frac{t_p}{T}} \cdot \sqrt{1 - \frac{t_p}{T}}$	$V \cdot \sqrt{\frac{t_p}{T}}$	-45% (para $\frac{T}{t_p} = 4$ )
	1	V	V	+11%

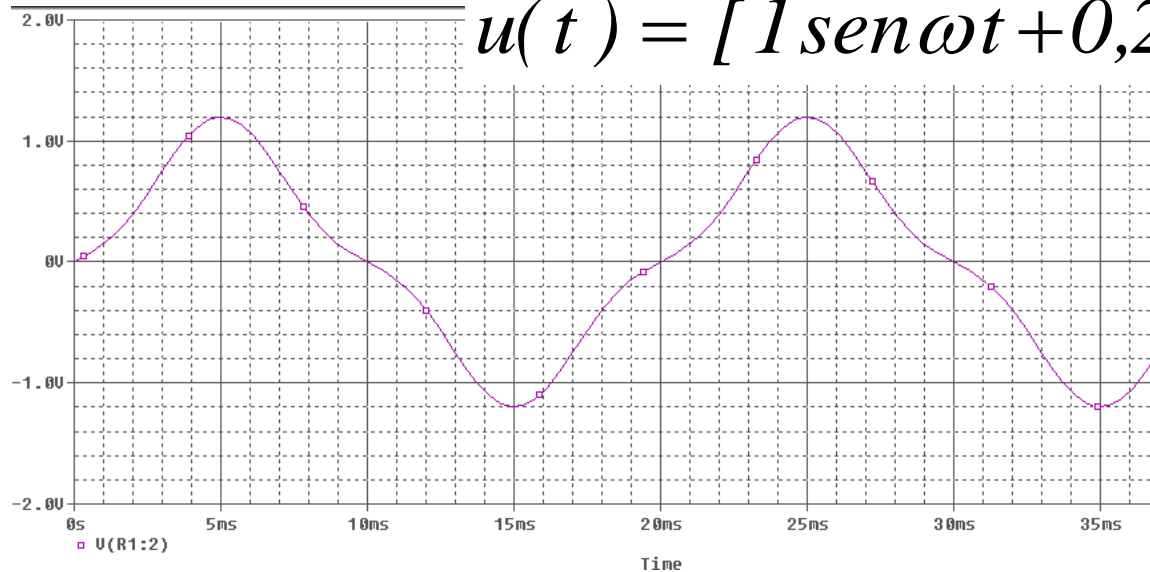
$$u(t) = (1 \sin \omega t + 0,2 \sin 3\omega t) V$$

$$FFO = 1,06$$



$$u(t) = [1 \sin \omega t + 0,2 \sin(3\omega t + \pi)] V$$

$$FFO = 1,21$$



## Detectores de Valor Eficaz Verdadero ( True RMS )

Los detectores de valor medio tienen el inconveniente de la dependencia de la indicación con la forma de onda.

La presencia de distorsión en las señales de frecuencia industrial (50 o 60 Hz) es cada vez más común, debido sobre todo a la proliferación de cargas no lineales, que, absorbiendo corrientes deformadas, provocan además la indirecta deformación de la onda de tensión.

