



Medidas Eléctricas

Unidad Temática N° 3

Medición de potencia en sistemas monofásicos y trifásicos.
Caracterización de impedancias

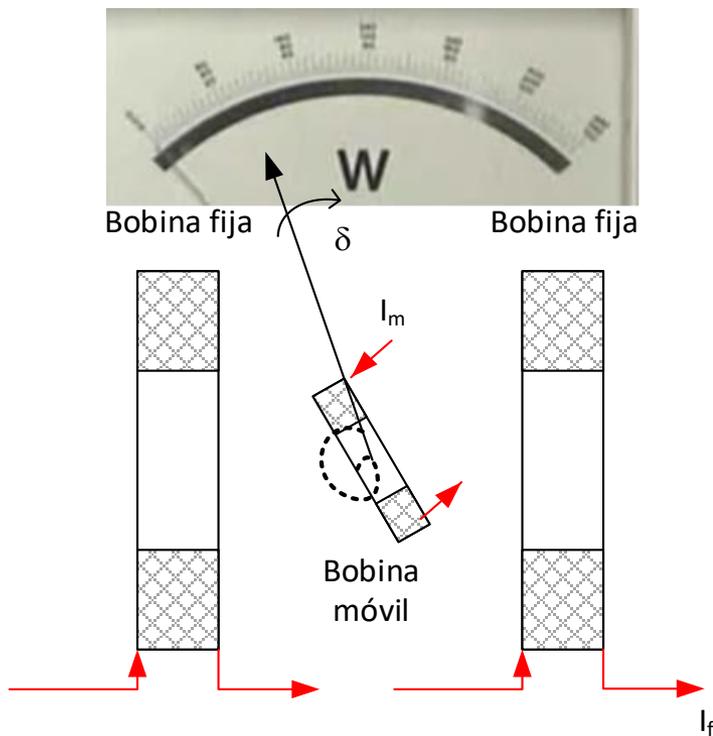
Gabinete del Trabajo Práctico N° 3



Parte 1. Instrumento electrodinámico.

Instrumento electrodinámico:

Consta de dos bobinados: uno fijo y otro móvil, solidario con al aguja indicadora



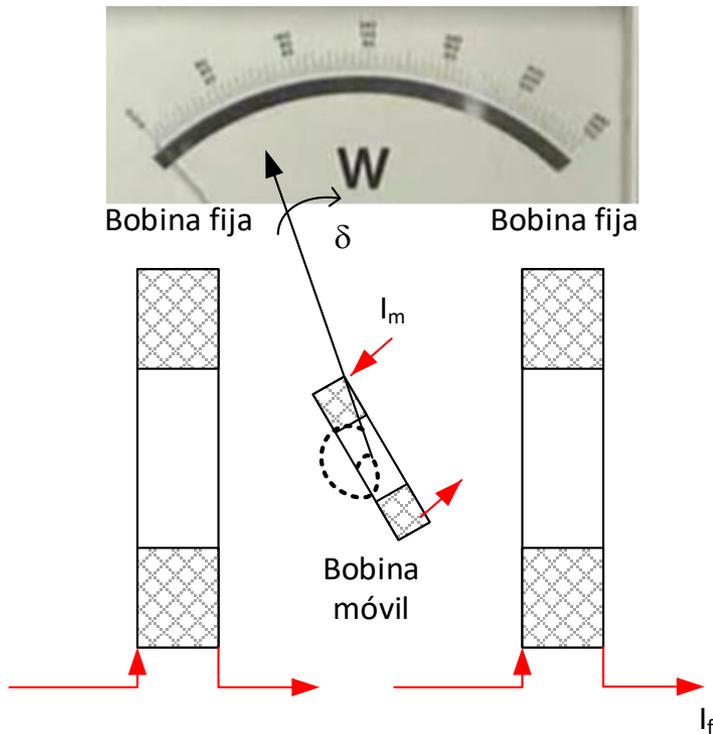
Parte 1. Instrumento electrodinámico.

Instrumento electrodinámico:

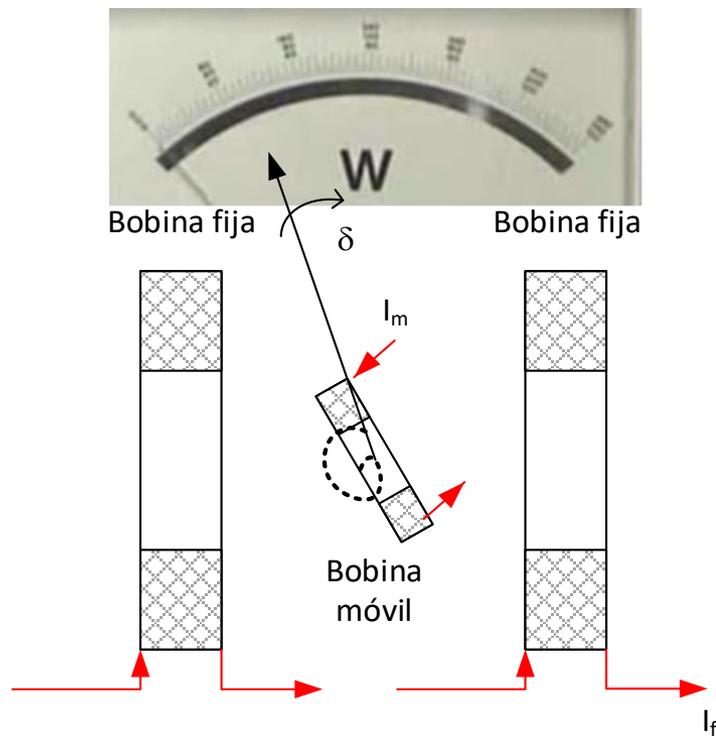
Consta de dos bobinados: uno fijo y otro móvil, solidario con al aguja indicadora

Posee una cupla antagónica (resorte) que posibilita que la deflexión sea:

$$\delta = \frac{Cte}{T} \int_0^T i_f i_m dt$$



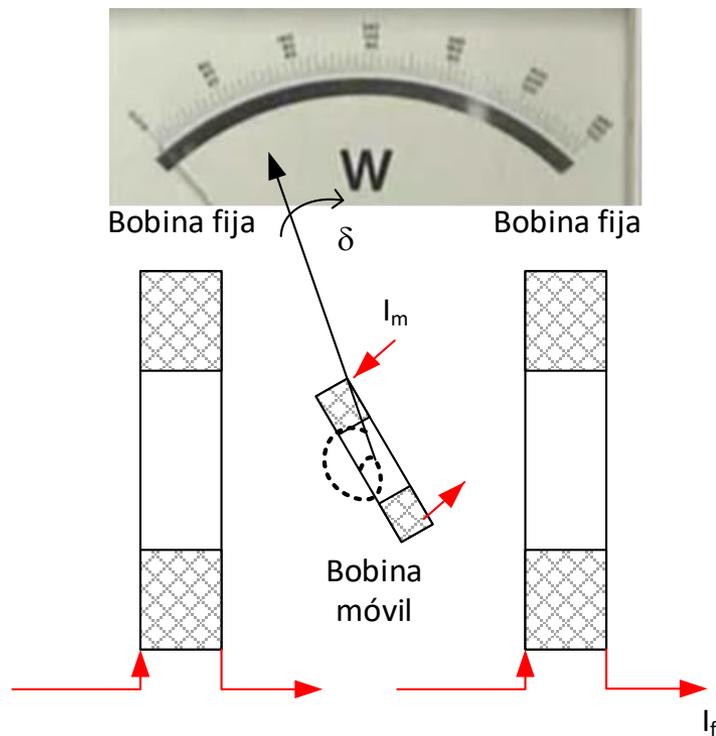
Parte 1. Instrumento electrodinámico.



Si ambos bobinados se conectan en serie ($i_f = i_m = i$), tenemos:

$$\delta = \frac{Cte}{T} \int_0^T i^2 dt$$

Parte 1. Instrumento electrodinámico.

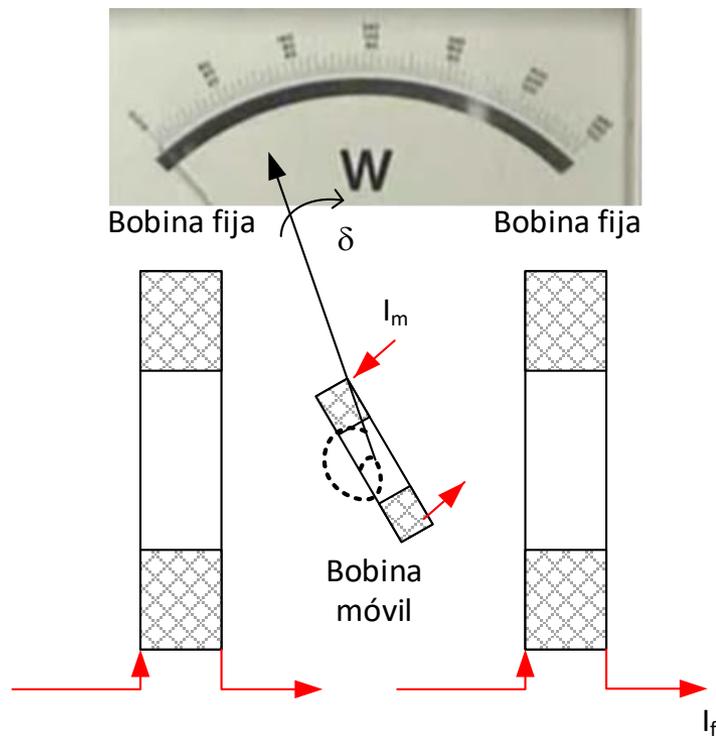


Si ambos bobinados se conectan en serie ($i_f = i_m = i$), tenemos:

$$\delta = \frac{Cte}{T} \int_0^T i^2 dt$$

La deflexión es proporcional al valor medio del cuadrado de la corriente. Se lo puede adecuar para medir el valor eficaz verdadero de una corriente

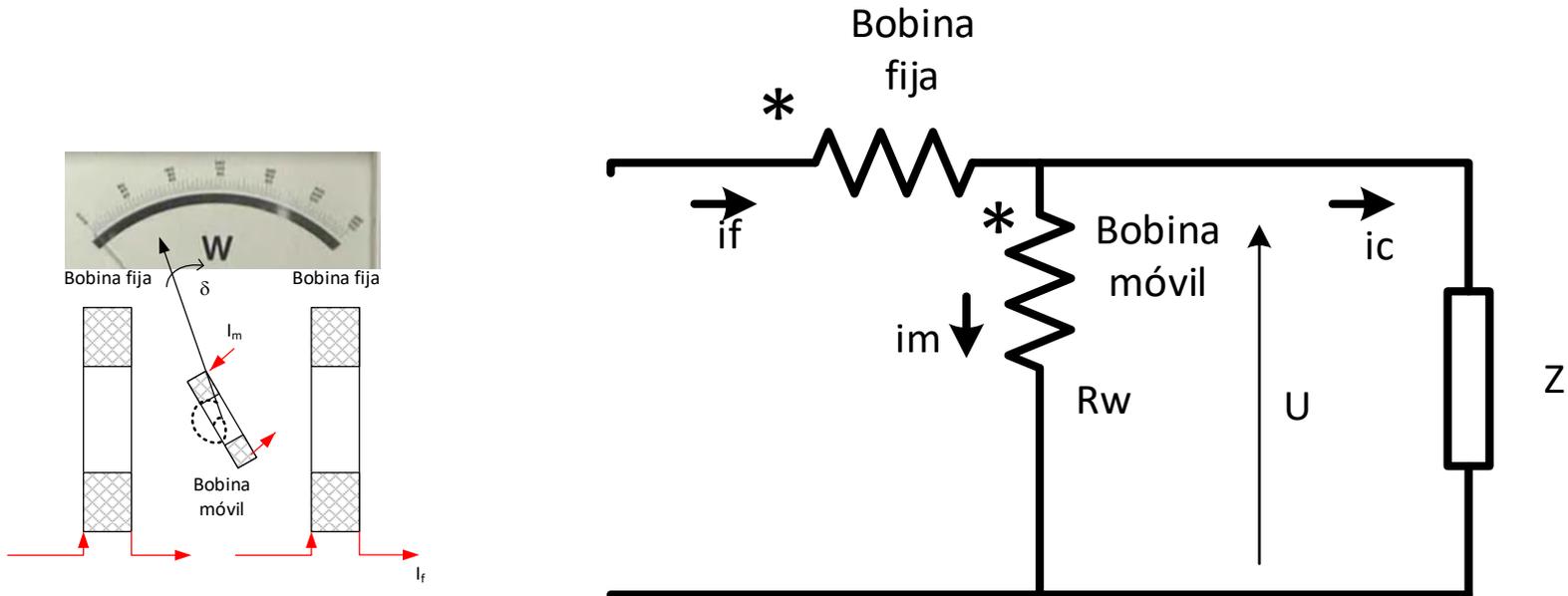
Parte 1. Instrumento electrodinámico.



Si ambos bobinados se conectan en serie ($i_f = i_m = i$), y logramos que la corriente sea proporcional a una tensión, mediría el valor eficaz verdadero de esa tensión.

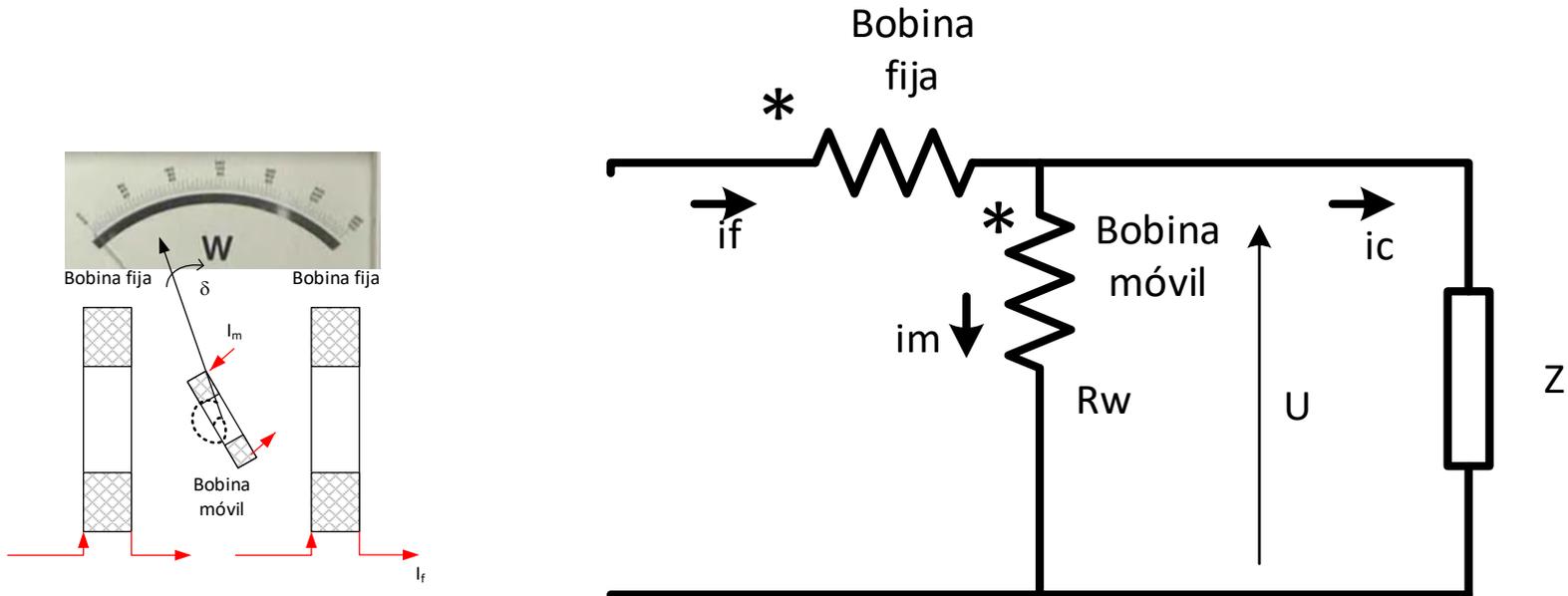
$$\delta = \frac{Cte}{R T} \int_0^T u^2 dt$$

Instrumento electrodinámico como vatímetro.



Si logramos que:
$$i_m = \frac{u_m}{R_w}$$

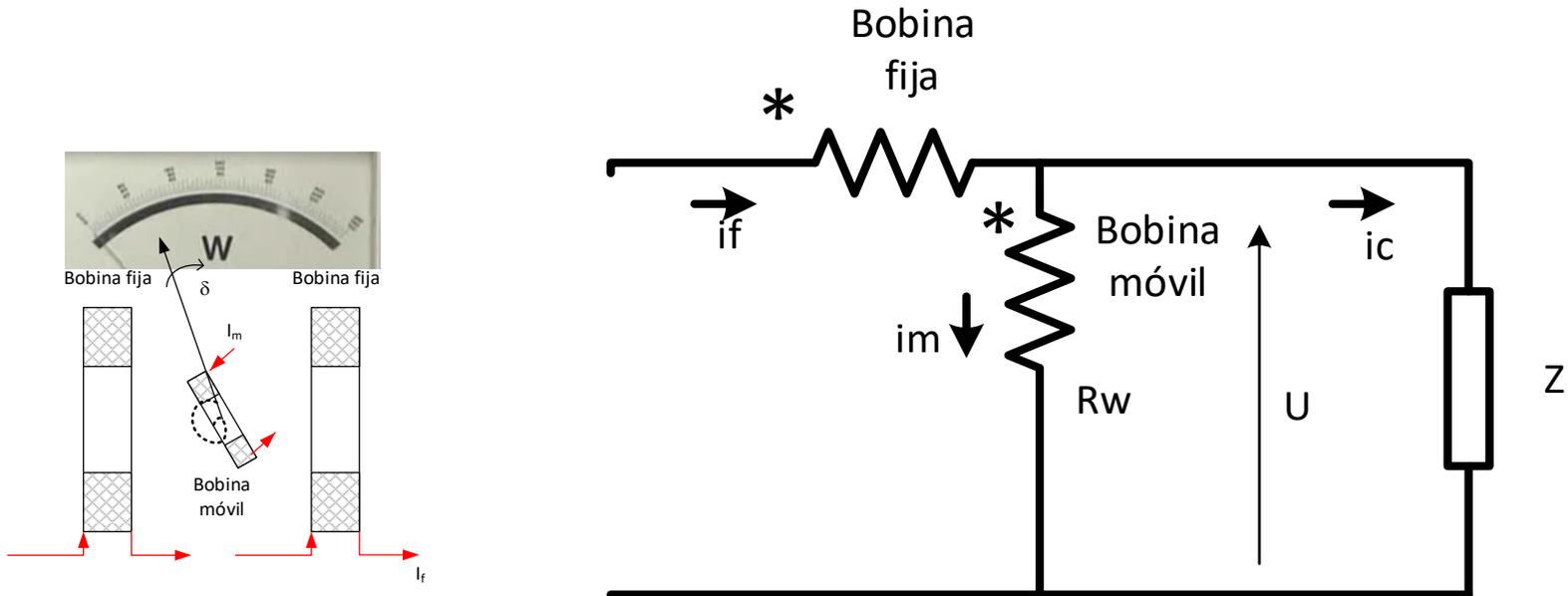
Instrumento electrodinámico como vatímetro.



