
Artículos

Impacto del desbalance sobre la determinación de las pérdidas técnicas de energía eléctrica en líneas de distribución de baja tensión



Héctor O. Pascual

Grupo de I+D: Tratamiento de Señales en Sistemas Eléctricos (TSSE) - CODAPLI - UTN FRLP., Argentina
opascual@frlp.utn.edu.ar

Ariel A. Albanese

Grupo de I+D: Tratamiento de Señales en Sistemas Eléctricos (TSSE) - CODAPLI - UTN FRLP., Argentina
albanese@frlp.utn.edu.ar

José L. Maccarone

Grupo de I+D: Tratamiento de Señales en Sistemas Eléctricos (TSSE) - CODAPLI - UTN FRLP., Argentina
josmacca@gmail.com

Marcelo R. Gil

Grupo de I+D: Tratamiento de Señales en Sistemas Eléctricos (TSSE) - CODAPLI y GIDeSO - UTN FRLP., Argentina
ingilmr@frlp.utn.edu.ar

Ingenio Tecnológico

vol. 7, e065, 2025
Universidad Tecnológica Nacional, Argentina
ISSN-E: 2618-4931
Periodicidad: Frecuencia continua
ingenio@frlp.utn.edu.ar

Recepción: 14 julio 2025
Aprobación: 04 diciembre 2025

URL: <https://portal.amelica.org/ameli/journal/266/2665247007/>

Resumen: Para determinar las pérdidas técnicas de energía, las distribuidoras de energía eléctrica de los diferentes países utilizan diversas metodologías de cálculo, las cuales se nutren de la información proveniente de sus respectivos sistemas eléctricos de potencia. Es común que estos métodos de cálculo se basen en herramientas computacionales que permitan resolver flujos de carga que respondan a la información obtenida del sistema eléctrico bajo análisis, considerándolo como balanceado, pero esta consideración del sistema no refleja completamente la realidad de su funcionamiento, ya que las corrientes en las líneas trifásicas presentan un grado de desbalance, lo cual provoca un incremento del valor de las pérdidas técnicas. Contemplando lo dicho, y teniendo presente la realidad de operación de los sistemas de distribución de energía eléctrica, para acercar los resultados de las pérdidas calculadas a los valores reales, surge la necesidad de incorporar factores de corrección. Es objeto del presente trabajo determinar un factor de corrección que permita disminuir el error en la cuantificación de las pérdidas técnicas de las líneas de baja tensión, independientemente de su longitud, potencia activa que transmita, como así también de las variaciones de las tensiones y corrientes en sus fases.

Palabras clave: Pérdidas Técnicas, Desbalance, Energía, Red de Baja Tensión, Factor de corrección.

Abstract: To determine technical energy losses, electric power distribution companies in different countries use various calculation methodologies, which rely on information from their respective power systems. It is common for these calculation methods to be based on computational tools that solve power flow equations using data from the electrical system under analysis, assuming it to be balanced. However, this assumption does not fully reflect the system's actual operating conditions, since the currents in three-phase lines exhibit a degree of unbalance, which leads to an increase in the value of technical losses. Considering the above mentioned and acknowledging the real operating conditions of electric power distribution systems, there arises the need to incorporate correction factors to bring the calculated loss values closer to the actual ones. The purpose of this work is to determine a correction factor that allows reducing the error in

the quantification of the technical losses of low-voltage lines, regardless of their length, active power transmitted, as well as the variations in voltage and current in their phases.

Keywords: Technical Losses, Unbalance, Energy, Low Voltage Network, Correction Factor.

INTRODUCCIÓN

En relación con la operación y explotación de los sistemas eléctricos de transmisión y distribución (Gönen, 1986; Gönen, 1988; Grainger and Stevenson, 1996; Pabla, 2004), la determinación de sus pérdidas de energía tiene vital importancia.

El resultado de la diferencia entre la energía ingresada (compra) menos la energía egresada (venta), se define generalmente como pérdida total de energía. Estas pérdidas pueden dividirse en técnicas y no técnicas.

- Pérdidas técnicas: Tienen su origen en el hecho de que los sistemas eléctricos se encuentran compuestos por una variada cantidad de elementos, que no presentan un comportamiento ideal de funcionamiento en su régimen de explotación. Estas pérdidas son producto principalmente del hecho físico que constituye la circulación de corriente eléctrica y la presencia de tensión en las redes. (Hong-Rui et al., 2007; JIANG et al., 2005; Khodr et al., 2002; Nazarko et al., 2000; Pascual et al., 2024; Pascual et al., 2016; Pascual et al., 2008).
- Pérdidas no técnicas: Están constituidas por la energía efectivamente suministrada pero no medida, o bien no registrada comercialmente como tal (fraude, robo, hurto de energía, errores de facturación, errores de lectura de mediciones, etc.) Estas pérdidas se obtienen restando el resultado de las Pérdidas técnicas (obtenido por cálculo), al valor de las Pérdidas totales de energía, esta última obtenida de las mediciones de energía comprada y vendida por la Empresa de distribución eléctrica bajo análisis.

