

**GRUPO TSSE (CODAPLI) UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL FRLP
ARGENTINA**

Sesión Técnica 5: Calidad del Servicio y del Producto en Distribución

- Calidad del Producto. Aspectos técnicos de la calidad del producto: armónicos, flicker, desbalances, huecos de tensión. Análisis, predicción y medición.

**ALCANCES DE LA EXPRESIÓN DADA POR IEC E IEEE PARA OBTENER EL FACTOR DE
DESBALANCE CON LOS MÓDULOS DE TENSIONES O CORRIENTES.**

Autor/es / Authors	Dr.-Ing. HECTOR OSVALDO PASCUAL, Ing. ARIEL ADRIAN ALBANESE y Dr.-Ing. JOSE LUIS MACCARONE.
Empresa o entidad / Company or Organization	GRUPO TSSE (CODAPLI) UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL FRLP.
Cargo / Position	DOCENTE-INVESTIGADOR
DATOS DE LA EMPRESA / ORGANIZATION INFORMATION	
Dirección / Address	Avda. 60 y 124 s/n
Localidad / Location	Berisso, Buenos Aires
País / Country	Argentina
Código Postal / Zip Code	1923
Teléfono / Telephone	0221 412 4300
Fax	
E-Mail	hopascual@gmail.com

RESUMEN:

El factor de desbalance de secuencia negativa, se encuentra definido a través de la normativa internacional IEC e IEEE por medio de la relación porcentual entre la componente de secuencia negativa y positiva. Además, es posible obtener un factor de desbalance de secuencia homopolar, el cual estará dado por la relación porcentual entre la componente de secuencia homopolar y positiva. En este sentido es oportuno mencionar que, a través de la normativa vigente en la República Argentina, no se encuentra acotado directamente ninguno de los factores mencionados.

Cuando se pretende determinar el desbalance en tensiones o corrientes en un sistema trifásico tetrafilare de distribución de energía eléctrica de baja tensión (como el de Argentina), es práctico utilizar los módulos de tensiones o corrientes, en lugar de emplear los módulos y ángulos para obtener las componentes de secuencia y a través de estas componentes obtener los factores de desbalance. Lo dicho en virtud de que la medición de los módulos de las tensiones o corrientes no requieren de la utilización de equipamiento sofisticado.

Considerando lo dicho es que en el presente trabajo se analizan los alcances que presenta la aplicación de la expresión dada en los estándares: IEC 61000-4-30 (2008) y IEEE 1159 (2009), basada en el empleo de los módulos de las tensiones o corrientes, para determinar el factor de desbalance de secuencia negativa en tensiones o en corrientes respectivamente. En este aspecto se busca mostrar en cuales casos es posible aplicar la mencionada expresión y cuantificar los errores que se cometen al emplearla en situaciones que comúnmente se presentan en los sistemas de distribución de energía eléctrica.

Palabras claves: Desbalance, Mediciones, Errores.

**GRUPO TSSE (CODAPLI) UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL FRLP
ARGENTINA**

Sesión Técnica 5: Calidad del Servicio y del Producto en Distribución

- Calidad del Producto. Aspectos técnicos de la calidad del producto: armónicos, flicker, desbalances, huecos de tensión. Análisis, predicción y medición.

1- INTRODUCCIÓN.

Los sistemas trifásicos tetrafilares de distribución de energía eléctrica, pueden presentar diferentes grados de desbalance en tensiones, lo cual se produce cuando los módulos de las tensiones de cada fase son diferentes entre sí, o bien cuando el ángulo de separación entre los fasores que representan las tensiones de cada fase, se aparta de los 120°. Análogamente, los mencionados sistemas pueden presentar diferentes grados de desbalance en corrientes, cuando los módulos de las corrientes de las fases no son iguales o cuando su ángulo de separación es distinto a los 120°.

Para cuantificar el grado de desbalance de tensiones o corrientes en un sistema trifásico, es posible emplear las expresiones (1) y (2) obtenidas de IEC [3] e IEEE [4].

$$F_{avn} [\%] = \frac{|\bar{V}_1^{neg}|}{|\bar{V}_1^{pos}|} 100 \quad (1)$$

$$F_{din} [\%] = \frac{|\bar{I}_1^{neg}|}{|\bar{I}_1^{pos}|} 100 \quad (2)$$

Con estas últimas expresiones, el grado de desbalance se obtiene a través de una relación entre la magnitud de la componente de secuencia negativa y la magnitud de la componente de secuencia positiva, expresada como porcentaje. Las componentes de secuencia mostradas en (1) y (2) se obtienen a través de (3) y (4) respectivamente.

