

Comportamiento de un medidor de energía eléctrica monofásico diseñado para una red eléctrica con tensión 120 V / 240 V a tres hilos.

Rubén Neris, Yorebil Montero, Delio Siret, Joel Frías.

I. Introducción.

Los medidores de energía eléctrica son el instrumento usado para la medición de la energía eléctrica servida a los hogares y la industria por las distribuidoras de electricidad. Sus resultados se utilizan para determinar el costo de la energía consumida, y, por tanto, se debe asegurar que su diseño y funcionamiento sea lo suficientemente bueno para que lo que midan no sea ni más ni menos que la energía consumida.

Este análisis está enfocado en caracterizar el comportamiento de los medidores de energía eléctrica diseñados para trabajar en una red monofásica de baja tensión a tres hilos (dos potenciales a 120 V desfasados 180 grados con neutro central). El detalle más llamativo de este tipo de medidor es que posee dos circuitos de corrientes, pero solo un circuito de tensión, lo cual impide que cumpla con el teorema de Blondel, que básicamente dice que el medidor debe tener las mismas cantidades de circuitos de corriente y tensión. Esta falencia lo hace muy vulnerable ante los desbalances de tensión y corriente que pudieran existir en el entorno donde es instalado, debilidad que puede provocar funcionamiento inadecuado, y que genera mediciones incorrectas.

De acuerdo a la Ley Dominicana de Electricidad, las normas IEC y ANSI son las referencias para la selección de medidores de energía eléctrica que pueden usarse en las transacciones de compra y venta de energía en nuestro país. La IEC no contempla los medidores para red BT monofásica a tres hilos. La norma ANSI sí lo contempla. Atendiendo a su forma de conexión los clasifica en 2S y 2A.

Sin embargo, la norma ANSI también aclara que este tipo de medidor debe usarse solo cuando se asegure que las tensiones estén balanceadas dentro de un límite "aceptable". La norma no dice cuál es este límite (ANSI-C12.1 A.2.2.3).

La razón de ser de este análisis es determinar cuál es el máximo desbalance de tensión que soportan estos medidores antes de que su clase de exactitud se salga de los límites establecidos por la respectiva norma.

Se ensayaron por igual cinco modelos de medidores diferentes, teniendo en común que eran medidores con tensión a 240 V, con un solo circuito de tensión (forma 2S o 2A), diseñados para funcionar sin neutro, y con la misma clase de exactitud, 0.5. En total se hicieron 200 ensayos, todos los medidores experimentaron comportamientos similares. Con tensiones balanceadas, todos presentaron errores por debajo del 0.4%.

II. Términos usados aplicables solo al presente análisis

Tensión balanceada: se considera que las tensiones de cada potencial (línea), con respecto a neutro, de una red monofásica de tres hilos a 240 V están balanceadas cuando sus amplitudes son similares.

Nota 1: para los fines de este documento se considera que las magnitudes de tensión entre cada línea y neutro serán similares cuando el desbalance de tensión entre ambas sea menor o igual a un 4 %.

Desbalance de carga: desbalance entre las intensidades de corrientes que pasan a través de cada circuito de corriente del medidor.

Tensión desbalanceada: desbalance entre las tensiones de potencial a neutro (desbalance simétrico) para una alimentación monofásica de 3 hilos a 240 V con neutro central.

Nota 2: Para los fines de este informe, no se considera un desbalance de tensión cuando los niveles de tensión respecto al neutro de cada potencial presentan valores equidistantes con relación a la tensión nominal.

Ejemplo:

Nivel de tensión del potencial 1 = 100 V

Nivel de tensión del potencial 2 = 100 V

Sobre-registro: cuando el medidor está registrando más energía que la suministrada.

Sub-registro: cuando el medidor está registrando menos energía que la suministrada.

Trabaja fuera de lo normal: quiere decir que el error que presenta el medidor está fuera de los límites permitidos por la Ley General de Electricidad ($\pm 2.0\%$ para los medidores residenciales).

Trabaja normalmente: quiere decir que el error que presenta el medidor está dentro de los límites permitidos por la Ley General de Electricidad ($\pm 2.0\%$ para los medidores residenciales).

V_1 : tensión entre el potencial 1 y neutro.

