

CIDEL Argentina 2014
Congreso Internacional de Distribución Eléctrica

DESBALANCE EN LA TENSIÓN. MEDICIÓN EN EL ÁREA METROPOLITANA Y VERIFICACIÓN DE EQUIPOS DE REGISTRO

**Pedro E. Issouribehere ⁽¹⁾, Juan C. Barbero ⁽¹⁾, Gustavo A. Barbera ⁽¹⁾, Fernando Issouribehere ⁽¹⁾,
Hugo G. Mayer ⁽¹⁾, Pablo. D. Capechi ⁽²⁾**

(1) IITREE-LAT UNLP / (2) Alumno FI-UNLP

ARGENTINA

gbarbera@iitree-unlp.org.ar

Palabras clave

Calidad de Servicio – Definición – Desbalance – Ensayo – Equipo – Medición.

1. RESUMEN

En la Argentina, el control de la Calidad de Servicio Eléctrico que se aplica sobre las empresas distribuidoras considera tres aspectos: la Calidad del Producto Técnico (nivel de tensión, armónicas y flicker), la Calidad del Servicio Técnico (interrupciones) y la Calidad Comercial. El control de tales indicadores se lleva a cabo por medio de rigurosas campañas de medición que se realizan desde hace dos décadas.

Un parámetro que no se encuentra regulado en nuestro país, pero que debido a la sensibilidad que presentan las cargas actuales es menester evaluar, es el desbalance presente en la tensión. Justamente, por no ser un parámetro regulado, se desconoce el estado de las redes de distribución en términos de desbalance.

Por otro lado, los equipos existentes en el mercado para su evaluación, muestran que diferentes fabricantes han implementado la medición del desbalance utilizando algoritmos de cálculo basados en distintas definiciones – algunas de ellas basadas en aproximaciones – lo cual dificulta la interpretación de los resultados.

En el artículo se presenta un estudio del nivel de desbalance de tensión presente en las redes de BT del Área Metropolitana. El mismo se basa en registros reales, cada uno de ellos de una semana de duración, llevados a cabo con equipos de medición que evalúan dicho parámetro de acuerdo a lo establecido en la Normativa Internacional. Los resultados obtenidos de la campaña de medición son comparados con lo recomendado por las distintas Normas.

Conjuntamente con el análisis de los datos obtenidos de las campañas, se incluyen pruebas de laboratorio efectuadas sobre cuatro equipos comerciales de Calidad de Servicio, a los fines de determinar si la metodología de cómputo utilizada es apropiada para medir el desbalance bajo condiciones reales.

2. INTRODUCCIÓN

El desbalance de una variable trifásica es una condición en la que las tres fases presentan diferencias en el módulo y/o desplazamientos angulares entre fases distintos de 120 grados eléctricos. La variable trifásica indicada de manera genérica puede ser indistintamente, la tensión fase-neutro, la tensión de línea o la corriente de un sistema trifásico.

El método que computa correctamente el grado de desbalance de una variable trifásica es el que emplea las componentes de secuencia de esa variable, y por lo tanto requiere una medición trifásica, tanto del módulo como de la fase de la variable.

A lo largo de los años se han propuesto diferentes simplificaciones para determinar un factor de desbalance a partir de mediciones del módulo solamente. Naturalmente, la razón de esto radica en que al requerir medir sólo el módulo la complejidad del instrumento resulta menor y, en consecuencia, también su costo.

3. MARCO TEÓRICO

Diferentes definiciones del factor de desbalance

- *Componentes simétricas:*

Como se ha mencionado en la Introducción, la definición verdadera del factor de desbalance de cualquier magnitud trifásica (tensiones, corrientes u otra) corresponde a la relación entre el módulo de la componente de secuencia inversa y el correspondiente de la directa de tal magnitud trifásica.

Como ejemplo demostrativo, en caso de ser la magnitud trifásica estudiada la tensión, el factor queda:

$$K_{Componentes} (\%) = 100 \frac{U_{ai}}{U_{ad}}$$

Siendo:

U_{ad} , el módulo de la tensión de la componente de secuencia directa.

