

# **IV CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2022**

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Delta

---

## ***Fundamentos para incorporar en la reglamentación de Argentina, límites directos del desbalance en las Redes de Distribución de Energía Eléctrica.***

---

**Héctor O. Pascual, Ariel A. Albanese, José L. Maccarone, Guillermo R. Cocha.**

UTN FRLP Grupo de I+D: Tratamiento de Señales en Sistemas Eléctricos (TSSE) y CODAPLI. Av.60 esq. 124 s/n, La Plata, Buenos Aires, Argentina // Tel: +54-0221-412-4300 // e-mail: opascual@frlp.utn.edu.ar

**Resumen** – El desbalance es una alteración que frecuentemente aparece en los sistemas de distribución de energía eléctrica y afecta a la calidad de la energía entregada por el mismo. Dicho desbalance se produce cuando el sistema trifásico de tensiones o corrientes se aparta de su condición de equilibrio en módulos o fases. Su cuantificación puede obtenerse, según IEC e IEEE, mediante un factor de desbalance (relación porcentual entre los componentes de secuencia negativa y positiva). Este factor está acotado en muchos países, pero en otros, como es el caso de Argentina, no se encuentra acotado directamente a través de la normativa vigente.

El objeto del presente trabajo es mostrar la conveniencia de modificar la reglamentación vigente de nuestro país, con el objeto de incorporar en la misma límites que acoten directamente los niveles de desbalance en tensiones, considerando que un sistema desbalanceado incrementa las pérdidas de energía y disminuye considerablemente el rendimiento de gran parte de los equipos conectados al sistema trifásico.

**Palabras claves** - Desbalance; Sistemas Eléctricos; Reglamentación; Pérdidas de energía.

## INTRODUCCIÓN

En un sistema de distribución trifásico de energía eléctrica se pueden presentar desbalances en tensiones y corrientes. Estos se producen cuando los módulos del sistema de tensiones o corrientes son desiguales o bien cuando los ángulos de separación entre los fasores de las mencionadas tensiones o corrientes se apartan de los 120° entre sí.

Las redes de distribución de energía eléctrica, alimentan cargas que pueden ser monofásicas, bifásicas o trifásicas desequilibradas. Este tipo de cargas pueden ocasionar un sistema de corrientes desiguales en las fases de una línea, motivo por el cual el sistema puede presentar un grado de desbalance en corrientes. Además, la circulación de corrientes diferentes en las distintas fases del sistema, lleva a que las caídas de tensiones en cada fase se encuentren desequilibradas, motivo por el cual el sistema también presentará un grado de desbalance en sus tensiones en el punto de alimentación de los diferentes consumos. El desbalance dependerá de las cargas, de las características de las líneas empleadas en el sistema de distribución y de las tensiones en el punto de alimentación a la red de distribución.

Los sistemas desbalanceados pueden estudiarse a través de su descomposición en tres sistemas trifásicos compuestos por: un sistema balanceado de secuencia positiva o directa (coincidente con la secuencia del sistema de distribución en estudio), un sistema balanceado de secuencia negativa o inversa, (el cual posee una secuencia opuesta a la del sistema de distribución) y una secuencia homopolar o cero, compuesta por una terna de fasores de igual magnitud y fase.

En la normativa nacional (ENRE Res: 184, 2000) y a través de los correspondientes contratos de concesión de las diferentes empresas distribuidoras del país, no se encuentra acotado el desbalance en forma directa. Lo cual permite que el desbalance en Argentina, pueda alcanzar valores excesivos (de acuerdo a los recomendados por normativas internacionales), sin violar ninguna de las reglamentaciones vigentes.

En tal sentido, es objeto del presente trabajo mostrar la necesidad de incorporar en la reglamentación de nuestro país, límites directos del desbalance en las Redes de Distribución de Energía Eléctrica, para evitar que éste presente valores como los mostrados en el desarrollo del trabajo, sin posibilidad de penalización alguna.