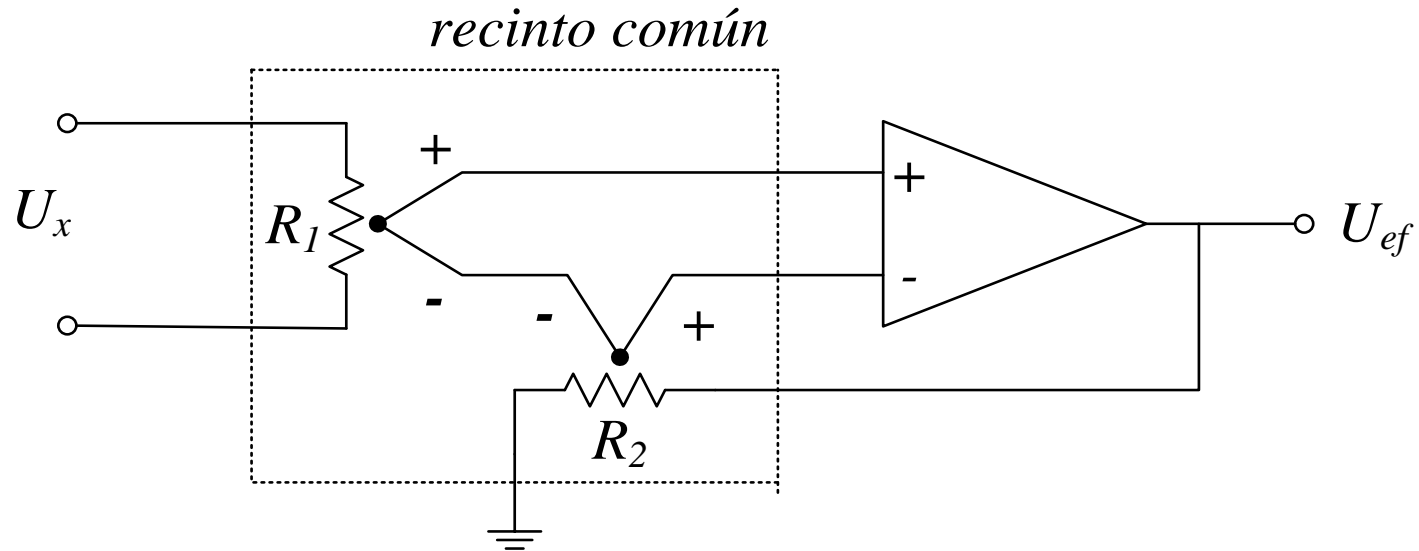
Los detectores de valor eficaz verdadero (**True Root Mean Square** en inglés), solucionan el problema, indicando el valor eficaz de la onda a medir con independencia (dentro de ciertos límites) de la forma de onda.

Los detectores de **Valor Eficaz Verdadero** se pueden clasificar, de acuerdo con su principio de funcionamiento (el procedimiento mediante el cual se logra la señal proporcional al valor eficaz), en dos grandes grupos, a saber:

- **Detectores Físicos**: utilizan la definición de valor eficaz a través de su efecto, *“el valor eficaz de una señal de alterna es aquél que produce en una resistencia, el mismo calor que una señal de igual valor de continua”*, esto es, una señal de  $x V_{ef}$  produce en un resistor la misma disipación que una señal de  $x V_{CC}$ .

Mediante el sensado del efecto térmico de la señal de alterna, se busca una señal de continua, que será la que en definitiva se mida, que por definición es proporcional al valor eficaz de la señal de alterna.

Su funcionamiento se basa en el efecto térmico que produce la señal a medir, que por definición depende del valor eficaz de la misma.



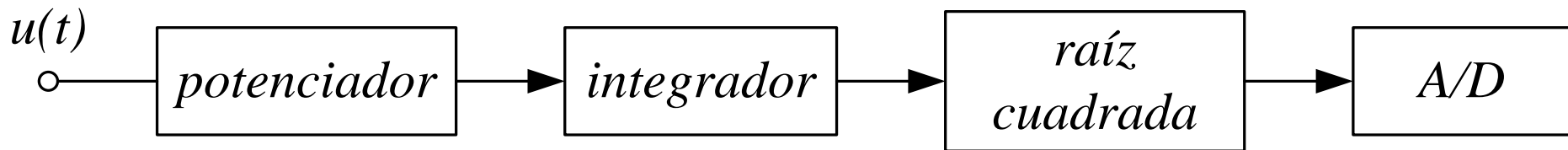
La corriente por  $R_2$  se ajusta automáticamente para lograr que la salida de las dos termocuplas en oposición sea nula. Si ambas son idénticas y el recinto está aislado del medio, el calor que disipan  $R_1$  y  $R_2$  es el mismo. Si  $R_1 = R_2$ , la corriente continua que circula por la última es por definición igual al valor eficaz de la corriente deformada que circula por la  $R_1$  (Proporcional a  $U_x$ ).



- Detectores matemáticos: parten de la definición del valor eficaz de una señal:

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

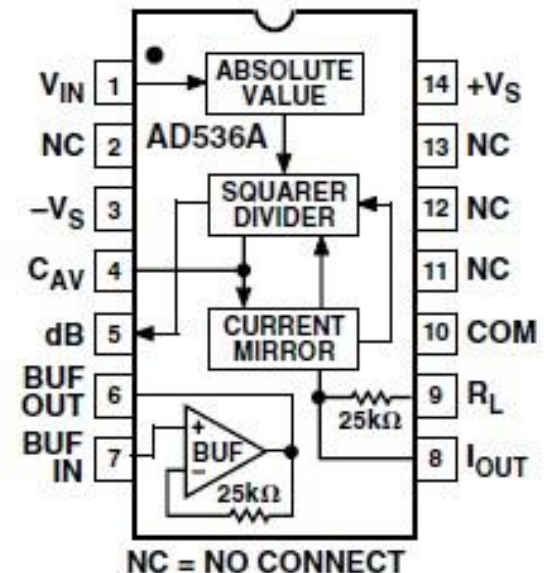
efectuando las operaciones con circuitos adecuados.