U_{ai} , el módulo de la tensión de la componente de secuencia inversa.

- IEEE

Existen distintas definiciones del desbalance de tensiones y corrientes en diferentes documentos del IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), lo cual genera confusión en cuanto a la medición de tal parámetro, debido a las interpretaciones que han hecho diferentes autores y fabricantes de instrumentos de Calidad de Servicio o Power Quality.

Una de ellas considera los valores eficaces de las componentes fundamentales del sistema trifásico. Se define como la diferencia entre el mayor y el menor valor, referida al valor medio de los tres valores eficaces. Analíticamente:

$$K_{IEEE-B}(\%) = 100 \frac{(U_{max} - U_{min})}{\frac{U_1 + U_2 + U_3}{3}}$$

Siendo:

U_{max} , el máximo valor de los módulos de las tres tensiones de las componentes fundamentales (de fase o de línea).

U_{min} , el mínimo valor de los módulos de las tres tensiones de las componentes fundamentales (de fase o de línea).

U_1 , U_2 y U_3 , los módulos de las tres tensiones de las componentes fundamentales (de fase o de línea).

Otra de las expresiones existentes en documentación de la IEEE se refiere a la máxima desviación respecto al valor medio de cada fase, referida al valor medio de las tres fases. Es decir:

$$K_{IEEE-C}(\%) = 100 \frac{\text{Max}(|U_1 - U_{med}|, |U_2 - U_{med}|, |U_3 - U_{med}|)}{U_{med}}$$

Con:

$$U_{med} = \frac{U_1 + U_2 + U_3}{3}$$

Siendo:

U_1 , U_2 y U_3 , los módulos de las tres tensiones de las componentes fundamentales (de fase o de línea).

- Pillay-Hofmann-Manyage

Propone una expresión aproximada que evita el empleo del álgebra fasorial de las componentes simétricas. La expresión es:

$$K_{PILLAY}(\%) = 82 \frac{\sqrt{U_{abm}^2 + U_{bcm}^2 + U_{cam}^2}}{\frac{1}{3}(U_{ab} + U_{bc} + U_{ca})}$$

Siendo:

U_{ab} , U_{bc} y U_{ca} , los módulos de las tres tensiones de las componentes fundamentales de línea.

U_{abm} , U_{bcm} y U_{cam} , la diferencia entre la magnitud de cada tensión de línea y el promedio de las tres.

Con:

$$U_m = \frac{U_{ab} + U_{bc} + U_{ca}}{3}$$

- IEC 61000-2-4

La Norma IEC 61000-2-4 adopta la siguiente expresión aproximada que evita el empleo del álgebra fasorial de las componentes simétricas:

$$K_{IEC61000-2-4}(\%) = 100 \sqrt{\frac{6(U_{ab}^2 + U_{bc}^2 + U_{ca}^2)}{(U_{ab} + U_{bc} + U_{ca})^2} - 2}$$

Siendo:

U_{ab} , U_{bc} y U_{ca} , los módulos de las tres tensiones de las componentes fundamentales de línea.

- CENELEC

El Comité Europeo de Normalisation Electrotechnique adopta una expresión exacta que emplea los módulos de las tensiones de las componentes fundamentales de línea para obtener el desbalance de la terna de tensiones de fase según la definición de las componentes de secuencia:

$$K_{CENELEC}(\%) = 100 \frac{\sqrt{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}}{\sqrt{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}$$

4. RESULTADOS DE LAS MEDICIONES

En este apartado se presentan resultados de mediciones del factor de desbalance en la tensión realizadas entre 2007 y 2011 en distintos centros de transformación MT/BT, más precisamente del lado de baja tensión. Para la realización de las mismas se empleó un equipo de Calidad del Servicio Eléctrico normalizado, el cual mide el factor de desbalance de manera exacta, es decir como el cociente entre la componente de secuencia inversa y la componente de secuencia directa de la tensión.

Al momento en el cual se llevaron a cabo tales mediciones, en el Área Metropolitana de Buenos Aires la distribución de energía eléctrica era llevada a cabo por tres compañías, llamadas A, B y C en el presente artículo.

