

DESBALANCES EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS MÉTODOS EXISTENTES PARA SU DETERMINACIÓN.

Pedro E. Issouribehere, Juan C. Barbero, Gustavo A. Barbera, Fernando
Issouribehere, H. Gastón Mayer

IITREE-LAT FI UNLP

48 y 116 B1900AMF, La Plata, Argentina – gbarbera@iitree-unlp.org.ar

1. RESUMEN

La experiencia en mediciones de Calidad de Servicio con equipos del mercado muestra que diferentes fabricantes han implementado la medición de los desbalances utilizando algoritmos de cálculo basados en distintas definiciones, lo cual dificulta la interpretación de los resultados, aún para quien esté advertido de las diferencias que pueden esperarse.

En este trabajo se presenta un estudio comparativo de los resultados obtenidos con las distintas definiciones y criterios para determinar el factor de desbalance, basado en registros temporales de tensiones y corrientes trifásicas correspondientes a condiciones normales de operación en distintas plantas industriales. Este estudio reveló que el desempeño de instrumentos de medición de calidad de suministro y de protecciones que miden el factor de desbalance mediante alguno de estos algoritmos podría resultar objetable en condiciones similares, que pueden ser frecuentes en plantas industriales.

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. Esas simplificaciones sólo son válidas para determinar el desbalance de una terna de fasores ABC, a partir de mediciones de los módulos de la terna de las diferencias (fasoriales) A-B, B-C, C-A. Es decir, las fórmulas simplificadas sólo tendrían validez para determinar el desbalance de la terna de tensiones fase-neutro, a partir de mediciones de las magnitudes de la terna de tensiones de línea, dado que para el caso de las corrientes las equivalencias carecen de sentido práctico.

En consecuencia, las expresiones aproximadas no serían aplicables para determinar el desbalance de las tensiones de línea ni el desbalance de las corrientes.

Sin embargo se encuentra en la bibliografía y aún en instrumentos de medición de calidad de energía, que esos métodos aproximados son empleados para determinar indistintamente el desbalance de tensiones (de fase o de línea) y de corrientes.

A fin de comparar los valores de los factores de desbalance obtenidos con las distintas aproximaciones, en relación al método basado en las componentes de secuencia, se aplicaron los diversos algoritmos a mediciones de tensiones de fase y de corriente realizadas en una acería provista de un horno de arco eléctrico y en una planta industrial con un variador de velocidad.

En el apartado siguiente se presentan definiciones y expresiones aproximadas para el factor de desbalance que se encuentran en normas y en bibliografía.

3. DEFINICIONES.

Factor de desbalance a partir de las componentes simétricas

La definición verdadera del factor de desbalance de tensiones ([1], [2], [3], [4]) corresponde a la relación entre los módulos de las componentes de secuencia inversa y directa de la tensión, según:

$$K = 100 \frac{U^-}{U^+} \quad (1)$$

Con:

$$U^- = \frac{1}{3} \left(\dot{U}_A + \dot{U}_B e^{j\frac{4}{3}\pi} + \dot{U}_C e^{j\frac{2}{3}\pi} \right)$$

$$U^+ = \frac{1}{3} \left(\dot{U}_A + \dot{U}_B e^{j\frac{2}{3}\pi} + \dot{U}_C e^{j\frac{4}{3}\pi} \right)$$

Siendo:

U^- y U^+ las componentes de secuencia inversa y directa, y \dot{U}_A , \dot{U}_B , \dot{U}_C las tensiones fase-neutro, expresadas en forma fasorial.

Se considera que esta definición corresponde al valor verdadero del factor de desbalance, porque además, claramente puede ser aplicada también a las tensiones de línea y a las corrientes.

IEEE

Existen distintas definiciones del desbalance de tensiones y corrientes en diferentes documentos del IEEE. Esto, sumado a las interpretaciones que han hecho distintos autores y fabricantes de instrumentos y de protecciones, ha creado confusión en cuanto a la medición del desbalance.

Las diferencias de interpretación surgen porque, aparte de las distintas definiciones, nunca se indica si en el caso de las tensiones, deben emplearse las tensiones de fase o las tensiones de línea.