Si logramos que: $I_m = \frac{u_m}{R_w}$

$$\delta = \frac{Cte}{R_w \cdot T} \int_0^T I_f u_m dt$$

Instrumento electrodinámico como vatímetro.

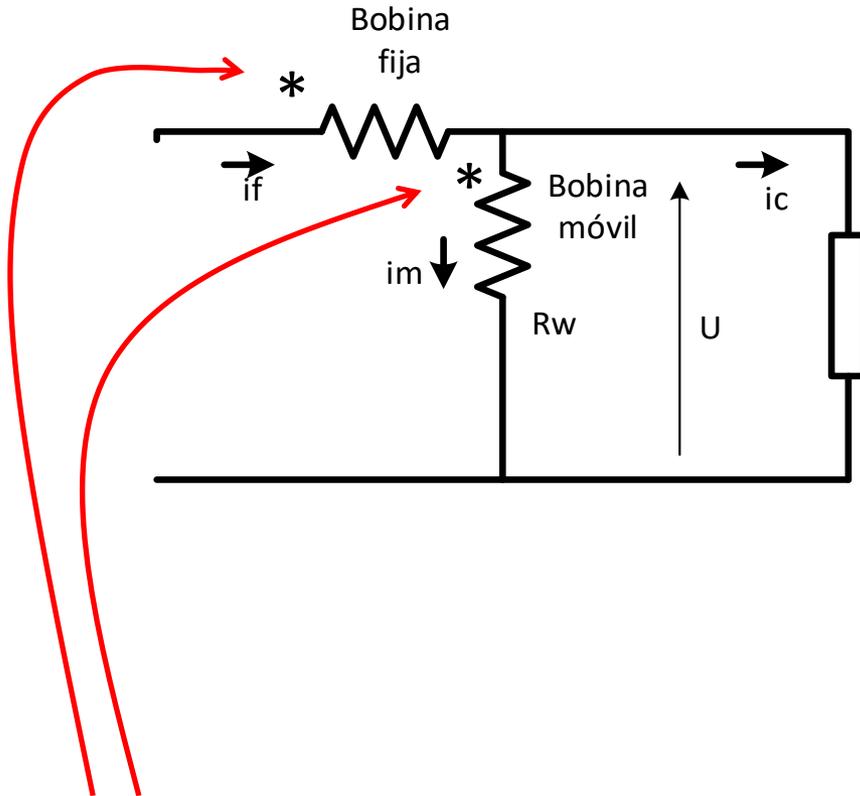


Si logramos que: $i_m = \frac{u_m}{R_w}$

$$\delta = \frac{\text{Cte}}{R_w \cdot T} \int_0^T i_f u_m dt$$

La deflexión es proporcional a la potencia media en la carga Z .

Vatímetro electrodinámico. Características.



Z

Clase U nominal I nominal $\cos \phi_n$	}	deflexión a fondo de escala.
--	---	------------------------------

La potencia fiduciaria será:

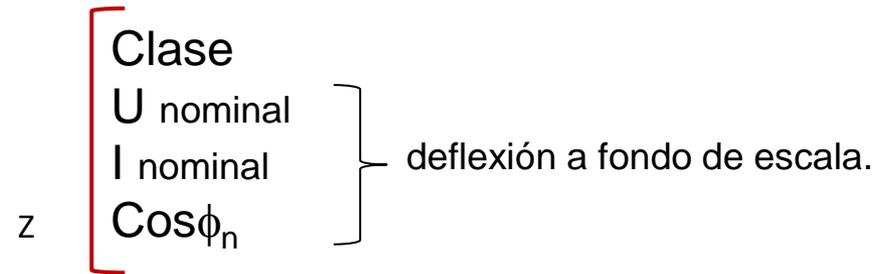
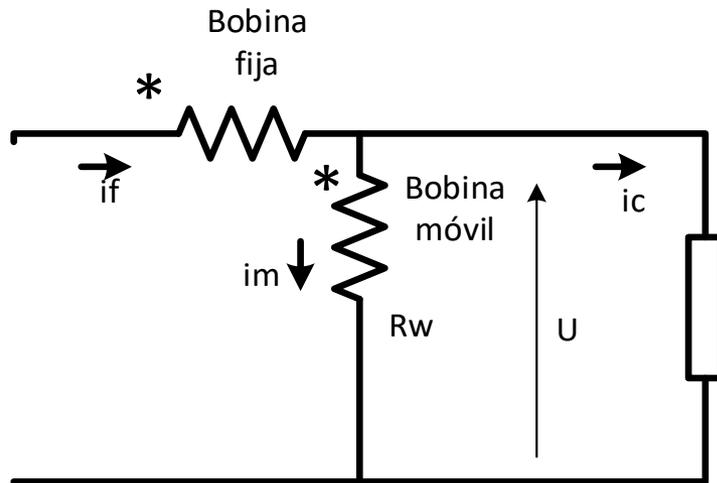
$$P = U_n I_n \cos \phi_n$$

R_w, X_w R_a, X_a

Puntos Homólogos:

polaridades de corriente entrantes, provocan una deflexión correcta (positiva, para desfases entre ellas de $\pm 90^\circ$)

Vatímetro electrodinámico. Características.



La potencia fiduciaria será:

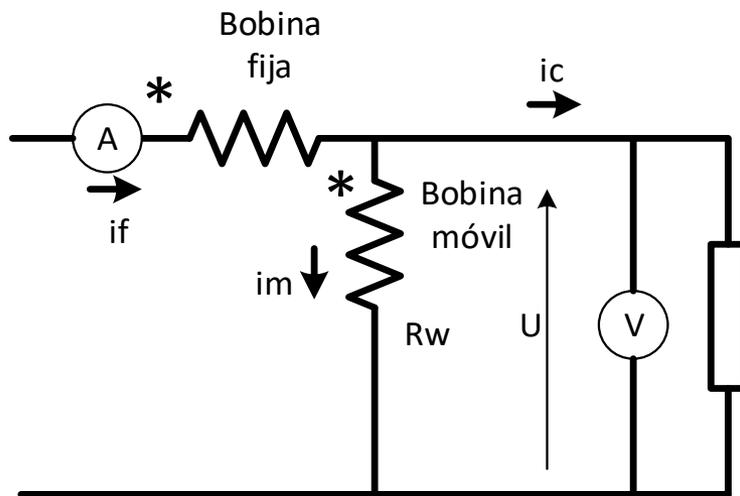
$$P = U_n I_n \cos \phi_n$$

- R_w, X_w
- R_a, X_a

Dependiendo del $\cos \phi$ de la carga, podemos tener poca deflexión y corriente o tensión mayores a la nominal: es muy fácil dañarlo.

Siempre se usan con voltímetro y amperímetro de control.

Vatímetro electrodinámico. Características.



$\left[\begin{array}{l} \text{Clase} \\ U_{\text{nominal}} \\ I_{\text{nominal}} \\ \cos \phi_n \end{array} \right. \left. \vphantom{\begin{array}{l} \text{Clase} \\ U_{\text{nominal}} \\ I_{\text{nominal}} \\ \cos \phi_n \end{array}} \right\} \text{ deflexión a fondo de escala.}$

La potencia fiduciaria será:

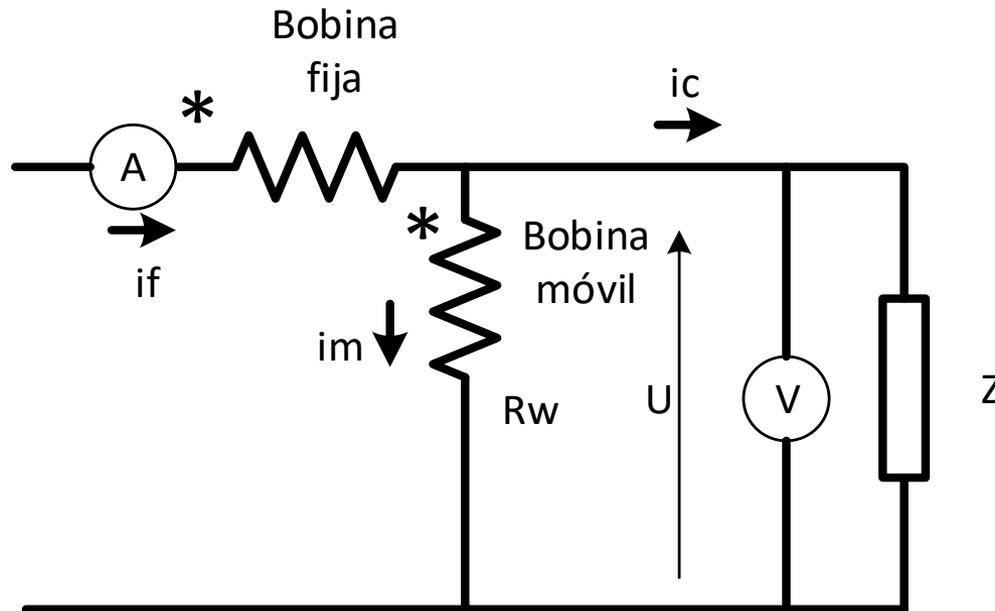
$$P = U_n I_n \cos \phi_n$$

$\left[\begin{array}{l} R_w, X_w \\ R_a, X_a \end{array} \right.$

Dependiendo del $\cos \phi$ de la carga, podemos tener poca deflexión y corriente o tensión mayores a la nominal: es muy fácil dañarlo.

Siempre se usan con voltímetro y amperímetro de control.

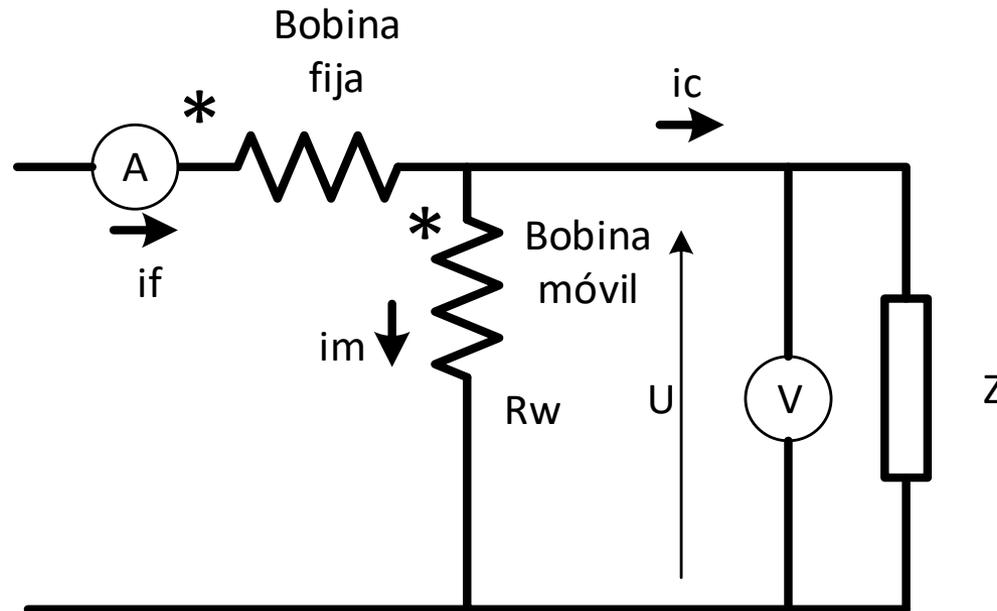
Watímetro electrodinámico. Error de consumo propio.



En esta conexión (asimilable a la “corta” en voltímetro amperímetro), la corriente medida es, además de la de carga, la propia de la bobina voltimétrica. El watímetro mide de más: mide la potencia de su propia bobina:

$$P_m = P_c + \frac{U^2}{R_w}$$

Watímetro electrodinámico. Error de consumo propio.

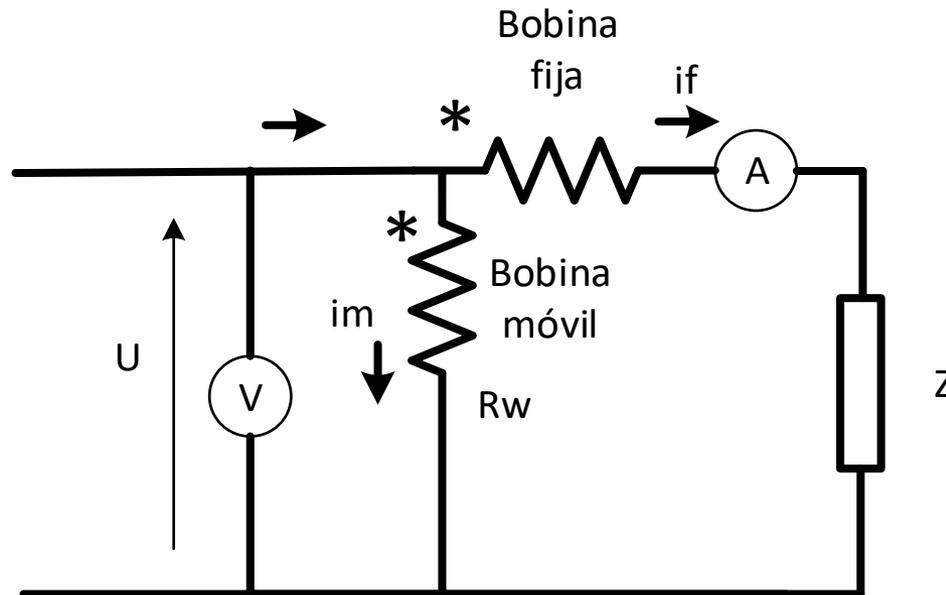


Como además tenemos el voltímetro de control, la potencia medida será:

$$P_m = P_c + \frac{U^2}{R_{vw}}$$

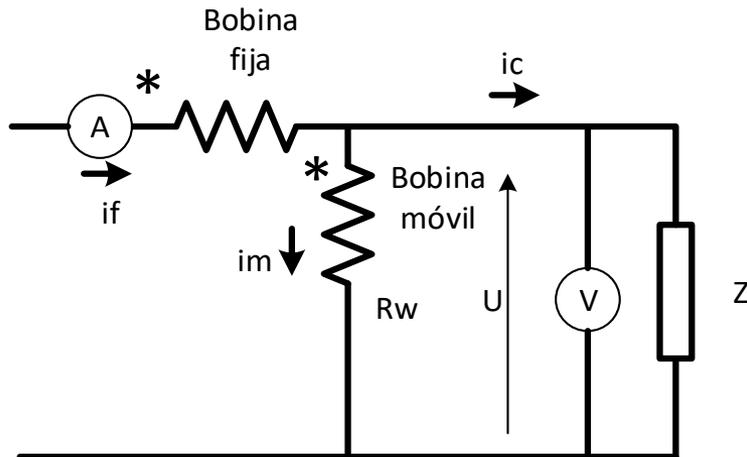
$$R_{vw} = R_v // R_w$$

Vatímetro electrodinámico. Error de consumo propio.



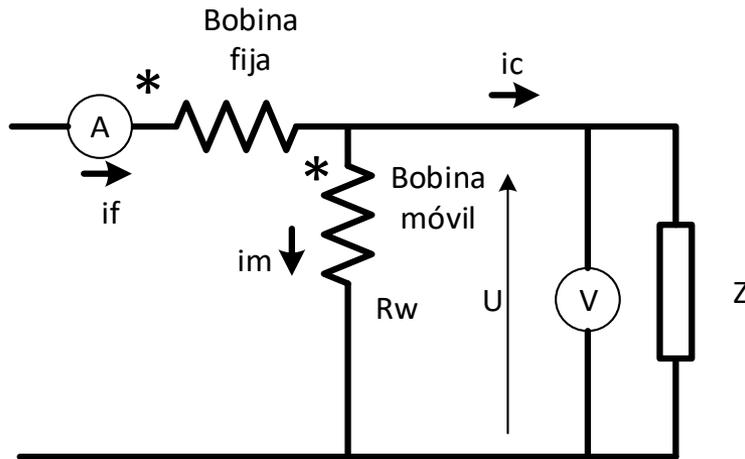
Otra posibilidad es conectar la bobina de corriente directamente en serie con la carga (“conexión larga”). El vatímetro medirá la potencia de la carga, la de su bobina amperométrica y la del amperímetro.

Vatímetro electrodinámico. Error de fase.

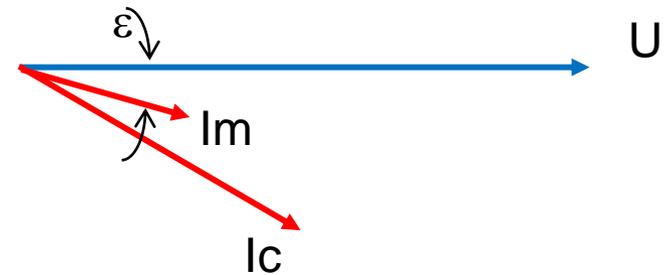


El uso del instrumento electrodinámico como vatímetro se basa en conseguir que la corriente i_m esté en fase con la tensión U .