En tal sentido, se realizaron 460 mediciones. Como fue mencionado previamente, la duración de cada una de ellas fue de una semana, mientras que el período de integración empleado fue de 10^7 . Por lo tanto, cada medición semanal se compone de aproximadamente 1008 períodos de 10^7 .

A manera de ejemplo, en la Fig. 1 se muestra el perfil de una medición semanal típica del factor de desbalance.

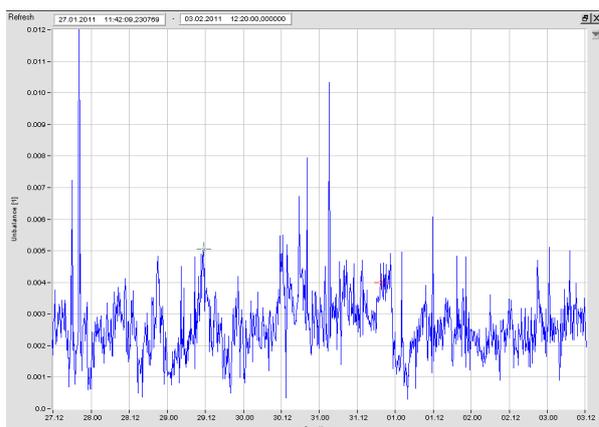


Fig. 1. Medición semanal de desbalance en la tensión.

El resumen de mediciones realizadas en cada año, según las tres distribuidoras se presenta en la Tabla I.

Tabla I. Mediciones realizadas por año en cada Distribuidora.

Año de medición	Distribuidora			Total por año
	A	B	C	
2007	40	49	48	137
2008	23	44	46	113
2009	2	66	32	100
2010	-	51	14	65
2011	-	45	-	45
Total por distribuidora	65	255	140	460
Total de registros				

A los efectos de obtener conclusiones objetivas, se llevó a cabo un procesamiento estadístico de los registros. En ese sentido, para cada medición semanal se calculó el factor de desbalance promedio (de los 1008 períodos) y el correspondiente P_{95} . Este último indica el grado de desbalance superado por sólo el 5% de los registros, por lo que representa un valor cercano al máximo semanal.

A su vez, estos dos indicadores calculados se emplearon como variables a fin de estimar los niveles de desbalance presentes en distintos conjuntos de mediciones o lotes. Por lo tanto, con el objeto de caracterizar a cada uno de los lotes estipulados en términos de nivel de desbalance, se calcularon los siguientes indicadores:

Prom_Lote: Es el promedio de los valores medios semanales de las mediciones que componen el lote.

Max_Prom_Lote: Representa el valor máximo de todos los promedios semanales que conforman el lote.

Prom_Per95_Lote: Es el promedio de todos P_{95} que conforman el lote.

Max_Per95_Lote: Es el valor máximo de todos los P_{95} semanales. Naturalmente se trata de un nivel de

desbalance cercano al máximo esperable en las redes de distribución analizadas.

Una vez definidas estas cuatro variables, se procede a mostrar los resultados obtenidos en la campaña de medición.

Distribuidora A

A partir de lo definido en el apartado previo, se presentan los resultados de la campaña de medición realizada en la red de la Distribuidora A en los años 2007, 2008 y 2009. En la Fig. 2 se muestran los indicadores **Prom** y **Prom_Per95**.

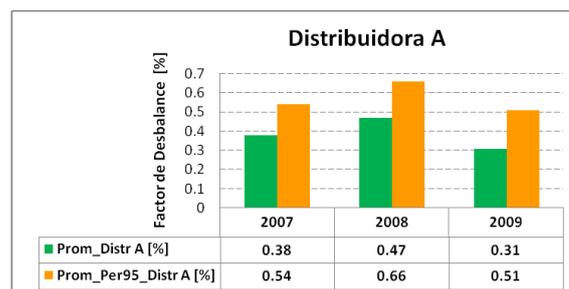


Fig. 2. Indicadores Prom y Prom_Per95 para la Distribuidora A.

En la Fig. 3 se hace lo propio con los indicadores **Max_Prom** y **Max_Per95**.