Para el cálculo de las pérdidas técnicas, las empresas distribuidoras de energía eléctrica emplean diversas metodologías de cálculo que se nutren de la información proveniente de sus respectivos sistemas eléctricos de potencia. En virtud de lo mencionado, el método seleccionado para el cálculo de pérdidas dependerá del estado de digitalización, comunicación y automatización de las redes de baja, media y alta tensión.

Los métodos empleados para el cálculo de las pérdidas técnicas, por lo general, se basan en herramientas computacionales que permitan resolver flujos de carga para diferentes estados de demanda de sistema eléctrico considerado. Los cálculos de los citados flujos se realizan considerando al sistema eléctrico como balanceado, lo cual no representa completamente la realidad de funcionamiento de dichos sistemas, ya que la desigualdad en la distribución de cargas en las diferentes fases (particularmente en los sistemas de distribución de baja tensión) provoca que las corrientes presentes en los conductores de las líneas eléctricas trifásicas no tengan el mismo módulo y ángulo. Este grado de desbalance lleva a un incremento del valor de las pérdidas técnicas, el cual no es contemplado en el resultado de las pérdidas obtenidas a través de los flujos de carga.

Una forma de estudiar el desbalance en los sistemas trifásicos es 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. Contemplando la normativa internacional IEC (IEC 61000-4-30, 2008) o IEEE (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, a la cual llamaremos factor de desbalance en corrientes de secuencia negativa (F_{din}), expresado por la ecuación [1]. Además, considerando la citada normativa, también es posible considerar la relación entre la magnitud de la componente de secuencia homopolar sobre la magnitud de la componente de secuencia positiva, expresada como porcentaje, a la cual llamaremos factor de desbalance en corrientes de secuencia homopolar (F_{dih}), y es expresado por la ecuación [2].

$$F_{din}[\%] = \frac{|\bar{I}_{sec}^-|}{|\bar{I}_{sec}^+|} 100 \quad [1]$$

$$F_{dih}[\%] = \frac{|\bar{I}_{sec}^0|}{|\bar{I}_{sec}^+|} 100 \quad [2]$$

En las cuales:

$$\bar{I}_{sec}^-$$

Fasor de corriente de secuencia negativa. [A]

$$\bar{I}_{sec}^+$$

Fasor de corriente de secuencia positiva. [A]

$$\bar{I}_{sec}^0$$

Fasor de corriente de secuencia homopolar o cero. [A]

Para poder apreciar el impacto del desbalance sobre una línea de baja tensión (BT), en la Figura 1, se muestran dos curvas teóricas a través de las cuales se puede observar cómo varía el porcentaje de las pérdidas de potencia con respecto a la potencia transmitida, cuando las corrientes en la línea presentan diferentes valores del factor de desbalance en corrientes de secuencia negativa (F_{din}) y diferentes valores del factor de desbalance en corrientes de secuencia homopolar (F_{dih}).