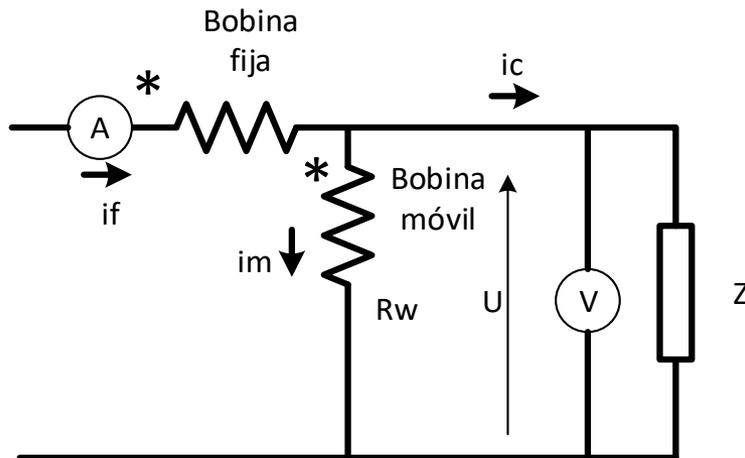
Vatímetro electrodinámico. Error de fase.



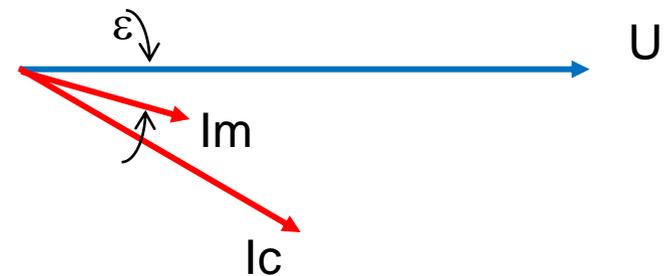
El uso del instrumento electrodinámico como vatímetro se basa en conseguir que la corriente i_m esté en fase con la tensión U .



Vatímetro electrodinámico. Error de fase.

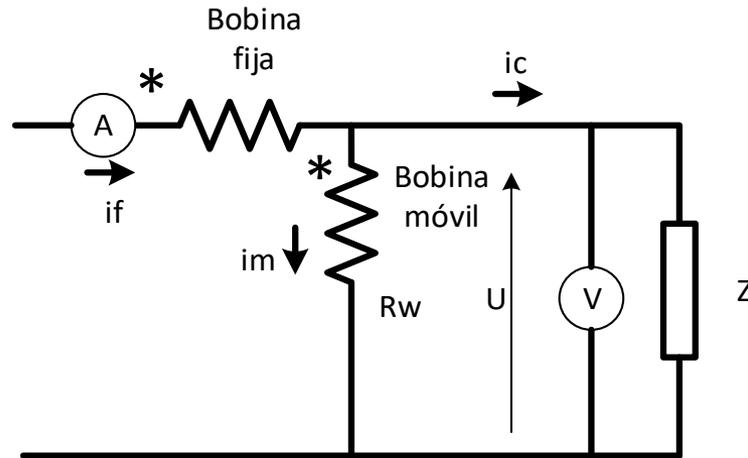


El uso del instrumento electrodinámico como vatímetro se basa en conseguir que la corriente I_m esté en fase con la tensión U .

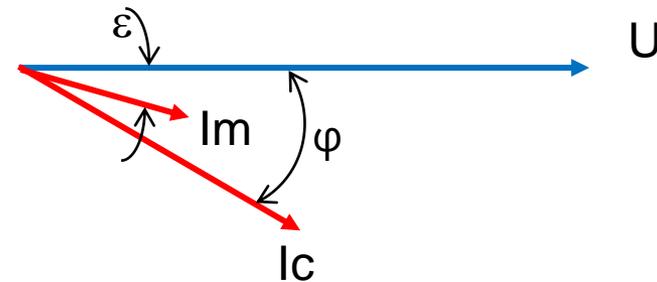


En realidad, por ser la de tensión una bobina, nunca estará exactamente en fase con U . Tendremos entonces un apartamiento ε de la condición ideal.

Vatímetro electrodinámico. Error de fase.



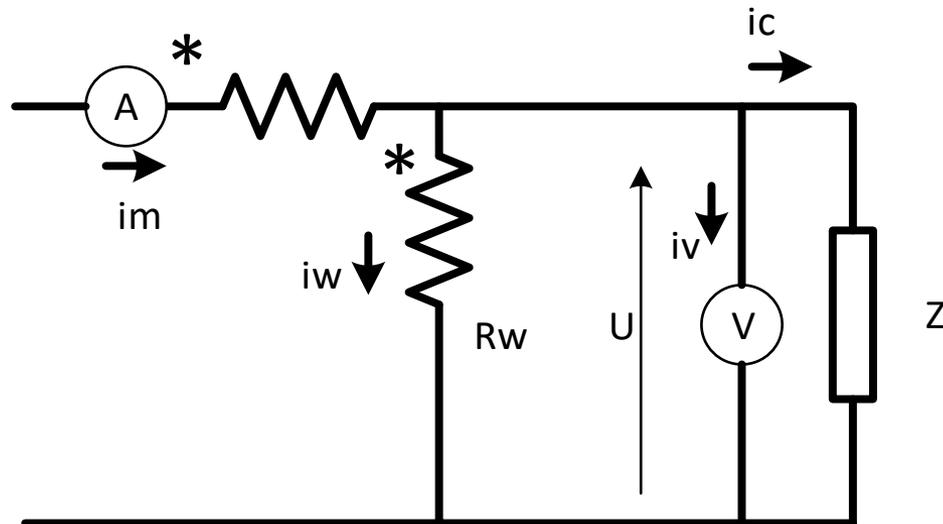
El ángulo genera un error llamado “de fase”, cuyo valor es:



$$e = \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

El error tendrá el signo de φ : mide de más para carga inductiva, y de menos para capacitiva.

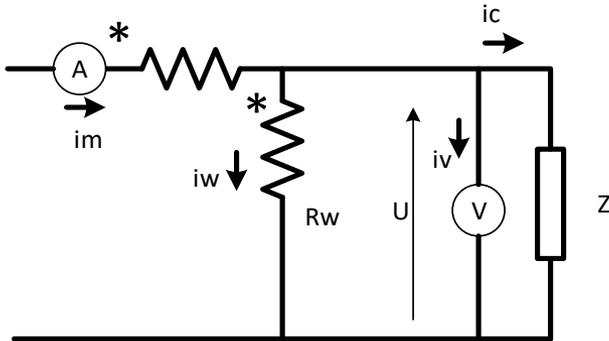
Problema: caracterización de una impedancia Z



Se trata de obtener los valores característicos de Z: $|Z|$ y $\cos\varphi$ o R y X.

Valores aproximados: 60Ω , 70° / 1 A / 50 Hz

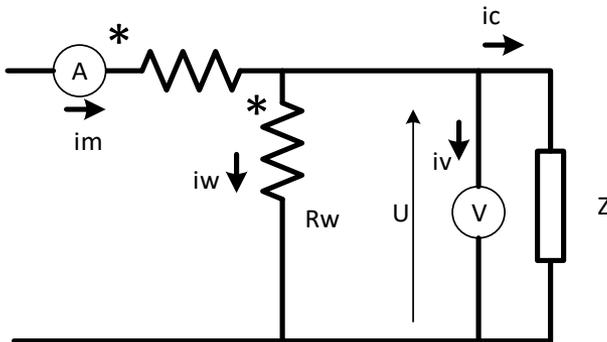
Problema: caracterización de una impedancia Z



$$|Z| = \frac{U_c}{I_c}$$

$$\cos \varphi = \frac{P_c}{U_c I_c}$$

Problema: caracterización de una impedancia Z



$$|Z| = \frac{U_c}{I_c}$$

$$\cos \varphi = \frac{P_c}{U_c I_c}$$

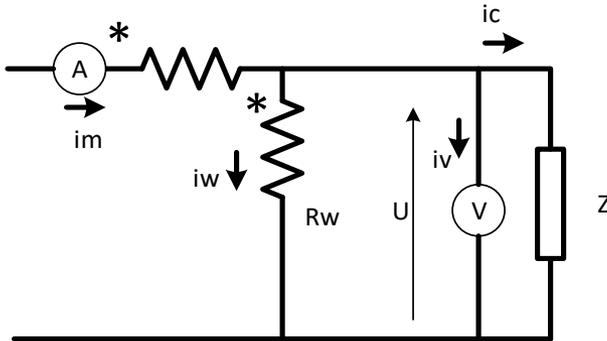
Instrumentos disponibles:

A: Analógico, C: 0,5, alc. 1A

W: Analógico de bajo factor de potencia
 C: 0,25, Tensiones nominales: 75/150 V
 Corriente nominal: 2,5/5 A
 $\cos \phi_n$: 0,2
 R_w : 1524/3048 Ω
 L_w : 0,0041 mH

V: C: 1,5, alc 15/30/75 V R_v 1000/V

Problema: caracterización de una impedancia Z



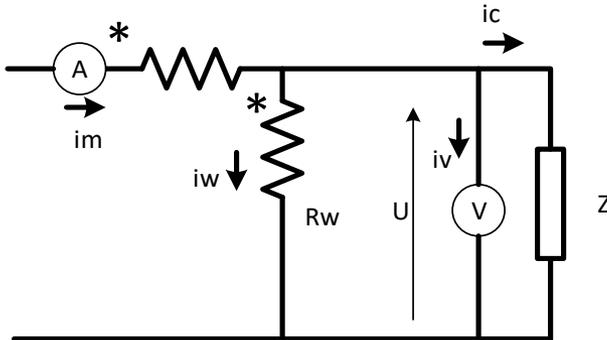
Medimos a la corriente nominal de la inductancia: 1 A
 (cuidado con la linealidad)

Valores aproximados:

$$U_m \approx 60 \text{ V} \quad 1 \text{ A} \approx 60 \text{ V}$$

$$P_m \approx 60 \text{ V} \quad 1 \text{ A} \cos 70^\circ \approx 20 \text{ W}$$

Problema: caracterización de una impedancia Z



Medimos a la corriente nominal de la inductancia: 1 A
(cuidado con la linealidad)

Valores aproximados:

$$U_m \approx 60 \text{ V} \quad 1 \text{ A} \approx 60 \text{ V}$$

$$P_m \approx 60 \text{ V} \quad 1 \text{ A} \cos 70^\circ \approx 20 \text{ W}$$

Errores:

A: Analógico, C: 0,5, alc. 1 A.

$$E = C I_f / 100 = \pm 0,005 \text{ A}, e_I = \pm 0,5\%$$

W: Analógico de bajo factor de potencia
C: 0,25, Tensiones nominales: 75/150 V

$$E = C I_n U_n \cos \phi_n / 100 = \pm 0,09 \text{ W}$$

Corriente nominal: 2,5/5 A

$$e_p = \pm 0,47\%$$

$\cos \phi_n$: 0,2

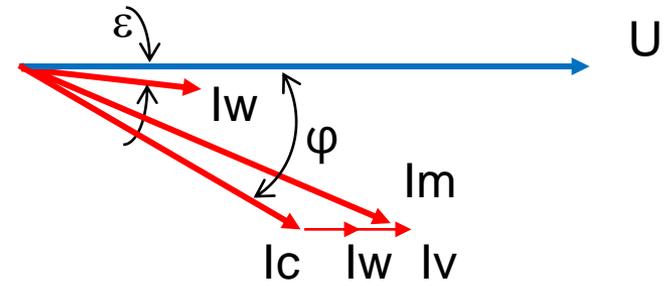
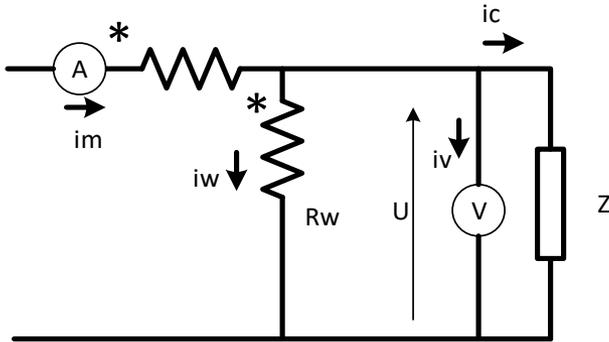
R_w : 1524/3048 Ω

L_w : 0,0041 mH

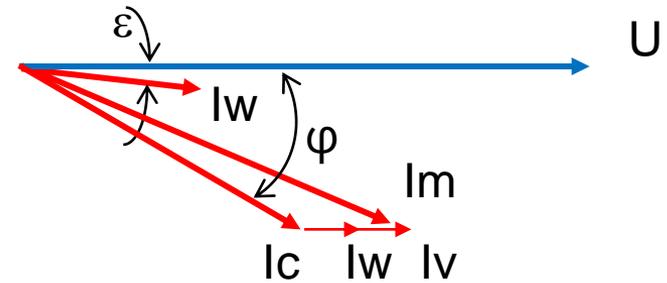
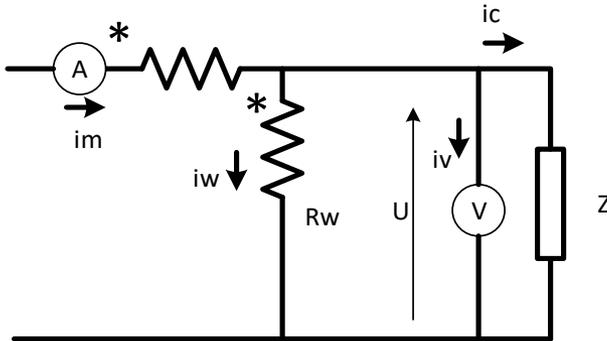
V: C: 1,5, alc 15/30/75 V R_v 1000 Ω /V

$$E = C U_f / 100 = \pm 1,1 \text{ V}, e_U = \pm 1,9\%$$

Caracterización de una impedancia Z



Caracterización de una impedancia Z – Error de fase



Error de fase:

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{2\pi 50 \text{ hz } 0,0041 \text{ H}}{1524 \Omega}$$

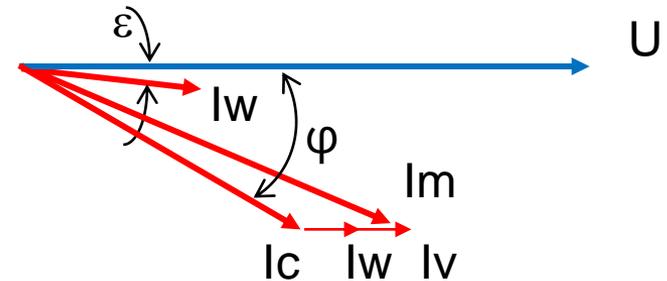
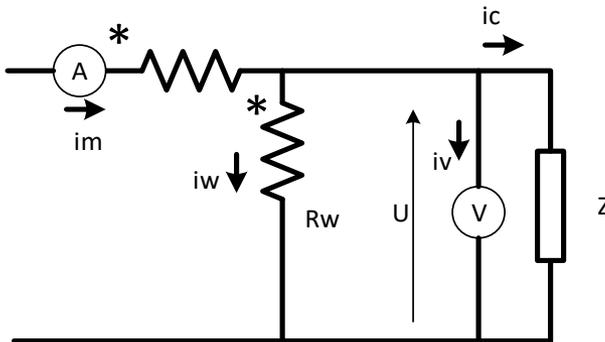
W: Analógico de bajo factor de potencia
 C: 0,25, Tensiones nominales: 75/150 V
 Corriente nominal: 2,5/5 A

$\operatorname{Cos} \phi_n$: 0,2

R_w: 1524/3048 Ω

L_w: 0,0041 mH

Caracterización de una impedancia Z – Error de fase



Error de fase:

W: Analógico de bajo factor de potencia
 C: 0,25, Tensiones nominales: 75/150 V
 Corriente nominal: 2,5/5 A

$\text{Cos } \phi_n$: 0,2

R_w : 1524/3048 Ω

L_w : 0,0041 mH

$$\text{tg } \varepsilon = \frac{2\pi 50 \text{ hz } 0,0041 \text{ H}}{1524 \Omega}$$

$$\varepsilon = 0,00084 \text{ rad}$$

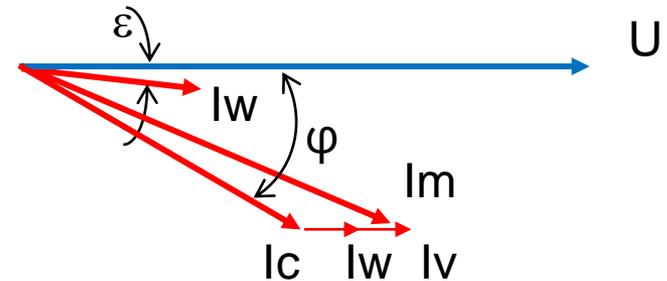
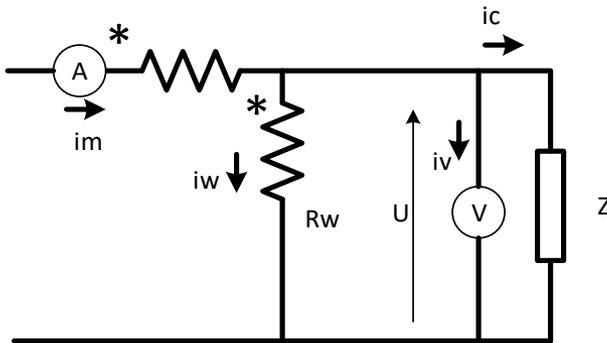
$$e = 0,00084 \text{ tg } (70^\circ) 100$$

$$e = 0,23 \%$$

$$E = 0,046 \text{ W}$$

Comparable con $E_w = \pm 0,09 \text{ W}$

Caracterización de una impedancia Z – Consumo propio



Vatímetro: R_w : 1524/3048 Ω

Voltímetro: R_v : 1000 Ω/V 75 k Ω

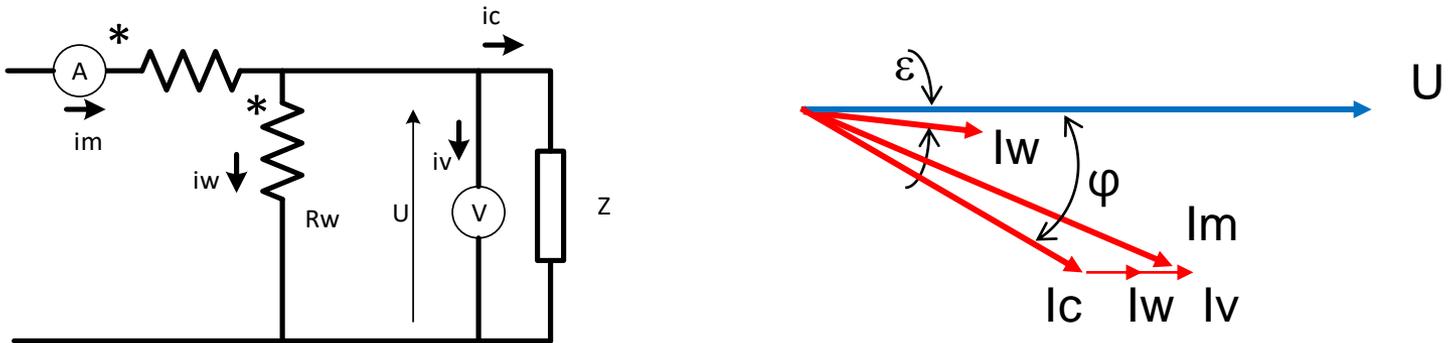
$R_{vw} = 1494 \Omega$

$P_{vw} = U^2 / R_{vw} = 60 \text{ V}^2 / 1494 \Omega = 2,4 \text{ W}$

Comparable con $E_w = \pm 0,09 \text{ W}$

$$P_c = P_m - \varepsilon \cdot \text{tg } \varphi \cdot P_m - U^2 / R_{vw} = P_m - 0,046 \text{ W} - 2,40 \text{ W}$$

Caracterización de una impedancia Z – Corriente



$\Delta I = |I_m| - |I_c|$ debería ser despreciable frente a E_{im}

Si no es despreciable, hay que desafectar:

$$I_c = \sqrt{I_m^2 - 2 \frac{P_m}{R_{vw}} + \frac{U^2}{R_{vw}^2}}$$

$\Delta I = |I_m| - |I_c|$ verificación práctica: desconectar bobinas voltimétricas.