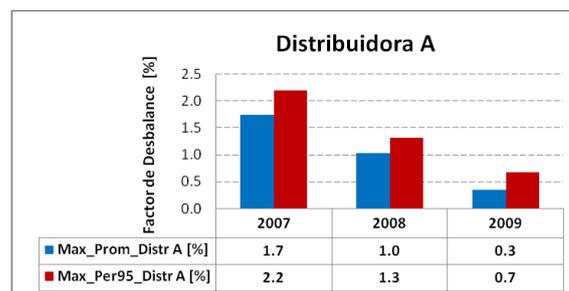


Fig. 3. Indicadores Max_Prom y Max_Per95 para la Distribuidora A.

Distribuidora B

En las Fig. 4 y 5 aparecen los resultados obtenidos en la Distribuidora B desde el año 2007 hasta el 2011.

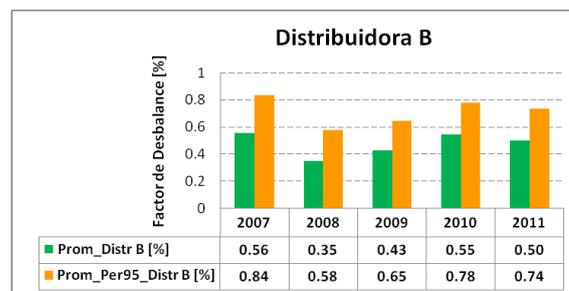


Fig. 4. Indicadores Prom y Prom_Per95 para la Distribuidora B.

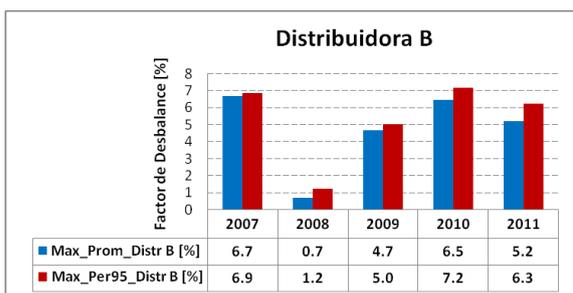


Fig. 5. Indicadores Max_Prom y Max_Per95 para la Distribuidora B.

Distribuidora C

Finalmente, los niveles de desbalance en la Distribuidora C, considerando los cuatro indicadores definidos, se muestran en las Fig. 6 y 7. Estas mediciones se llevaron a cabo entre el 2007 y el 2010.

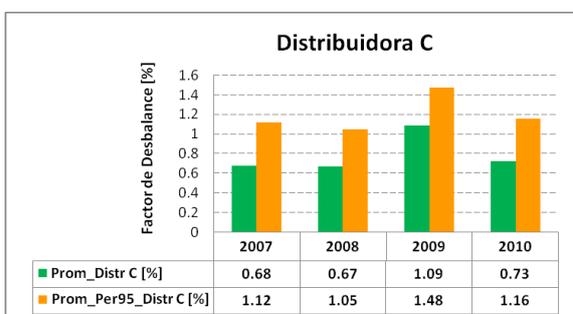


Fig. 6. Indicadores Prom y Prom_Per95 para la Distribuidora C.

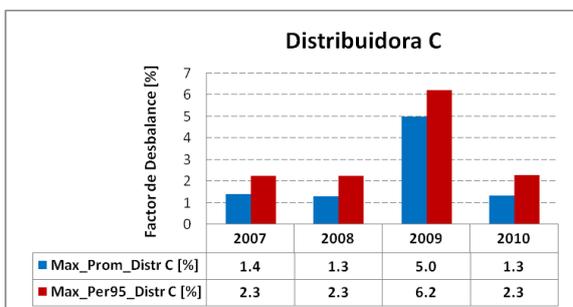


Fig. 7. Indicadores Max_Prom y Max_Per95 para la Distribuidora C.

Comparación entre Distribuidoras

A los efectos de comparar los niveles de desbalance en la tensión en las tres distribuidoras analizadas, en las Fig. 8 y 9 se muestran diagramas de barras los indicadores **Prom** y **Prom_Per95**, y **Max_Prom** y **Max_Per95**, respectivamente.