V_2 : tensión entre el potencial 2 y neutro.

I_1 : corriente que circula por el potencial 1.

I_2 : corriente que circula por el potencial 2.

$\% \Delta V$: porcentaje desbalance de tensión.

$\% e$: porcentaje de error de lectura.

III. Planteamiento teórico

Sabemos que la fórmula para calcular el error relativo de una medición es:

$$e = \frac{P_m - P_p}{P_p} = \frac{P_m}{P_p} - 1 \quad (1.1)$$

P_m = potencia medida por el medidor

P_p = potencia medida por el patrón

Donde:

$$P_p = V_{p1} \cdot I_{p1} + V_{p2} \cdot I_{p2} \quad (1.2)$$

Tomando en cuenta que los medidores a utilizar son de un elemento y medio (forma 2S o 2A) entonces la lectura de los mismos se corresponde con la forma:

$$P_m = \frac{V_{m1} + V_{m2}}{2} (I_{m1} + I_{m2}) \quad (1.3)$$

Considerando al patrón y al medidor conectados a una misma fuente de tensión y corriente:

$$V_{p1} = V_{m1} = V_1 \quad V_{p2} = V_{m2} = V_2$$

$$I_{p1} = I_{m1} = I_1 \quad I_{p2} = I_{m2} = I_2$$

y sustituyendo las ecuaciones 1.2 y 1.3 en la 1.1 tenemos:

$$e = \frac{\frac{V_1 + V_2}{2} (I_1 + I_2)}{V_1 \cdot I_1 + V_2 \cdot I_2} - 1$$

$$e = \frac{1}{2} \frac{V_1 \cdot I_1 + V_1 \cdot I_2 + V_2 \cdot I_1 + V_2 \cdot I_2}{V_1 \cdot I_1 + V_2 \cdot I_2} - 1$$

$$e = \frac{1}{2} \left(\frac{V_1 \cdot I_1 + V_2 \cdot I_2}{V_1 \cdot I_1 + V_2 \cdot I_2} + \frac{V_1 \cdot I_2 + V_2 \cdot I_1}{V_1 \cdot I_1 + V_2 \cdot I_2} \right) - 1$$

$$e = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{V_1 \cdot I_2 + V_2 \cdot I_1}{V_1 \cdot I_1 + V_2 \cdot I_2} \right) - 1$$

$$e = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{V_1 \cdot I_2 + V_2 \cdot I_1}{V_1 \cdot I_1 + V_2 \cdot I_2} - 1$$

$$e = \frac{1}{2} \frac{V_1 \cdot I_2 + V_2 \cdot I_1}{V_1 \cdot I_1 + V_2 \cdot I_2} - \frac{1}{2}$$

$$e = \frac{1}{2} \left(\frac{V_1 \cdot I_2 + V_2 \cdot I_1}{V_1 \cdot I_1 + V_2 \cdot I_2} - 1 \right) \quad (1.4)$$

Con la expresión encontrada (2.4) veremos cuál debe ser el máximo desequilibrio de tensión de forma tal que el error de medida no sobrepase un $\pm 2\%$ (± 0.02), esto según la Ley General de Electricidad No.125-01 en su artículo 452 la cual se ampara en la norma IEC 60687 o ANSI/IEEE C12.16 y C12.10.

Por lo tanto, tenemos que:

$$|e| \leq 0.02$$

$$A) e \leq 0.02$$

$$B) e \geq -0.02$$

Analizando el caso A

$$e \leq 0.02$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{V_1 \cdot I_2 + V_2 \cdot I_1}{V_1 \cdot I_1 + V_2 \cdot I_2} - 1 \right) \leq 0.02 \quad (1.5)$$

Este análisis lo realizaremos partiendo del hecho de que I_1 tiene un valor muy pequeño en comparación con I_2 , es decir, partiendo del hecho de que tenemos un desequilibrio de carga total en la instalación.