En [5] y [6] se definen dos factores, aplicables tanto sea a tensiones como a corrientes:

a) *Factor de desbalance*: relación de la componente de secuencia negativa a la componente de secuencia positiva. Esta definición es idéntica a la expresada en (1).

b) *Razón de desbalance*: Considerando los valores eficaces de las componentes fundamentales del sistema trifásico, se define como la diferencia entre el mayor valor y el menor valor, referida al valor medio de los tres valores eficaces.

Formalmente:

$$K = \frac{3 \cdot (U_{max} - U_{min})}{U_1 + U_2 + U_3} \cdot 100 \quad (2)$$

Siendo:

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

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

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

En [2] se aplican dos formas de medir el desbalance, pero en un apartado titulado *Desbalance de tensiones de fase en sistemas trifásicos*. Una de ellas es la definición dada por (1) y la otra:

c) *Desbalance porcentual*: La máxima desviación respecto al valor medio de cada fase, referida al valor medio de las tres fases. Es decir:

$$K = \frac{\text{Max}(|U_1 - U_{med}|, |U_2 - U_{med}|, |U_3 - U_{med}|)}{U_{med}} \cdot 100 \quad (3)$$

Siendo:

$U_{med} = (U_1 + U_2 + U_3)/3$ y U_1 , U_2 , U_3 los módulos de las tres tensiones (de fase o de línea).

En [3] se define un factor de desbalance mediante (1), llamándolo indistintamente *voltage imbalance* y *voltage unbalance*, y para estimarlo se propone la expresión (3) para la cual, si bien no hay indicación específica, se presenta un ejemplo en el que se emplean las *tensiones de línea*.

También en [7] se define el desbalance de tensiones con la expresión (3) y se presenta un ejemplo en el que se emplean las *tensiones de línea*, pero no hay indicaciones acerca de las magnitudes a emplear.

La definición dada en a) corresponde, tal como se mencionó, a (1). Las confusiones aludidas surgen con el empleo y aplicabilidad de (2) y (3).

En efecto, de lo expuesto y considerando diferentes documentos del propio IEEE, cabe interpretar que (2) y (3) se pueden emplear indistintamente para determinar el factor de desbalance tanto para tensiones de fase como para tensiones de línea, dado que no se indica explícitamente que deban usarse exclusivamente unas u otras.

NEMA

National Electrical Manufacturers Association of USA adopta en [8] la definición b) del IEEE, con la misma ambigüedad en cuanto al empleo de tensiones de fase o de línea, si bien en el ejemplo de

cálculo que se presenta se emplean las *tensiones de línea*⁽¹⁾. Esta misma definición es adoptada por ANSI [9].

CENELEC

CENELEC [12] adoptó la expresión presentada en [1]. Esta definición está mencionada como método alternativo de cálculo en [13]. Esta expresión es exacta y se deriva del cálculo del desbalance de la terna de *tensiones de fase* a partir de las componentes de secuencia.

$$K = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \tag{4}$$

Siendo:

$$\beta = \frac{U_{AB}^4 + U_{BC}^4 + U_{CA}^4}{(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)^2}$$

U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} los módulos de las *tensiones de línea*.

Pillay-Hofmann-Manyage

En [14] y [15] se propone una expresión aproximada que evita el empleo de álgebra fasorial con las componentes simétricas, y da una buena aproximación al valor real del factor de desbalance:

$$K = 82 \sqrt{\frac{3 \cdot (U_{ABM}^2 + U_{BCM}^2 + U_{CAM}^2)}{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}} \tag{5}$$

Siendo:

U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} los módulos de las tres *tensiones de línea*.

$U_{ABM}, U_{BCM}, U_{CAM}$ diferencia entre la magnitud de cada tensión de línea y el promedio de las tres.

A modo de ejemplo, en la Tabla I se consideran dos ternas de tensiones (Figura 1) y se calculan las componentes de secuencia y los factores de desbalance obtenidos con las distintas variantes, las cuales fueron computadas con tensiones de línea y con tensiones de fase.

Tabla I: Comparación de los factores de desbalance.