Al comparar los indicadores que surgen de realizar un promedio de magnitudes (**Prom** y **Prom_Per95**) se observa que las distribuidoras A y B presentan valores del mismo orden. Asimismo, si se comparan los valores asociados a los máximos (**Max_Prom** y **Max_Per95**), la que presenta los valores más elevados es la distribuidora B.

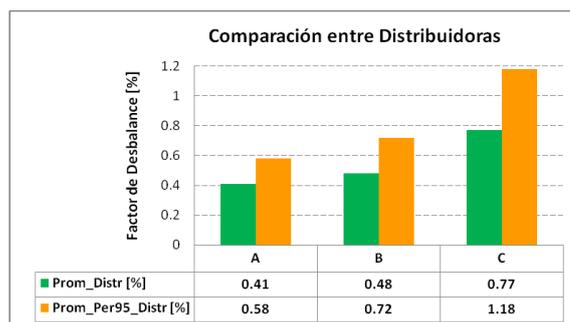


Fig. 8. Comparación de Indicadores Prom y Prom_Per95 entre las tres Distribuidoras.

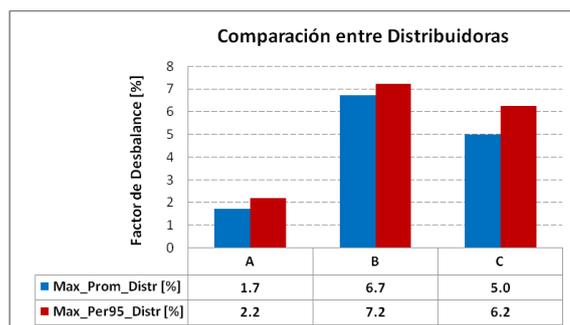


Fig. 9. Comparación de Indicadores Max_Prom y Max_Per95 entre las tres Distribuidoras.

Tal como fue mencionado en diversos pasajes del presente artículo, el factor de desbalance no se encuentra regulado en la Argentina. Por dicha razón, no es posible comparar los resultados obtenidos con los niveles de referencia existentes.

Sin embargo, a nivel internacional existen distintos documentos en los cuales se recomiendan niveles máximos que podrían considerarse como de referencia. En estos documentos se vislumbra un particular consenso en adoptar, para redes públicas de baja tensión y en régimen permanente, un valor de desbalance máximo en la tensión de 2 %. Al considerar los indicadores que surgen de aplicar el promedio, este nivel no es superado en ninguno de los casos. Sin embargo, al analizar los valores máximos, se observan distintos niveles de transgresión.

5. EVALUACIÓN DE EQUIPOS COMERCIALES

En este capítulo se evalúa el desempeño de cuatro instrumentos comerciales de medición de Calidad de Servicio, utilizados para efectuar registros en redes eléctricas y plantas industriales, que implementan la medición del factor de desbalance utilizando algoritmos de cálculos basados en distintas definiciones. Varios de ellos se emplean en las campañas de medición de armónicas y flicker que se llevan a cabo en el Área Metropolitana de Buenos Aires. En el presente trabajo, tales instrumentos son denominados I, II, III y IV.

A manera de ejemplo, en las Fig. 10, 11, 12 y 13 se muestran los oscilogramas y los correspondientes diagramas fasoriales que estos cuatro equipos muestran en el módulo dedicado a evaluar el desbalance presente en la tensión y/o corriente.

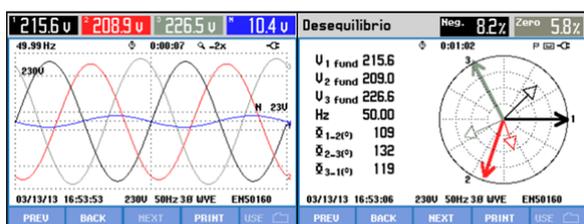


Fig. 10. Oscilogramas y diagrama fasorial provistos por el equipo I.

