

Reducción de los Factores de Desbalance en un Sistema de Distribución de Media Tensión debido a la Inserción de Generación Distribuida

Miguel Piumetto⁽¹⁾, Juan C. Gómez⁽²⁾ y Jorge C. Vaschetti⁽³⁾

(1) Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611, Ciudad Universitaria, X5000JJC Córdoba-Argentina. (e-mail: mpiumetto@efn.uncor.edu).

(2) Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto, Ruta Nacional 36 Km. 601, X5804BYA Río Cuarto, Córdoba-Argentina. (e-mail: jcgomez@ing.unrc.edu.ar).

(3) Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina, Ciudad Universitaria, X5016ZAA Córdoba-Argentina. (e-mail: jvaschetti@hotmail.com).

Recibido Nov. 13, 2013; Aceptado Ene. 8, 2014; Versión final recibida Feb. 28, 2014

Resumen

Este trabajo presenta un estudio y análisis detallado de la importancia e implicancia de la regulación del desbalance, por la inserción de la generación distribuida, en una red de distribución de electricidad en el nivel de media tensión. El desbalance constituye un problema de eficiencia energética en los sistemas eléctricos de potencia ya que produce demandas y pérdidas de energía adicionales. Para este estudio, se trabajó sobre un sistema real de distribución de la empresa EPEC de la provincia de Córdoba en Argentina, modelando el comportamiento real del mismo mediante el software ATP/EMTP. Los resultados muestran que el efecto que produce la generación distribuida es positivo, en cuanto a disminuir el desbalance en la red. El coeficiente de desclasificación obtenido es un buen indicador del comportamiento energético. Se concluye que es posible regular y disminuir el desbalance con la inserción de la generación distribuida.

Palabras clave: desbalance, ATP/EMTP, factor de desbalance, factores de asimetría, potencias asimétricas, pérdidas.

Factor Imbalance Reduction in Medium Voltage Distribution Systems due to the insertion of Distributed Generation

Abstract

This paper presents a study and analysis of the importance and implications of the imbalance regulation, by the insertion of distributed generation, on a medium voltage electricity distribution network. The imbalance represents a problem of energy efficiency in electric power systems since it generate additional demands and energy losses. For this study, and actual distribution system of the company EPEC in the province of Cordoba, Argentina, was considered. The modeling of the actual behavior by using the ATP/EMTP software. The results show that the effect of the distributed generation is positive in terms of reducing the imbalance in the network. The derating coefficient obtained is a good indicator of the energy performance. It is concluded that it is possible to regulate and reduce the imbalance with the inclusion of distributed generation.

Keywords: imbalance regulation, ATP/EMTP, asymmetry factors, asymmetrical power, losses.

INTRODUCCIÓN

El desbalance de una variable trifásica es una condición en la que las tres fases presentan diferencias en el módulo y/o desplazamiento angular entre fases, distinto 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 (IEEE 1159 -1995; Bollen, 2002; Pillay, 2001). En los sistemas de potencia el desbalance de tensión y corriente es una ineficiencia importante que no debe subestimarse dado que las potencias involucradas son superiores a la necesaria en un sistema homólogo simétrico, en los últimos años en la literatura internacional se han propuestos diferentes estudios, metodologías y aplicaciones del impacto y la integración de la GD (Lopes Peças, 2002; Keane, 2007; Desmet, 2003) o desarrollos de algoritmos para la mitigación del desbalance (Elnady, 2005; Zhu, 2002; Peralta, 2008) que no muestran la integración de la GD para la mitigación del desbalance.

En general los efectos del desbalance se resume en la aparición de componentes de secuencia inversa y homopolar que dan como resultado pérdidas adicionales de potencia y energía, calentamiento adicional de máquinas que limita la capacidad de carga nominal, reducción en el transporte de potencia en los sistemas de distribución y propagación del desbalance a otros nodos de conexión de la red (Gomez, 2005).