Terna de tensiones	$U_a = 0.95 e^{-j10.7^\circ}$ $U_b = 1.18 e^{-j120.2^\circ}$ $U_c = 0.91 e^{+j131.5^\circ}$	$U_a = 1.01 e^{+j3.1^\circ}$ $U_b = 1.01 e^{-j124.8^\circ}$ $U_c = 0.98 e^{+j121.8^\circ}$
Comp. secuencia	$U^+ = 1.0 e^{j0^\circ}$ $U^- = 0.021 e^{-j12.3^\circ}$ $U^0 = 0.192 e^{-j116^\circ}$	$U^+ = 1.0 e^{j0^\circ}$ $U^- = 0.052 e^{j40.6^\circ}$ $U^0 = 0.035 e^{j142^\circ}$
K_{CS}	2.14 %	5.18 %
$K_{CENELEC}$	2.14 %	5.18 %
K_{Pillay}	2.16 %	5.16 %
K_{IEEEb_UL}	3.54 %	8.77 %
K_{IEEEb_Uf}	26.8 %	2.99 %
K_{IEEEc_UL}	2.10 %	4.83 %
K_{IEEEc_Uf}	16.4 %	1.18 %

La definición de CENELEC concuerda exactamente con el cálculo del desbalance a partir de las componentes de secuencia. El método de Pillay-Hofmann-Manyage tiene un error pequeño y lo mismo ocurre con método c) de la IEEE aplicado a las tensiones de línea.

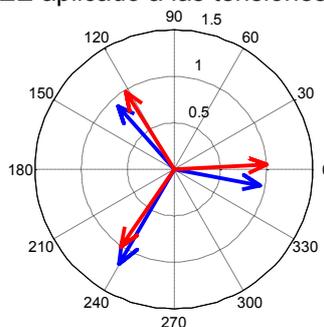


Figura 1. Ternas consideradas en Tabla I

⁽¹⁾ En [10] se indica que NEMA emplea las tensiones *fase-neutro*, sin embargo en lugar de citar como referencia un documento de NEMA se cita a [11], cuando en realidad en [11], al igual que en [16] se indica que NEMA emplea las *tensiones de línea*.

4. VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL

Se emplearon registros temporales de tensiones y corrientes trifásicas para efectuar determinaciones ciclo a ciclo de los factores de desbalance aplicando las distintas definiciones y criterios. Los resultados se presentan a continuación.

CASO 1: HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

La Figura 2 muestra un diagrama unifilar de la red de alimentación del horno de arco eléctrico. La acería se encuentra alimentada desde la red pública en 13.2 kV. Los puntos 1 y 2 indican los puntos de medición.

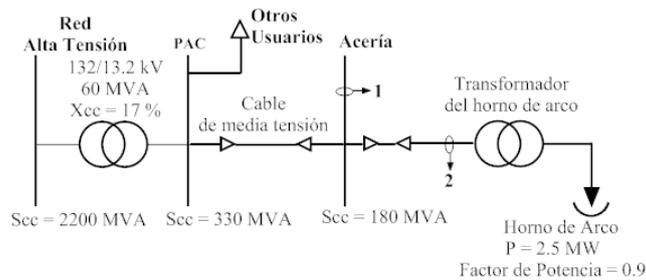


Figura 2. Diagrama unifilar de la acería.

Los registros obtenidos y el post-procesamiento efectuado para el cálculo de los diversos factores de desbalance se presentan en las Figuras 3 a 12.

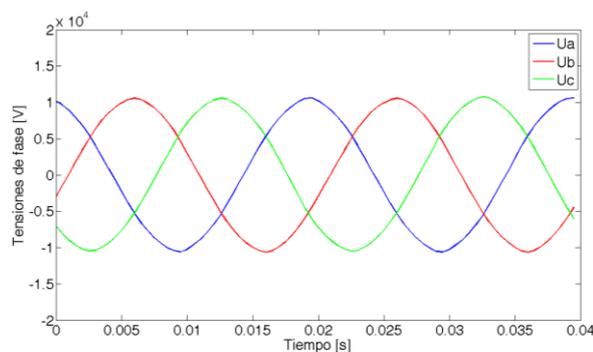


Figura 3. Oscilogramas de las tensiones de fase.