Entonces,

$$I_1 \approx 0$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{V_1 \cdot I_2 + V_2 \cdot (0)}{V_1 \cdot (0) + V_2 \cdot I_2} - 1 \right) \leq 0.02$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{V_1 \cdot I_2}{V_2 \cdot I_2} - 1 \right) \leq 0.02$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{V_1}{V_2} - 1 \right) \leq 0.02$$

$$\frac{V_1}{V_2} - 1 \leq 0.04$$

$$\frac{V_1}{V_2} \leq 1.04 \rightarrow \Delta\%V \leq 4\% \quad (1.6)$$

Analizando el caso B

$$e \geq -0.02$$

Este análisis lo realizaremos partiendo del hecho de que I_1 tiene un valor muy pequeño en comparación con I_2 , es decir, partiendo del hecho de que tenemos un desequilibrio de carga total en la instalación.

Entonces,

$$I_1 \approx 0$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{V_1 \cdot I_2 + V_2 \cdot (0)}{V_1 \cdot (0) + V_2 \cdot I_2} - 1 \right) \geq -0.02 \quad (1.7)$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{V_1 \cdot I_2}{V_2 \cdot I_2} - 1 \right) \geq -0.02$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{V_1}{V_2} - 1 \right) \geq -0.02$$

$$\frac{V_1}{V_2} - 1 \geq -0.04$$

$$\frac{V_1}{V_2} \geq 0.96 \rightarrow \Delta\%V \geq -4\% \quad (1.8)$$

Interpretación de los resultados:

En los dos casos anteriormente analizados (resultados 2.6 y 2.8) el desequilibrio de tensión que debe haber de forma tal que el error de medida no sobrepase el $\pm 2\%$ debe ser $|\Delta\%V| \leq 4\%$. Asegurando esta condición, se puede garantizar que el usuario conectado al servicio no sea capaz de hacer ninguna alteración en la medición mediante la manipulación del desbalance de carga. En ese sentido la responsabilidad de que el medidor opere en las condiciones adecuadas de desequilibrio de tensión dependerá exclusivamente del proveedor del servicio de electricidad.

IV. Ensayos:

Ensayo 1: Tensiones balanceadas, intensidades de corrientes desbalanceadas.

Este ensayo consistió en energizar el medidor con una tensión de 240 V entre potenciales, con tensiones balanceadas.

Interpretación de los resultados: el medidor trabajó normalmente, sin importar el desbalance de carga a que fue sometido (ver tabla 1 y figura 1).

Tabla 1. Comportamiento del medidor (V en voltios, I en amperes)						
	V1	V2	% ΔV	I1	I2	% e
Tensiones balanceadas, corrientes desbalanceadas	120	120	0	0	2	-0.32
	120	120	0	3	3	-0.23
	100	100	0	1	10	-0.35
	112	112	0	8	4	-0.18

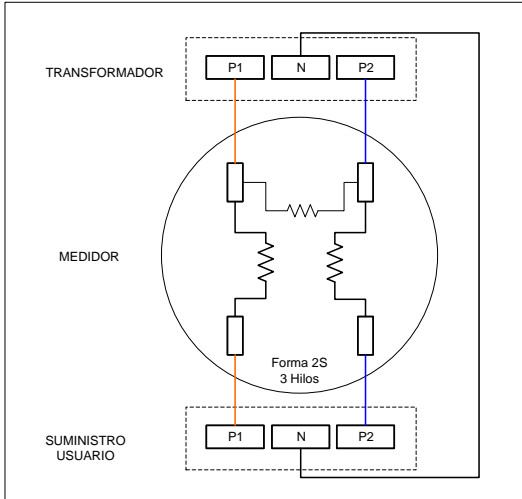


Figura 1.

Ensayo 2: conexión del medidor a un solo potencial, dejando el otro potencial sin conexión.

En este ensayo se conectó el medidor a un solo potencial, conforme se muestra en la figura 2 (en el otro terminal sin ninguna conexión).

Esta conexión podría permitir que el usuario se esté alimentando del potencial energizado y neutro. (Ver figura.2).