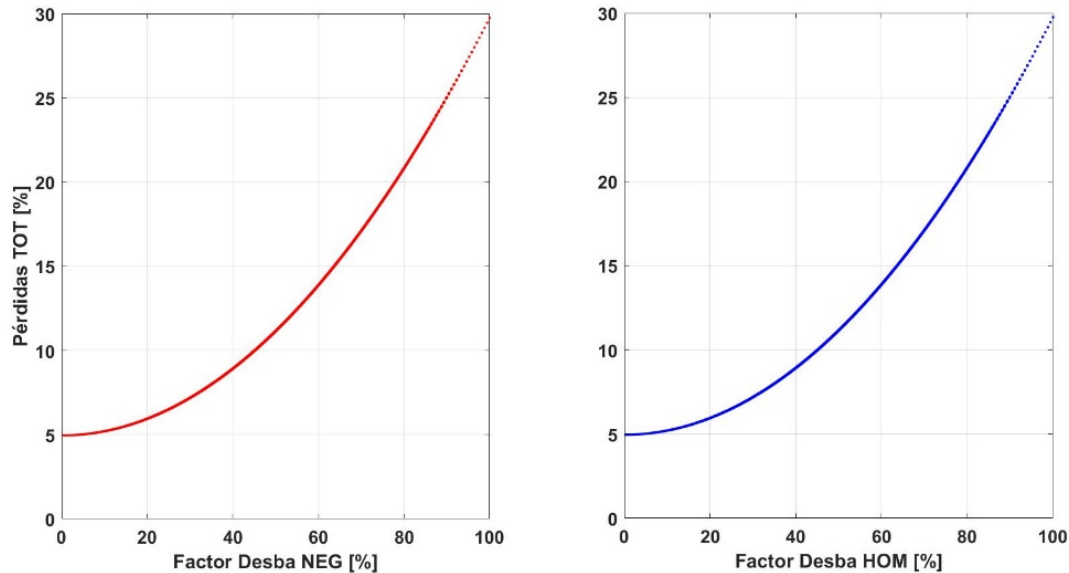


Figura 1

Pérdidas de potencia en función de los factores de desbalance de secuencia negativa y homopolar.

Para las curvas mostradas en la Figura 1, se tomó como ejemplo una línea trifásica tetrafililar de baja tensión (BT), que tiene una longitud de 200 metros, un cable del tipo preensamblado de aleación de aluminio 3x50/50 (conductores de fase de 50 mm² y conductor de neutro de 50 mm²) y se encuentra transmitiendo una potencia activa trifásica de 60 KW con una tensión monofásica en la carga de 220 V.

Considerando lo dicho, surge la necesidad de incorporar un factor de corrección por desbalance ($F_{desb_{BT}}$) aplicado a los métodos de cálculo, con el objeto de acercar los valores de las pérdidas técnicas calculadas a los valores reales. Para determinar el $F_{desb_{BT}}$ se considera un sistema trifásico tetrafililar, por ser este el vinculado con la red de distribución en baja tensión y se realiza un estudio paramétrico multivariable, en el cual se busca identificar una relación de variables que pueda tomarse como una característica típica del sistema en estudio.

DESARROLLO

El valor del factor de corrección $F_{desb_{BT}}$ a utilizar dependerá del grado de desbalance, o sea del valor de las corrientes de las distintas fases del sistema y de la corriente que se deriva por el conductor de neutro. En este aspecto, como el valor de las corrientes de fase y neutro pueden variar en cada instante de tiempo y además teniendo en cuenta que en general para baja tensión (BT) no se dispone del registro de dichos valores de corrientes de fases y neutro, es que para proponer un valor representativo $F_{desb_{BT}}$ del se realizó un estudio paramétrico sobre una línea genérica de baja tensión, en la cual se mantuvo el valor de potencia activa trifásica entregada a la carga como constante y se fueron variando las potencias de cada una de las fases con el objeto de obtener diferentes valores de corriente en las fases y el neutro. Para poder lograr que todas las fases estuvieran sometidas al mismo rango de variación de corrientes, se tomó como referencia a la variación de potencia en la fase 1, y a través de las dos fases restantes se fueron variando los valores de sus respectivas potencias activas, de tal forma de que la potencia activa trifásica se mantuviera constante a lo largo de la ejecución del algoritmo desarrollado.

En la Figura 2, se puede apreciar la evolución de los valores eficaces de las corrientes correspondientes a la fase 1 tomada como variable de referencia, como así también la variación de las corrientes de las fases 2 y 3. Por tratarse de un sistema trifásico tetrapolar los distintos valores de la corriente de neutro se obtienen a través de la suma fasorial de las corrientes de las fases para cada una de las distribuciones de corrientes consideradas. En virtud de lo mencionado, a través de la ejecución del algoritmo desarrollado es posible identificar en cada una de las distribuciones de corrientes, el valor de la potencia de pérdida de la línea en estudio. Lo dicho, manteniendo constante la potencia activa trifásica para todas las distribuciones de corrientes en cada fase y neutro. A modo de ejemplo, la potencia activa trifásica en la carga, considerada para las gráficas de la Figura 2, es de 60 KW. Es importante mencionar que para el estudio paramétrico efectuado se consideraron corrientes de fase que superan ampliamente a la admisible para el conductor, como sucede cuando la potencia activa trifásica establecida en la carga es transmitida a través de una sola de las fases de la línea trifásica tetrafilar. Lo dicho con el objeto de validar la aplicación del factor de multiplicación $F_{desb_{BT}}$ en un rango en un rango muy amplio de corrientes admisibles de los conductores que puedan ser utilizados.