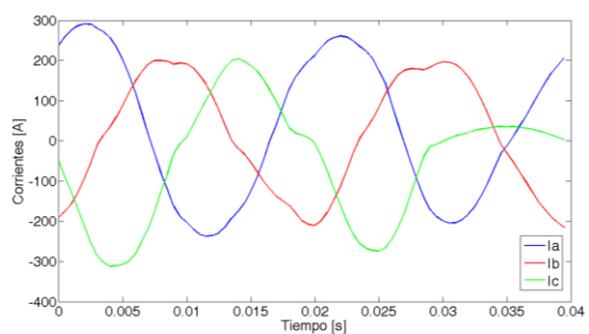


Figura 8. Oscilogramas de las corrientes de fase.

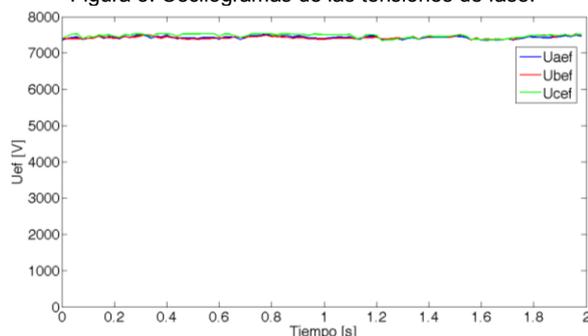


Figura 4. Valores eficaces de las tensiones de fase

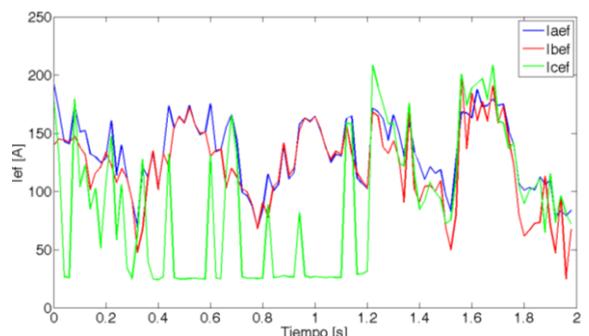


Figura 9. Valores eficaces de las corrientes de fase.

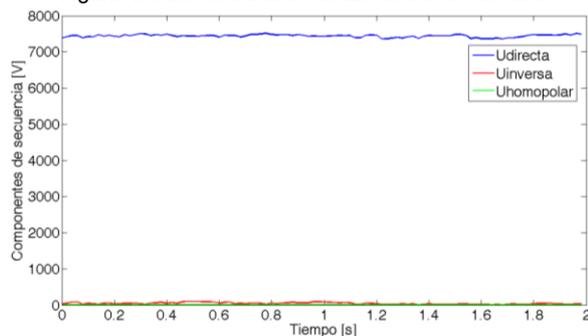


Figura 5. Componentes de secuencia de tensiones de fase.

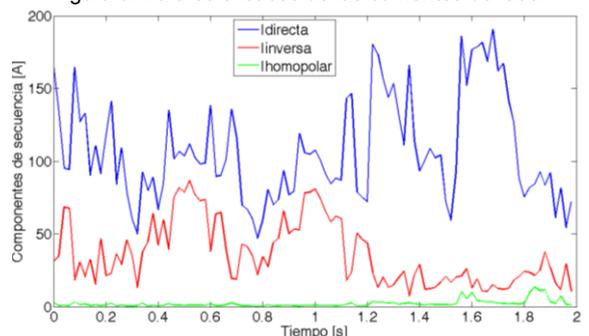


Figura 10. Componentes de secuencia de corrientes de fase

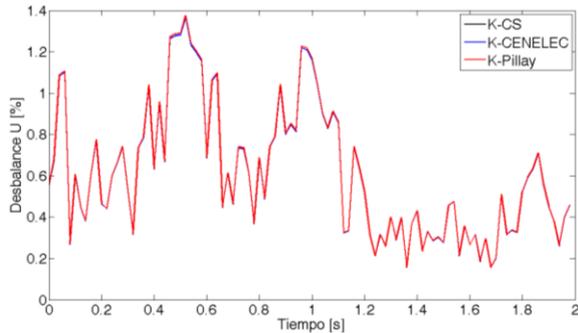


Figura 6. Desbalance de las tensiones.