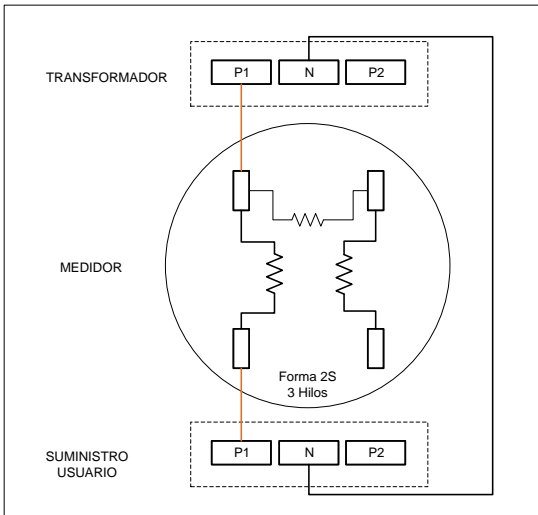


Figura 2.

Interpretación de los resultados: el medidor no registró la energía suministrada, no obstante, la corriente circula por la línea conectada, lo que virtualmente representa un sub-registro de un 100% de la energía suministrada bajo estas condiciones.

Ensayo 3: cargas balanceadas, tensiones desbalanceadas

En este ensayo se sometió el medidor a cargas balanceadas, y a tensiones desbalanceadas respecto al neutro.

Interpretación de los resultados: el medidor trabajó normalmente, sin importar el desbalance de tensiones (ver figura 3 y tabla 2).

Tabla 2. Comportamiento del medidor (V en voltios, I en Amperes)

	V1	V2	%ΔV	I1	I2	%e
Tensiones desbalanceadas	100	115	15 %	2	2	-0.25
	110	100	9 %	5	5	-0.12
Corrientes balanceadas	105	120	14 %	10	10	-0.33

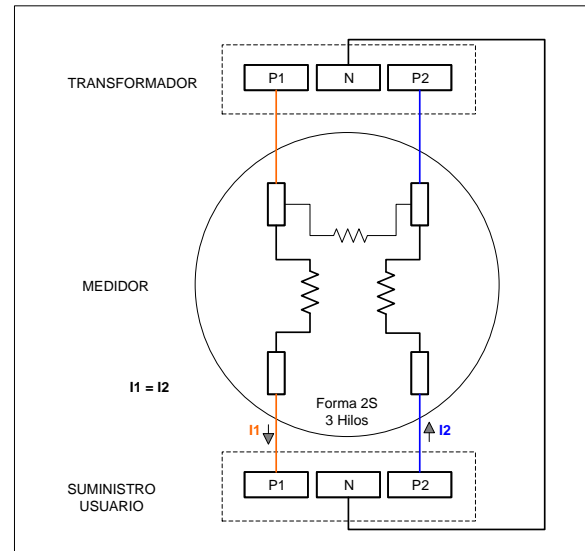


Figura 3.

Ensayo 4: conexión del medidor a una tensión de potencial a neutro.

En este ensayo se energizó el medidor con valores de tensión cercanos a 120 V (que es la tensión nominal de potencial- neutro) conectando uno de sus terminales a neutro.

Interpretación de los resultados: el medidor presentó un sub-registro de aproximadamente un -50 % (ver fig. 4 y tabla 3).

Tabla 3. Comportamiento del medidor (V en voltios, I en Amperes)

	V1	V2	% ΔV	I1	I2	% e
Medidor conectado a una sola línea de alimentación	0	132	100 %	0	10	-49.50
	0	120	100 %	0	2	-48.99
	110	0	100 %	1.3	0	-50.07

Ensayo 6: medidor sometido a tensiones y cargas desbalanceadas al mismo tiempo.

En este ensayo se energizó el medidor con tensiones desbalanceadas entre potenciales, y cargas desbalanceadas simultáneamente. En todos los casos en que combinamos los valores, el medidor presentó errores fuera de lo normal, tanto de sub-registro como de sobre registro.

Interpretación de los resultados:

Si la línea que tiene mayor potencial coincide con la línea sometida a mayor carga, el medidor presenta sub-registro. Los casos más críticos de sub-registro con desbalance de tensión, ocurrieron cuando se utilizó sólo una de las líneas de carga, (la que coincidía con el mayor potencial), y por la otra línea no pasaba ninguna corriente, siempre para desbalances de tensión superiores al $\pm 4\%$ (Fig. 6, tabla 5 y 6).