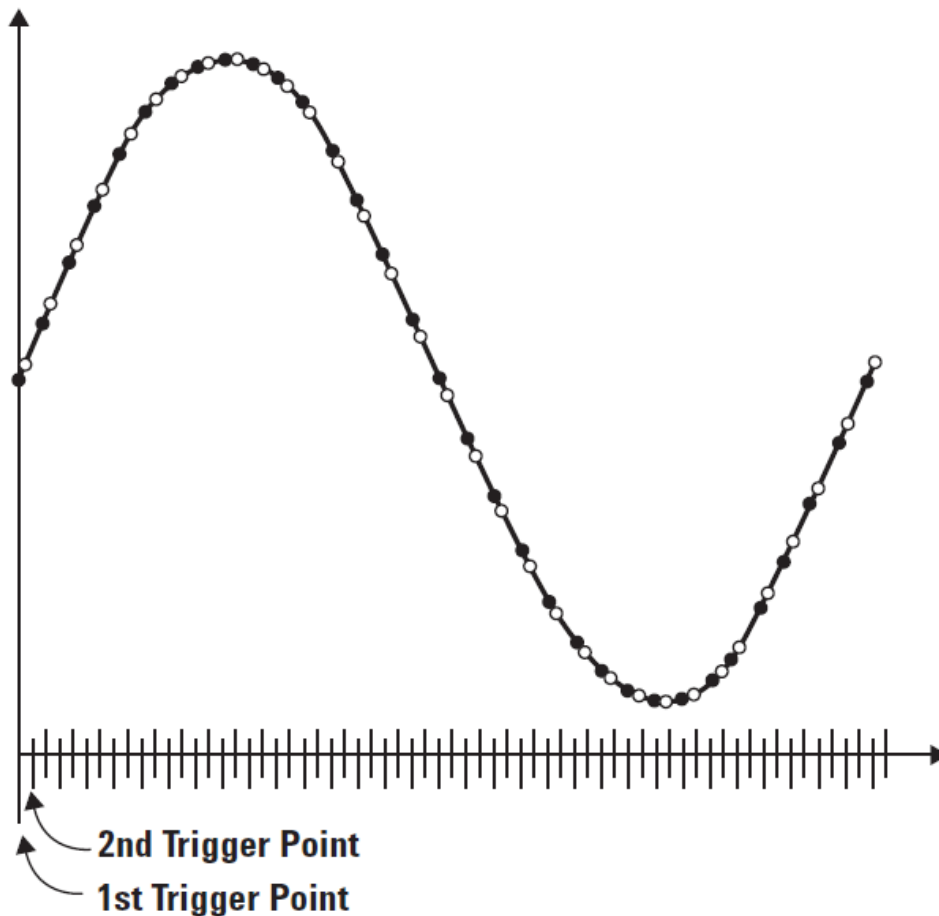
Mediante los bloques indicados se realiza la conversión por definición.

Un ejemplo de circuito que realiza estas operaciones es el siguiente:

*Analog Devices, AD536A  
True RMS-to-DC conversion*



➤ *Detectores de Muestreo Digital:*



Utilizan técnicas de Muestreo Digital, similares a las empleadas en osciloscopios digitales para señales repetitivas.

Así, se obtiene un conjunto de valores adecuados, para ser enviados a un algoritmo de cálculo del valor eficaz.

## Algunas características adicionales de los instrumentos para Corriente Alterna

### Acoplamiento de la señal de entrada

- **AC:** se acopla vía un capacitor por ejemplo, que bloquea la continua y las bajas frecuencias (es imprescindible leer el manual para encontrar la más baja frecuencia medible).

⇒ *Valor Eficaz de la señal de alterna*

- **AC + DC, o directo (DC):** Toda la señal de entrada va al sistema de medición.