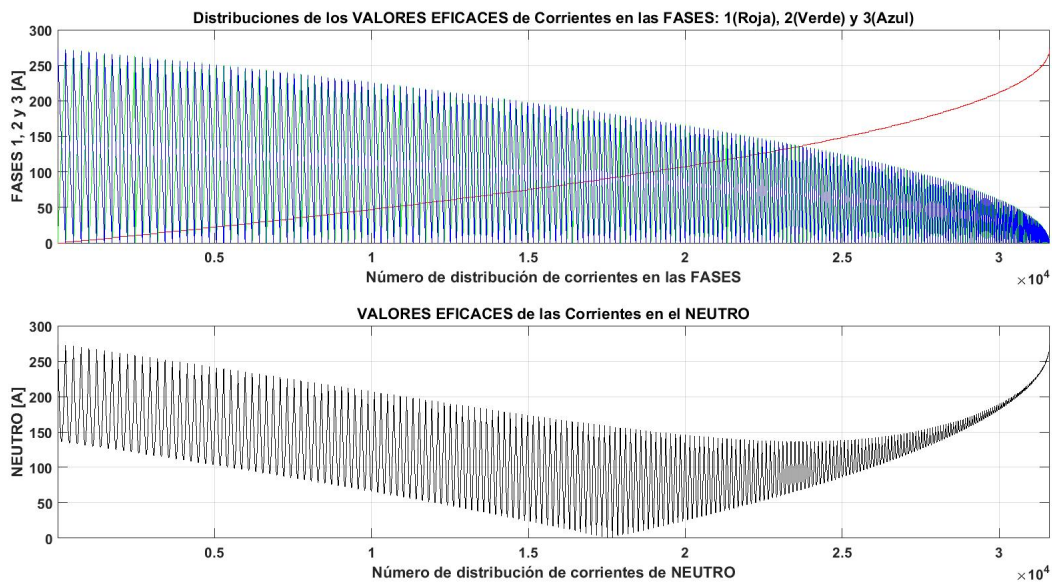


Figura 2

Variación de la distribución de los valores eficaces de las corrientes en las diferentes fases y el neutro.

Con el objeto de poder apreciar como varían las corrientes de las fases y el neutro en cada una de las distribuciones consideradas, en la Figura 3, se muestra una ampliación de la Figura 2, entre los números correspondientes a las distribuciones que van desde 10000 hasta la 10400.

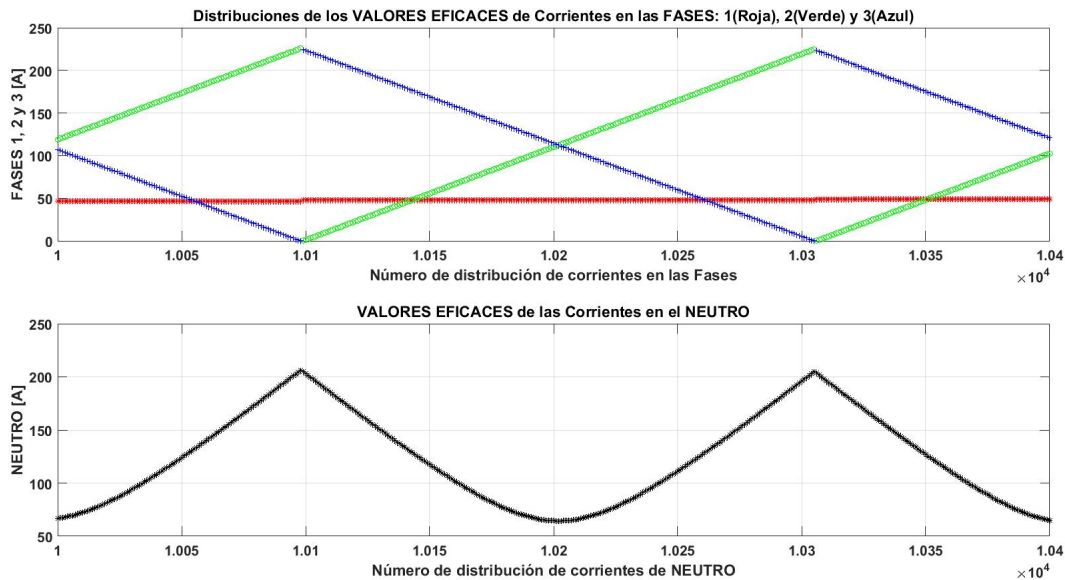


Figura 3

Variación de la distribución de los valores eficaces de las corrientes en las diferentes fases y el neutro.

Con el objeto de generalizar el empleo del Factor de corrección por desbalance ($F_{desb_{BT}}$) para un determinado desbalance considerado, y de esta forma poder utilizarlo en líneas de baja tensión que presenten diferentes longitudes, potencias activas trifásicas transmitidas, como así también diferentes valores de tensiones y corrientes en sus fases, es que no solo se evaluó la línea para la longitud y potencia considerada en las Figuras 1, 2 y 3, sino que también se realizaron numerosos análisis modificando la longitud de la línea, la potencia activa trifásica transmitida, como así también utilizando diferentes módulos de tensiones en las fases.