Este trabajo presenta un estudio y análisis detallado de como varían los factores de desbalance por la inserción de la GD en una red de distribución de MT, teniendo en cuenta el índice de penetración y el de dispersión de la GD. Se trabajó con un sistema real de distribución, calculando los factores de asimetría a partir de la potencia compleja y cuantificando el comportamiento eficiente de la red. Se investigó la variación de los distintos indicadores como los Factores de Desbalance de Tensión y Corriente en los niveles de MT y BT, el Factor de Asimetría Total, el Coeficiente de Desclasificación y el Coeficiente de Transferencia de Desbalance con diferentes estados.

NORMATIVA INTERNACIONAL, DEFINICIONES Y ECUACIONES DE CÁLCULO

De acuerdo a lo expresado en la norma IEEE 1159 -1995 el desbalance de tensión se define, utilizando el método de las componentes simétricas, como la magnitud de la relación entre la componente de secuencia negativa y la componente de secuencia positiva, expresado en por ciento. Es claro entonces que para la determinación del grado de desbalance de un sistema se debe trabajar con las componentes de secuencia del sistema, para lo cual se deben conocer los módulos y ángulos de desfase de las componentes de fase.

Entonces, si al sistema desbalanceado lo analizamos a partir de la representación por medio de tres sistemas trifásicos compuestos - como lo indica la Fig. 1 - por dos ternas (trifásicas) simétricas y una tercera compuesta por vectores de igual magnitud, pero de igual fase, se tiene que:

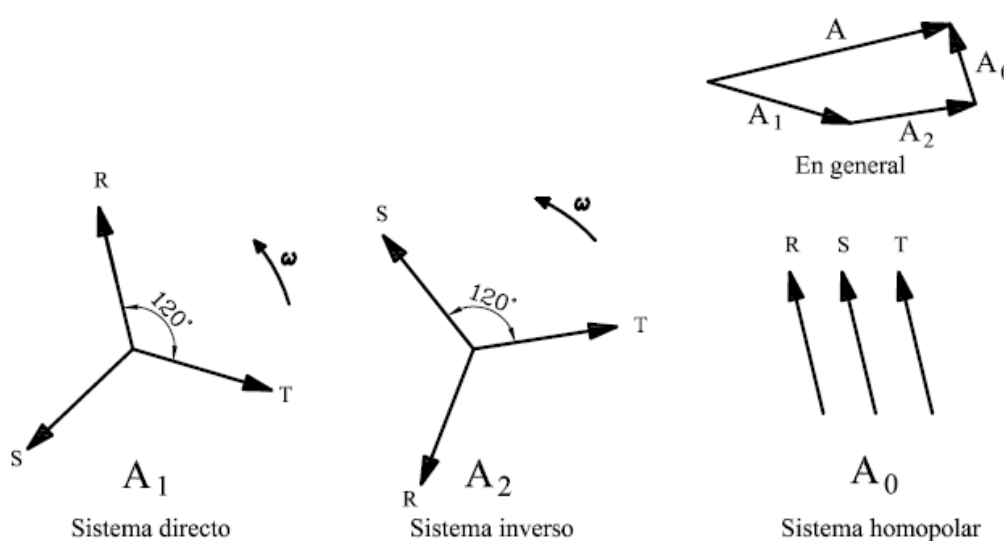


Fig. 1: Descomposición de un sistema fasorial asimétrico en tres sistemas fasoriales

De acuerdo al Teorema de Fortescue se tiene que:

$$\begin{bmatrix} A_R \\ A_S \\ A_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

En la que:

$$a = -0,5 + j0,87 = 1\angle 120^\circ \quad a^2 = -0,5 - j0,87 = 1\angle 240^\circ \quad (2)$$

Por lo que las tensiones resultan:

$$V_{RST} = AV_{012} \quad (3)$$

$$V_{012} = A^{-1} \cdot V_{RST} \quad (4)$$

De acuerdo a las normativas IEC e IEEE, el factor de desbalance de tensión (FDV) se expresa como (5), donde V_2 corresponde a la componente de secuencia negativa de la tensión y V_1 corresponde a la componente de secuencia positiva de la tensión tomadas de (4):

$$FDV = \frac{V_2}{V_1} \times 100 \quad (5)$$

Un sistema trifásico que no se encuentre en falta, que todas sus cargas sean equilibradas y sea alimentado por una terna trifásica de secuencia positiva pura, circularán solo corrientes de secuencia positiva y producirán caídas de tensión equilibradas de secuencia positiva. No existirán caídas de tensión de secuencia negativa ni cero. En un sistema simétrico, las corrientes y tensiones de diferente secuencia no afectan a las otras; o sea, las corrientes de secuencia positiva producen solo caídas de tensión de secuencia positiva. Ésta última afirmación también se refiere a las otras dos secuencias (Roeper, 1985).

