

CUANTIFICACIÓN DEL DESBALANCE ADMISIBLE EN CORRIENTES, PARA REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DE BAJA TENSIÓN.

Héctor Osvaldo Pascual^{1*}, José Luis Maccarone¹, Ariel Adrian Albanese¹, Omar Américo Fata¹ y Carlos Di Clemente².

¹Grupo de I+D sobre Tratamiento de Señales en Sistemas Eléctricos (TSSE). Dto. Electrotecnia. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata. Dirección: 60 y 124, La Plata, CP (1900), Buenos Aires, Argentina.

²Empresa Distribuidora de Energía Norte S.A. (EDEN). Dirección: Carlos Pellegrini N°1023, Piso 10, CABA, Código Postal: C1009ABU, Argentina.

*Autor a quien se debe dirigir la correspondencia

Correo electrónico: opascual@frlp.utn.edu.ar

Resumen: Las redes de Distribución de energía Eléctrica, presentan generalmente corrientes diferentes en cada una de sus fases. Lo dicho es debido a las características de las cargas alimentadas por las citadas redes, entre las cuales se encuentran los consumos domiciliarios. El grado de desbalance de las corrientes no se encuentra acotado por ninguna reglamentación vigente, más allá de que desde un punto de vista técnico, sería conveniente que la operación del sistema se realizara contemplando sus líneas con cargas balanceadas. El objeto del presente trabajo es determinar cuál es el grado de desbalance en corrientes admisible en sistemas de distribución eléctrica de baja tensión, para que no se afecte la calidad del producto técnico (tensión) de dicho sistema. Para tal efecto y contemplando los parámetros acotados por la reglamentación vigente en Argentina, se cuantifica el mencionado desbalance a través de la relación porcentual entre la componente de secuencia negativa y positiva (relación empleada por IEEE e IEC).

Palabras claves: Desbalance, Corrientes, Distribución, Reglamentación.

Abstract: The Electric Energy Distribution networks, have generally a different currents in each a phases. This is due to the characteristics of the loads which fed by the aforementioned networks, among which are the household consumption. The degree of unbalance of the currents is not bounded by any current regulations. Nevertheless is advisable technically that the operation of the system be realized contemplating its lines with balanced loads. The aim of the present work is to determine the admissible degree of currents unbalance, in low voltage electrical distribution systems; so that the quality of the voltage of said system is not affected. For this purpose, and considering the parameters bounded by the current regulations in Argentina, aforementioned imbalance is quantified through the percentage ratio between the negative and positive sequence components (ratio used by IEEE and IEC).

Keywords: Unbalance, Currents, Distribution, Regulation.

Introducción:

Un sistema de distribución trifásico de energía eléctrica presenta un desbalance en corrientes cuando sus módulos son desiguales y/o cuando los ángulos de separación entre los fasores de las mencionadas corrientes se apartan de los 120° entre sí.

Las cargas alimentadas por las redes de distribución de energía eléctrica, entre las cuales se encuentran los consumos domiciliarios de naturaleza monofásica, 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. Este dependerá de las características de las cargas y de las tensiones presentes en los distintos puntos de 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.

Contemplando 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. En el presente trabajo se identifica la mencionada relación como *Factor de Desbalance en Corriente (F_{din})*.

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 F_{din} . En tal sentido es objeto del presente trabajo mostrar cual es el valor que podría admitirse del mencionado factor, sin violar los parámetros de calidad de servicio referidos al producto técnico (tensión), tales como: caídas o subidas de las tensiones de fase, factor de potencia y factor de desbalance en tensiones.

Es oportuno mencionar que el estudio presentado se desprende de las actividades vinculadas con el Proyecto de I+D con título "Tratamiento de señales aplicado a Sistemas Eléctricos de Potencia", el cual se desarrolla en el Dto. de Electrotecnia de la Facultad Regional La Plata (Código: UTI3464TC en la esfera del Programa de Incentivos a los Docentes Investigadores y en todo el ámbito de la UTN).

Desarrollo:

Identificación de las variables intervinientes:

Como referencia para el presente estudio se utiliza el circuito de la Figura 1, en el cual se aprecia la representación de una línea de distribución de energía eléctrica con sus respectivas cargas.