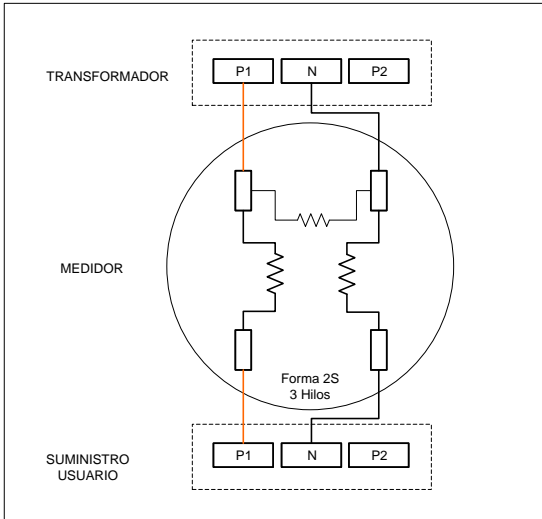


Figura 4.

Ensayo 5: medidor sometido a bajas tensiones, pero balanceadas.

En este ensayo se energizó el medidor y funcionó normalmente con valores de tensión hasta los 56 V (de potencial- neutro).

Interpretación de los resultados: el medidor no se ve afectado cuando es se conecta a sistemas con tensiones por debajo de su valor nominal, siempre que las tensiones estén balanceadas. Se pudo verificar un funcionamiento correcto hasta los 56 V. Para tensiones por debajo el medidor se apaga.

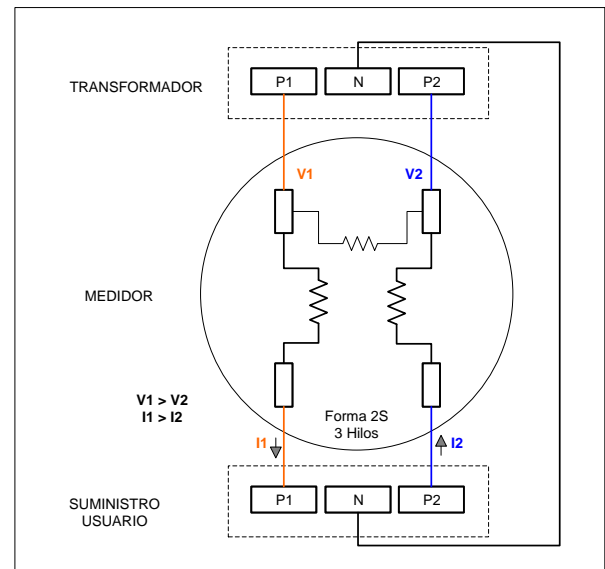


Figura 6.

		V ₁	V ₂	% ΔV	I ₁	I ₂	% e
Desbalance de tensión	Por la línea de menor potencial pasa la mayor corriente	115	120	4 %	12	2	1.54
		110	120	9 %	12	2	3.21
		100	120	20 %	12	2	6.94
		100	125	25 %	12	2	8.62
Desbalance de corriente	Por la línea de mayor potencial pasa la mayor corriente	120	115	4 %	12	2	-1.50
		120	110	8 %	12	2	-3.01
		120	100	17 %	12	2	-6.10
		125	100	20 %	12	2	-7.35

V₁ = tensión entre el potencial 1 y neutro
 V₂ = tensión entre el potencial 2 y neutro
 I₁ = corriente que circula por el potencial 1
 I₂ = corriente que circula por el potencial 2
 % ΔV = porcentaje desbalance de tensión
 % e = porcentaje de error de lectura

Nivel de tensión mínima por línea a la que el medidor funciona correctamente	V ₁	V ₂	% ΔV	I ₁	I ₂	% e
56	56	0 %	0	10	-0.43	
56	56	0 %	1	6	-0.38	

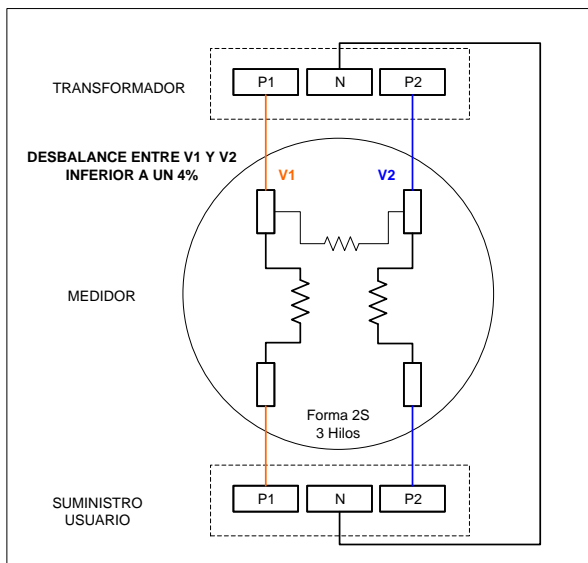


Figura 5.