Las corrientes de secuencia negativa y cero son propias de circuitos con impedancias desequilibradas; o sea, un juego de impedancias desequilibradas en un sistema simétrico puede considerarse como una fuente de corriente de secuencia negativa o cero. La terna de secuencia positiva corresponde al flujo de potencia que proviene de la red hacia la carga, es decir, desde el generador hacia aguas abajo. La potencia suministrada o energía eléctrica generada tiene únicamente representación de secuencia positiva, o sea, no existe generación de secuencia negativa u homopolar en los sistemas de generación simétricos.

La terna de secuencia negativa, la componente negativa, es una indicación de la medida de desbalance existente en el sistema trifásico, o sea, de la falta de simetría entre los fasores de tensión en el punto de conexión. La presencia de componentes de secuencia homopolar se vincula a la conexión respecto de tierra. Las corrientes homopolares son aquellas que no cierran el circuito por las fases activas, sino que lo hacen por el neutro, o por tierra, si existiera vinculación galvánica con el circuito. Las tensiones homopolares en un sistema estrella se encuentran en el centro de estrella de cargas, cuya magnitud se mide respecto de tierra o del centro estrella de generación.

Conociendo las tensiones y corrientes de secuencia, se puede calcular la potencia compleja desarrollada por el sistema trifásico y que se determina como:

$$S_{3\phi} = V_{RST}^T \cdot I_{RST}^* \quad (6)$$

$$S_{3\phi} = (AV_{012})^T \cdot (AI_{012})^* = V_{012}^T \cdot A^T \cdot A^* \cdot I_{012} \quad (7)$$

En la que $A^T = A$ y que $A \cdot A^* = 3$, por lo que resulta:

$$S_{3\phi} = 3(V_{012}^T \cdot I_{012}^*) = 3 \cdot V_0 \cdot I_0^* + 3 \cdot V_1 \cdot I_1^* + 3 \cdot V_2 \cdot I_2^* \quad (8)$$

Si se divide a la (8) por $(V_1 \cdot I_1^*)$ se establecerán los coeficientes complejos, los que quedan definidos como:

$$Kv2 = \frac{V_2}{V_1} \quad (9)$$

$$Ki2 = \frac{I_2^*}{I_1^*} \quad (10)$$

$$Kv0 = \frac{V_0}{V_1} \quad (11)$$

$$Ki0 = \frac{I_0^*}{I_1^*} \quad (12)$$

Sustituyendo estas expresiones en la (8) se obtiene:

$$S_{3\phi} = 3 \cdot V_1 \cdot I_1^* (1 + Kv2 \cdot Ki2 + Kv0 \cdot Ki0) \quad (13)$$

De acuerdo a la (13) existen dos componentes en la potencia compleja, el primero se asocia a la potencia aparente como la (14) y el segundo a la potencia aparente de asimetría como la (15):

$$S = 3 \cdot V_1 \cdot I_1^* = P + jQ \quad (14)$$

$$SA = 3 \cdot V_1 \cdot I_1^* (Kv2 \cdot Ki2 + Kv0 \cdot Ki0) = M + jN \quad (15)$$