También puede despreciarse ΔI , si comprobamos $|I_m - I_c| = I_{cw} \ll E_{im}$,
(ya que $|I_m - I_c| > |I_m| - |I_c|$)

Caracterización de una impedancia Z – Valores buscados. Propagación de errores

$$|Z| = \frac{U_c}{I_c} \quad \text{Si tuvimos que desafectar}$$

Caracterización de una impedancia Z – Valores buscados. Propagación de errores

$$|Z| = \frac{U_c}{I_c}$$

Si tuvimos que desafectar

$$|Z| = \frac{U_c}{\sqrt{I_m^2 - 2\frac{P_m}{R_{vw}} + \frac{U_c^2}{R_{vw}^2}}}$$

Caracterización de una impedancia Z – Valores buscados. Propagación de errores

$$|Z| = \frac{U_c}{I_c} \quad \text{Si tuvimos que desafectar} \quad |Z| = \frac{U_m}{\sqrt{I_m^2 - 2\frac{P_m}{R_{vw}} + \frac{U_m^2}{R_{vw}^2}}}$$

Para obtener e_z deberemos propagar $Z = f(I_m, P_m, U_m)$

Caracterización de una impedancia Z – Valores buscados. Propagación de errores

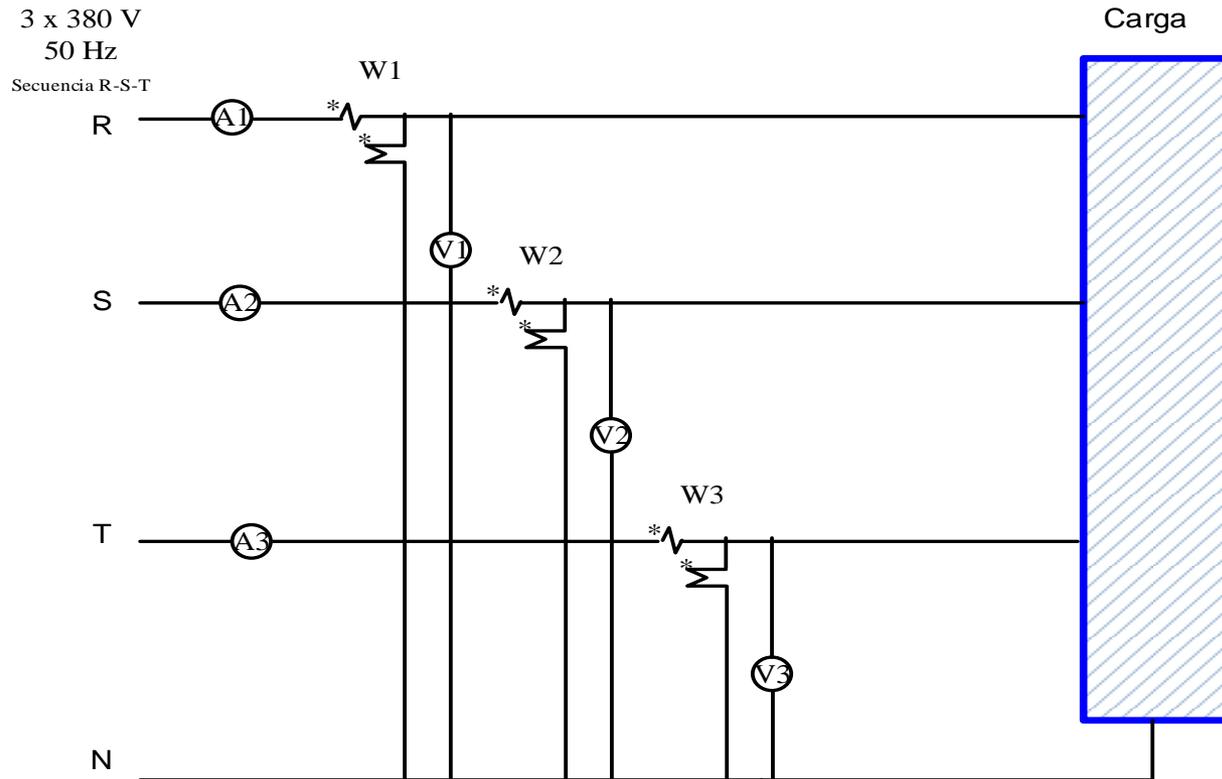
$$|Z| = \frac{U_c}{I_c} \quad \text{Si tuvimos que desafectar} \quad |Z| = \frac{U_m}{\sqrt{I_m^2 - 2\frac{P_m}{R_{vw}} + \frac{U_m^2}{R_{vw}^2}}}$$

Para obtener e_z deberemos propagar $Z = f(I_m, P_m, U_m)$

Idem para $\cos \varphi$

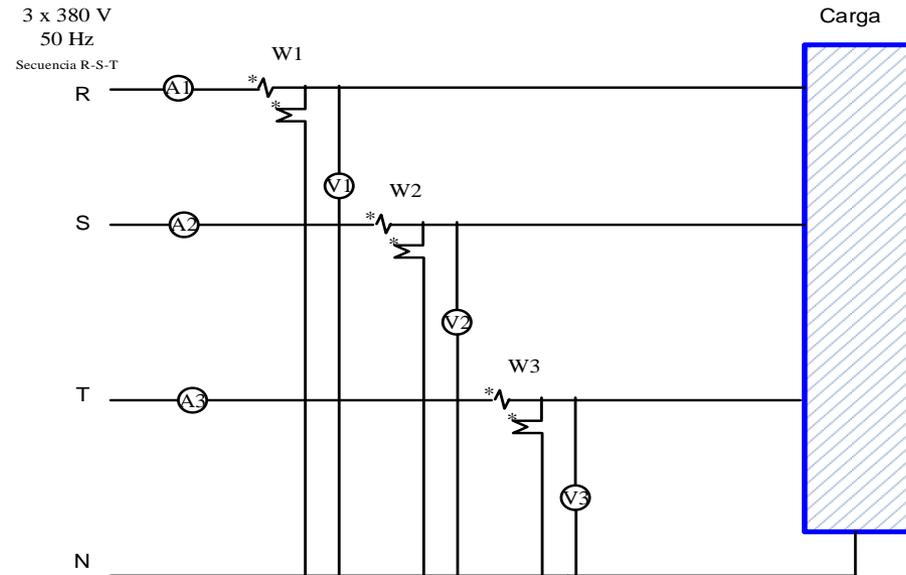
$$\cos \varphi = \frac{P_c}{U_c I_c} = \frac{P_m - \varepsilon \operatorname{tg} \varphi P_m - \frac{U_m^2}{R_{vw}}}{U_m \sqrt{I_m^2 - 2\frac{P_m}{R_{vw}} + \frac{U_m^2}{R_{vw}^2}}}$$

Parte 2. Potencia en sistemas trifásicos: Tetrafilar.



Teorema de Blondel: tres instrumentos conectados a un punto común.

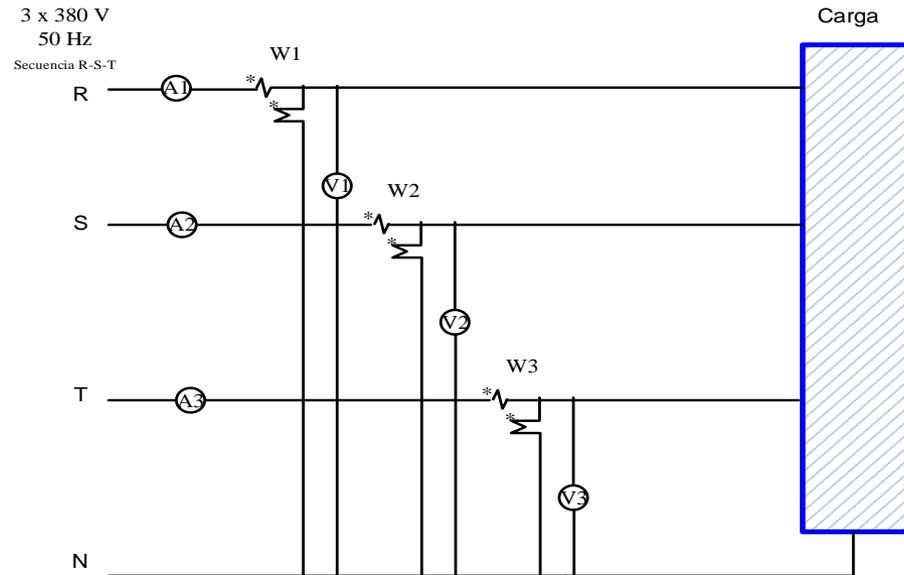
Parte 2. Potencia en sistemas trifásicos: Tetrafilar.



$$P_{\text{total}} = P_{R(RN)} + P_{S(SN)} + P_{T(TN)}$$

Con esa posición de puntos homólogos, todas las indicaciones resultan positivas.

Parte 2. Potencia en sistemas trifásicos: Tetrafilar.



$$P_{\text{total}} = P_{R(RN)} + P_{S(SN)} + P_{T(TN)}$$

Con esa posición de puntos homólogos, todas las indicaciones resultan positivas.

Aplicando propagación:

$$EP_{\text{total}} = EP_{R(RN)} + EP_{S(SN)} + EP_{T(TN)}$$

Práctica de laboratorio.

Tetrafilar con instrumentos digitales.

Marca: Tecniarck, Modelo: DX-105



MEDIDOR MULTIFUNCION LINEA DX

Características generales

Los multimedidores de la serie DX son instrumentos analizadores para montaje en panel (96x96mm), que miden y calculan mediante microprocesadores los principales parámetros de redes eléctricas industriales trifásicas (equilibradas y desequilibradas).

Las mediciones se efectúan calculando el verdadero valor eficaz, mediante tres entradas de tensión y tres de intensidad (utilizando transformadores de corriente de relación /5 A o /1 A, o transductores de corriente tipo Rogowski de relación 150 mV.)

Los multimedidores DX permiten la visualización de los parámetros medidos, mediante una pantalla LCD color de 3,5" de gran definición con ángulo de visión de 180°, retroiluminación led, sistema de ahorro de energía y teclas de sensado táctil capacitivas.

Los parámetros, textos y unidades de medición están claramente identificados, siendo de muy fácil lectura y operación; de manejo intuitivo, tornando al equipo totalmente amigable con el usuario.

Las unidades y escalas se parametrizan automáticamente en función de las magnitudes a medir, por lo que no es necesario realizar ninguna programación previa (Auto scale). Los registros de cada parámetro se indican en tiempo real (True RMS), y los valores máximos quedan grabados en memoria asociados a la fecha y hora del evento. Todas las pantallas registran las mediciones en forma: Digital numérica (4 ½ dígitos) y Analógica, mediante una barra progresiva (vú metro) con indicación porcentual referida al fondo de escala.



Se utilizará un medidor digital tipo de tablero, que analiza tensión y corriente de cada fase.

Práctica de laboratorio. Tetrafilar con instrumentos digitales.

Marca: Tecniarck, Modelo: DX-105

Tecniarck
DIVISIÓN ELECTRONICA

MEDIDOR MULTIFUNCION
LINEA DX

Características generales

Los multimedidores de la serie DX son instrumentos analizadores para montaje en panel (96x96mm), que miden y calculan mediante microprocesadores los principales parámetros de redes eléctricas industriales trifásicas (equilibradas y desequilibradas).

Las mediciones se efectúan calculando el verdadero valor eficaz, mediante tres entradas de tensión y tres de intensidad (utilizando transformadores de corriente de relación /5 A o /1 A, o transductores de corriente tipo Rogowski de relación 150 mV.)

Los multimedidores DX permiten la visualización de los parámetros medidos, mediante una pantalla LCD color de 3,5" de gran definición con ángulo de visión de 180°, retroiluminación led, sistema de ahorro de energía y teclas de sensado táctil capacitivas.

Los parámetros, textos y unidades de medición están claramente identificados, siendo de muy fácil lectura y operación; de manejo intuitivo, tornando al equipo totalmente amigable con el usuario.

Las unidades y escalas se parametrizan automáticamente en función de las magnitudes a medir, por lo que no es necesario realizar ninguna programación previa (Auto scale). Los registros de cada parámetro se indican en tiempo real (True RMS), y los valores máximos quedan grabados en memoria asociados a la fecha y hora del evento. Todas las pantallas registran las mediciones en forma: Digital numérica (4 ½ dígitos) y Analógica, mediante una barra progresiva (vú metro) con indicación porcentual referida al fondo de escala.



El instrumento digitaliza tensión y corriente, y calcula valores eficaces verdaderos. También calcula potencias activas, reactiva, aparente y factor de potencia.

Práctica de laboratorio.

Tetrafilar con instrumentos digitales.

➔ Características Generales

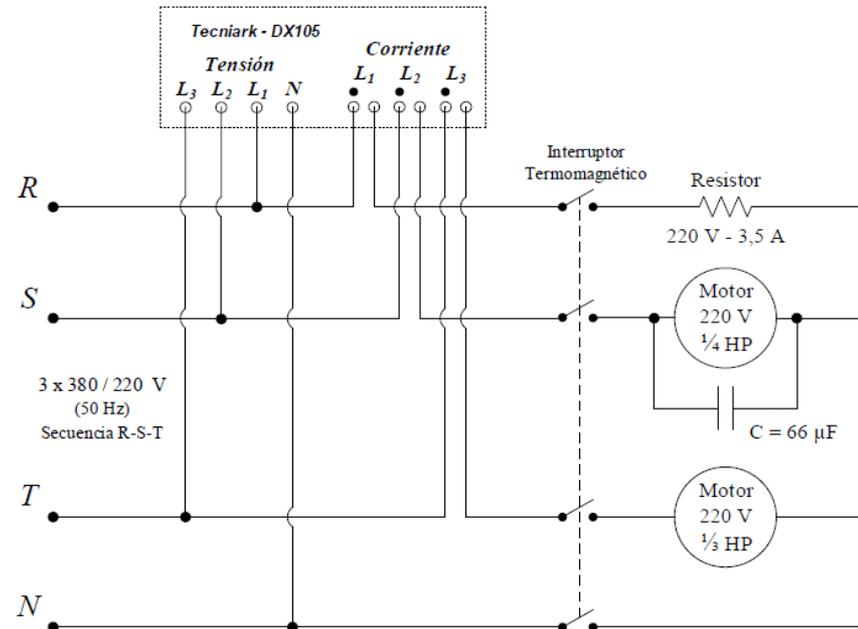
Características eléctricas

Tipo de medida	Verdadero valor eficaz hasta armónica 31 en redes de C.A. (3P, 3P+N)
Clase de Precisión de medición	
Tensión y corriente	0,5% de la lectura +/- 1 dígito
Potencia	1% de la lectura +/- 1 dígito
Energía Activa	1% de la lectura +/- 1 dígito
Energía Reactiva	2% de la lectura +/- 1 dígito
Margen de Medida	5 a 150% de fondo de escala
Señales de Entrada	
Tensiones	3 Tensiones alternadas isofrecuenciales entre 45 y 65 Hz. 0 a 500 V (Directo F-F) modelo 0 (400/231 V.) 0 a 600 V (Directo F-F) modelo 6 (480/277 V.) 0 a 150 KV (Con transformadores de tensión) modelo 1 (110 /63 V.)
Corrientes	Transductores de corriente TR: Relación/150m V. (Regulación: 5 a 9.999 A) Sobrecarga adm. 3 In. Continuo Transformadores de corriente TC: Relación/5A o /1A. (Regul.: 5 a 9.999 A) Sobrecarga adm. 3 In. Continuo
Frecuencia	50/60 Hz (Rango medición de 45 a 65 Hz)

La expresión de los errores sigue, para cada magnitud indicada, la forma normalizada para instrumentos digitales.

Práctica de laboratorio.

Circuito a utilizar.



Se simulará un circuito tetrafilar tipo industrial, con una carga resistiva (fase R) y dos motores monofásicos (fases S y T). La fase S incorpora una capacidad. El conjunto configura una carga desequilibrada.

Práctica de laboratorio.