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1^{hom} \\ \bar{V}_1^{pos} \\ \bar{V}_1^{neg} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_{10} \\ \bar{V}_{20} \\ \bar{V}_{30} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1^{hom} \\ \bar{I}_1^{pos} \\ \bar{I}_1^{neg} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Siendo:

a : Operador que genera una rotación de 120° en la dirección contraria a la de las agujas de un reloj.

\bar{V}_{10} , \bar{V}_{20} y \bar{V}_{30} : Fasores correspondientes a las tensiones de las diferentes fases.

\bar{I}_1 , \bar{I}_2 y \bar{I}_3 : Fasores correspondientes a las corrientes de las diferentes fases.

Como se puede apreciar, obtener estos factores de desbalance " F_{avn} " y " F_{din} " requieren del conocimiento del módulo y del ángulo de las tensiones y corrientes del sistema. Lo dicho presenta un grado de dificultad cuando no se dispone de equipo sofisticado que permita realizar una medición fasorial de las variables en cuestión.

En virtud de lo mencionado es que una alternativa a través de la cual es posible obtener los factores F_{avn} y F_{din} , es emplear las expresiones (5) y (6), dadas en los estándares [3] y [4].

$$\left. \begin{aligned} F_{avn} [\%] &= \frac{\sqrt{1 - \sqrt{3 - 6\beta_v}}}{\sqrt{1 + \sqrt{3 - 6\beta_v}}} 100 \\ \beta_v &= \frac{V_{12}^4 + V_{23}^4 + V_{31}^4}{(V_{12}^2 + V_{23}^2 + V_{31}^2)^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

**GRUPO TSSE (CODAPLI) UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL FRLP
ARGENTINA**

Sesión Técnica 5: Calidad del Servicio y del Producto en Distribución

- Calidad del Producto. Aspectos técnicos de la calidad del producto: armónicos, flicker, desbalances, huecos de tensión. Análisis, predicción y medición.

$$F_{din}[\%] = \left. \begin{aligned} & \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta_i}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta_i}}} 100 \\ & \beta_i = \frac{I_1^4 + I_2^4 + I_3^4}{(I_1^2 + I_2^2 + I_3^2)^2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

V_{12}, V_{23} y V_{31} : Módulos de los fasores de las tensiones de línea

I_1, I_2 e I_3 : Módulos de los fasores de las corrientes de línea.

En las expresiones (5) y (6) se puede apreciar que la información requerida son los módulos de las tensiones para determinar el " F_{dvn} " o los módulos de las corrientes para obtener el " F_{din} ", lo cual permite la utilización de equipamiento menos sofisticado y de un costo menor.

De acuerdo con lo establecido en [3] y [4], las expresiones (5) y (6) son válidas cuando el sistema de tensiones y corrientes respectivamente, no presentan armónicos y además no tienen componentes homopolares.

Más allá de lo mencionado en el párrafo anterior y observando la practicidad que presenta la utilización de las expresiones (5) y (6) para obtener el desbalance en tensiones " F_{dvn} " y corrientes " F_{din} ", alguien puede verse tentado a emplear estas ecuaciones en los sistemas de distribución de baja tensión, presumiendo que el error cometido podría ser pequeño. En virtud de esto, es objeto del presente trabajo cuantificar los errores en las citadas mediciones, cuando las mismas se realizan sobre los sistemas de distribución de baja tensión, en las condiciones habituales de su explotación.

2- DETERMINACION DEL " F_{dvn} " (tensiones):

Cuando se emplea la expresión (5) para determinar el " F_{dvn} " en un sistema trifásico tetrafilar, no se cometen errores producto de su utilización y el valor obtenido coincide con el arrojado por la expresión (1). Lo dicho, en virtud de que en la expresión (5) se emplean los módulos de los fasores de las tensiones de línea $\bar{V}_{12}, \bar{V}_{23}$ y \bar{V}_{31} cuya suma fasorial da cero por tratarse de un triángulo de tensiones, esto implica que el valor de la componente de secuencia homopolar presente en el sistema formado por las tensiones $\bar{V}_{12}, \bar{V}_{23}$ y \bar{V}_{31} , será nulo. Cabe mencionar que, para el mismo sistema trifásico, si en lugar de utilizar las tensiones de línea, se considera el sistema conformado por los fasores de las tensiones de fase, éste podría presentar una componente homopolar.