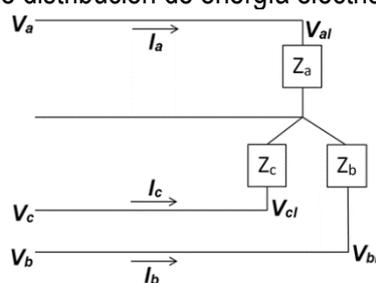


Figura 1.

Las cargas que alimenta un sistema de distribución eléctrica presentan características muy variadas. Estas cargas pueden provocar que las corrientes de las fases sean desiguales en magnitud y ángulo. Además, las corrientes desbalanceadas provocan que las tensiones de las fases se aparten de su valor nominal en distinta forma, debido a lo cual se manifiesta un desbalance en tensiones, que también son contempladas. En virtud de lo mencionado para el presente estudio se realizan las siguientes consideraciones:

* Las tensiones no presentan deformación y la terna que alimenta la línea en estudio ($V_a-V_b-V_c$) 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 de 220 V).

* 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%. Esto en virtud de que la reglamentación vigente de la República Argentina (ENRE Res: 184, 2000) no fija límites en forma directa para dicho Factor (Pascual et al. 2013).

Metodología empleada:

Contemplando que la evaluación del desbalance en corrientes se obtiene a través del cociente mostrado en la expresión (1), la base de la metodología empleada consiste en analizar el comportamiento de la línea de distribución, con respecto a parámetros de calidad del producto técnico (tensión), cuando se efectúan barridos de ternas de secuencia negativa, con módulos diferentes, sobre ternas de secuencia positiva, para las cuales también se consideran distintos módulos. En la Figura 2 se aprecia la secuencia positiva afectada de la secuencia negativa para un instante del barrido mencionado anteriormente. Cabe aclarar que como en el presente estudio se encuentran sólo componentes de secuencia directa e inversa, no existirán corrientes que circulen por el neutro de la línea.

$$F_{din} = \frac{|I_{sneg}|}{|I_{abase}|} \times 100 \text{ [%]} \quad (1)$$

I_{sneg} = Corriente de secuencia negativa de la fase a.

I_{abase} = Corriente de secuencia positiva de la fase a.

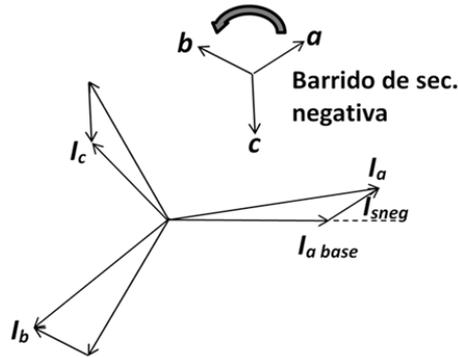


Figura 2.

Como punto de partida para el inicio del análisis paramétrico y considerando como referencia la fase a, se determina la corriente máxima I_{a0} , que se encuentra en fase con la tensión en la carga V_{al} , estableciendo como rango para la tensión V_{al} al estipulado por la reglamentación vigente ($\pm 8,0$ % de la tensión nominal). De la Figura 3 se desprende la expresión (3), a través de la cual se obtiene el valor del módulo de I_{a0} buscado.

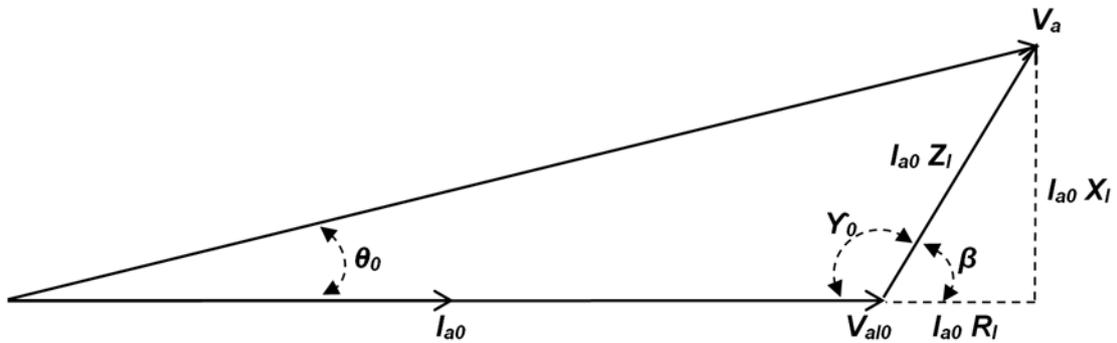


Figura 3.