Ejemplos de lecturas y cálculo de errores.

DAVE		00:00:27 01/01/2012	
L1	Potencia activa 798.4 W 0 320k	Potencia act. max. 811.7 W	
	0.2%	00:03:44 01/01/12	
L2	Potencia activa 157.6 W 0 320k	Potencia act. max. 587.5 W	
	0.0%	00:00:20 01/01/12	
L3	Potencia activa 258.5 W 0 320k	Potencia act. max. 613.5 W	
	0.0%	00:00:30 01/01/12	

Potencia Activa por fase

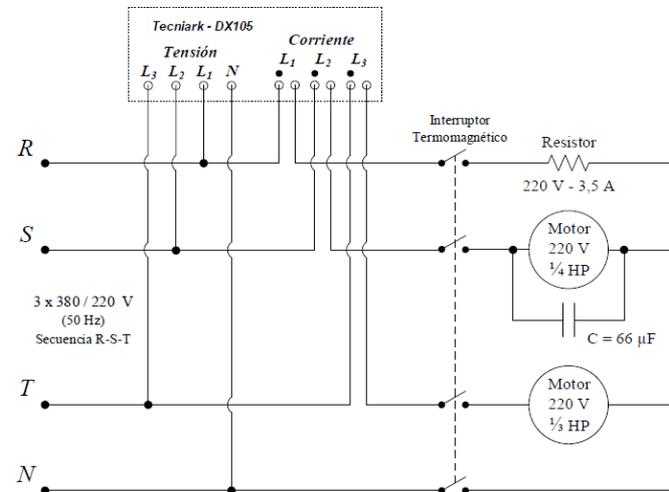
Potencia en la fase R (L1): 798,4 W

$$E_{P_{L1}} = \pm (1\% P_m + 1 \text{ díg.}) = \pm \left(\frac{1}{100} \cdot 798,4 + 0,1 \right) W = \pm 8 W$$

$$P_{L1} = (798 \pm 8) W$$

Práctica de laboratorio.

Circuito a utilizar.



Impedancia del circuito de Corriente (por fase): $< 0,02 \Omega$.

Impedancia del circuito de Tensión (por fase): $> 0,5 M\Omega$.

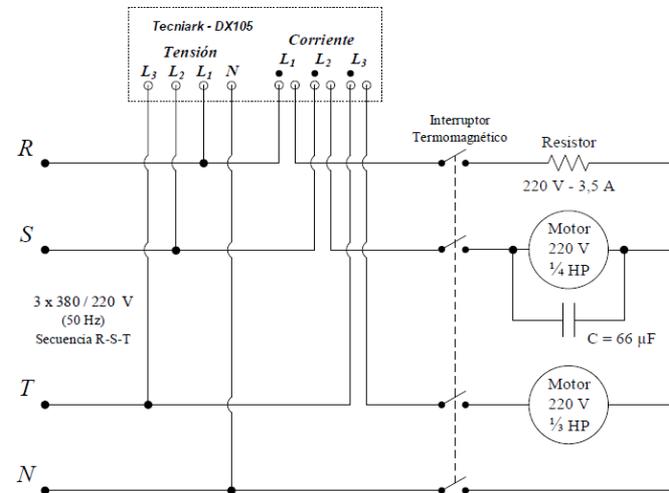
Si bien, estimando el consumo propio de la bobina de tensión como:

$(220 \text{ V})^2 / 0,5 M\Omega \approx 0,1 \text{ W}$, es despreciable frente a $E_p = \pm 8 \text{ W}$.

no se utilizará la conexión corta, ya que este modelo particular de medidor, toma energía para su funcionamiento (no sólo la necesaria para la medición), de una de las fases a medir, haciendo que el consumo en esa fase sea apreciable.

Práctica de laboratorio.

Circuito a utilizar.



Impedancia del circuito de Corriente (por fase): $< 0,02 \Omega$.

Impedancia del circuito de Tensión (por fase): $> 0,5 M\Omega$.

conexión larga:

La caída de tensión en el circuito de corriente ($\approx 0,06V$) y su potencia ($\approx 0,25W$), resultan despreciables.

Práctica de laboratorio.

Ejemplos de lecturas y cálculo de errores.

	Tension de fase	Tension max.
L1	227.1 V 0.3% 00:00:00 01/01/12	228.6 V 00:00:00 01/01/12
L2	229.6 V 0.3% 00:00:00 01/01/12	230.8 V 00:00:00 01/01/12
L3	227.5 V 0.3% 00:00:00 01/01/12	227.8 V 00:00:00 01/01/12

Tensiones de fase

Tensión en la fase R (L1): 227,1 V

$$E_{U_{L1}} = \pm (0,5 \% U_m + 1 \text{ dig.}) = \pm \left(\frac{0,5}{100} \cdot 227,1 + 0,1 \right) V = \pm 1 V$$

$$U_{L1} = (227 \pm 1) V$$

Práctica de laboratorio.

Ejemplos de lecturas y cálculo de errores.



Corrientes de fase

Corriente en la fase R (L1): 3,541 A

$$E_{I_{L1}} = \pm (0,5 \% I_m + 1 \text{ díg.}) = \pm \left(\frac{0,5}{100} \cdot 3,541 + 0,001 \right) A = \pm 0,02 A$$

$$I_{L1} = (3,54 \pm 0,02) A$$

Práctica de laboratorio.

Ejemplos de lecturas y cálculo de errores.

DAVE		00:00:27 01/01/2012	
L1	Potencia activa 798.4 W 0 320k	Potencia act. max. 811.7 W	
	0.2%	00:03:44 01/01/12	
L2	Potencia activa 157.6 W 0 320k	Potencia act. max. 587.5 W	
	0.0%	00:00:20 01/01/12	
L3	Potencia activa 258.5 W 0 320k	Potencia act. max. 613.5 W	
	0.0%	00:00:30 01/01/12	

Potencia Activa por fase

Potencia en la fase R (L1): 798,4 W

$$E_{P_{L1}} = \pm (1\% P_m + 1 \text{ díg.}) = \pm \left(\frac{1}{100} \cdot 798,4 + 0,1 \right) W = \pm 8 W$$

$$P_{L1} = (798 \pm 8) W$$

Práctica de laboratorio.

Ejemplos de lecturas y cálculo de errores.

	Cos Phi fase		Angulo de fase
L1	0.999 Ind	1.00	0.163 Gr
	100.0%		
L2	0.300 Cap	1.00	72.52 Gr
	100.0%		
L3	0.303 Ind	1.00	72.32 Gr
	100.0%		

Factor de Potencia y Ángulo de fase

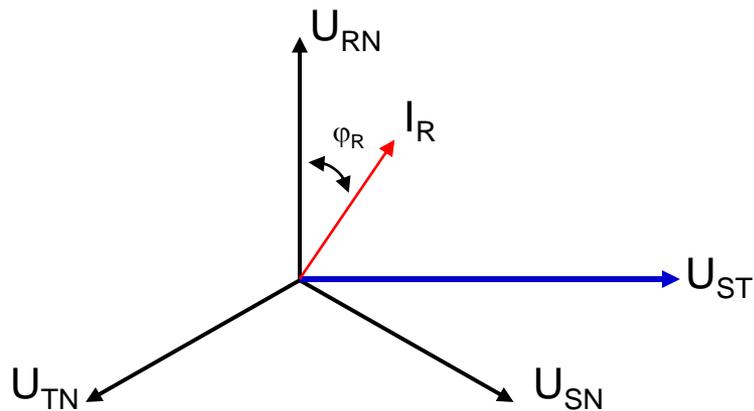
Factor de potencia en la fase R (L1):
0,999 inductivo

En la hoja de datos, no se especifican datos de exactitud para el factor de potencia.
Se podría calcular el error límite, considerando la siguiente hipótesis pesimista:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \Rightarrow e_{\cos \varphi} = \pm (e_P + e_S)$$

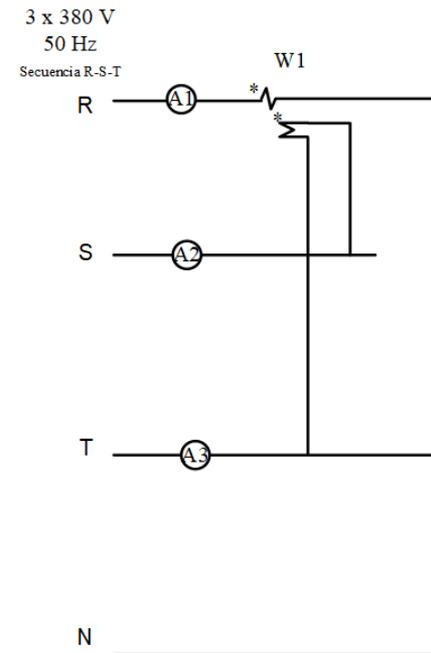
$$e_{\cos \varphi} = \pm 100 \cdot \left(\frac{\delta}{798,4} + \frac{\delta}{805,3} \right) = \pm 2 \% \Rightarrow E_{\cos \varphi} = \pm 0,02$$

Potencia reactiva con instrumentos analógicos

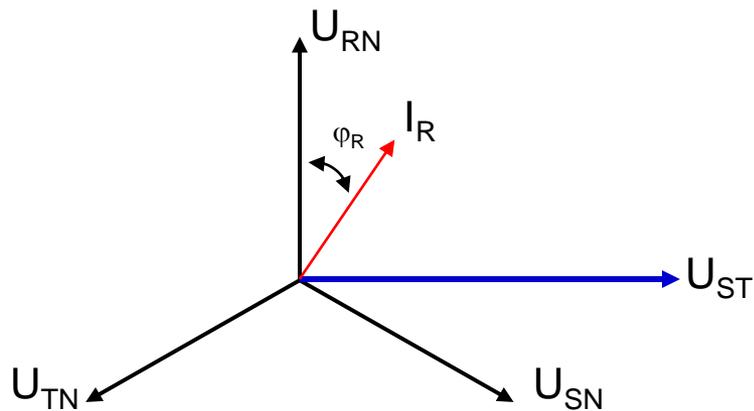


El método necesita una tensión atrasada 90° con respecto a la que genera el consumo (U_{ST})

$$P_{R(ST)} = U_{ST} I_R \cos(90 - \varphi_R)$$



Potencia reactiva con instrumentos analógicos

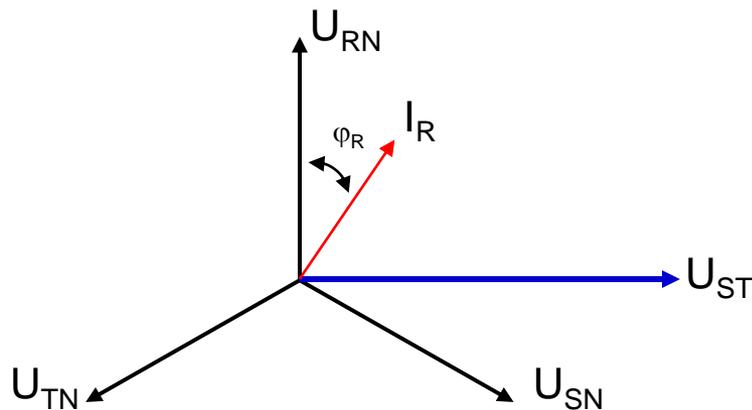


$$P_{R(ST)} = U_{ST} I_R \cos (90 - \varphi_R)$$

$$P_{R(ST)} = \sqrt{3} U_{RN} I_R \text{ sen } (\varphi_R)$$

$$P_{R(ST)} = \sqrt{3} Q_{RN}$$

Potencia reactiva con instrumentos analógicos



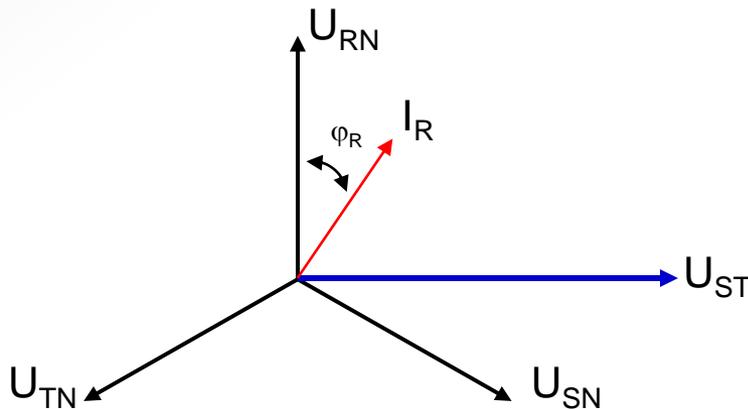
$$P_{R(ST)} = U_{ST} I_R \cos (90 - \varphi_R)$$

$$P_{R(ST)} = \sqrt{3} U_{RN} I_R \text{ sen } (\varphi_R)$$

$$P_{R(ST)} = \sqrt{3} Q_{RN}$$

Notar que si φ_R es capacitivo (adelanta a U_{RN}) $P_{R(ST)}$ sería negativo.
 O sea, potencias positivas indican carga inductiva y negativas, capacitivas.

Potencia reactiva con instrumentos analógicos



$$P_{R(ST)} = U_{ST} I_R \cos (90-\varphi_R)$$

$$P_{R(ST)} = \sqrt{3} U_{RN} I_R \text{ sen } (\varphi_R)$$

$$P_{R(ST)} = \sqrt{3} Q_{RN}$$

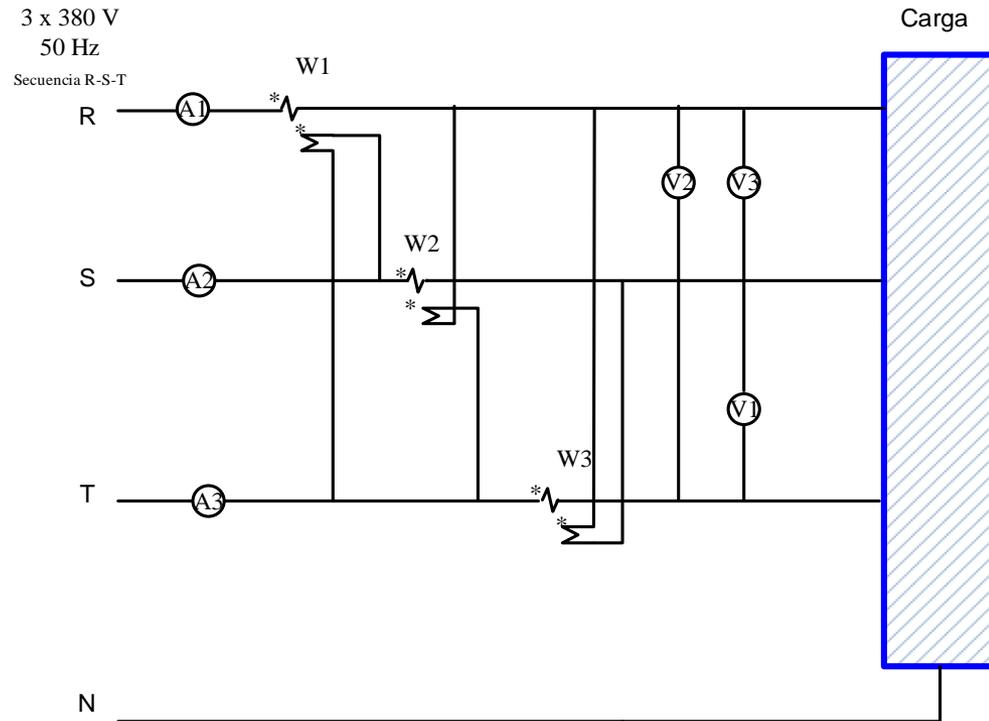
Notar que si φ_R es capacitivo (adelanta a U_{RN}) $P_{R(ST)}$ sería negativo.

O sea, potencias positivas indican carga inductiva y negativas, capacitivas.

Obviamente que el instrumento solo “intentará” indicar en sentido opuesto.

Se deberá invertir una de sus bobinas y computar esa indicación como negativa.

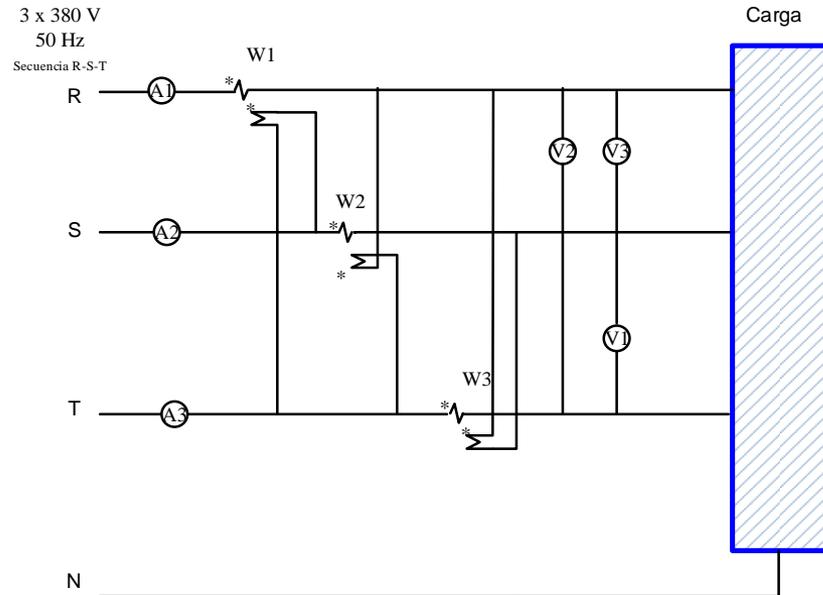
Potencia reactiva con instrumentos analógicos



Si el sistema es trifásico (trifilar o tetrafilar) se repite el esquema de secuencias en la conexión:

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{RN}} + Q_{\text{SN}} + Q_{\text{TN}} = \frac{1}{\sqrt{3}} (P_{\text{R(ST)}} + P_{\text{S(TR)}} + P_{\text{T(RS)}})$$

Ejemplo.