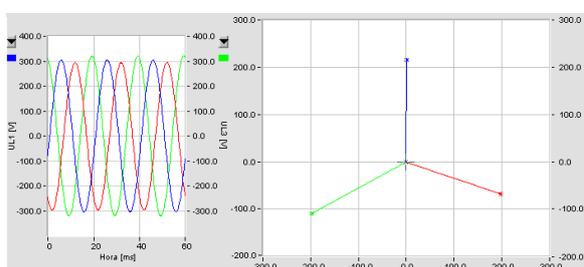


Fig. 11. Oscilogramas y diagrama fasorial provistos por el equipo II.

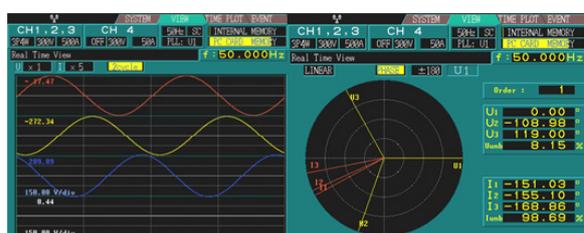


Fig. 12. Oscilogramas y diagrama fasorial provistos por el equipo III.

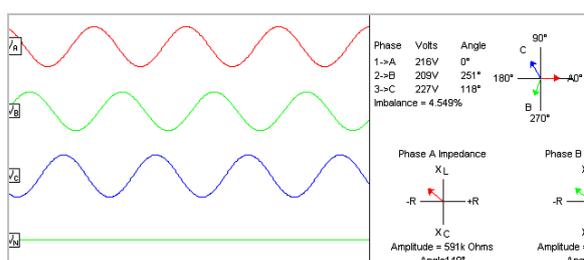


Fig. 13. Oscilogramas y diagrama fasorial provistos por el equipo IV.

Como se mencionó en el Punto 2, el método que computa correctamente el grado de desbalance de una variable trifásica es el que emplea las componentes de secuencia de esa variable, y por lo tanto requiere una medición trifásica, tanto del módulo como de la fase de la variable. Naturalmente, debido a la complejidad de tal medición, puesto que debe trabajarse con álgebra fasorial, los instrumentos capaces de efectuarla resultan de costo elevado.

Previo a efectuar las pruebas, se llevó a cabo un pormenorizado análisis de la información provista por cada uno de los fabricantes de los instrumentos. Su objeto fue determinar si éstos indican en sus manuales y documentación asociada el algoritmo que el instrumento emplea para calcular el factor de desbalance, y sobre qué variables lo mide (tensión y/o corriente).

Pruebas realizadas

Para realizar la verificación de los cuatro equipos, en el ítem del factor de desbalance, se utilizó un instrumento de laboratorio, el cual permite la generación de las ternas de tensiones de fase en módulo y ángulo, completamente configurables por el usuario.

En tal sentido, se generaron cuatro ternas de tensiones las que fueron aplicadas a cada uno de los cuatro equipos.

La primera terna, con la cual se realizó la Prueba 1 contó con tres fasores de igual magnitud desfasados 120° , por lo que el factor de desbalance de ésta resultó nulo. La terna se detalla a continuación, en valores por unidad (p.u.):

Terna Prueba 1:	
- $U_a = 1,00 e^{j0^\circ}$	Desbalance esperado: 0,0 %
- $U_b = 1,00 e^{-j120^\circ}$	
- $U_c = 1,00 e^{j120^\circ}$	

Para la segunda prueba, la terna contó con asimetrías sólo en los módulos. El desfase se mantuvo inalterado, es decir:

Terna Prueba 2:	
- $U_a = 0,92 e^{j0^\circ}$	Desbalance esperado: 6,0 %
- $U_b = 1,09 e^{-j120^\circ}$	
- $U_c = 0,91 e^{j120^\circ}$	

De manera opuesta, la terna de la Prueba 3 contó con desequilibrio en los ángulos, pero no así en los módulos:

Terna Prueba 3:	
- $U_a = 1,00 e^{j5^\circ}$	Desbalance esperado: 4,7 %
- $U_b = 1,00 e^{-j115^\circ}$	
- $U_c = 1,00 e^{j117^\circ}$	

Por último, para llevar adelante la Prueba 4 se implementó una terna con asimetrías tanto en los módulos como en los ángulos:

Terna Prueba 4:	
- $U_a = 0,98 e^{-j4^\circ}$	Desbalance esperado: 8,2 %
- $U_b = 0,95 e^{-j113^\circ}$	
- $U_c = 1,03 e^{j115^\circ}$	

Los resultados de la investigación previa y de las pruebas realizadas se muestran en la Tabla II. Allí se

detalla en primera instancia si el fabricante informa cómo el instrumento mide el desbalance. En caso de informarlo, se indica con qué algoritmo. Luego de ello se detalla en qué variables lo mide; mientras la mayoría lo hace tanto en tensión como en corriente, uno de ellos lo mide sólo en la tensión. Finalmente, se señala si el equipo ha medido el desbalance de manera correcta. Para ello se ha considerado correcto, el cálculo según componentes simétricas.

Tabla II. Resumen de los analizadores y resultados de la experiencia al medir el factor de desbalance. Comparación con componentes simétricas

Instrumento	¿Informa cómo lo mide? ¿Método?	Variable en la cual lo mide	Pruebas en que lo midió correctamente
I	No	Corriente y tensión	En todas
II	No	Tensión	En todas
III	Si - Cenelec	Corriente y tensión	En todas
IV	Si - IEEE-C Fase	Corriente y tensión	No en todas

Se comprobó que sólo uno de ellos presentó valores inadecuados en al menos una de las cuatro ternas propuestas.

6. CONCLUSIONES

- El desbalance o factor de desbalance es un parámetro no regulado en Argentina.
- A nivel internacional existen recomendaciones que indican valores de este parámetro.
- La forma correcta de calcular el desbalance es por medio de las componentes simétricas (cociente entre componente inversa y directa).
- Existen fórmulas aproximadas que estiman el grado de desbalance a partir de los módulos de los tres fasores. De este modo, es posible construir instrumentos de medida con costos más competitivos en el mercado.
- Se realizaron 460 mediciones semanales de desbalance en la tensión en distintos puntos del Área Metropolitana de Buenos Aires. En términos generales se observó un importante grado de cumplimiento de las recomendaciones internacionales. Sin embargo, en casos puntuales, tales valores fueron transgredidos.
- Se analizó la documentación de cuatro equipos comerciales de medición de Calidad de Servicio, con el objeto de determinar si los fabricantes indican la forma en la que éstos miden el desbalance. Se comprobó que dos de ellos no lo hacen.

- Se realizaron pruebas de laboratorio a los fines de determinar si estos cuatro equipos miden correctamente el desbalance. Para ello, se crearon cuatro ternas con distintos niveles y particularidades de desbalance. Se comprobó que tres equipos lo midieron correctamente.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Erico Spinadel. "Circuitos Eléctricos y Magnéticos – Temas especiales". Nueva Librería. 1982.
- [2] Joint Working Group CIGRE C4.07 / CIREC. "Power Quality Indices and Objectives. Final WG Report". CIGRE 2004. 2004.
- [3] Math H.J. Bollen and Irene Yu-Hua Gu. Mohamed E. "Signal Processing of Power Quality Disturbances". EL-Hawary, Series Editor. 2006.
- [4] CENELEC 1999. "Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems". European standard EN 50160, CENELEC, Brussels/Belgium, 1999. November 1999.
- [5] P. Pillay and M. Manyage. "Definitions of Voltage Unbalance". IEEE Power Engineering Review, May 2001. pp. 49-50.
- [6] IEC 61000-2-4. "Electromagnetic compatibility (EMC). Part 2-4: Environment – Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances. Second Ed.". 2002.
- [7] P.E. Issouribehere, J. C. Barbero y G. A. Barbera. "Estudio comparativo de las diferentes definiciones de los Factores de Desbalance de Tensiones y Corrientes en los Sistemas Trifásicos". XIII ERIAC. 2009.
- [8] P.E. Issouribehere, J. C. Barbero, G. A. Barbera y F. Issouribehere. "Desbalances en Sistemas de Distribución. Evaluación experimental de los métodos existentes para su determinación". CIDEL Argentina. 2010.