$$|I_{a0}| = \frac{2|V_{al0}||Z_l|\cos(\gamma_o) + \sqrt{[2|V_{al0}||Z_l|\cos(\gamma_o)]^2 - 4|Z_l|^2(|V_{al0}|^2 - |V_a|^2)}}{2|Z_l|^2} \quad (3)$$

En esta última:

$$\gamma_o = \pi - \beta \text{ [rad]}$$

$$\beta = \text{atang}(X_l/R_l). \text{ [rad]}$$

X_l = Reactancia de la línea. [Ω]

R_l = Resistencia de la línea. [Ω]

Z_l = Impedancia de la línea. [Ω]

I_{a0} = Corriente inicial de la fase a. [A]

V_a = Tensión de alimentación de la línea, correspondiente a la fase a y módulo V_{nom} . [V]

$V_{al0} = 0.92V_{nom}$ = Mínima tensión en la carga (fase a). [V]

V_{nom} = Tensión nominal del sistema. [V]

Si en alguno de los barridos realizados, para las diferentes longitudes de la línea, el valor del módulo de la corriente I_{a0} , obtenido de la expresión (3), supera al valor de la corriente nominal del conductor, se adopta como corriente de inicio a dicha corriente nominal.

Con el valor del módulo de I_{a0} y a través de la expresión (4) se determina el módulo de la corriente $I_{a\ base}$, la cual formará la secuencia directa a la que se le aplicará el barrido de corriente de secuencia inversa I_{sneg} , (Figura 4).

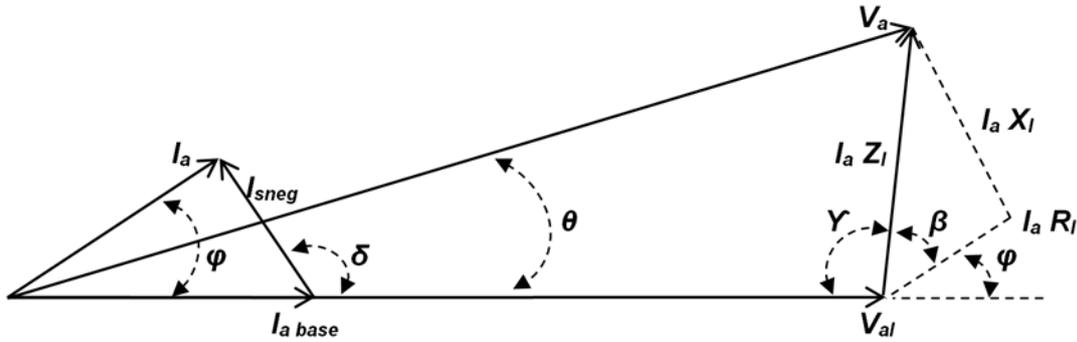


Figura 4.

$$|I_{a\ base}| = |I_{a0}| - |I_{sneg}| \quad (4)$$

Para los cálculos realizados en el presente trabajo se contemplaron una serie de valores del módulo de I_{a0} , partiendo del valor determinado por (3) y decreciendo hasta un valor cercano a cero.

A través de la expresión (5) se determina el ángulo δ el cual es el ángulo de barrido de la I_{sneg} que provocará el ángulo máximo φ , entre el fasor de corriente I_a y la tensión de carga V_{al} .

$$\delta = \pi - \arccos\left(\frac{|I_{sneg}|}{|I_{a\ base}|}\right) \quad (5)$$

Conociendo este ángulo δ y por medio de (6) y (7) es posible calcular el ángulo máximo de φ y compararlo con el ángulo de carga permitido por la reglamentación vigente, el cual para nuestro estudio se corresponde con un valor de $\cos(\varphi)$ igual a ± 0.85 .

$$I_a = |I_{a\ base}| \angle 0 + |I_{sneg}| \angle \delta \quad (6)$$

$$\varphi = \operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{imag}\{I_a\}}{\operatorname{real}\{I_a\}}\right) \quad (7)$$

Con el objeto de determinar el rango de variación del módulo del fasor I_{sneg} , utilizado para los barridos de secuencia negativa, se procede determinando el $\cos(\varphi)$ para diferentes valores de I_{sneg} , en orden creciente. Cuando se alcanza el valor que provoca que el $\cos(\varphi)$ se encuentre fuera del rango establecido por la reglamentación, éste se descarta y de esta forma queda fijado su rango de variación.