## DESARROLLO

### *Cuantificación del desbalance:*

De acuerdo con la normativa internacional (IEC 61000-4-30, 2008) o (IEEE Std 1159, 2009), el desbalance en un sistema trifásico se puede cuantificar a través de la relación entre la magnitud de la componente de secuencia negativa y la magnitud de la componente de secuencia positiva, expresada como porcentaje, la cual representaremos como  $F_{dvn}(1)$  y  $F_{din}(2)$  para las tensiones y corrientes respectivamente.

$$F_{dvn} = \frac{|V^{neg}|}{|V^{pos}|} \times 100 \quad (1)$$

$$F_{din} = \frac{|I^{neg}|}{|I^{pos}|} \times 100 \quad (2)$$

# IV CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2022

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Delta

Además, cabe mencionar que en la descomposición de un sistema trifásico de distribución desbalanceado, con conexión en estrella y neutro conectado, pueden aparecer componentes de secuencia homopolar, motivo por el cual podría también evaluarse un factor de desbalance homopolar, dado en forma porcentual por la relación entre la magnitud de la componente de secuencia homopolar y la magnitud de la componente de secuencia positiva, representados por  $F_{dvh}$  (3) y  $F_{dih}$  (4) para tensiones y corrientes respectivamente.

$$F_{dvh} = \frac{|V^{hom}|}{|V^{pos}|} \times 100 \quad (3)$$

$$F_{dih} = \frac{|I^{hom}|}{|I^{pos}|} \times 100 \quad (4)$$

El cálculo de las componentes de secuencias positiva, negativa y homopolar se efectúa a través de la aplicación del teorema de Fortescue (Grainger J. J. 1995) y estarán dadas por las expresiones (5) o (6) según corresponda a tensiones o corrientes.

$$\begin{bmatrix} V_a^{hom} \\ V_a^{pos} \\ V_a^{neg} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} I_a^{hom} \\ I_a^{pos} \\ I_a^{neg} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

En estas últimas “ $a$ ” es un operador que genera una rotación de  $120^\circ$  en la dirección contraria a la de las agujas de un reloj.

$$a = 1 \angle 120^\circ = 1e^{j2\pi/3} = -0.5 + j0.866$$

La normativa nacional (ENRE Res: 184, 2000), a través de los correspondientes

contratos de concesión de las diferentes empresas distribuidoras del país, no presenta límites para el factor de desbalance en la tensión de manera directa, sino que se tiene una cierta cota, a través de considerar los niveles máximos y mínimos admitidos para los módulos de las tensiones de cada fase. Cabe mencionar que en la citada reglamentación no se encuentra contemplado el desbalance en las corrientes.

## *Valores del desbalance en tensiones permitidos en Argentina:*

De acuerdo con lo mencionado anteriormente y lo desarrollado en (Pascual et al. 2013) y (Pascual et al. 2014), es posible decir que para determinar los valores que podrían alcanzar los Factores de desbalance en tensiones  $F_{dvn}$  y  $F_{dvh}$  se deben tener en cuenta las variaciones admitidas para los módulos de las tres tensiones de fase y los apartamientos angulares de cada una de ellas respecto a los  $120^\circ$  de separación que debería existir entre las mismas para conformar un sistema balanceado.

El rango de variación que puede presentarse para los módulos de las tensiones de fase, en baja tensión, se encuentra acotado por la normativa nacional y es de  $\pm 8,0\%$  de la tensión nominal del sistema eléctrico de distribución.

En relación con los límites de la variación angular, en su apartamiento de los  $120^\circ$  entre los fasores que conforman el sistema trifásico, la normativa nacional no fija ningún rango al respecto.

Con el objeto de determinar un posible rango de variación angular de las diferentes fases de las tensiones de carga en un sistema de distribución de baja tensión, con respecto a un sistema trifásico de referencia balanceado, es

# IV CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2022

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Delta

posible basar el análisis en un circuito que represente una fase, teniendo presente las características de la línea y el tipo de carga conectada a ella. Para lo cual se tomaron las siguientes consideraciones:

- Todos los casos analizados contemplan la máxima corriente posible en la línea, sin superar el valor admisible del conductor, ni los límites de tensión permitidos en la carga.
- Las tensiones no presentan deformación.
- Las cargas consideradas en los diferentes casos, presentan un factor de potencia que varía entre 0.85 capacitivo y 0.85 inductivo.
- Las longitudes de líneas utilizadas van desde los 50 a los 500 metros.

Del análisis efectuado se desprende que el rango de variación angular entre los fasores correspondientes a la tensión de alimentación de la línea y el fasor de tensión en la carga, para todos los tipos de líneas considerados, se encuentra entre  $-15.58^\circ$  y  $2.34^\circ$ .

Determinados los posibles rangos de variación de las seis variables involucradas (3 correspondientes a los módulos de los fasores de las tensiones de las fases y 3 a los ángulos de estos fasores), es posible identificar los valores máximos que podrían alcanzar los Factores de desbalance en tensiones  $F_{dvn}$  y  $F_{dvh}$ . Para cumplir con el objetivo buscado se empleó un algoritmo genético, el cual proporciona un método de búsqueda dirigida basada en probabilidades, con amplia aplicación en problemas de optimización en los cuales el número de variables es grande.