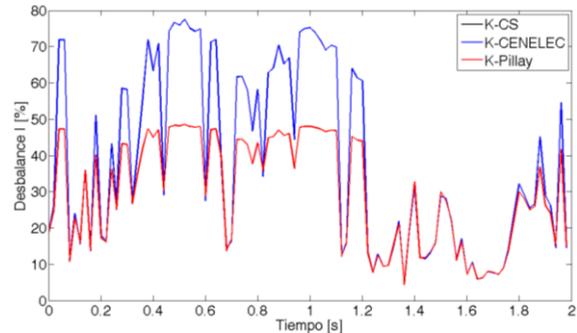


Figura 11. Desbalance de las corrientes de fase.

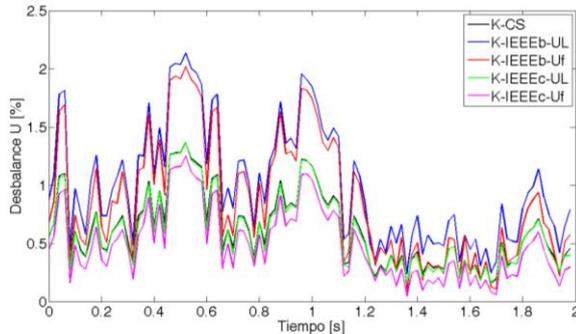


Figura 7. Desbalance de las tensiones.

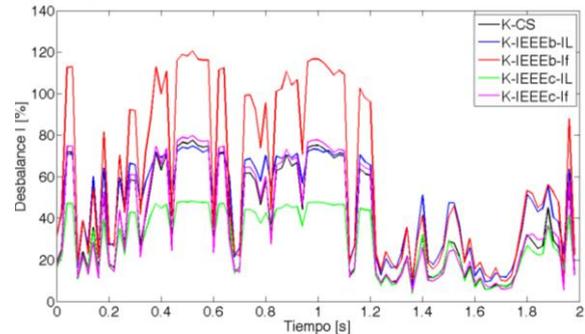


Figura 12. Desbalance de las corrientes de fase.

Para las tensiones, se observa que la (3) de IEEE empleada con las tensiones de línea describe muy bien el desbalance de las tensiones de fase dado que la componente de secuencia inversa tiene poco peso.

En el caso de las corrientes, se encuentra que la (3) de IEEE con las corrientes de fase describe aceptablemente el desbalance real en todo el registro. Mientras que (3) de IEEE con corrientes de línea se aparta notablemente del valor real cuando la componente de secuencia inversa es comparable con la componente de secuencia directa.

CASO 2: MOTORES CON VARIADORES DE VELOCIDAD

La Figura 13 muestra un diagrama unifilar de la red de alimentación del variador de velocidad (VFD), y los puntos numerados como 1 y 2 donde se realizaron las mediciones.

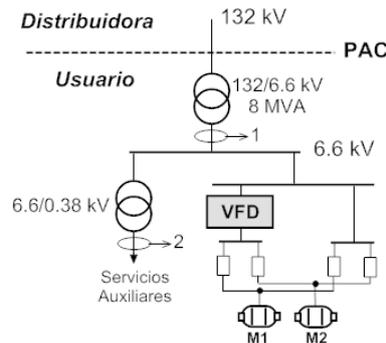


Figura 13. Diagrama unifilar de la instalación.

Los registros y el post-procesamiento efectuado se presentan en las Figuras 14 a 23.

En los registros de tensiones se observa una importante componente de modo común que se traduce en que la componente homopolar resulta mayor que la componente de secuencia inversa. Cabría esperar que las determinaciones del desbalance que no están basadas en las componentes de secuencia resulten notablemente distorsionadas. Sin embargo, (3) de IEEE empleada con las tensiones de línea describe muy bien el desbalance de las tensiones de fase dado que en las tensiones de línea el modo común resulta suprimido.