Para proseguir con los cálculos, se realizan dos verificaciones, que se suman a la ya realizada y vinculada con el valor de $\cos(\varphi)$. Estas se hacen para todos los casos analizados y vinculados con los barridos de secuencia negativa, efectuados para diferentes corrientes de fase y distintas longitudes de la línea. Las verificaciones mencionadas son:

a) Que la tensión en la carga V_{al} no supere en ningún caso el rango de tensión admitido ($\pm 8\%$ de la tensión nominal). Para cumplir con lo dicho y del análisis de la Figura 4 se obtiene el fasor de tensión en la carga V_{al} , expresión (8).

$$V_{al} = |V_a| \angle \theta - |I_a| \angle \varphi Z_l \quad (8)$$

Donde el ángulo θ de la tensión V_a se calcula a través de la expresión (9)

$$\theta = \text{asen} \left(\frac{|I_a Z_l| \text{sen}(\gamma)}{|V_a|} \right) \quad (9)$$

El barrido de secuencia negativa afecta a todas las fases del sistema trifásico considerado, razón por la cual si durante este barrido el módulo de V_{al} no supera los márgenes de $\pm 8\%$ en la fase a , este margen no será superado en ninguna de las otras fases.

b) Además se verifica que el factor de desbalance en la tensión F_{dvn} al final de la línea, dado por la expresión (10) y provocado por el desbalance en las corrientes, no supere el valor de 2% recomendado por IEEE Std 1159, (2009) e IEC 61000-2-2, (2000).

$$F_{dvn} = \frac{|V_{al}^{neg}|}{|V_{al}^{pos}|} \times 100 \text{ [%]} \quad (10)$$

El cálculo de las componentes de secuencias positiva y negativa, vinculadas con la expresión (10) se efectúa a través de la aplicación del teorema de Fortescue (Grainger et al. 1995) y estarán dadas por la expresión (11).

$$\begin{bmatrix} V_{al}^{hom} \\ V_{al}^{pos} \\ V_{al}^{neg} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & k & k^2 \\ 1 & k^2 & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{al} \\ V_{bl} \\ V_{cl} \end{bmatrix} \quad (11)$$

En esta última “ k ” es un operador que genera una rotación de 120° en la dirección contraria a la de las agujas de un reloj.

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

$$k^2 = 1 \angle 240^\circ = 1 e^{j4\pi/3} = -0.5 - j0.866$$

Las tensiones de carga V_{al} , V_{bl} y V_{cl} de la expresión (11) se obtienen a partir de conocer el sistema equilibrado de tensiones de alimentación de la línea en cuestión y afectarlo de las caídas provocadas por las corrientes que circulan en cada una de las fases, expresiones (12), (13) y (14) respectivamente.

$$V_{al} = |V_a| \angle \theta - I_a Z_l \quad (12)$$

$$V_{bl} = |V_a| \angle (\theta - 2\pi/3) - I_b Z_l \quad (13)$$

$$V_{cl} = |V_a| \angle (\theta + 2\pi/3) - I_c Z_l \quad (14)$$

En estas últimas, las corrientes I_a , I_b e I_c se obtienen de las expresiones (15), (16) y (17).

$$I_a = |I_{abase}| \angle 0 + |I_{sneg}| \angle \delta \quad (15)$$

$$I_b = |I_{abase}| \angle (-2\pi/3) + |I_{sneg}| \angle (\delta + 2\pi/3) \quad (16)$$

$$I_c = |I_{abase}| \angle (2\pi/3) + |I_{sneg}| \angle (\delta - 2\pi/3) \quad (17)$$

A través de la metodología expresada se desarrolló un programa que permite realizar los cálculos de todas las variables involucradas en el presente estudio paramétrico y de esta forma obtener los resultados buscados.

Para el presente trabajo se consideraron diferentes tipos de líneas aéreas, las cuales se utilizan en la República Argentina para la distribución de energía eléctrica en baja tensión. Las características principales de estas líneas se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Tipos de Líneas aéreas utilizadas en el presente estudio