3- DETERMINACIÓN DEL " F_{din} " (corrientes):

Al emplear la expresión (6) para determinar el " F_{din} " en un sistema trifásico tetrafilar podrían cometerse errores, en virtud de que en este tipo de sistemas es común que aparezcan corrientes por el neutro producto del desbalance de las corrientes en las diferentes fases, lo cual implica la presencia de una secuencia homopolar en el sistema de corrientes, ya que en estos casos la suma de los fasores de las corrientes en las líneas (\bar{I}_1, \bar{I}_2 e \bar{I}_3) no es cero. En esta situación el resultado arrojado por la expresión (6) no coincidiría con el valor dado en la expresión (2), introduciéndose de esta forma un error en la medición del F_{din} .

Metodología para cuantificar el error en la determinación del " F_{din} ".

**GRUPO TSSE (CODAPLI) UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL FRLP
ARGENTINA**

Sesión Técnica 5: Calidad del Servicio y del Producto en Distribución

- Calidad del Producto. Aspectos técnicos de la calidad del producto: armónicos, flicker, desbalances, huecos de tensión. Análisis, predicción y medición.

Para la evaluación del error en la determinación del " F_{din} " en un sistema trifásico tetrafilar cualquiera, se utiliza la expresión (7).

$$e_{F_{din}}[\%] = \frac{F_{din}' - F_{din}}{F_{din}} 100 \quad (7)$$

En la cual:

$e_{F_{din}}$: Error relativo porcentual en la determinación del Factor de desbalance en corrientes.

F_{din}' : Factor de desbalance en corrientes obtenido a través de la aplicación de la expresión (6).

F_{din} : Factor de desbalance en corrientes obtenido a través de la aplicación de la expresión (2).

Teniendo presente las diferentes condiciones de explotación del sistema eléctrico de distribución de baja tensión, es que para identificar como impacta la presencia de la componente homopolar en el error " $e_{F_{din}}$ ", se realiza un estudio paramétrico.

En un sistema trifásico tetrafilar de corrientes cualquiera, el sistema de secuencia negativa y el de secuencia homopolar pueden tener una amplia gama de valores en módulos y ángulos, razón por la cual en el estudio paramétrico se tomó un sistema trifásico de corrientes de secuencia positiva con un valor de referencia para el módulo de las corrientes y se lo afectó con sistemas de componentes de secuencia negativa y homopolar con diferentes módulos y ángulos. Esta composición de sistemas: positivo, negativo y homopolar se llevó adelante realizando diferentes barridos de la secuencia negativa sobre la secuencia directa y lo dicho para diferentes valores de módulo y ángulo de la secuencia homopolar (Figura 1)

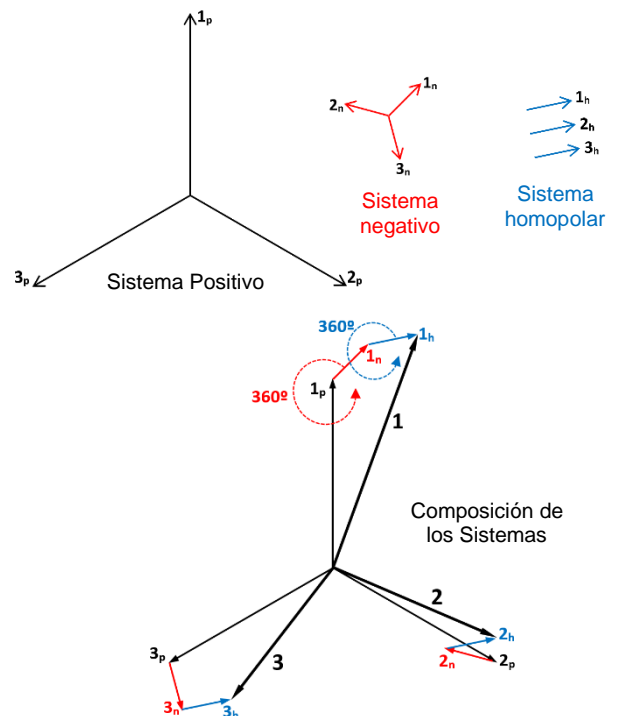


Figura-1: Ejemplo de uno de los puntos del barrido de secuencias.