Definiéndose el factor de asimetría como KA:

$$KA = Kv2 \cdot Ki2 + Kv0 \cdot Ki0 \quad (16)$$

Que expresa el grado de desbalance complejo. La potencia real de asimetría se determina entonces como la parte real de (15). Cuando las cargas son estáticas, la asimetría conduce a pérdidas de productividad, operaciones defectuosas de convertidores, etc. También se incrementan las pérdidas en líneas y además puede trasladarse el fenómeno a otras cargas vecinas o en las proximidades del sistema donde intervengan equipos dinámicos o sensibles. El caso más crítico se presenta cuando se alimentan motores asíncronos debido a que el componente de desbalance de corriente del rotor es varias veces superior al coeficiente de desbalance de tensión y las pérdidas se incrementan considerablemente en las máquinas por la presencia del campo de secuencia negativa. En un sistema balanceado, el coeficiente de asimetría de (10), KA, es cero y por consiguiente la potencia de asimetría es cero. Cuando se alimentan cargas tipo motor, la potencia de asimetría se traduce en puras pérdidas en la máquina y en el sistema, con una demanda en exceso. Evidentemente un sistema es más perfecto y más eficiente en la medida que su coeficiente de asimetría se aproxima a cero. Se desprende entonces la necesidad de definir la desclasificación del sistema, que puede calcularse como:

$$D = 1 - KA \quad (17)$$

Otro aspecto no menos importante, es analizar el factor de propagación del desbalance en el sistema a distintos niveles de tensión. Si tomamos la definición del coeficiente de transferencia definido por IEC/TR 61000-3-13 y en estudios (Paranavithana, 2009), lo calculan como:

$$T_{us-ds} = \frac{FDVds}{FDVus} \quad (18)$$

Dónde FDVds es el nivel de tensión hacia donde se propaga el desbalance y FDVus es el nivel de tensión en donde está la fuente de desbalance

Conceptualmente este coeficiente (18) determina la emisión global de propagación de la medida de desbalance, de un sistema de AT (aguas arriba) hacia un sub-sistema aguas abajo de MT o BT; definiendo en este trabajo el coeficiente de desbalance como la razón entre el desbalance del nivel de tensión de MT con respecto al de BT, en donde se origina y se encuentra la fuente de desbalance, al cual definimos como Tbt-mt.

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE MT EN ATP/EMTP

El sistema eléctrico en estudio abastece la zona de Río II y Pilar de la Provincia de Córdoba, Argentina, corresponde a la empresa EPEC (Empresa Provincial de Energía de Córdoba), y posee demandas agroindustriales, comerciales y residenciales como se aprecia en la Fig. 2. El sistema seleccionado comprende una línea de 66 kV, una barra de 13,2 kV en Río II y dos alimentadores de 13,2 kV, denominados D3 y D4 como se observa en diagrama unifilar (Piumetto, 2013). La línea de AT es de conductor de 170 mm² de Al configuración triángulo, mientras que el tendido en 13,2 kV es con conductores de 50 mm² de Al con configuración plana. En el esquema radial, se indican los valores de carga máxima registrados durante el año 2009 en cada subestación transformadora (SET), se muestran los clientes singulares, industrias y puntos de seccionamiento. La puesta a tierra es rígida en el inicio de cada nivel de tensión, con valores característicos de Diferencia Angular (Z_1-Z_0) menor a 16° y Z_0/Z_1 menor a 2,5 de acuerdo a (Roeper, 1985).