W: C 1,5; 5 A; 380 V $\cos\phi_N=1$

Lecturas:

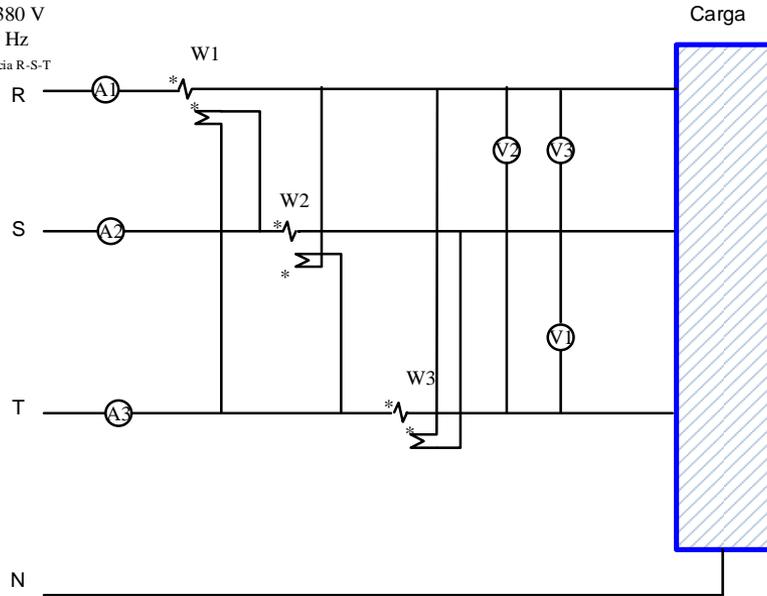
$$P_{R(ST)} = 0,80 \text{ kW}$$

$$P_{S(TR)} = -0,44 \text{ kW}$$

$$P_{T(RS)} = 0,76 \text{ W}$$

Ejemplo.

3 x 380 V
50 Hz
Secuencia R-S-T



W: C 1,5; 5 A; 380 V $\cos\phi_N=1$

Lecturas:

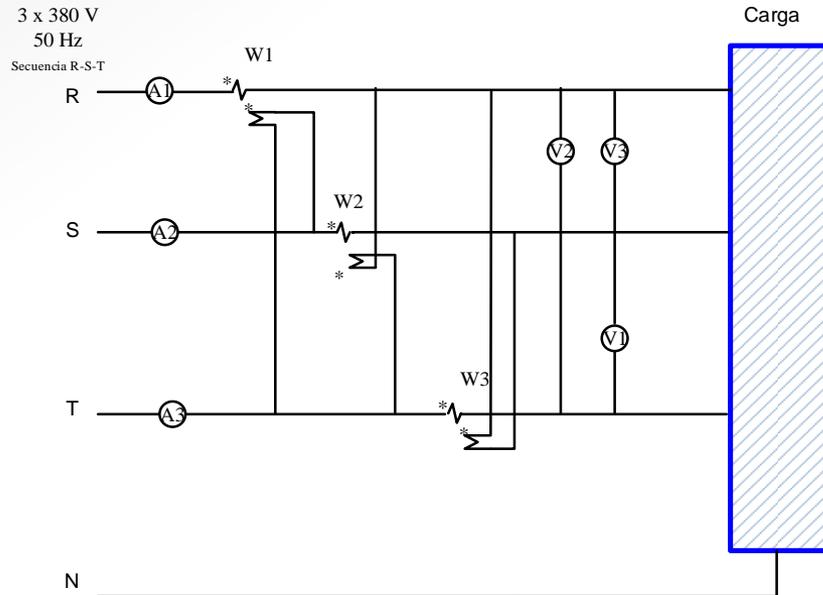
$$P_{R(ST)} = 0,80 \text{ kW}$$

$$P_{S(TR)} = -0,44 \text{ kW}$$

$$P_{T(RS)} = 0,76 \text{ W}$$

$$Q_{\text{total}} = \frac{1}{\sqrt{3}} (0,80 - 0,44 + 0,76) = 0,647 \text{ kVAR (inductivo)}$$

Ejemplo.



W: C 1,5; 5 A; 380 V $\cos\phi_N=1$

Lecturas:

$$P_{R(ST)} = 0,80 \text{ kW}$$

$$P_{S(TR)} = -0,44 \text{ kW}$$

$$P_{T(RS)} = 0,76 \text{ W}$$

$$Q_{\text{total}} = \frac{1}{\sqrt{3}} (0,80 - 0,44 + 0,76) = 0,647 \text{ kVAR (inductivo)}$$

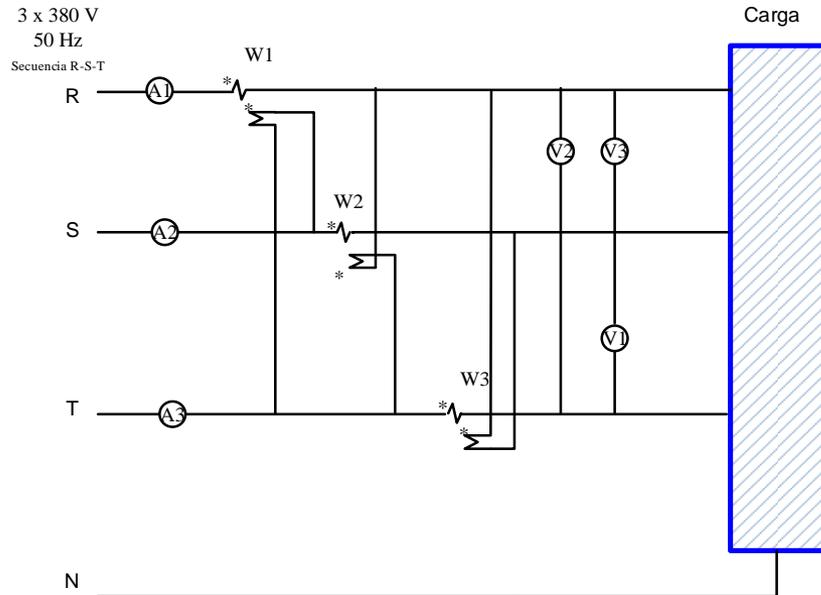
$$E_{Q_{\text{total}}} = \frac{1}{\sqrt{3}} (E_{P1} + E_{P2} + E_{P3}) = \frac{1}{\sqrt{3}} 3 E_P$$

$$E_P = \frac{1}{100} 1,5 \cdot 5 \text{ A} \cdot 380 \text{ V} = \pm 28,5 \text{ W}$$

$$E_{Q_{\text{total}}} = \pm 0,05 \text{ kVAR}$$

$$Q_{\text{total}} = (0,65 \pm 0,05) \text{ kVAR}$$

Ejemplo.



W: C 1,5; 5 A; 380 V $\cos\phi_N=1$

Lecturas:

$$P_{R(ST)} = 0,80 \text{ kW}$$

$$P_{S(TR)} = -0,44 \text{ kW}$$

$$P_{T(RS)} = 0,76 \text{ W}$$

$$Q_{\text{total}} = \frac{1}{\sqrt{3}} (0,80 - 0,44 + 0,76) = 0,647 \text{ kVAR (inductivo)}$$

$$E_{Q_{\text{total}}} = \frac{1}{\sqrt{3}} (E_{P1} + E_{P2} + E_{P3}) = \frac{1}{\sqrt{3}} 3 E_P$$

$$E_P = \frac{1}{100} 1,5 \cdot 5 \text{ A} \cdot 380 \text{ V} = \pm 28,5 \text{ W}$$

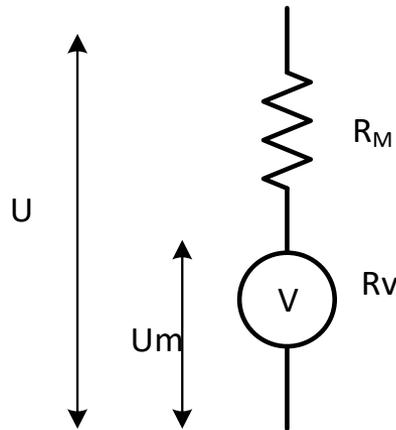
$$E_{Q_{\text{total}}} = \pm 0,05 \text{ kVAR}$$

$$Q_{\text{total}} = (0,65 \pm 0,05) \text{ kVAR}$$

Nota consumo propio

Transformadores de medida.

Cambio de alcance en sistemas de potencia. Algunos ejemplos

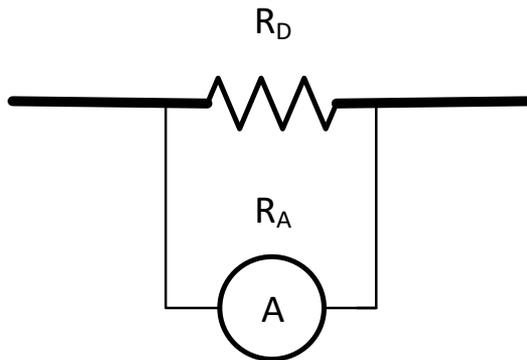


En alterna, la relación de impedancias depende de la frecuencia

En media o alta tensión no se puede lograr seguridad para el operador

Transformadores de medida.

Cambio de alcance en sistemas de potencia. Algunos ejemplos



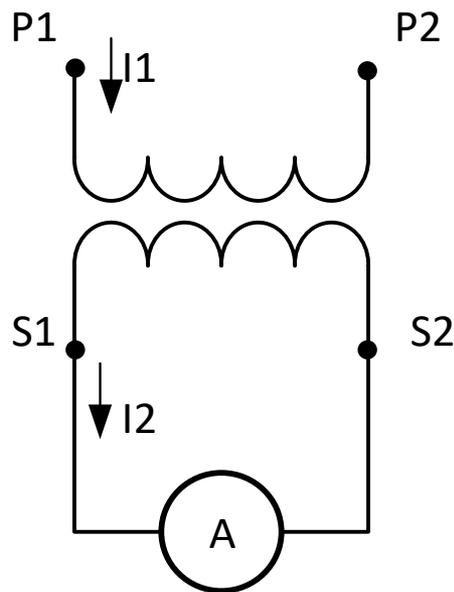
Situación análoga se da con cambios de alcance en amperímetros:

En media o alta tensión no se puede lograr seguridad para el operador

Para corrientes altas, hay mucha potencia involucrada en el derivador. Dificultades para intercalar protecciones u otros elementos de medida

Transformadores de corriente (TA)

Destinado al cambio de alcance de corriente



Especificaciones:

Relación de transformación $K_1 = I_1/I_2$

I_2 coincide con los alcances estándares de los instrumentos a conectar (1 A, 5 A)

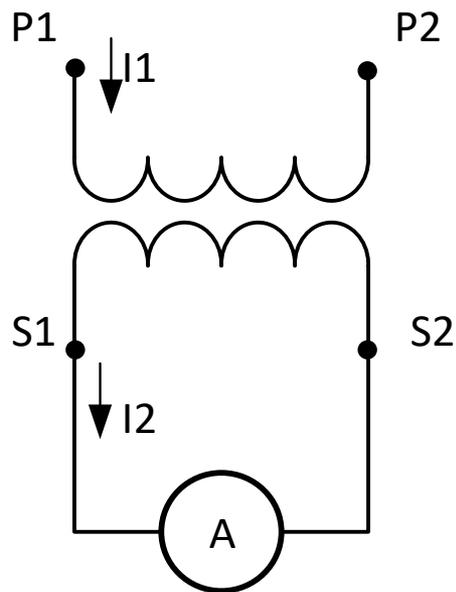
S_n : Prestación nominal

Aislación

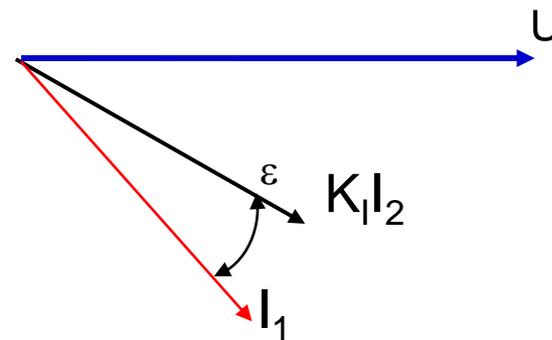
P1 P2 (S1 S2) puntos homólogos:
Corrientes entrantes por P1 son salientes por S1

Transformadores de corriente (TA)

Medición de corriente



$$I_1 = K_1 I_2$$



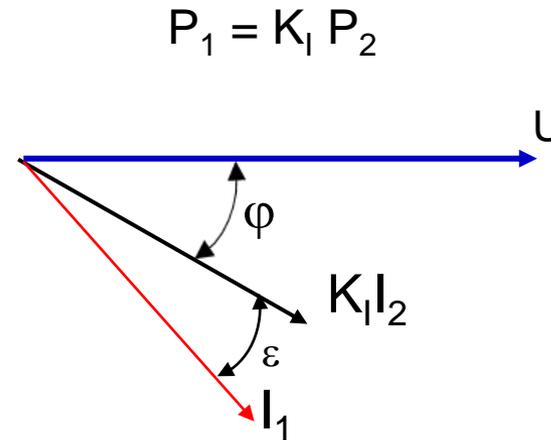
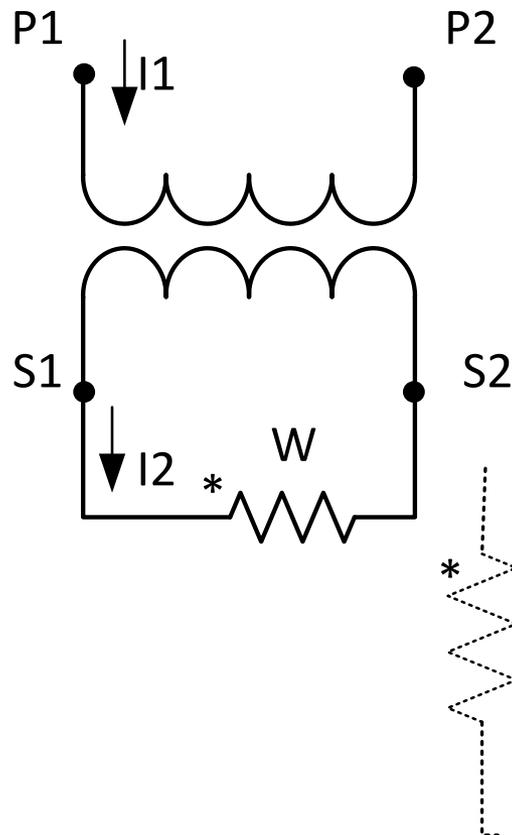
$$e_{I1} = \pm(\eta + e_{I2})$$

η : Error de relación

ε : Diferencia angular (de fase)

Transformadores de corriente (TA)

Medición de potencia (magnitud sensible a la fase). La diferencia angular ε se traduce en un error adicional: error de fase



$$e_{I1} = \pm(\eta + e_{P2} + \varepsilon \operatorname{tg}\varphi)$$

η : Error de relación

$\varepsilon \operatorname{tg}\varphi$: Error de fase

Transformadores de corriente (TA) - Errores

Se agrupan por clase de exactitud. Para cada clase se indican los errores de relación y fase (η , ε) en función de la corriente primaria para la condición de uso.

Tabla 7.I: Errores de relación y fase para transformadores de corriente clases 0,1 a 1

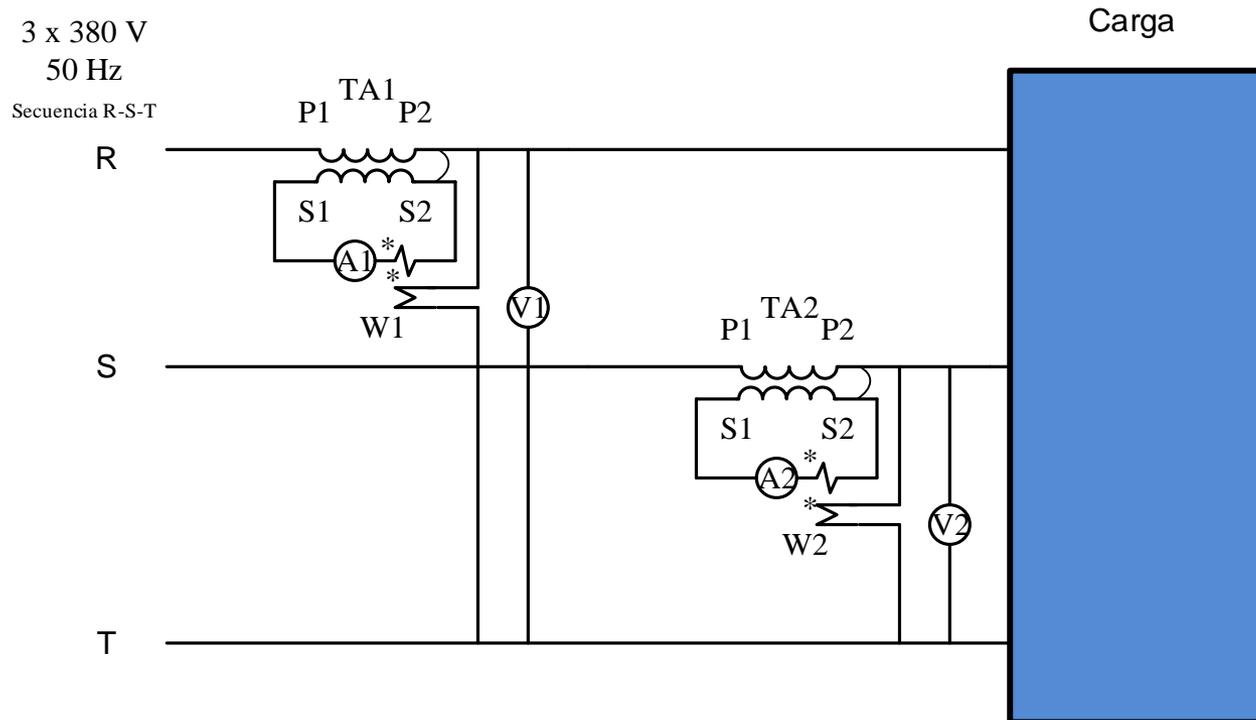
Clase	\pm Error de relación a distintos porcentajes I_n				\pm Error de fase a distintos porcentajes I_n							
					[minutos]				[centirradiares]			
	5	20	100	120	5	20	100	120	5	20	100	120
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5	0,45	0,24	0,15	0,15
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9
1	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60	5,4	2,7	1,8	1,8

La tabla vale para TA cuya prestación esté comprendida entre el 25% y 100% de la nominal.