Los resultados obtenidos permiten decir que para una línea que presenta las siguientes características:

Material: *Aleación de Al.*  
Sección:  $3 \times 185/95 \text{ mm}^2$   
Disposición: *Horizontal Aislador perno rígido.*

Resistencia:  $0.172 \text{ Ohm/Km}$

Reactancia:  $0.241 \text{ Ohm/Km}$

Corriente admisible:  $400 \text{ A}$

Cuando las cargas conectadas a la citada línea, provoquen en sus bornes, un sistema trifásico de tensiones conformado de la siguiente manera:

Tabla 1: Sistema tensiones en la carga ( $F_{dvn}$ )

Fase 1 [°]	Fase 2 [°]	Fase 3 [°]	Fase 1 [V]	Fase 2 [V]	Fase 3 [V]
0	-135.58	104.42	237.6	237.6	202.4

El factor de desbalance de secuencia negativa  $F_{dvn}$  tomará un valor de **14.10%**.

Utilizando la misma línea, pero con una combinación de cargas que en sus bornes presente el siguiente sistema trifásico de tensiones:

Tabla 2: Sistema de tensiones en la carga ( $F_{dvh}$ )

Fase 1 [°]	Fase 2 [°]	Fase 3 [°]	Fase 1 [V]	Fase 2 [V]	Fase 3 [V]
0	-120	104.42	237.6	202.4	237.6

El factor de desbalance de secuencia homopolar  $F_{dvh}$  tomará un valor de **14.10%**.

Es oportuno aclarar que la condición teórica del sistema eléctrico que permitiría alcanzar los valores de máxima, correspondientes a los factores de desbalance  $F_{dvn}$  y  $F_{dvh}$ , tienen baja probabilidad de suceder en condiciones reales de explotación. Lo dicho, teniendo presente la combinación de situaciones que deberían darse para generar un sistema trifásico con las características mencionadas. Esto no invalida el hecho de que producto de la distribución incorrecta de cargas monofásicas en el sistema y/o por una alimentación a las líneas de distribución con características deficientes, se presenten valores de los factores de desbalance que provoquen inconvenientes en los clientes trifásicos

# IV CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2022

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Delta

conectados al sistema de distribución de energía eléctrica.

Si para las líneas de distribución contempladas en el estudio, no se considera un desvío angular entre la tensión de alimentación y la de carga, para ninguna de las fases, y sólo se contemplan las variaciones de los módulos de las tensiones permitidas en la reglamentación vigente, el valor máximo de los Factores de desbalance de secuencia negativa y homopolar  $F_{avn}$  y  $F_{avh}$  podrían alcanzar un **5,47%**. Para este último caso, el sistema trifásico de tensiones en la carga estaría conformado de la siguiente manera:

Tabla 3: Sistema de tensiones en la carga, sin considerar variación angular.

Fase 1 [°]	Fase 2 [°]	Fase 3 [°]	Fase 1 [V]	Fase 2 [V]	Fase 3 [V]
0	-120	120	202.4	237.6	202.4

## Valores admisibles del desbalance en corrientes:

Como ya se mencionó anteriormente, las redes de Distribución de energía Eléctrica, presentan generalmente corrientes diferentes en cada una de sus fases. El grado de desbalance de las corrientes no se encuentra acotado por la reglamentación vigente, pero en función de no violar los límites fijados para algunos de los parámetros que se vinculan con la calidad del producto técnico (tensión), dicho desbalance no debería superar un determinado valor.

Con el objeto de obtener el valor límite del factor de desbalance en corrientes se procede de acuerdo con lo establecido en (Pascual et al. 2018), en donde la base metodológica empleada consiste en analizar el comportamiento de la línea de distribución, con respecto a parámetros de calidad del producto técnico, cuando se efectúan barridos de ternas de corriente de secuencia negativa,

con módulos diferentes, sobre ternas de corrientes de secuencia positiva, para las cuales también se emplean distintos módulos. Cabe aclarar que en el estudio se tuvo en cuenta sólo componentes de secuencia directa e inversa y además se realizaron las siguientes consideraciones:

- Las tensiones no presentan deformación y la terna que alimenta la línea en estudio es de secuencia directa, con sus módulos correspondientes al valor nominal.
- Se tienen en cuenta líneas con distintas características, para las cuales se varía su longitud entre 50 y 500 metros.
- Para todos los casos analizados se consideran diferentes corrientes de fase, pero sin superar la corriente admisible del conductor, ni los límites de tensión permitidos en la carga, ( $\pm 8\%$  de la tensión nominal).
- El rango establecido para el ángulo entre tensión y corriente de cada fase se corresponde con un factor de potencia que se encuentra entre 0.85 capacitivo y 0.85 inductivo.
- Se establece como límite del Factor de desbalance de tensión al recomendado por (IEEE Std 1159, 2009) e (IEC 61000-2-2, 2000) que es del 2%, ya que en Argentina no se fija límite para este factor.