En el caso de las corrientes, en que la característica de la carga impone que la componente homopolar sea nula, se encuentra que (3) de IEEE con corrientes de fase describe aceptablemente el desbalance real.

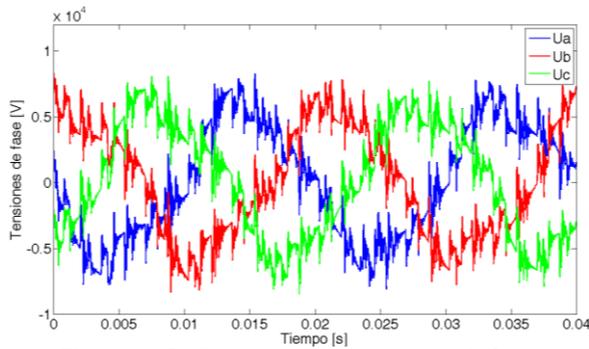


Figura 14. Oscilogramas de las tensiones de fase.

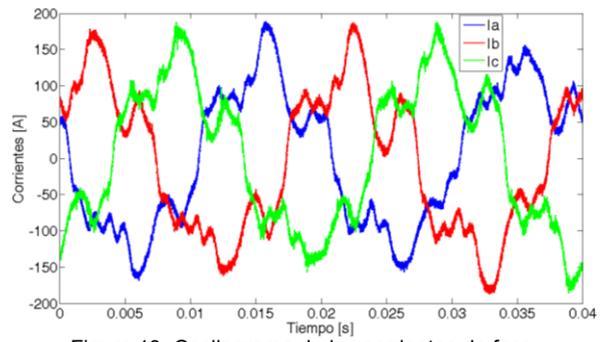


Figura 19. Oscilograma de las corrientes de fase.

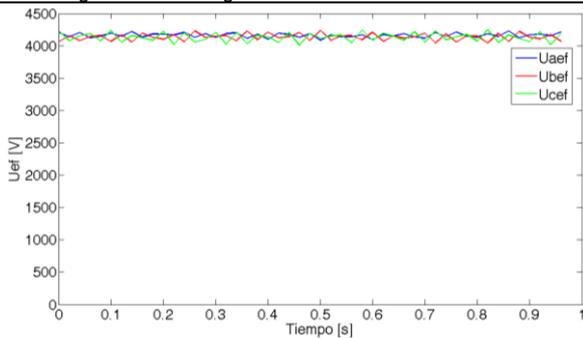


Figura 15. Valores eficaces de las tensiones de fase.

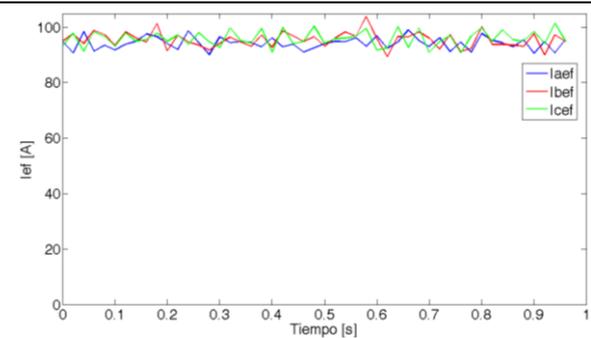


Figura 20. Valores eficaces de las corrientes de fase.

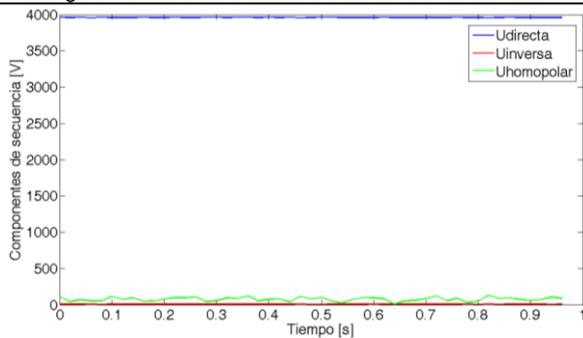


Figura 16. Componentes de secuencia de tensiones de fase.