Laboratorio: Medición de una carga trifásica trifilar, $I > 5$

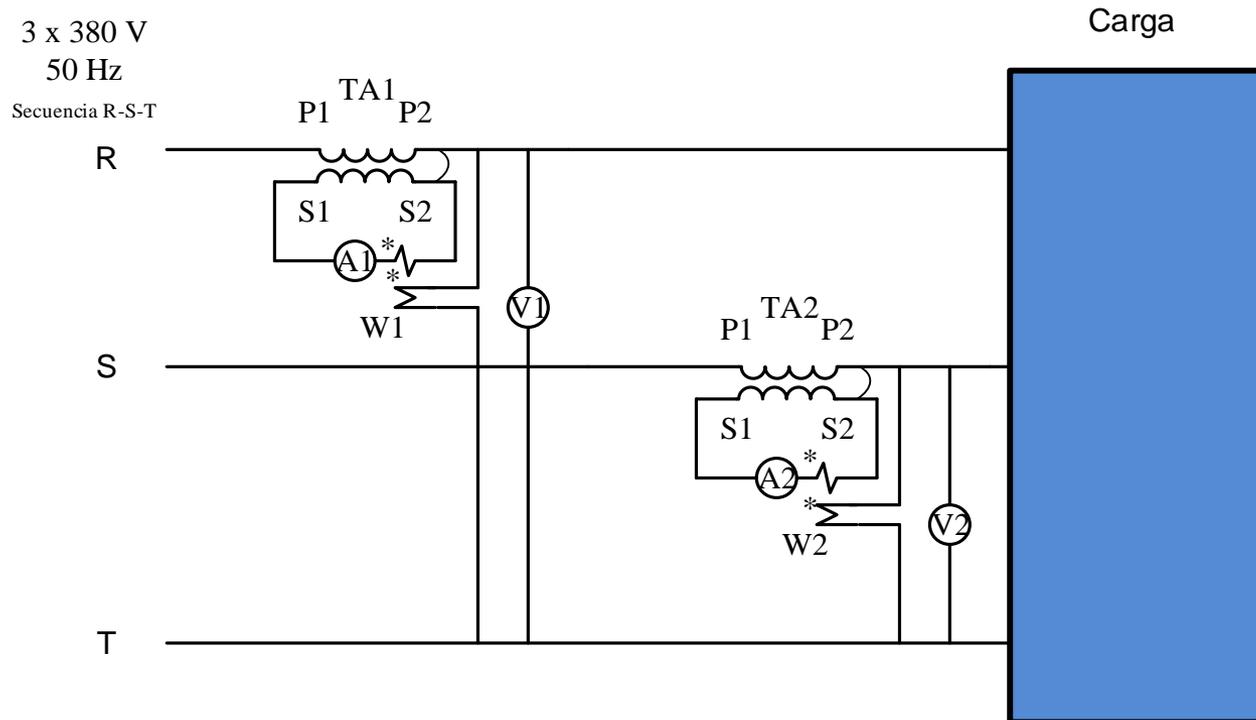
Teorema de Blondel: Uso dos vatímetros conectados a un hilo común.

Corriente > 5 A: Uso TA



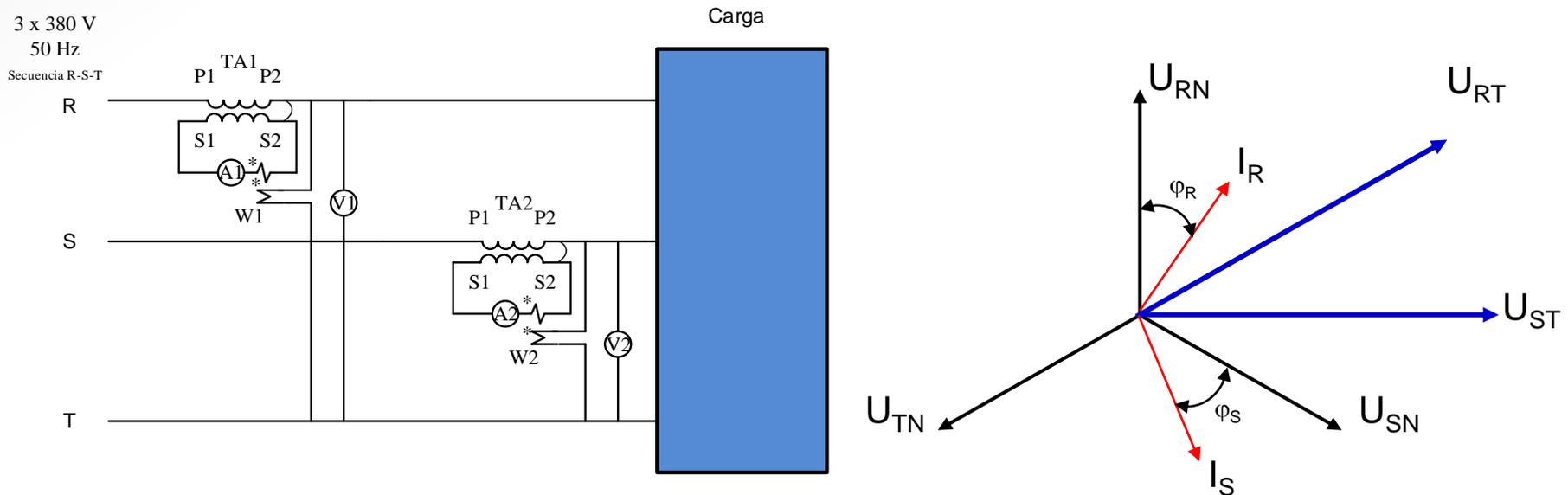
Laboratorio: Medición de una carga trifásica trifilar, $I > 5$

$$P_{\text{total}} = P_{R(RT)} + P_{S(ST)}$$



Laboratorio: Medición de una carga trifásica trifilar, $I > 5$

$$P_{\text{total}} = P_{R(RT)} + P_{S(ST)}$$



$$P_{\text{total}} = I_R U_{(RT)} \cos \varphi_{R(RT)} + I_S U_{(ST)} \cos \varphi_{S(ST)}$$

Notar que:

si $\varphi_{R(RT)}$ ó $\varphi_{S(ST)} > 90^\circ$ \Rightarrow

la indicación será negativa
(o tenderá a serlo , en analógicos)

Lecturas para un estado de carga.

$$P_{2RRT} = 1,20 \text{ kW} \quad I_{2R} = 3,50 \text{ A}$$

$$P_{2SST} = 0,20 \text{ kW} \quad I_{2S} = 3,50 \text{ A}$$

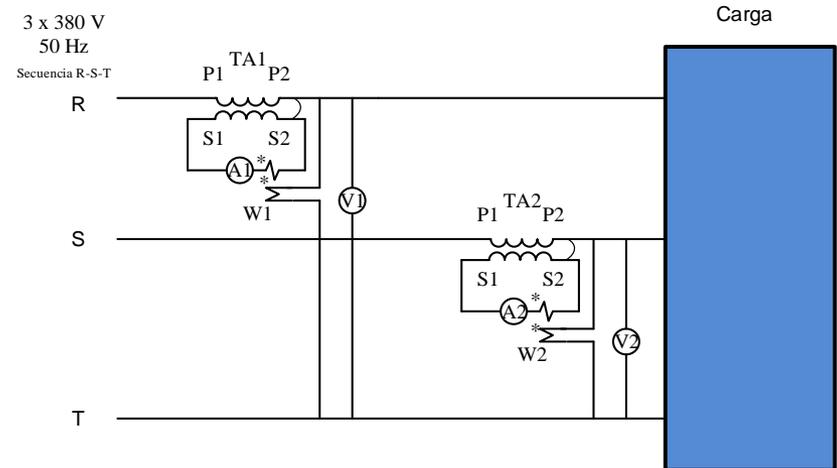
$$U_{RT} = U_{ST} = 380 \text{ V}$$

$$\text{TA: } K_I = 15/5 \quad c = 0,5 \quad \text{SN} = 10 \text{ VA}$$

$$\text{A: } I_{lc} = 5 \text{ A} \quad c = 1,5 \quad Z_A = 1 \text{ VA a } 5 \text{ A } \cos\phi = 0,8$$

$$\text{W: } 5 \text{ A, } 380 \text{ V} \quad c = 1,5 \quad Z_a = (0,13\Omega + j(314 \text{ s}^{-1} \cdot 0,14\text{mHy}))$$

$$\text{V: } I_{lc} \text{ 250/400 V} \quad c = 1,5$$



Valores finales y errores

$$P_{RRT} = 3 \times 1,20 \text{ kW} = 3,60 \text{ kW}$$

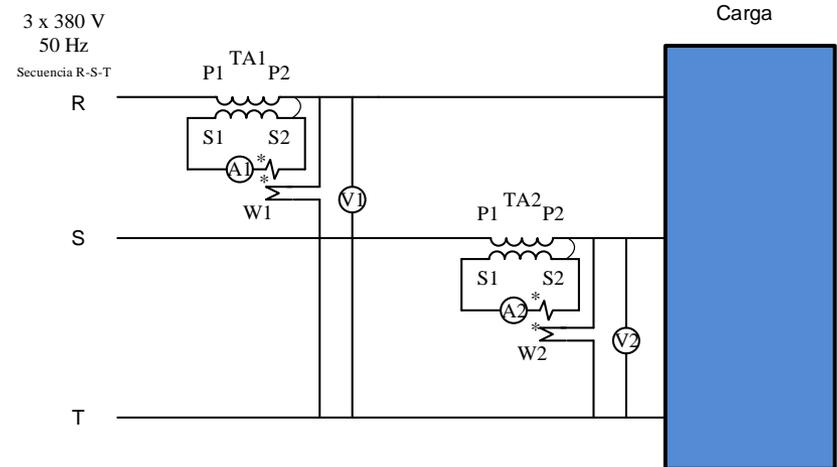
$$P_{SST} = 3 \times 0,20 \text{ kW} = 0,60 \text{ kW}$$

$$P_{\text{total}} = 3,60 \text{ kW} + 0,60 \text{ kW} = 4,20 \text{ kW}$$

$$E_{P_{\text{total}}} = E_{P_{R(RT)}} + E_{P_{S(ST)}}$$

$$e_{P_{R(RT)}} = \pm(\eta_{TA1} + e_{P2R(RT)} + \varepsilon \operatorname{tg}\varphi_{R(RT)})$$

$$e_{P_{S(ST)}} = \pm(\eta_{TA2} + e_{P2S(ST)} + \varepsilon \operatorname{tg}\varphi_{S(ST)})$$



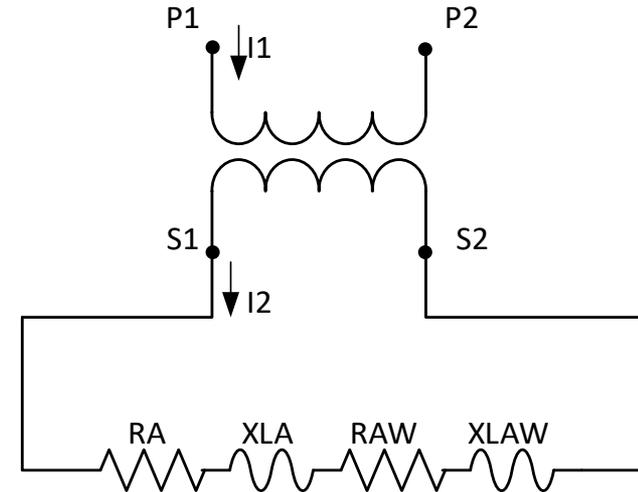
Errores del TA

Verifico la prestación a I nominal

Vatímetro: $Z = (0,13 + j 0,044) \Omega$

Amperímetro: $S = (0,8 \text{ W} + j 0,6 \text{ VAR})$

No hay potencia disipada en cables



$$S = (25 \text{ A}^2 0,13 \Omega + 0,8 \text{ W}) + j (25 \text{ A}^2 0,044 \Omega + 0,6 \text{ VAR})$$

$$|S| = 4,4 \text{ VA}$$

$$44\% \text{ de } S_N$$

Verifica $25\% < S_N < 100\%$

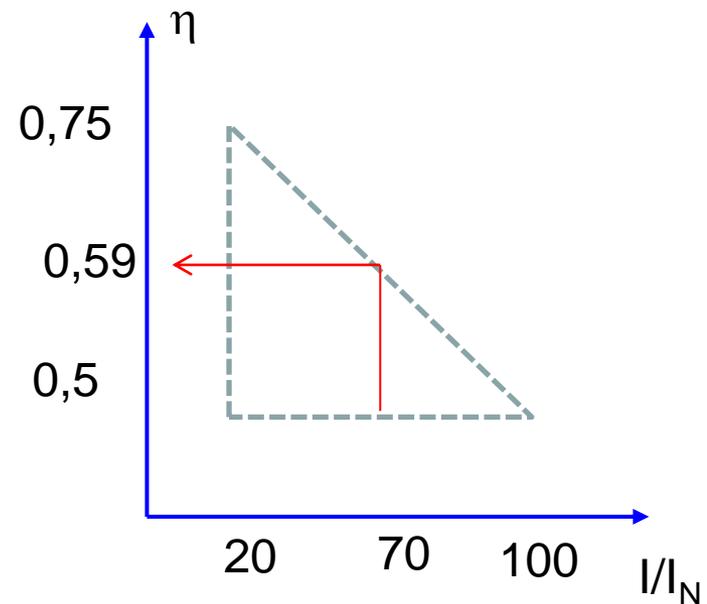
Error de relación

$$I_2 = 3,5 \text{ A}, I_{N2} = 5 \text{ A} \quad I_2/I_{N2} = 0,70$$

El transformador está cargado al 70 % de su corriente nominal y es clase 0,5

Clase	± Error de relación a distintos porcentajes I_n			
	5	20	100	120
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5
1	3,0	1,5	1,0	1,0

$$\eta = 0,59$$



En este caso el cálculo es el mismo para ambos TA, ya que tienen la misma corriente (no siempre será así)

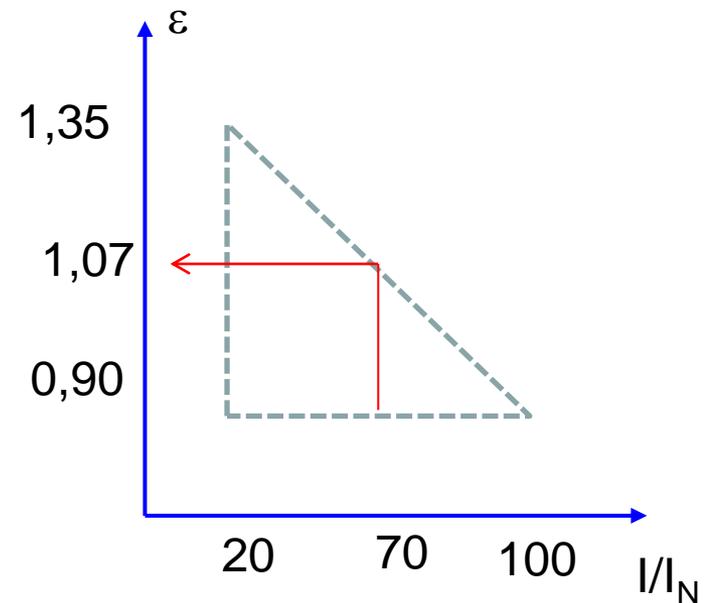
Error de fase

$$I_2 = 3,5 \text{ A}, I_{N2} = 5 \text{ A} \quad I_2/I_{N2} = 0,70$$

El transformador está cargado al 70 % de su corriente nominal y es clase 0,5

Clase	distintos porcentajes I_n			
	[centirradiaes]			
	5	20	100	120
0,1	0,45	0,24	0,15	0,15
0,2	0,9	0,45	0,3	0,3
0,5	2,7	1,35	0,9	0,9
1	5,4	2,7	1,8	1,8

$$\varepsilon = 1,07$$



Al igual que para el error de relación, el cálculo es el mismo para ambos TA, ya que tienen la misma corriente (no siempre será así)

Ángulo para el error de fase

$$P_{R(RT)} = I_R U_{(RT)} \cos \varphi_{R(RT)}$$

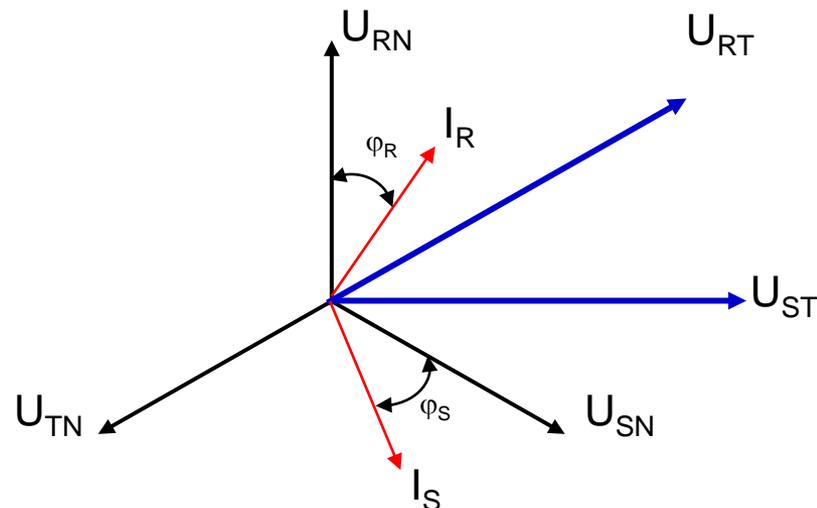
$$\cos \varphi_{R(RT)} = P_{R(RT)} / I_R U_{(RT)} = 0,90$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{R(RT)} = 0,48$$

$$P_{S(ST)} = I_S U_{(ST)} \cos \varphi_{S(ST)}$$

$$\cos \varphi_{S(ST)} = P_{S(ST)} / I_S U_{(ST)} = 0,90$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{S(ST)} = 6,6$$