En el proceso de búsqueda de un $F_{desb_{BT}}$ que permaneciera constante frente a un desbalance seleccionado, se analizaron diferentes alternativas con el objeto de que el $F_{desb_{BT}}$ no dependa de las longitudes de las líneas o secciones de sus conductores, ni de las potencias activas trifásicas transmitidas a la carga, como así tampoco de la variación de tensión en las cargas. De esta forma se buscó un patrón de variación en las pérdidas de energía, que pueda relacionarse con el valor de las pérdidas calculadas para las líneas operando con sistemas de corrientes balanceados (situación típica para los resultados de pérdidas obtenidos con las metodologías de cálculo empleadas por las empresas distribuidoras de energía eléctrica).

El trabajo realizado permitió identificar que el factor de corrección $F_{desb_{BT}}$ depende de la relación porcentual entre los módulos de las corrientes de las fases del sistema desbalanceado y el módulo de las corrientes de las fases del sistema balanceado que transmita la misma potencia activa trifásica a la carga ($I_{desbalan}/I_{balan}$). La citada dependencia permanecerá constante independientemente de: la variación del tipo de línea; las longitudes que tengan las mismas; o de las potencias activas trifásicas transmitidas a la carga. En virtud de lo dicho es posible establecer un factor de corrección $F_{desb_{BT}}$ que afecte a las pérdidas calculadas en un sistema balanceado para obtener las pérdidas cuando el sistema presente corrientes desbalanceadas.

En la Figura 4, se muestran la correspondencia entre los valores del factor de corrección $F_{desb_{BT}}$ calculados en el estudio paramétrico realizado (el cual es aplicado en forma directa sobre las pérdidas calculadas para un sistema balanceado con el objeto de contemplar el incremento de las pérdidas por desbalance) y la relación porcentual $I_{desbalan}/I_{balan}$ de las distintas fases.

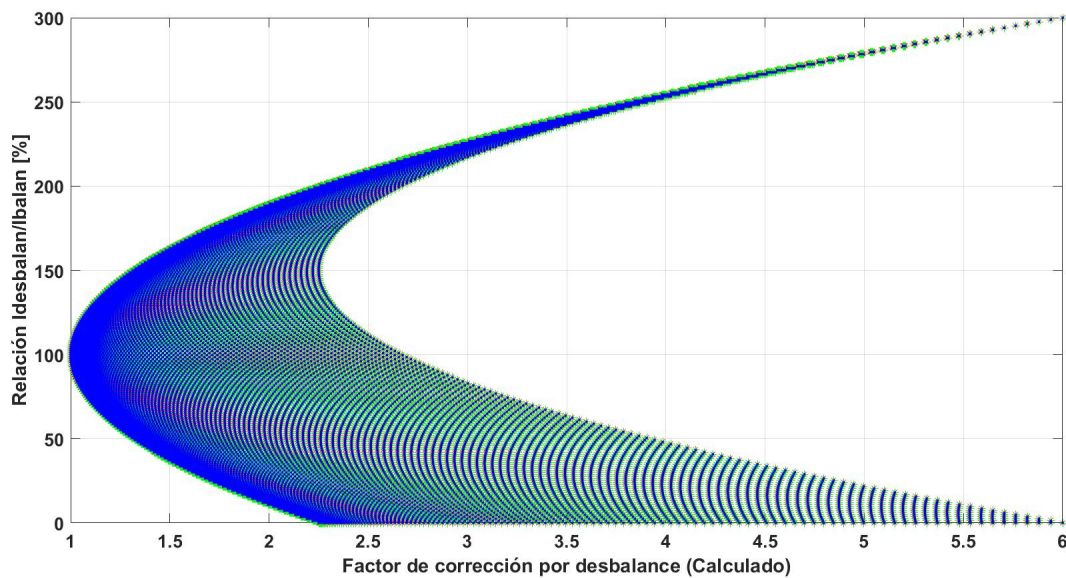


Figura 4
Relación porcentual $I_{desbalan}/I_{balan}$ con respecto al factor $F_{desb_{BT}}$

De acuerdo con los resultados obtenidos en el estudio realizado, se verifica que la Figura 4, no sufre modificaciones independientemente del tipo y longitud de la línea, o bien de la potencia activa trifásica transmitida a la carga. El perímetro externo de la gráfica formada en la Figura 4, es el que se toma para identificar el valor del factor de corrección por desbalance ($F_{desb_{BT}}$) considerando para tal efecto un determinado rango de variación de la relación porcentual entre las corrientes de las fases y las corrientes del sistema balanceado ($I_{desbalan}/I_{balan}$). A modo de ejemplo, cuando se admite que el rango de variación de la citada relación porcentual se encuentra entre 80 y 120%, el valor del factor $F_{desb_{BT}}$ que permitirá corregir el cálculo de pérdidas de líneas de baja tensión será de 1.05. Para poder identificar con mayor claridad el valor de 1.05, en la Figura 5, se muestra una ampliación de la Figura 4 sobre la zona de interés.