	Material	Sección [mm ²]	Disposición	Resistencia [Ω/Km]	Reactancia [Ω/Km]	I adm. [A]
Línea A	Aleac. Al.	3x185/95	Horizontal aislador perno rígido.	0.172	0.241	400
Línea B	Aleac. Al.	3x95/50	Horizontal aislador perno rígido.	0.373	0.257	240
Línea C	Aleac. Al.	3x50/25	Horizontal aislador perno rígido.	0.643	0.276	150
Línea D	Aleac. Al.	4x25	Horizontal aislador perno rígido.	1.276	0.317	100
Línea E	Cu.	3x120/70	Horizontal aislador perno rígido.	0.162	0.241	400
Línea F	Cu.	3x70/50	Horizontal aislador perno rígido.	0.291	0.257	250
Línea G	Cu.	3x50/35	Horizontal aislador perno rígido.	0.399	0.265	200
Línea H	Cu.	3x35/16	Horizontal aislador perno rígido.	0.572	0.276	160
Línea I	Cu.	4x16	Horizontal aislador perno rígido.	1.186	0.317	100
Línea J	Aleac. Al.	3x95/50	Preensamblado.	0.345	0.090	190
Línea K	Aleac. Al.	3x70/50	Preensamblado.	0.430	0.090	150
Línea L	Aleac. Al.	3x50/50	Preensamblado.	0.600	0.090	120
Línea M	Aleac. Al.	3x25/50	Preensamblado.	1.210	0.090	75

Resultados:

El algoritmo desarrollado, teniendo como base la metodología planteada anteriormente, arroja la información que permite construir la Figura 5, la cual muestra la totalidad de datos calculados para la **Línea A** (Tabla1). En la citada Figura puede apreciarse cuál es el valor que podría tomar el Factor de desbalance en corriente F_{din} , (sin afectar los parámetros de calidad de la tensión tenidos en cuenta en este trabajo), en función de la longitud de la línea y de la mayor corriente que se encuentre circulando por alguna de las fases.

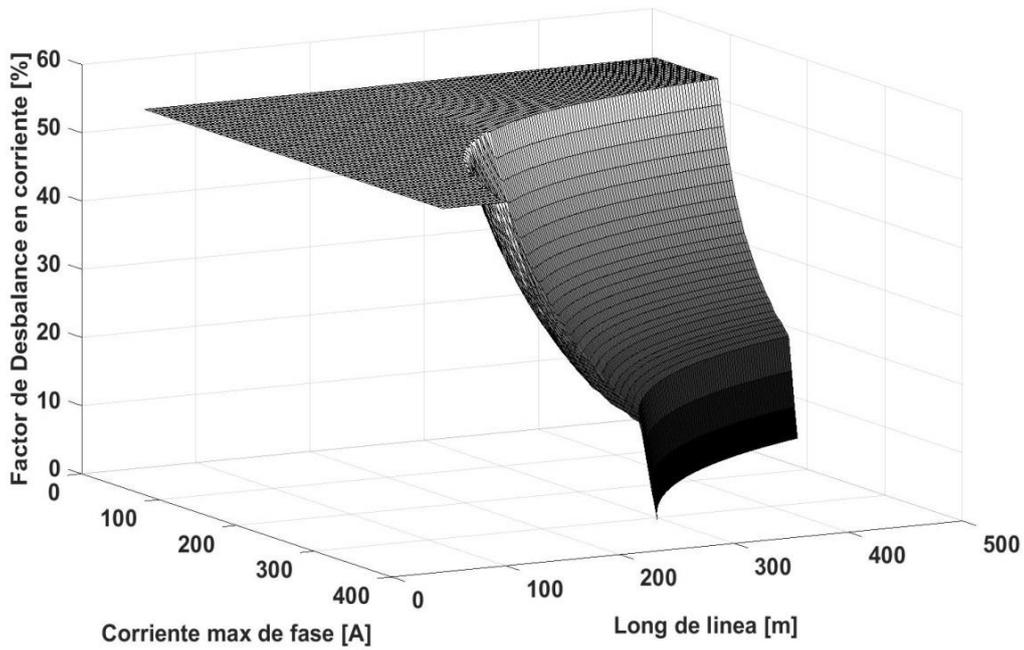
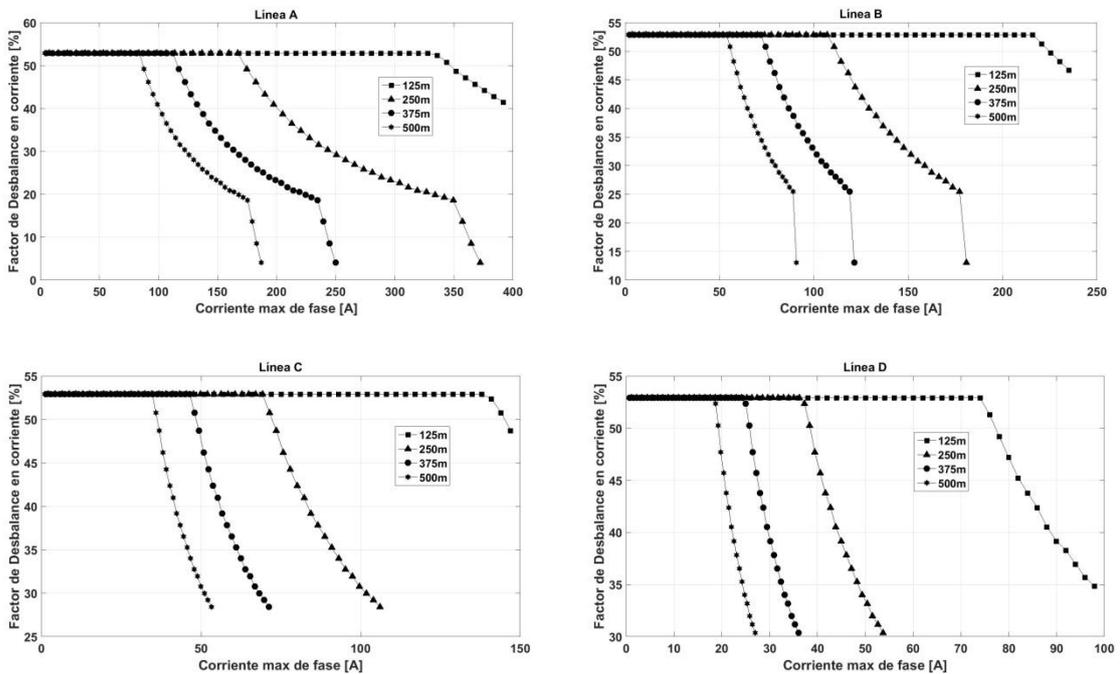