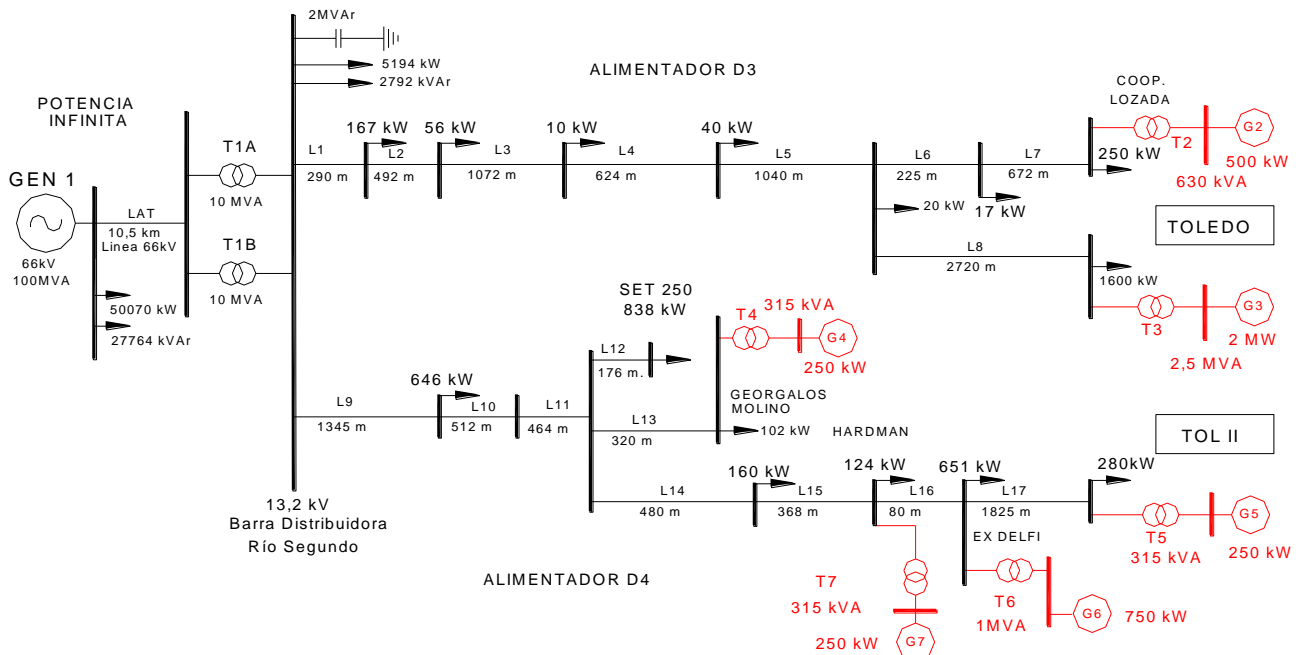


Fig. 2: Diagrama Unifilar del Sistema Eléctrico en estudio, con indicación de la carga máxima al 100% en los alimentadores y la posición de los GD

Las hipótesis de estudio se basaron en considerar situaciones con GD (Loi Lei Lai, 2007), comparando los resultados con el sistema radial original sin GD, para ello se fijaron para la GD las siguientes pautas:

i) La GD se inyectará de manera fija y estacionaria en los clientes singulares, los cuales generan la potencia que consumen de acuerdo a su registro máximo. Los generadores seleccionados son síncronos y sus características se han tomado de las tablas de (Roeper, 1985), la generación se efectúa en BT-380 V. La forma de conexión, es a través de transformadores elevadores de tensión, de acuerdo a los resultados de (Vaschetti, 2013). Se seleccionan los clientes TOLEDO y TOLII para analizar los registros en MT y BT.

ii) Se fijó el criterio de que la GD inyectará valores de potencia activa como: $\frac{1}{4}$ de la carga máxima, igual valor de la carga máxima, 3 veces la carga máxima, potencia activa igual a la carga en el resto de los clientes singulares y finalmente con todos los generadores simultáneos. En todos los casos se analiza con las configuraciones de Radial sin GD y Radial con GD.

iii) Se plantearon las siguientes variables: a) el estado de carga del sistema es con el 25%, 50%, 100% y 125% del valor de carga máxima registrada no simultánea, y b) el Índice de Penetración que es $I_p = \text{Potencias Inyectadas} / \text{Carga Total}$ y el Índice de Dispersión $I_d = \text{Barras con GD} / \text{Total de Barras con Carga}$.

iv) Se realiza el estudio de simulación con el software ATP/EMTP para una ventana de 500 ms. Se ubicaron dispositivos de medición de potencia, energía, tensión y corriente para el registro de valores

instantáneos y máximos, procesando las magnitudes fasoriales a componentes simétricas mediante el uso del software MATLAB.

v) Para la fuente de desbalance, como las cargas han sido modeladas con impedancias constantes en cada uno de los clientes y SET, se considera que la potencia total en situación de desbalance sigue siendo igual al sistema balanceado y equilibrado, modificando solamente los módulos de las impedancias en +/- 50% en dos fases del sistema y manteniendo el ángulo de las impedancias igual, lo que se resume en la Tabla 1:

Tabla 1 : Desbalance de Impedancia

	Sistema Balanceado		Sistema Desbalanceado	
	Módulo	Factor de Potencia	Módulo	Factor de Potencia
Fase A	igual resto fases	igual resto fases	-50%	igual resto fases
Fase B	igual resto fases	igual resto fases	igual sist. Balanceado	igual resto fases
Fase C	igual resto fases	igual resto fases	.+ 50%	igual resto fases

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El análisis se centró en la toma de datos, procesamiento y clasificación de tres puntos en el sistema de MT, dichos puntos son: a) La barra distribuidora de 13,2 Kv de Rio II b) En el usuario de la Cooperativa de Toledo en el alimentador D3, marcado como "TOLEDO", en el cual se han tomado registros en el nivel de MT como en el de BT, y c) el punto del usuario de la Cooperativa de Toledo en el alimentador D4, marcado como "TOL II", en el cual similarmente se han tomado registros en el nivel de MT y BT. Luego de procesar todos los factores de desbalance, factor de asimetría, factor de transferencia y las potencias asimétricas, en cada uno de estos puntos analizados, tenemos los siguientes resultados:

En Barra Distribuidora:

En la barra colectora, de donde parten los distintos ramales se midieron las tensiones de fase, las corrientes totales de ambos alimentadores, que al procesar estos valores instantáneos en MATLAB, se determinan los valores de los coeficientes de asimetría, el desbalance, desclasificación y la energía puesta en juego en cada situación planteada. Las variables tomadas fueron definidas en 3.- y todos los resultados se comparan con el estado original, es decir sistema radial de cargas sin Generación Distribuida, mostrándose los resultados en la Tabla 2 y Figuras 3 y 4:

Tabla 2: Factor de Desbalance de Corrientes

Carga %	sin GD	Mínimo en la carga 1/4 de C. Max	en resto aliment	Medio en la carga igual a C. Máx	en la carga 3 veces C. Max	Máximo 3 veces C. max con resto Alim	$\Delta\%$
25	12,1	16,12	12,37	8,48	2,95	2,22	-81,65
50	11,75	13,94	15,74	13,9	6,19	4,99	-57,53
100	11,53	13,3	15,85	14,4	14,06	13,24	14,83
125	10,29	11,62	13,8	13,2	15,6	14,89	44,70
$\Delta\%$	-14,96	-27,92	11,56	55,66	428,81	570,72	

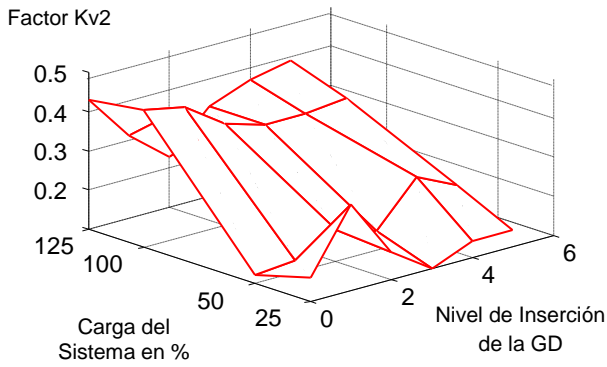


Fig. 3: Factor de Desbalance Kv2 en la Barra Distribuidora de MT

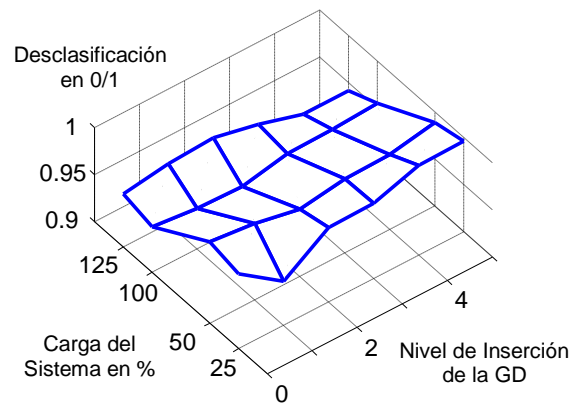


Fig. 4: Factor de Desclasificación en la Barra Distribuidora de MT

Los resultados mostrados en función del nivel de carga y del índice de penetración, el cual (o los cuales) se incrementan a medida que aumenta la potencia inyectada en la red de distribución, indican que el factor de desbalance Kv2 medido en la barra de distribución disminuye con el aumento del índice de penetración de la GD, observándose un valle en el punto en el cual la potencia inyectada por la GD iguala a la carga desbalanceada, pero de todas maneras en estados de carga altos, el indicador disminuye siempre con el aumento del nivel de penetración.