⇒ *Valor Eficaz Total de la señal*

*( Incluye la componente continua, si la hubiera)*

# Algunas características exclusivas de los detectores de Valor Eficaz Verdadero

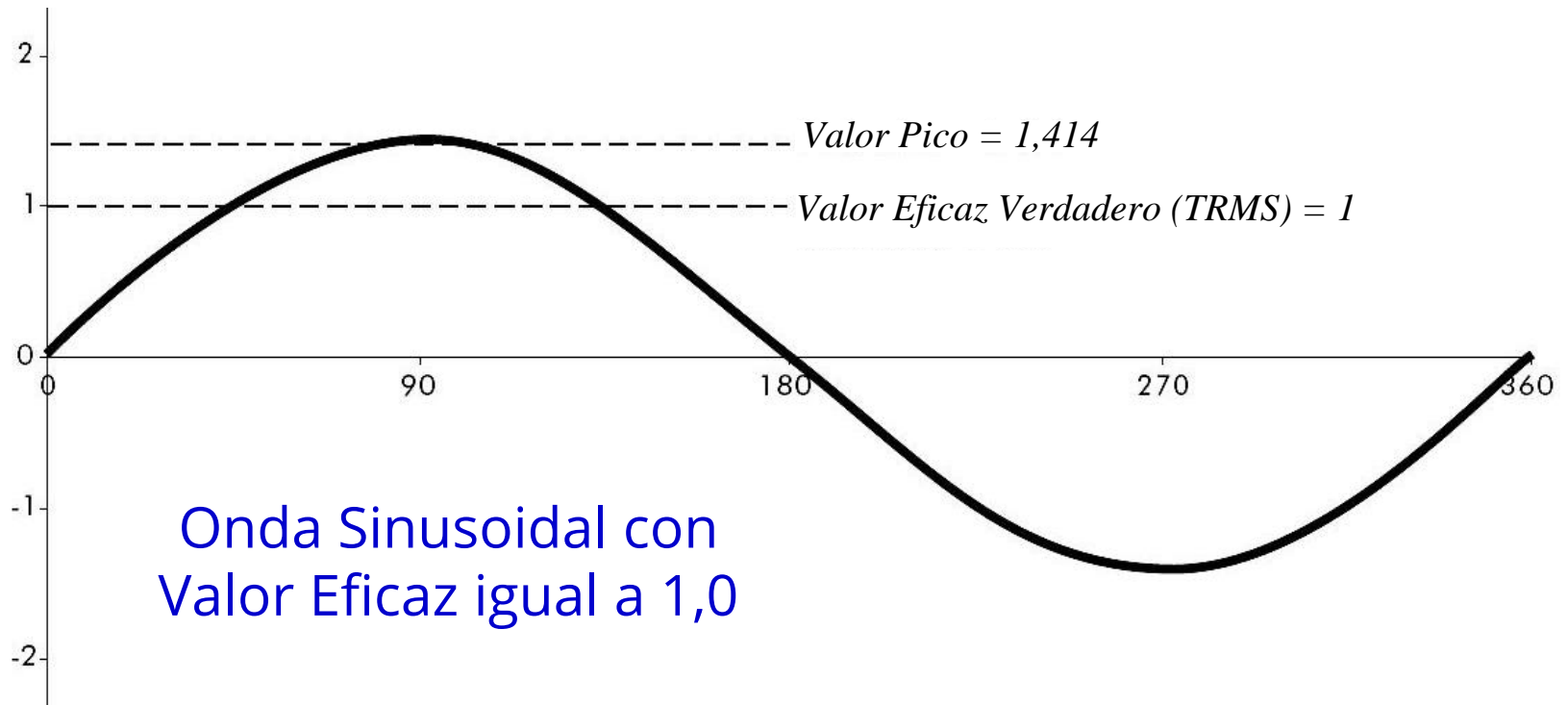
## Factor de Cresta

Relación entre el valor pico máximo que puede tener la señal de entrada y el valor eficaz fiduciario del aparato

Dicho valor máximo no debe ser superado para que sea válida la exactitud del instrumento, y por razones de seguridad.