Es oportuno mencionar que, dentro del rango seleccionado correspondiente a la variación de la relación porcentual $I_{desbalan}/I_{balan}$, se presenta una gran variedad de Factores de corrección F_{desbBT} que permiten llevar el resultado de las pérdidas calculadas al valor correcto, si se conocieran con certeza los módulos de las corrientes de las fases y neutro. Teniendo presente la realidad de operación de los sistemas de distribución de energía eléctrica, lo mencionado no es posible ya que no se dispone de la información completa de las variaciones de potencia monofásica en los diferentes tramos de las líneas de Baja Tensión, por lo que el factor de corrección F_{desbBT} elegido con la metodología propuesta se ubica en el perímetro externo de la gráfica formada en la Figura 4.

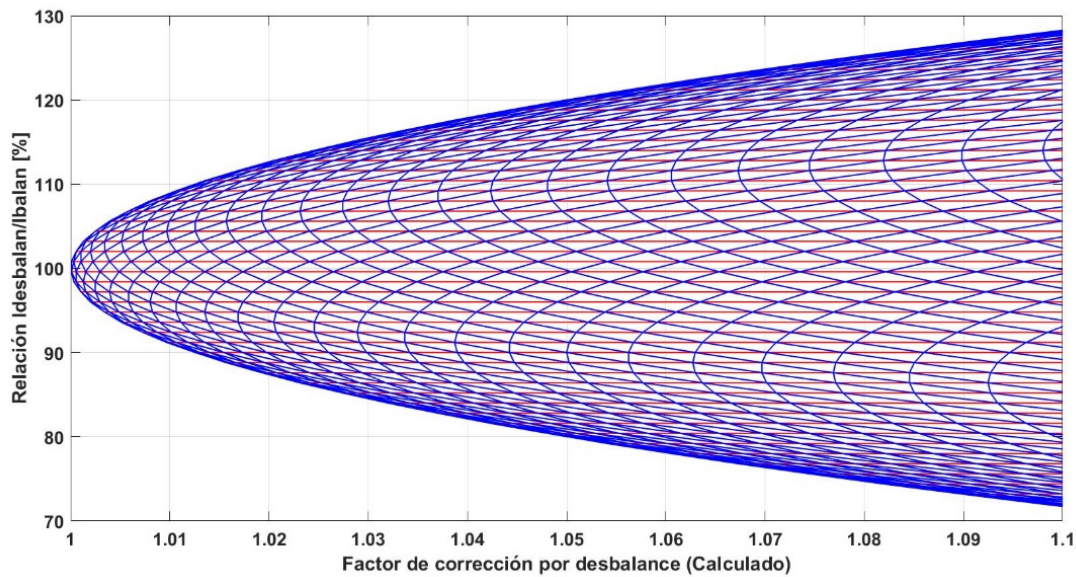


Figura 5

Ampliación de Figura 4, para obtener en forma gráfica el factor buscado $F_{desbBT} = 1.05$

Al elegir el F_{desbBT} de acuerdo con la metodología citada precedentemente, el resultado coincidirá con una distribución de corrientes en las fases de la línea de baja tensión, que se corresponderá para la fase 1 (tomada como referencia) con el valor máximo o mínimo vinculado con el rango seleccionado para la relación porcentual $I_{dsbalan}/I_{balan}$ y para las otras dos fases restantes las corrientes presentaran el mismo módulo. En la parte superior de la Figura 6, se puede apreciar cuáles son las distribuciones de las relaciones porcentuales " $I_{dsbalan}/I_{balan}$ " que cumplen con el rango de 80-120% y en la parte inferior de la Figura 6, se muestran todos los valores del " F_{desbBT} " que se corresponden con las distribuciones de las relaciones porcentuales " $I_{desbalan}/I_{balan}$ " de las distintas fases, destacándose la seleccionada para ser utilizada como factor de corrección " F_{desbBT} ".