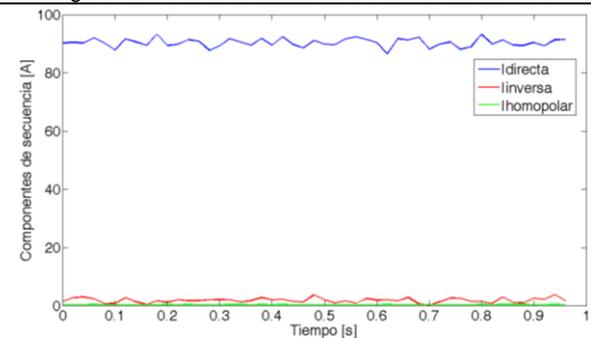


Figura 21. Componentes de secuencia de corrientes de fase

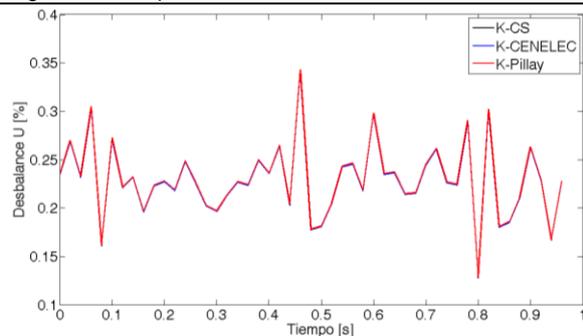


Figura 17. Desbalance de las tensiones.

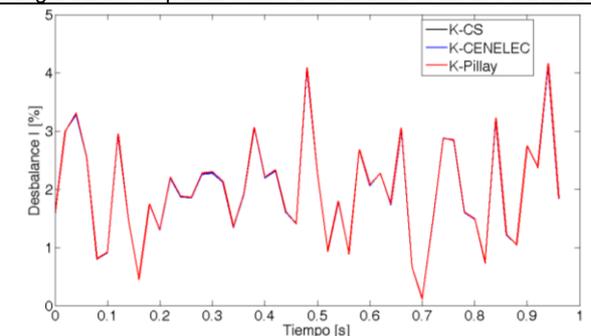


Figura 22. Desbalance de las corrientes.

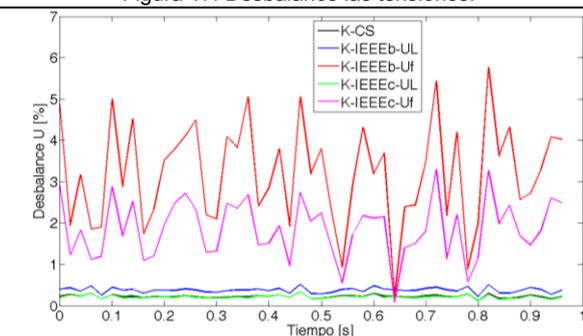


Figura 18. Desbalance de las tensiones.

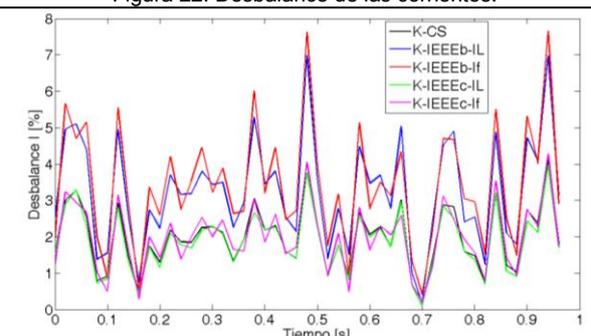


Figura 23. Desbalance de las corrientes.

5. CONCLUSIONES

El estudio realizado en este artículo permite comparar las diversas definiciones y establecer las condiciones en las que los algoritmos de cálculo que se aparten a la definición estricta IEC, aún resultan aceptables. La definición verdadera del factor de desbalance dada por (1) puede ser aplicada tanto para tensiones (de fase y de línea) como para corrientes.

La expresión (2) que es la definición de NEMA y una de las del IEEE, los resultados son inaceptables a lo largo de todos los registros analizados, tanto con las tensiones de fase como con las de línea.