Con esta metodología, los fasores de la terna de secuencia negativa adoptan distintos módulos que giran 360° para cada módulo y ángulo de la terna de secuencia homopolar, cuyos fasores también adoptan diferentes módulos para los cuales se hace un barrido de 360° . Esto permite abarcar las diferentes posibilidades de desbalance que se pueden presentar en cualquier sistema trifásico tetrafilar de corrientes.

Los resultados arrojados en el estudio se guardan en una matriz volumétrica, de la cual se pueden obtener gráficos como el de la Figura 2, en donde se observa el error cometido al usar la expresión (6) para calcular el Factor de desbalance en corrientes " F_{din} " cuando el sistema presenta una corriente homopolar

**GRUPO TSSE (CODAPLI) UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL FRLP
ARGENTINA**

Sesión Técnica 5: Calidad del Servicio y del Producto en Distribución

- Calidad del Producto. Aspectos técnicos de la calidad del producto: armónicos, flicker, desbalances, huecos de tensión. Análisis, predicción y medición.

cuyo módulo es de 1% de la componente positiva y su ángulo es de 0° . O también un gráfico como el de la Figura 3 en el cual se aprecia el citado error, pero esta vez contemplando una corriente homopolar con un módulo de 2% de la componente positiva y un ángulo de 0° .

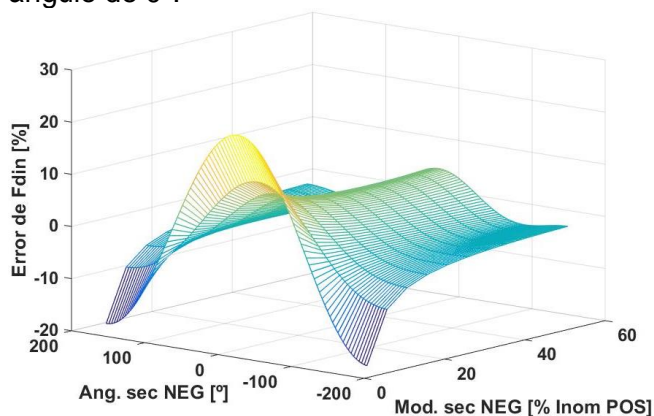


Figura-2: Error en la determinación del " F_{din} " con 1% de Sec. Homopolar y ángulo de 0° .

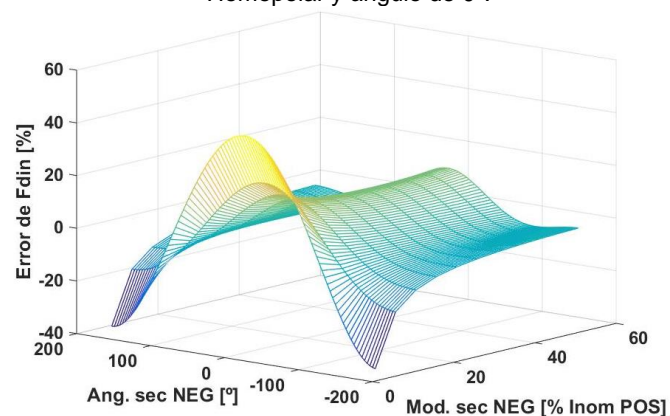


Figura-3: Error en la determinación del " F_{din} " con 2% de Sec. Homopolar y ángulo de 0° .

Si se conserva el mismo valor de módulo de la corriente homopolar que el utilizado para la Figura 3 (2% de la componente positiva) y se toma un ángulo de 90° para dicha componente homopolar se obtiene la Figura 4.