*Ejemplo:* Si tenemos un multímetro con *alcance 500 mV* (en su función de medición de valor eficaz de tensión alterna), con un *factor de cresta* (referido a fondo de escala), igual a 3 ( $FC = 3$ ); se interpreta que el aparato puede medir cualquier onda de *valor pico no mayor que 1,5 V* (500 mV eficaces con  $FC$  no mayor que 3). *(Notar que a mitad de escala tolera ondas con  $FC$  doble que a fondo de escala).*

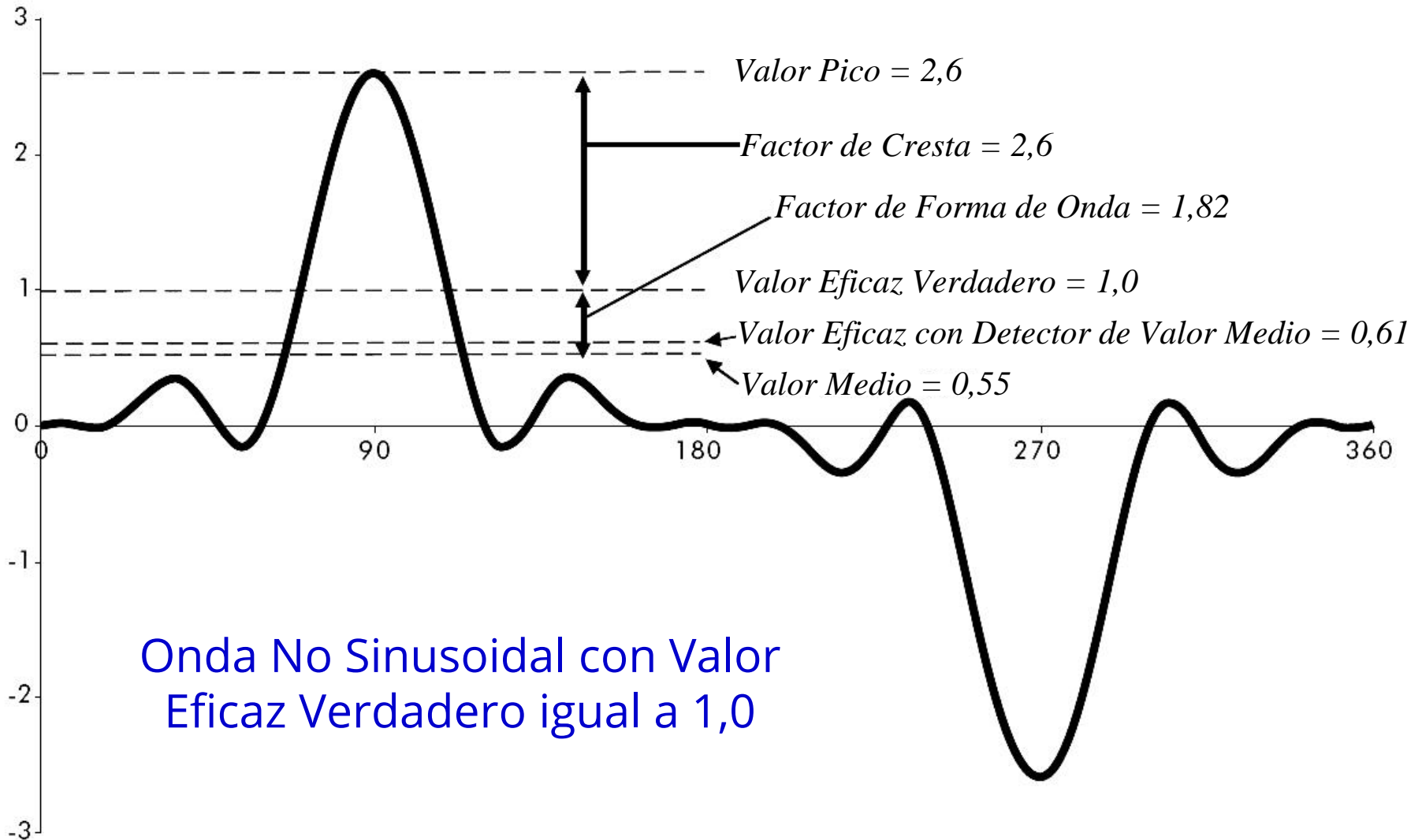
## Parámetros característicos para una Onda Sinusoidal