Con respecto al indicador $Ki2$, el mismo tiene un comportamiento diferente, se incrementa con la inyección de GD para valores altos de carga, mientras que para los estados de carga bajos este indicador disminuye. El coeficiente de desclasificación tiene poca variación con la inyección de GD, es más alto, es decir mejora en estados de carga bajos y se desmejora para valores altos de carga, pero en general la GD tiende a revertir la tendencia de la ineficiencia del sistema al aumentar valor la desclasificación, es decir llevarlo próximo a la unidad.

En extremo del alimentador D3, Cooperativa Toledo zona urbana, marcado como TOLEDO:

Al igual que en la barra distribuidora, luego de procesar todas las mediciones efectuadas en MT y en BT (antes y después del transformador de distribución), todos los resultados se comparan con el estado original, es decir sistema radial de cargas sin Generación Distribuida, mostrándose los resultados en la Tabla 3 y en las Figuras 5, 6, 7 y 8:

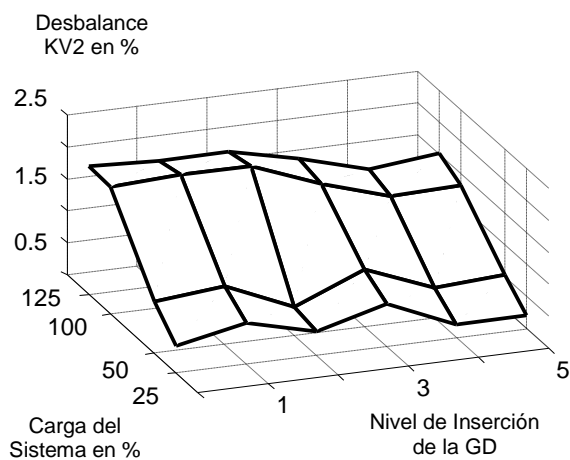


Fig. 5: Factor de Desbalance Kv2 en nivel de MT del usuario TOLEDO

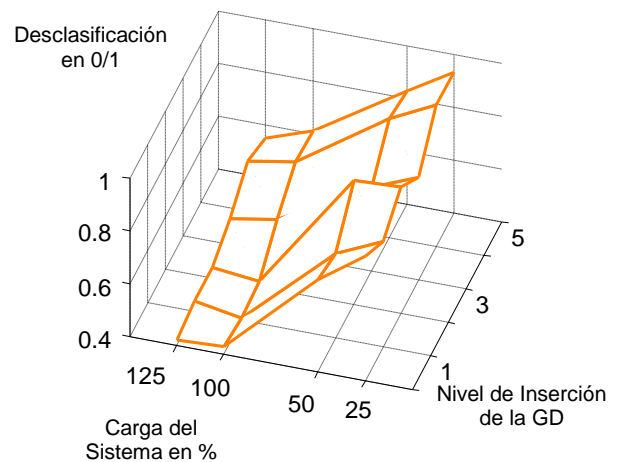


Fig. 6: Factor de Desclasificación en nivel de MT del usuario TOLEDO

Tabla 3: Factor de Desbalance de Corriente $Ki2$

Carga %	sin GD	Mínimo en la carga 1/4 de C. Max	en resto aliment	Medio en la carga igual a C. Máx	en la carga 3 veces C. Max	Máximo 3 veces C. max con resto Alim	Δ%
25	31,32	30,83	31,23	31,14	31,47	31,1	-0,70
50	30,61	30,79	30,52	30,82	30,88	31,8	3,89
100	28,77	28,26	26,79	29,16	29,74	29,74	3,37
125	28,81	28,87	28,8	29,29	29,4	29,61	2,78
Δ%	-8,01	-6,36	-7,78	-5,94	-6,58	-4,79	