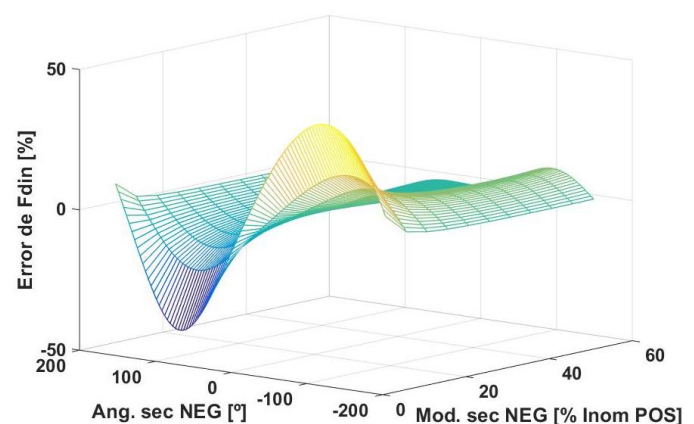


Figura-4: Error en la determinación del " F_{din} " con 2% de Sec. Homopolar y ángulo de 90° .

Análisis de los resultados en la determinación del " F_{din} ".

Del análisis realizado se desprende que, como se aprecia en las Figuras 2, 3 y 4, el error que se comete al emplear la expresión (6) para determinar el F_{din} , cuando en el sistema trifásico tetrafilar se encuentra presente una componente homopolar, dependerá del módulo y ángulo de dicha componente homopolar y además del módulo y ángulo de la componente de secuencia negativa.

En tal sentido, es posible afirmar que el error relativo porcentual máximo, obtenido en cada barrido de la secuencia homopolar, crece significativamente a medida que se incrementa el módulo de dicha componente en relación al módulo de secuencia positiva. Además, dicho error será mayor cuando, manteniendo un determinado valor de componente homopolar, disminuya la componente secuencia negativa en relación con la de secuencia positiva. Dicho en otras palabras, a medida que la componente homopolar se incrementa y la componente de secuencia negativa es más pequeña en el sistema trifásico tetrafilar de corrientes, el error

GRUPO TSSE (CODAPLI) UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL FRLP ARGENTINA

Sesión Técnica 5: Calidad del Servicio y del Producto en Distribución

- Calidad del Producto. Aspectos técnicos de la calidad del producto: armónicos, flicker, desbalances, huecos de tensión. Análisis, predicción y medición.

que se comete en la medición del F_{din} , empleando la expresión (6), será mayor.

En virtud de lo dicho, del estudio paramétrico realizado se recomienda no emplear la expresión (6) para medir el F_{din} cuando en el sistema se encuentre presente una secuencia homopolar cuyo módulo de corriente sea igual o superior al 1% del módulo de secuencia positiva, y además que el valor del Factor de desbalance de secuencia negativa sea inferior al 5%. Lo dicho se debe a que superado los mencionados límites, el error relativo cometido en la obtención del F_{din} podría alcanzar valores mayores al 20%.

En este aspecto es importante mencionar que el citado error en la obtención del F_{din} es un error relativo sistemático, para el cual sólo se contempla el empleo de la ecuación (6). Para obtener el error total en la medición del mencionado factor deberían considerarse también los errores en las mediciones de las corrientes (producto de la clase del amperímetro utilizado).

4- CONCLUSIÓN.

Los errores que se cometen al emplear la expresión (6) para la determinación del Factor de desbalance de secuencia negativa en corrientes, son del tipo sistemático ya que dependen de la metodología empleada y los mismos presentan el mismo módulo y signo, cuando la medición se repite para las mismas condiciones del sistema.

En virtud de que resulta simple obtener el Factor de desbalance a través de la medición de los módulos de corrientes o tensiones, es tentador emplear este método, pero teniendo presente las magnitudes de los errores mostrados en este trabajo, es que para sistemas trifásicos tetrafilares se recomienda

emplear la expresión (5) para determinar el factor de desbalance de secuencia negativa en tensiones y no utilizar la expresión (6) para determinar el factor de desbalance de secuencia negativa en corrientes. Cabe mencionar al respecto que la presencia de una pequeña corriente homopolar en el sistema eléctrico de potencia (circulación de corriente por el neutro) puede ocasionar grandes errores en la determinación del F_{din} .

6- REFERENCIAS.

- [1] ENRE Ente Nacional Regulador de la Electricidad (Argentina), Res. 184/2000.
- [2] Grainger J. J. and Stevenson W. D. Jr., "Análisis de Sistemas de Potencia", McGraw-Hill, México, 391-440,(1995).
- [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] 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 CIGRÉ (XV ERIAC 2013)*, Foz de Iguazú-PR, Brasil, 19-23 de mayo de 2013.
- [6] Pascual H. O., 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.