$$FFO = \frac{U_{ef}}{U} = 1,11$$

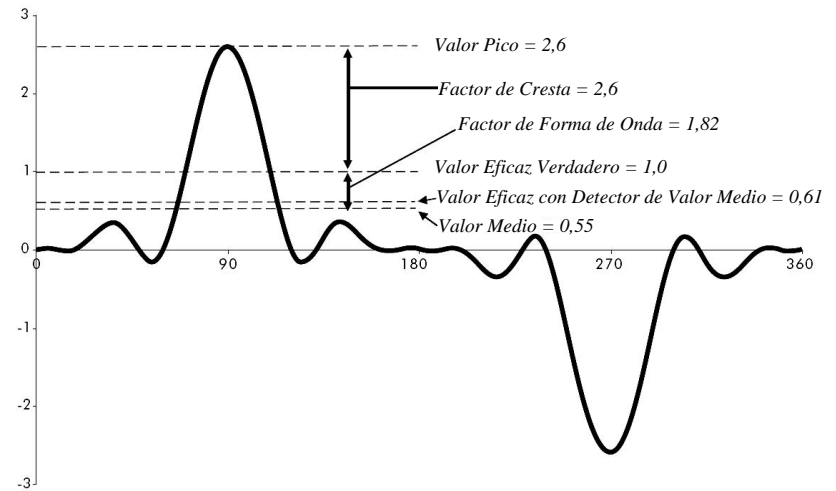
$$FC = \frac{U_p}{U_{ef}} = 1,414$$

# Parámetros característicos para una Onda No Sinusoidal



Onda No Sinusoidal con Valor Eficaz Verdadero igual a 1,0

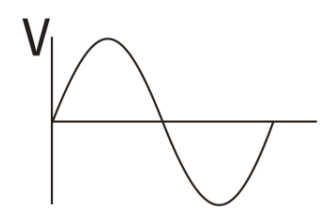
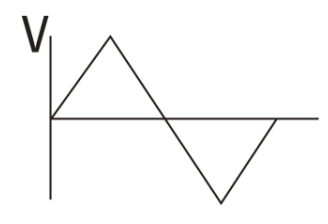
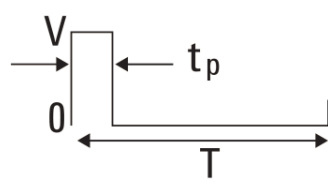
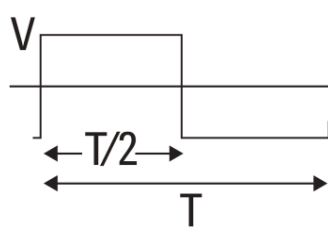
En la onda que veíamos, nos encontramos con que su factor de cresta,  $FC$ , es mucho mayor que el que corresponde a una onda sinusoidal.



Es decir que la onda toma valores pico más altos que los que toma una onda sinusoidal de igual valor eficaz.

Si estos picos son mayores que las tensiones instantáneas que es capaz de manejar la etapa de adaptación de señal del conversor, no se verán reflejados correctamente en la indicación. El fabricante da el ***Factor de Cresta referido al fondo de escala***, como una manera de indicar estos límites.

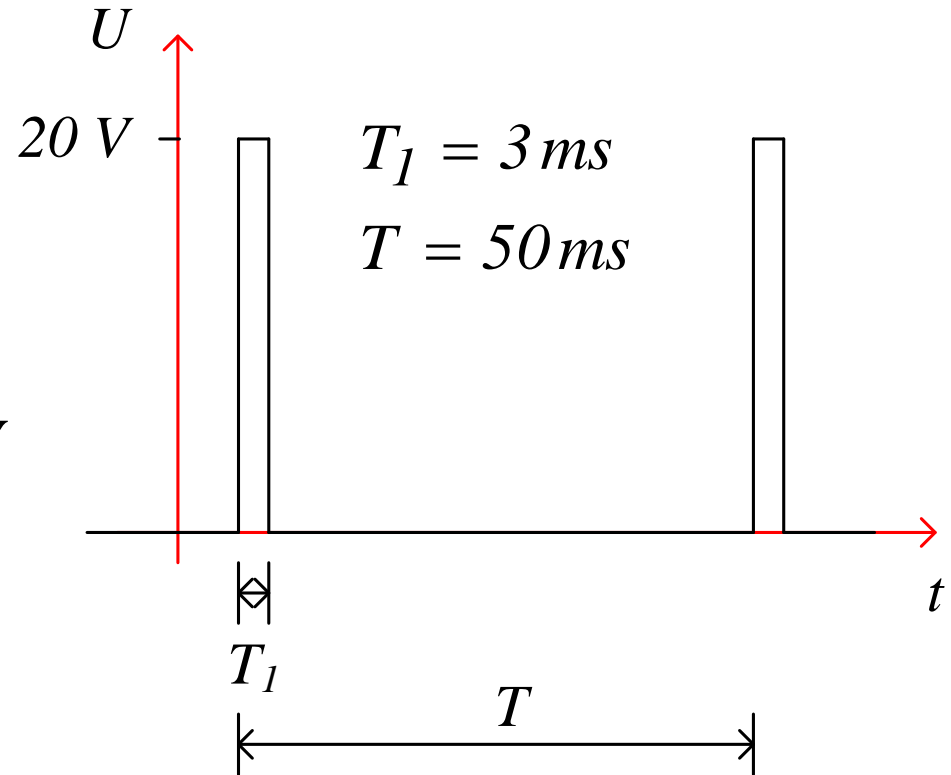
**Factor de Cresta** de algunas señales típicas:

	<b>Factor de Cresta</b>	<b>Valor Eficaz (AC)</b>	<b>Valor Eficaz (AC+DC)</b>
	$\sqrt{2}$	$\frac{V}{\sqrt{2}}$	$\frac{V}{\sqrt{2}}$
	$\sqrt{3}$	$\frac{V}{\sqrt{3}}$	$\frac{V}{\sqrt{3}}$
	$\sqrt{\frac{T}{t_p}}$	$V \cdot \sqrt{\frac{t_p}{T}} \cdot \sqrt{1 - \frac{t_p}{T}}$	$V \cdot \sqrt{\frac{t_p}{T}}$
	$1$	$V$	$V$



**Ejemplo:** Seleccionar el alcance adecuado para la medición del valor eficaz de una onda como la siguiente, empleando un multímetro HP974A.

$$U_{ef} = U_{m\acute{a}x} \sqrt{\frac{T_1}{T}} =$$
$$= 20 \sqrt{\frac{3}{50}} V = 4,9V$$



¿Habría que seleccionar entonces el alcance  $5\text{ V}$ ?

## AC + DC Voltage (rms responding, computed from acV, dcV)

Range	Resolution	Accuracy			
		DC, 20 Hz to 10 kHz	DC, 10 kHz to 30 kHz	DC, 30 kHz to 50 kHz	DC, 50 kHz to 100 kHz
5 V	1 mV	± (1% + 30)	± (1.2% + 40)	± (2.5% + 70)	± (3.5% + 300)
50 V	10 mV				
500 V	100 mV				
750 V	1 V	± (1% + 30) DC, 20 Hz to 1 kHz	Not Specified		

Measurement range:

500 mV to 500 V ranges	20 Hz to 30 kHz	5% to 100% of range
	30 kHz to 100 kHz	10% to 100% of range
750 V range		75 V to 750 V

Response time: < 2 seconds for AC, 5 seconds for AC+DC on fixed range

Crest factor: <3

$$FC \text{ (del multímetro) } < 3$$

$$\Rightarrow U_{\text{máx}}(\text{del multímetro}) < 3 * 5V = 15 V < 20 V$$

(Valor máximo de la señal a medir)

El alcance a emplear será entonces el de 50 V.

## AC + DC Voltage (rms responding, computed from acV, dcV)

Range	Resolution	Accuracy			
		DC, 20 Hz to 10 kHz	DC, 10 kHz to 30 kHz	DC, 30 kHz to 50 kHz	DC, 50 kHz to 100 kHz
5 V	1 mV	± (1% + 30)	± (1.2% + 40)	± (2.5% + 70)	± (3.5% + 300)
50 V	10 mV				
500 V	100 mV				
750 V	1 V	± (1% + 30) DC, 20 Hz to 1 kHz	Not Specified		

Measurement range:

500 mV to 500 V ranges	20 Hz to 30 kHz	5% to 100% of range
	30 kHz to 100 kHz	10% to 100% of range
750 V range		75 V to 750 V

Response time: < 2 seconds for AC, 5 seconds for AC+DC on fixed range

Crest factor: <3

Si ahora tenemos:

$$U_{m\acute{a}x} = 10 \text{ V} \Rightarrow U_{ef} = 10 \sqrt{\frac{3}{50}} \approx 2,4 \text{ V}$$

El alcance a utilizar será el de 5 V.