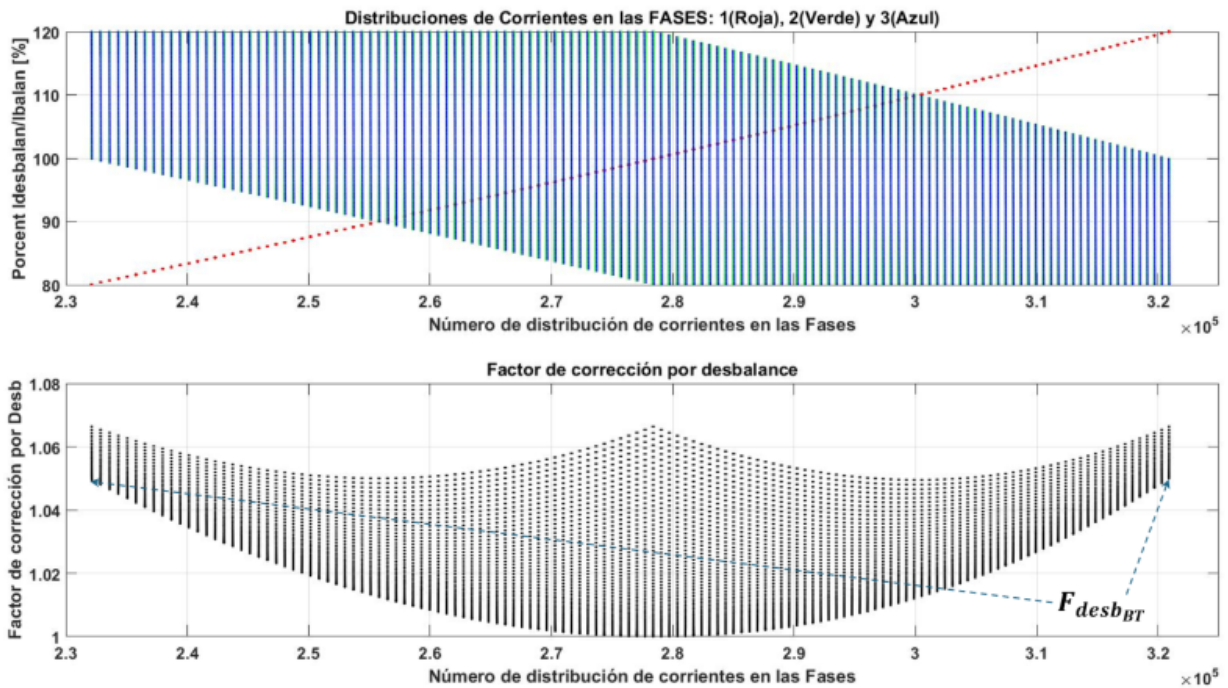


Figura 6
Distribución de corrientes de fases y factores de corrección "F_{desbBT}"

Con el objeto de mostrar cuáles serán los valores del factor de corrección "F_{desbBT}" para diferentes valores del rango de variación de la relación porcentual "I_{desbalan}/I_{balan}", se presenta la Tabla 1.

Tabla 1
Valor del factor F_{desbBT} en función del rango de la relación porcentual "I_{desbalan}/I_{balan}".

	Rango de la relación porcentual $I_{desbalan}/I_{balan}$								
	100% Sist. en equilibrio	90- 110%	80- 120%	70- 130%	60- 140%	50- 150%	40- 160%	30- 170%	20- 180%
F_{desbBT}	1	1.013	1.050	1.111	1.200	1.311	1.449	1.613	1.800

APLICACIÓN DEL FACTOR F_{DESBBT}

El factor de corrección F_{desbBT} cuya descripción y análisis se realizó previamente, se aplicará en las líneas que conforman las islas de la red de baja tensión de los sistemas eléctricos correspondientes a las distribuidoras de energía eléctrica, a través de la expresión [3].

$$Et_{Perd_{RedBT}} = E_{Perd_{RedBT}} * F_{desbBT} \quad [3]$$

En la cual:

$E_{Perd_{RedBT}}$: Pérdidas totales de energía eléctrica en la red de baja tensión, considerando la totalidad de las islas de la distribuidora en estudio. [Wh]

$E_{Perd_{RedBT}}$: Pérdidas de energía eléctrica en la red de baja tensión, considerando la totalidad de las islas de la distribuidora en estudio, pero sin contemplar en las mismas el posible desbalance en corrientes. [Wh]

La expresión [3] permitirá contemplar, en el resultado de las pérdidas obtenidas, el impacto que genera el desbalance en corrientes en un sistema eléctrico trifásico tetrafililar, típico de las redes de distribución de energía eléctrica de baja tensión y de esta forma disminuir el error en la determinación de las pérdidas técnicas.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente trabajo, a través de la metodología presentada, es posible determinar un factor de corrección por desbalance “ F_{desbBT} ” que afecte al valor de las pérdidas calculadas para líneas trifásicas tetrafilares balanceadas, con el objeto de disminuir el error del cálculo de las pérdidas de energía, ya que la realidad de funcionamiento de los sistemas de distribución de energía eléctrica presentan un desbalance en las corrientes de sus fases. Cabe mencionar que el citado factor de corrección tendrá validez, independientemente de la longitud de la línea, de los valores de potencia activa trifásica que ésta se encuentre transmitiendo, como así también de las variaciones de las tensiones en las cargas.