Figura 5.

Con el objeto de facilitar la lectura de los datos arrojados por el algoritmo para las diferentes líneas analizadas (Tabla 1), en la Figura 6 se presentan gráficos en el plano, que muestran el factor de desbalance en corriente (F_{din}) con respecto a la corriente máxima que circula por la línea, pero contemplando solamente longitudes de la misma de: 125, 250, 375 y 500 metros.



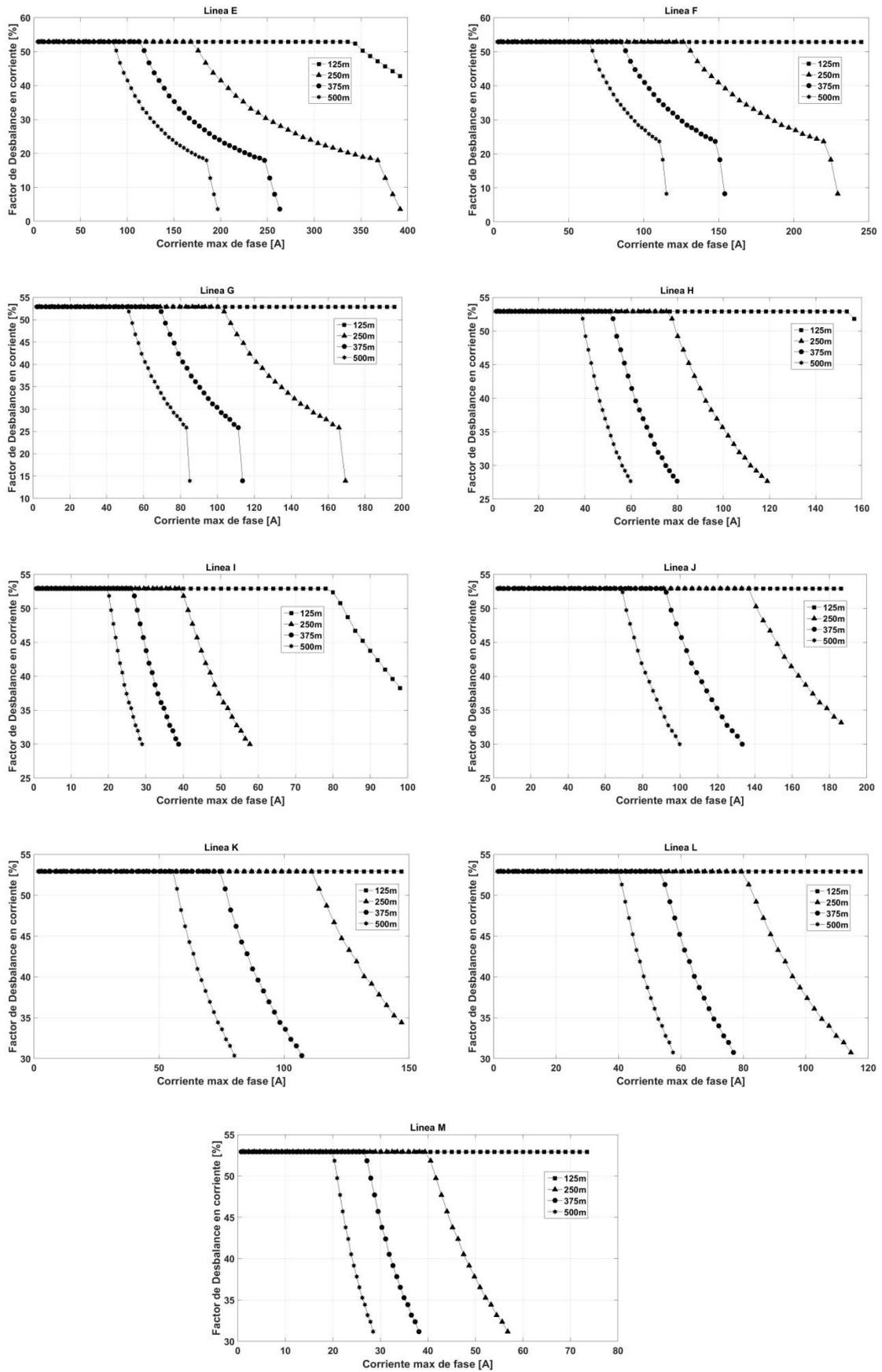


Figura 6.

Análisis de resultados:

En los resultados mostrados en las Figuras 5 y 6, se puede apreciar 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 F_{din} se corresponde con el máximo Factor de potencia admitido por la reglamentación vigente. 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 el máximo ángulo entre la corriente y la tensión en la carga, permitido por la reglamentación.

Conclusiones:

Desde un punto de vista nacional e internacional, y contemplando la literatura actual disponible al respecto (utilizando como principal fuente al *Institute of Electrical and Electronics Engineers* IEEE), se desprende que no existe una metodología que permita acotar el factor de desbalance en corriente para líneas de distribución de energía eléctrica de baja tensión. El presente trabajo muestra una manera de lograr lo mencionado y a través de gráficos como los de las Figuras 5 y 6 es posible cuantificar el F_{din} , para diferentes tipos de líneas, con distintas longitudes y considerando la corriente máxima que circula por éstas.