Notar que, para ambos casos:

$$FC = \frac{U_{m\acute{a}x}}{U_{ef}} = \sqrt{\frac{T}{T_1}} = \sqrt{\frac{50}{3}} \approx 4$$

# Algunas características exclusivas de los detectores de Valor Eficaz Verdadero

## Respuesta en Frecuencia (Ancho de Banda)

Interesa ver cómo responde el aparato a señales de diferentes frecuencias.

No sólo por la posible necesidad de medir señales de frecuencias elevadas, sino también por la habilidad de reproducir los armónicos de orden superior de señales deformadas con frecuencias fundamentales del orden de las de red.

No existe uniformidad a la hora de caracterizar este comportamiento.

Algunos fabricantes indican el "*ancho de banda*", que emula la definición idéntica utilizada para caracterizar la respuesta en frecuencia de amplificadores en general.

Esta definición da el rango de frecuencia dentro del cual el error del aparato no excede el 30 %. (*Recordar que es un aparato de medida*).

Actualmente, gran parte de los fabricantes indica la variación del error con la frecuencia, para límites que están dentro del orden del error básico del aparato.

Si es necesario analizar el comportamiento a distintas frecuencias, hay que recurrir al manual para ver cómo responde a ellas.

# Extracto del manual de un multímetro Yokogawa TY720 de 50000 cuentas

AC Voltage Measurement [RMS]  $\sim$  V AC Coupling, Rms-value detection, Crest factor\*: <3

Range	Reso- lution	Accuracy						Input Impedance	Maximum Input Voltage
		10 to 20Hz	20Hz to 1kHz	1k to 10kHz	10k to 20kHz	20k to 50kHz	50k to 100kHz		
50mV	0.001mV	2+80 *2	0.4+40 *2	5+40 *2	5.5+40 *2	15+40 *2		11M $\Omega$ <50pF	1000V rmsAC
500mV	0.01mV	1+30 *1	0.4+30 *1		1+40 *1	2+70 *2	5+200 *2		
5V	0.0001V								
50V	0.001V								
500V	0.01V	*2	*2	3+30 *2	-		10M $\Omega$ <50pF	1000V DC	
1000V*	0.1V								

\*: Crest factor <1.5 at 1000V range

Accuracy \*1: At 5 to 100% of range, \*2: At 10 to 100% of range

# Extractado del manual de un multímetro Fluke 287/289

## Especificaciones de voltaje de CA

Función	Rango	Resolución	Precisión				
			20 a 45 Hz	45 a 65 Hz	65 Hz a 10 kHz	10 a 20 kHz	20 a 100 kHz
CA mV	50 mV <sup>[1]</sup>	0,001 mV	1,5 % + 60	0,3 % + 25	0,4 % + 25	0,7 % + 40	3,5 % + 40 <sup>[5]</sup>
	500 mV	0,01 mV	1,5 % + 60	0,3 % + 25	0,4 % + 25	0,7 % + 40	3,5 % + 40
CA V	5 V <sup>[1]</sup>	0,0001 V	1,5 % + 60	0,3 % + 25	0,6 % + 25	1,5 % + 40	3,5 % + 40 <sup>[5]</sup>
	50 V <sup>[1]</sup>	0,001 V	1,5 % + 60	0,3 % + 25	0,4 % + 25	0,7 % + 40	3,5 % + 40
	500 V <sup>[1]</sup>	0,01 V	1,5 % + 60	0,3 % + 25	0,4 % + 25	No especificado	No especificado
	1000 V	0,1 V	1,5 % + 60	0,3 % + 25	0,4 % + 25	No especificado	No especificado

[1] Por debajo de un 5 % del rango, agregar 20 cuentas.

[5] Agregar un 2,5 % por arriba de 65 kHz.

**Factor de Cresta:** La exactitud se especifica con el factor de cresta de CA  $\leq 3,0$  a plena escala, aumentando linealmente a 5,0 a la mitad de la escala, salvo en el rango de 1000 V, donde se encuentra a 1,5 de plena escala, aumentando linealmente a 3,0 a la mitad de la escala y 500 mV y 5000  $\mu$ A, donde es  $\leq 3,0$  al 80 % de plena escala, aumentando linealmente a 5,0 a la mitad de la escala. *Para formas de onda no sinusoidales, agregar  $\pm(0,3$  % del rango y 0,1 % de la lectura).*