Para seleccionar el factor de corrección “ F_{desbBT} ”, el ente regulador deberá proponer o fijar un valor del rango de variación de la relación porcentual entre las corrientes de las fases y las corrientes del sistema balanceado, teniendo presente que dicho rango no deberá admitir un funcionamiento inapropiado del sistema eléctrico de potencia debido a grandes diferencias entre las corrientes de las fases en las líneas de baja tensión. De acuerdo con la experiencia del equipo de trabajo y teniendo presente lo mencionado, el valor de dicho rango podría ser de 80-120%, bajo esta condición el factor de corrección por desbalance “ F_{desbBT} ” que permitirá obtener un valor más próximo a la realidad en el cálculo de las pérdidas de las líneas de baja tensión, será de 1.05.

Referencias bibliográficas

- Gönen Turan (1986). *Electric Power Distribution System Engineering*, McGraw-Hill, United States of America.
- Gönen Turan (1988). *Modern Power System Analysis*, John Wiley & Sons, United States of America.
- Grainger J. and Stevenson W. D. Jr. (1996). *Análisis de Sistemas de Potencia*, McGraw-Hill, México.
- Hong-Rui Wang et al. (2007). *A New Algorithm for the Theoretical Energy Loss Calculation of the Distribution Network Based on Artificial Neural Networks*, Proceedings of the Sixth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Hong Kong, 19-22 August 2007.
- 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*.
- JIANG Hui-lan et al. (2005). *A Practical Method of Calculating the Energy Losses in Distribution Systems Based on RBF Network*, 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition, Asia and Pacific, Dalian, China.
- Khodr H. M. et al. (2002). “Standard Levels of Energy Losses in Primary Distribution Circuits for SCADA Application”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, N° 3, August 2002.
- Nazarko J. et al. (2000). “The fuzzy approach to energy losses calculations in low voltage distribution networks”, Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE, Vol 4, Page(s): 2763 – 2768, 23-27 Jan. 2000.
- Pabla A. S. (2004). *Electric Power Distribution*, New York, McGraw-Hill, ISBN 1-85233-324-3, pp 199-216.
- Pascual H. O. et al. (2024). *Cálculo de Pérdidas Técnicas de Energía en Sistemas Eléctricos de Transmisión y Distribución*, V Congreso de Energías Sustentables en Bahía Blanca (CES 2024), Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina, 16 al 19 de octubre de 2024. (<https://ces.frbb.utn.edu.ar/2024/>). Publicado en AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN) // ISSN: 2683-8818 // DOI: <https://doi.org/10.33414/ajea.1770.2024>
- Pascual H. O. et al. (2016). *Evaluación de un Algoritmo de Cálculo de Pérdidas Técnicas, Utilizado por Distribuidoras de Energía Eléctrica de Argentina*, III CONGRESO DE LAS AMERICAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA CLADE 2016, Córdoba, Argentina, 03 al 05 de octubre de 2016.
- Pascual H. O. et al. (2008). *Metodología de Cálculo de Pérdidas Técnicas de Energía en Redes Eléctricas*, Congreso Latinoamericano de Distribución Eléctrica CLADE 2008, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina, 22-24 de septiembre de 2008.

AmeliCA

Disponible en:

<https://portal.amelica.org/ameli/ameli/journal/266/2665247007/2665247007.pdf>

Cómo citar el artículo

Número completo

Más información del artículo

Página de la revista en portal.amelica.org

AmeliCA

Ciencia Abierta para el Bien Común

Héctor O. Pascual, Ariel A. Albanese, José L. Maccarone,
Marcelo R. Gil

**Impacto del desbalance sobre la determinación de las
pérdidas técnicas de energía eléctrica en líneas de
distribución de baja tensión**

Ingenio Tecnológico

vol. 7, e065, 2025

Universidad Tecnológica Nacional, Argentina

ingenio@frlp.utn.edu.ar

ISSN-E: 2618-4931



CC BY-NC-SA 4.0 LEGAL CODE

**Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-
CompartirIgual 4.0 Internacional.**