Si la línea que tiene mayor potencial coincide con la línea sometida a menor carga, el medidor presenta un sobre registro. Los casos más críticos de sobre registro con desbalance de tensión ocurren cuando se utiliza sólo una de las líneas de carga, la que coincide con el menor potencial, y por consiguiente por la otra línea no pasa ninguna corriente, siempre que el desbalance de tensión supere el $\pm 4\%$. (Fig. 7, tablas 5 y 6).

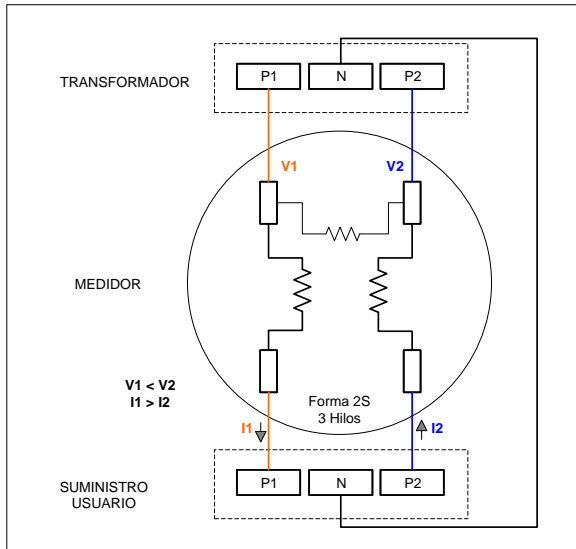


Figura 7.

V. Conclusiones.

Al usar este tipo de medidores debe tenerse en cuenta su limitación de funcionamiento, que implica que solo funcionan en condiciones adecuadas cuando son sometidos a un sistema con tensiones balanceadas (de acuerdo a nuestro estudio, el desbalance debe ser menor que un 4%), conforme a lo descrito en los puntos **A.2.1.2**, **A.2.2.3** de la norma **ANSI C12.1**, norma que establece las especificaciones técnicas de estos medidores.

En caso de que no se pueda garantizar las condiciones de balance de tensión, recomendamos la utilización de medidores de energía eléctrica monofásicos de 3 hilos con dos elementos de medida, cada elemento con un circuito de tensión y uno de intensidad. El circuito de tensión de cada elemento de medida debe estar conectado entre el neutro y el potencial correspondiente, de conformidad con lo establecido en la norma **IEC-62053-52**, tabla 1, numeral **4.3**. También se puede consultar la norma **ANSI C12.1-2**, literales **A.1.5.1** y **A.2.4.1**, donde los medidores cuyas configuraciones están de acuerdo con lo descrito son los forma 12S, 25S y 13A.

Tabla 7. COMPORTAMIENTO DEL MEDIDOR (V en voltios, I en Amperes)							
		V1	V2	% ΔV	I1	I2	% e
Desbalance de tensión	Por la línea de menor potencial pasa la mayor corriente	108	118	9%	12	10	0.40
		108	118	9%	12	6	1.50
		108	118	9%	12	2	3.26
		108	118	9%	12	0.5	4.24
		108	118	9%	12	0	4.63
Desbalance de corriente	Por la línea de mayor potencial pasa la mayor corriente	118	108	8%	12	10	-0.40
		118	108	8%	12	6	-1.45
		118	108	8%	12	2	-3.06
		118	108	8%	12	0.5	-3.91
		118	108	8%	12	0	-4.24

V1 = tensión entre el potencial 1 y neutro
 V2 = tensión entre el potencial 2 y neutro
 I1 = corriente que circula por el potencial 1
 I2 = corriente que circula por el potencial 2
 % ΔV = porcentaje desbalance de tensión
 % e = porcentaje de error de lectura

VI. Anexo.