En cuanto a (3) y (5), empleadas con las tensiones de línea describen muy bien el desbalance de las tensiones de fase, cuando la componente de secuencia inversa fue apreciablemente menor que la de secuencia directa.

Las expresiones (4) y (5) deben ser utilizadas con tensiones de línea para evaluar el factor K de desbalance de las tensiones fase-neutro.

Los resultados obtenidos con la expresión (4) son exactos ya que dicha expresión deriva de (1) [16].

El hecho de que las expresiones (4) y (5) se deban emplear con tensiones de línea para determinar el factor K de desbalance de las tensiones fase-neutro, indicaría que dichas expresiones deberían emplearse para determinar desbalances de corrientes, si se toman los recaudos para obtener por medición directa los módulos de IAB, IBC e ICA requeridos.

Sin embargo, la expresión (3) utilizada con corrientes de fase es la que mejores resultados proporcionó, incluso en las porciones de los registros con elevada componente de secuencia inversa.

Los valores que se indican como referencia en diferentes países [10] deben ser considerados a la luz de estas conclusiones, teniendo presente la definición que se ha empleado para determinarlos.

Del mismo modo se debe proceder al considerar los valores medidos por los distintos registradores de calidad de energía existentes en el mercado. Adicionalmente, el conocimiento de las diferencias mencionadas es particularmente útil para analizar el comportamiento de las protecciones eléctricas. Dependiendo del método de cálculo que utilicen las mismas, pueden dar lugar a salidas de servicio intempestivas y erróneas del equipamiento al cual están protegiendo.

Si bien los desbalances de las tensiones de la red en los suministros trifásicos no están regulados actualmente en Argentina para la prestación de los servicios eléctricos públicos de Distribución – tampoco las corrientes de las respectivas cargas – el contenido de este trabajo podrá ser de utilidad para la definición de los procedimientos de control en el futuro.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Robert and J. Marquet. "Assessing Voltage Quality with relation to Harmonics, Flicker and Unbalance". CIGRE WG 36.05, Paper 36-203. 1992
- [2] IEEE-1993. "IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants". (Red Book) ANSI-IEEE Std. 141, 1993
- [3] IEEE-1995. "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality". IEEE Std. 1159. 1995.
- [4] IEC-2003. "Electromagnetic compatibility. Testing and measurement techniques. Power Quality Measurement Methods". IEC 61000-4-30. 2003.
- [5] IEEE-1987. "IEEE guide for self-commutated converters". ANSI/IEEE Std 936-1987.
- [6] IEEE-2000. "The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms. Seventh Edition". ANSI/IEEE Std 100-2000.
- [7] IEEE-2004. "IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators". IEEE Std. 112 (Revision of the IEEE Std. 112-1996).
- [8] NEMA-2003. "Motors and Generators". National Electrical Manufacturers Association of USA. Standard MG1-2003, Section 14.36.
- [9] ANSI-NEMA 1995. "Electric Power Systems and Equipment–Voltage Ratings (60 Hz)". ANSI C84.1 - 1995.
- [10] CIGRE-2004. "Power Quality Indices and Objectives". Joint Working Group CIGRE C4.07 / CIRED. Final WG Report. March, 2004.
- [11] M.H.J. Bollen. "Definitions of Voltage Unbalance". IEEE Power Engineering Review, November 2002.
- [12] CENELEC 1999. "Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems". European standard EN 50160, CENELEC, Brussels/Belgium, 1999. November 1999.
- [13] IEC 2003. Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 4, Section 30: Power Quality Measurement Methods, IEC Std. 61000-4-30.
- [14] P. Pillay and M. Manyage. "Definitions of Voltage Unbalance". IEEE Power Engineering Review, May 2001.
- [15] P. Pillay, P. Hofmann and M. Manyage. "Derating of Induction Motors Operating With a Combination of Unbalanced Voltages". IEEE Transaction on Energy Conversion, Volume 17, Issue 4, Dec. 2002.
- [16] *Signal Processing of Power Quality Disturbances*. Math H. J. Bollen and Irene Y. H. Gu. IEEE Press series. ISBN-13-978-0-471-73168-9.