Los resultados arrojados por el estudio muestran que el valor máximo que podría tomar el factor de desbalance en corriente ( $F_{din}$ ), sin afectar la calidad de servicio es de **52.9%**, más allá de que el valor de corriente que circula por las fases sea pequeño. Esto se debe a que para bajas corrientes el citado factor se corresponde con el máximo Factor de potencia admitido por la reglamentación. Es decir que, al incrementar el valor de la relación porcentual entre la componente de secuencia negativa y positiva, por encima del 52.9% provoca que para algún punto del barrido de la secuencia negativa sobre la positiva, se supera

# IV CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2022

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Delta

el máximo ángulo permitido entre la corriente y la tensión en la carga.

## **Problemas que ocasiona el desbalance:**

Algunos de los problemas que se producen por el desbalance presente en los sistemas trifásicos son los siguientes:

- Incremento de las pérdidas de energía en las redes eléctricas.
- Calentamiento adicional de máquinas, limitando su capacidad de carga.
- Reducción del transporte de energía en los sistemas de distribución.
- Sobre corrientes en algunas de las fases.
- Propagación de desbalance a otros nodos de conexión de la red.
- Deterioro de fusibles de alimentadores o banco de capacitores.

Particularmente en motores asincrónicos:

- Torque opuesto al producido por el flujo principal (Freno eléctrico).
- Calentamiento y pérdida adicional en el bobinado del estator.
- Aumento de corrientes inducidas en el rotor, incrementando sus pérdidas.
- Vibraciones mecánicas.

Como una referencia para cuantificar el impacto que puede tener el desbalance, es posible decir que de acuerdo con (NEMA MG-1-2006) un factor de desbalance de 3.5% puede resultar en un 25% de calentamiento adicional en los motores eléctricos.

## **CONCLUSIONES**

Más allá de que las recomendaciones que se desprenden de la normativa internacional tales como (IEEE Std 1159-2009) y (IEC 61000-2-2: 2000), las cuales establecen que el factor de desbalance en tensiones no debería superar el 2%, en nuestro país este factor no se

encuentra acotado y de acuerdo con lo mostrado en el presente trabajo, el desbalance podría superar significativamente el citado valor sin violar ninguna reglamentación vigente, con el consecuente perjuicio ocasionado por ello a los clientes trifásicos conectados al sistema de distribución, sin que estos tengan posibilidad de reclamo alguno.

En virtud de lo mencionado, consideramos altamente recomendable modificar la reglamentación con el objeto de incorporar en la misma, límites que acoten directamente los niveles de desbalance para que en ninguna condición de explotación del sistema sean superados, y evitar de esta forma que se distribuya energía con calidad deficiente.

## **REFERENCIAS**

- ENRE Ente Nacional Regulador de la Electricidad (Argentina), Res. 184/2000.
- Goldberg David “Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning”, Addison-Wesley (1989)
- Grainger J. J. and Stevenson W. D. Jr., “Análisis de Sistemas de Potencia”, McGraw-Hill, México, 391-440,(1995).
- IEC 61000-2-2: 2000, “Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 2-2: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems”.
- IEC 61000-4-30: 2008., “Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods”.
- IEEE Std 1159-2009., “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”.

# **IV CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2022**

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Delta

---

- NEMA MG 1-2006, Motors and Generators.

- Pascual Héctor Osvaldo., et al., “Determinación del Desbalance Admisible en Corrientes, para Líneas de Media Tensión,” Congreso Internacional de Distribución Eléctrica CIDEL Argentina 2018, Buenos Aires, Argentina, septiembre de 2018.

- Pascual Héctor O., et al., “Análisis del factor de desbalance homopolar en redes de distribución argentinas, contemplando la reglamentación nacional vigente al respecto,” Congreso Internacional de Distribución Eléctrica CIDEL Argentina 2014, Buenos Aires, Argentina, septiembre de 2014. (7 páginas) (<http://www.cidel2014.com>).

- Pascual H. O., et al., “Análisis del Desbalance en Redes de Distribución Argentinas, Contemplando la Reglamentación Nacional Vigente al Respecto,” Décimo Quinto Encuentro Regional Ibero-americano del del CIGRÉ (XV ERIAC 2013), Foz de Iguazú-PR, Brasil, 19-23 de mayo de 2013.