Error de los vatímetros (secundario)

$$e_{P2R(RT)} = c I_N U_N \cos\phi_N / P_{med}$$

$$e_{P2R(RT)} = 1,5 \cdot 5 \text{ A} \cdot 380\text{V} \cdot 1 / 1,2 \text{ kW} = \pm 2,4 \%$$

$$e_{P2S(ST)} = 1,5 \cdot 5 \text{ A} \cdot 380\text{V} \cdot 1 / 0,2 \text{ kW} = \pm 14 \%$$

Error en cada fase y total

$$e_{PR(RT)} = \pm(e_{P2R(RT)} + \eta + \varepsilon \operatorname{tg}\varphi_{RRT})$$

$$e_{PR(RT)} = \pm(2,4 + 0,59 + 1,07 \cdot 0,48) = \pm 3,5\%$$

$$e_{PS(ST)} = \pm(14 + 0,59 + 1,07 \cdot 6,6) = \pm 22\%$$

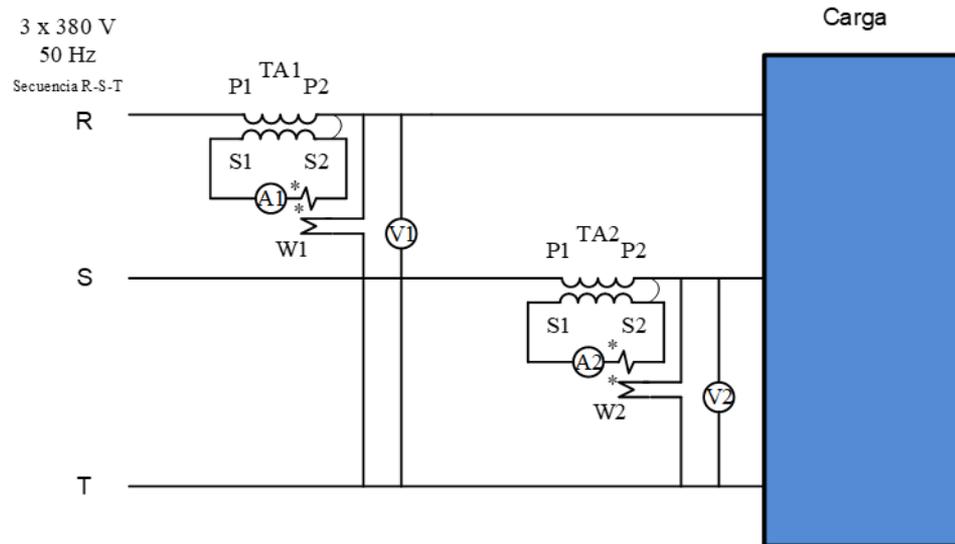
$$\begin{aligned} E_{P_{total}} &= \pm(E_{PR(RT)} + E_{PS(ST)}) = \\ &= \pm(3,5 \cdot 3,60 \text{ kW} + 22 \cdot 0,60 \text{ kW}) / 100 = \pm 0,258 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$e_{P_{total}} = \pm E_{P_{total}} / P_{total} = \pm 6,1 \%$$

Consumo propio

$$R_W = 21,2 \text{ k}\Omega \text{ (Alcance 380 V)}$$

$$R_V = 35,1 \text{ k}\Omega \text{ (Alcance 500 V)}$$



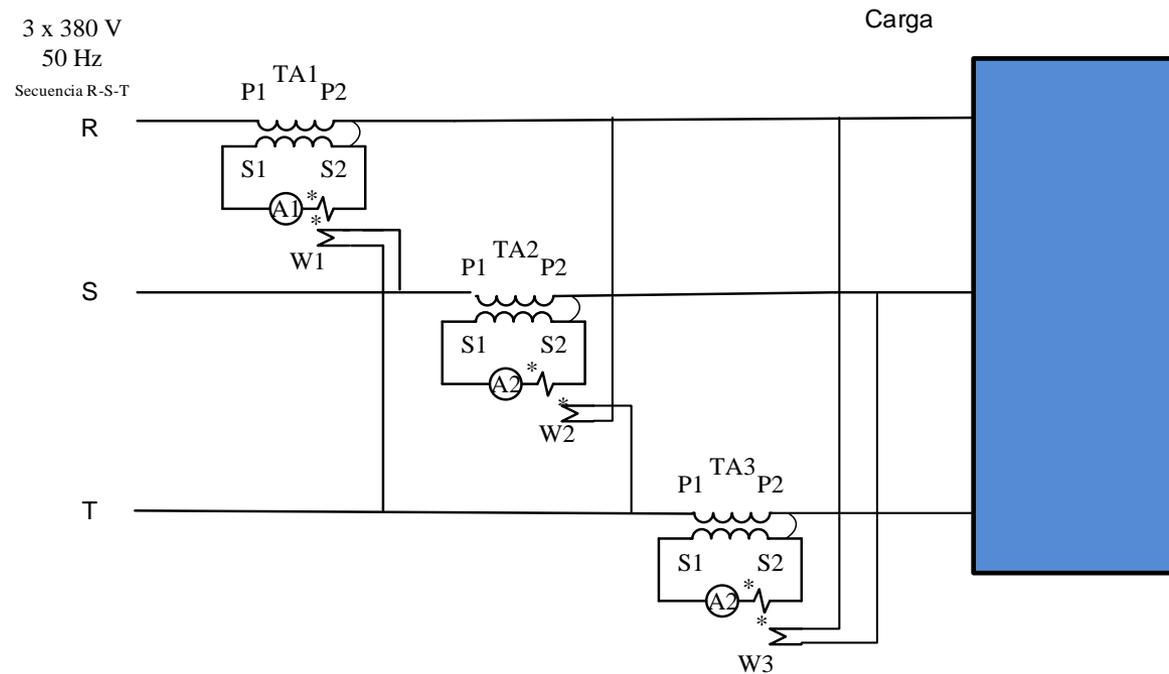
$$R_{VW} = 13,2 \text{ k}\Omega$$

$$P_{VW} = 380^2 / 13,2 \text{ k}\Omega = 10,9 \text{ W}$$

$$2P_{VW} \approx 22 \text{ W} = 0,022 \text{ kW} \text{ despreciable frente a } E_{\text{ptotal}} = \pm 0,258 \text{ kW}$$

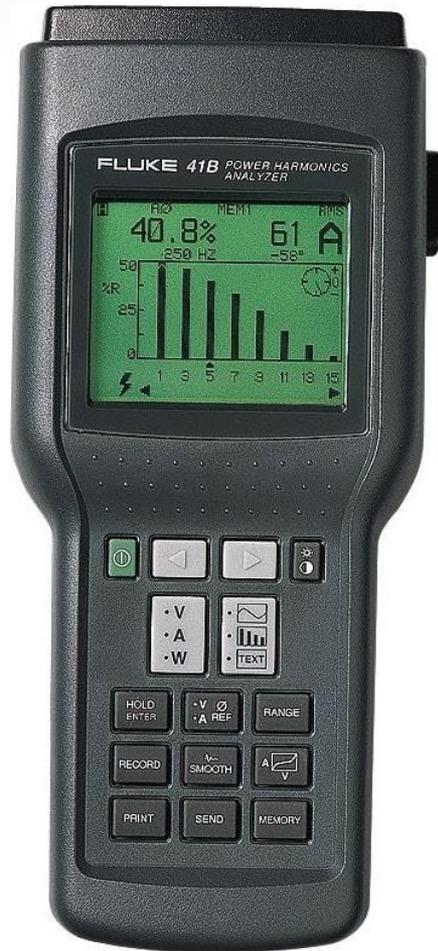
Medición de Q en trifilares

Vale lo ya explicado: mido la tensión que está a 90° de la corriente.



Este método no usa el teorema de Blondel

Caracterización de Z con analizador digital

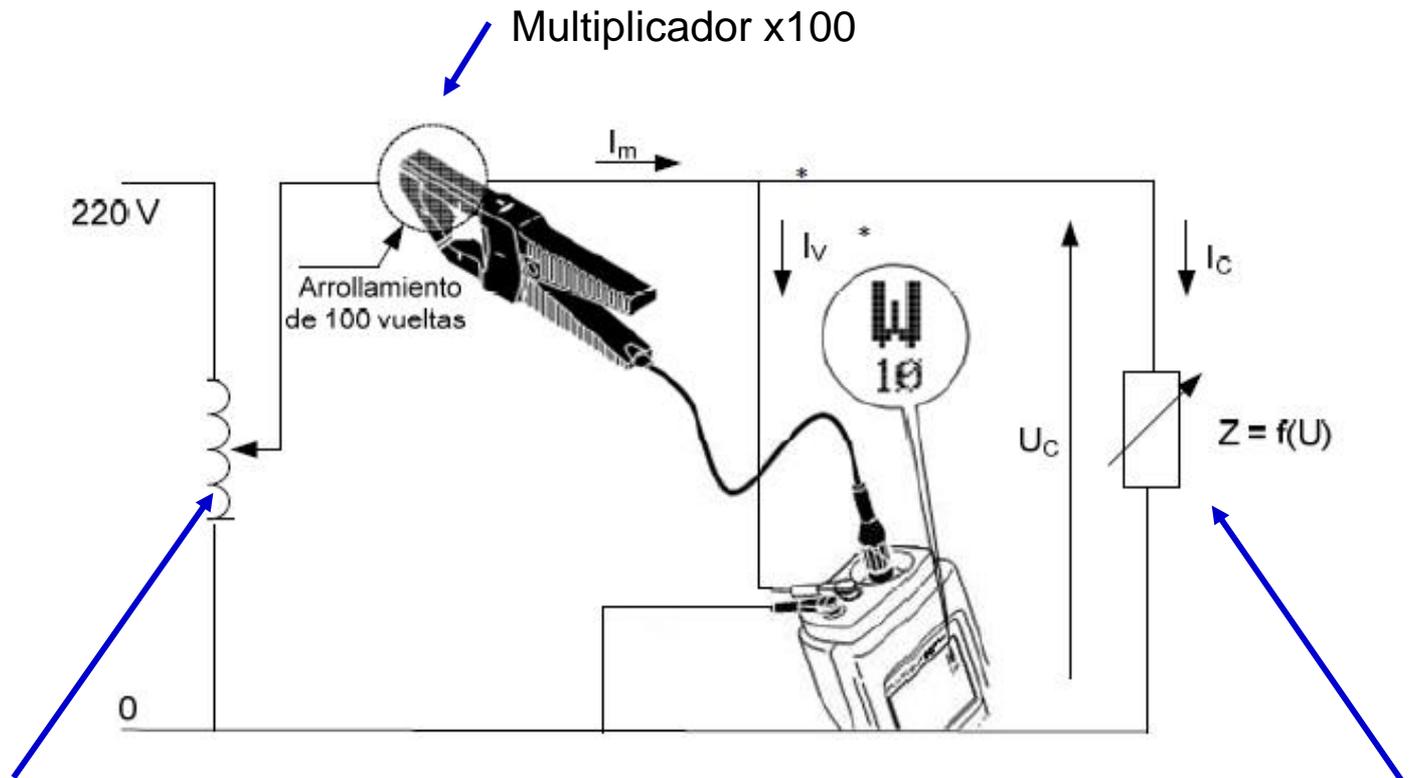


FLUKE.

Fluke 39/41B
Power Harmonics Tester

Users Manual

Caracterización de Z con analizador digital



Autotransformador variable

Elemento a medir (Z): Primario de un transformador toroidal

Caracterización de Z con analizador digital

Valores medidos

$$U_m = 220 \text{ V}$$

$$I_m = 30,0 \text{ A (0,30 A)}$$

$$P_m = 4,40 \text{ kW (44,0 W)}$$

$$S_m = 6,62 \text{ kVA (66,2 VA)}$$

$$Q_m = 4,70 \text{ kVAR (47,0 VAR)}$$

$$P_f = 0,66$$

$$Z_{eq} = U_m / I_m = 733 \ \Omega$$

$$R_{eq} = Z_{eq} \cdot P_f = 484 \ \Omega$$

$$X_{eq} = Z_{eq} \sqrt{1 - P_f^2} = 551 \ \Omega$$

Caracterización de Z con analizador digital

Errores

$$e_{U_m} = \pm(0,5\% U_m + 2 \text{ dig}) = \pm 1,4 \%$$

$$e_{I_m} = \pm(0,5\% I_m + 3 \text{ dig}) = \pm 1,5 \%$$

$$e_{\text{pinza}} = \pm 5\% (\text{Relación}) \longrightarrow e_{I_m} = \pm 6,5\%$$

$$e_{Z_{eq}} = \pm 7,9\%$$

Error del factor de potencia fp

$$E_{fp} = \pm 0,02$$

$$\cos\varphi = 0,66 \quad \text{tg}\varphi = 1,14$$

$$E_{\text{pinza}} = \pm 3^\circ (\text{fase})$$

$$e_{fp \text{ total}} = \pm(e_{fp} + \varepsilon \text{tg}\varphi)$$

$$e_{fp \text{ total}} = \pm(0,02 \cdot 100/0,66 + 3^\circ \pi \cdot 100/180 \text{tg}\varphi)$$

$$e_{fp \text{ total}} = \pm 9 \%$$

Caracterización de Z con analizador digital

Errores

$$R_{eq} = Z_{eq} \text{ fp} = 484 \, \Omega$$

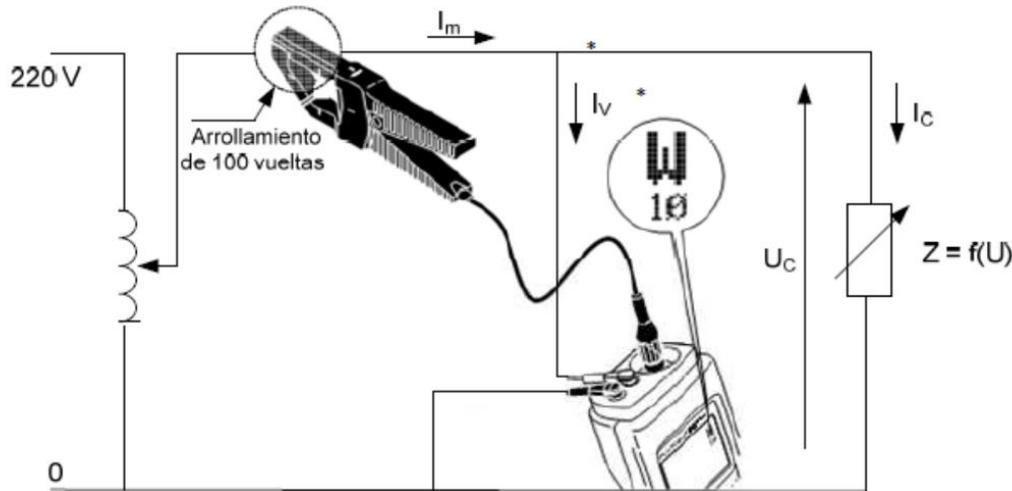
$$e_{R_{eq}} = \pm(e_{Z_{eq}} + e_{\text{fp}}) = \pm(8\% + 9\%) = \pm 17\%$$

$$X_{eq} = Z_{eq} \sqrt{1 - \text{fp}^2}$$

$$e_{X_{eq}} = \pm\left(e_{Z_{eq}} + \frac{\text{fp}^2}{1 - \text{fp}^2} e_{\text{fp}}\right) = \pm 15\%$$

Caracterización de Z con analizador digital

Consumo propio



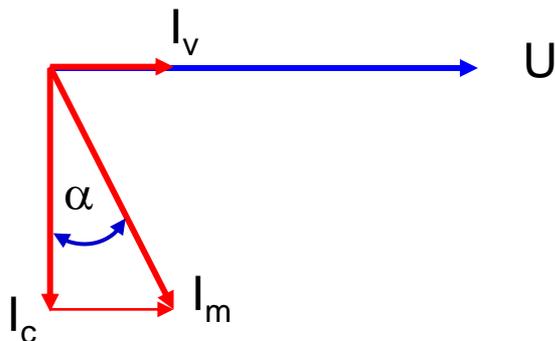
Efecto en la medición de corriente

$$I_v = \frac{220\text{ V}}{1\text{ M}\Omega} = 220\ \mu\text{A}$$

$$E_{I_m} = \pm 0,02\text{A}$$

$I_v \ll E_{I_m}$ el efecto es despreciable

Efecto en la fase

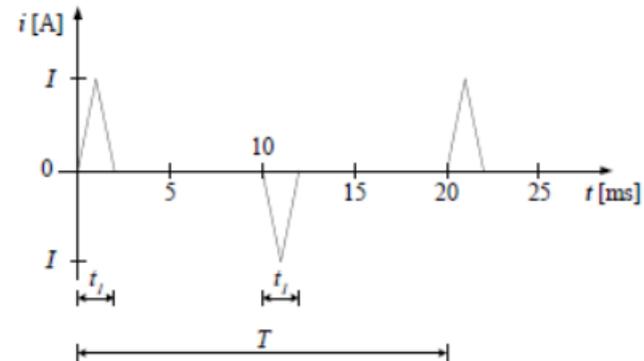
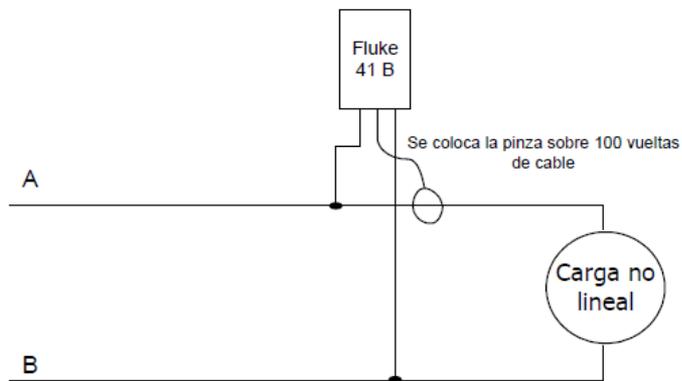


Para el caso más desfavorable

$$\text{sen } \alpha \approx \alpha = I_v / I_m = 220\ \mu\text{A} / 300\ \text{mA} = \mathbf{0,04^\circ}$$

Despreciable frente a los 3° de la pinza

Estudio de un carga no lineal



Con:

- $I \approx 1.9$ A
- $t_L \approx 2$ ms
- $T = 20$ ms