Teniendo en cuenta que una línea de baja tensión abastece distintas cargas a lo largo de su recorrido y puede estar alimentada a través de un sistema trifásico de tensiones que presente un cierto grado de desbalance, cabe mencionar que la aplicación de los gráficos 5 y 6 son orientativos cuando se los utiliza con los datos provenientes de una medición de campo, en virtud de que dichos gráficos fueron construidos en base a considerar la carga concentrada al final de la línea y que el sistema trifásico de tensiones que alimenta la línea es simétrico y equilibrado. Más allá de lo dicho y en relación con la distribución de carga a lo largo de la línea, la condición contemplada para los cálculos, es la más desfavorable en relación con la metodología empleada en el presente trabajo para evaluar el desbalance.

Referencias:

- [1] Grainger J. J. and Stevenson W. D. Jr. (1995). *Análisis de Sistemas de Potencia* (391-440). México. McGraw-Hill.
- [2] 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".
- [3] IEC 61000-4-30: 2008., "Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods".
- [4] IEEE Std 1159-2009., "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality".
- [5] ENRE Ente Nacional Regulador de la Electricidad (Argentina), Res. 184/2000.
- [6] Pascual H. O., Albanese A. A., Fata O. A., Neira L. L., Pérez F. A. y Schattenhoffer F., "Análisis del Desbalance en Redes de Distribución Argentinas, Contemplando la Reglamentación

Nacional Vigente al Respetto,” Décimo Quinto Encuentro Regional Iberoamericano del CIGRÉ (XV ERIAC 2013), Foz de Iguazú-PR, Brasil, 19-23 de mayo de 2013.