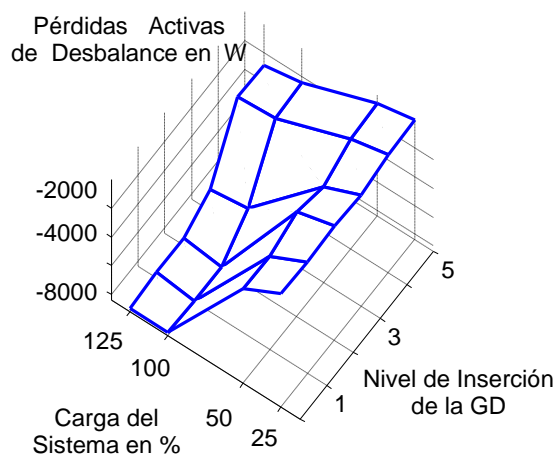


Fig. 7: Potencia Activa de Desbalance en nivel de MT del usuario TOLEDO

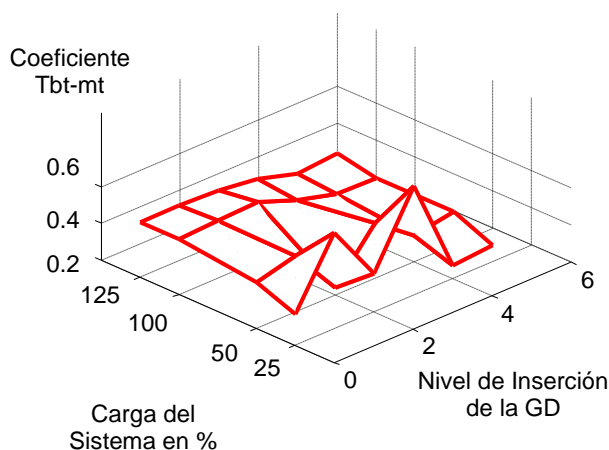


Fig. 8: Coeficiente de Transferencia del Desbalance en nivel de MT en TOLEDO

Para el punto en estudio, en el extremo del alimentador D3, el índice de desbalance Kv2, siempre mejora con el incremento de la GD siendo notorio cuando el sistema se encuentra descargado, mientras que el factor de desbalance de corrientes posee poca variación entre los extremos del índice de penetración. En cuanto a la desclasificación, la misma mejora con valores altos de inyección de GD siendo más favorable a medida que aumenta la carga. En cuanto a la potencia activa perdida por desbalance, la disminución es importante, superando el 50% y llegando al 75% para todos los estados de carga, lo que muestra una mejora en la eficiencia del rendimiento del sistema; y con respecto al coeficiente de transferencia del desbalance del nivel de BT (en donde se genera el desbalance) a MT, este coeficiente también muestra una disminución para todos los estados de carga y se mejora a medida que aumenta la potencia inyectada de la GD.

En el nivel de BT, se aprecia que el factor de desbalance en el usuario también sufre una variación con los niveles de GD, como se observa en la siguiente Tabla 4:

Tabla 4: Factor de Desbalance en BT en TOLEDO

Carga %	sin GD	Mínimo en la carga 1/4 de C. Max	en resto aliment	Medio en la carga igual a C. Máx	en la carga 3 veces C. Max	Máximo 3 veces C. max con resto Alim	Δ%
25	1,15	0,89	0,9	0,84	0,73	0,73	-36,52
50	1,82	1,83	1,84	1,79	1,37	1,42	-21,98
100	3,98	4,01	3,94	3,7	3,37	3,43	-13,82
125	4	3,9	4,03	3,75	3,56	3,61	-9,75
Δ%	247,83	338,20	347,78	346,43	387,67	394,52	

En extremo del alimentador D4, Cooperativa Toledo zona rural, marcado como TOL II:

Al procesar todas las mediciones efectuadas en MT y en BT (antes y después del transformador de distribución) de los valores instantáneos de la tensión y de la corriente de cada fase, los resultados se

comparan con el estado original, es decir el sistema radial de cargas sin Generación Distribuida, mostrándose las variaciones de cada factor de desbalance y de la eficiencia en las siguiente Tabla 5, con las Figuras Nº 9, 10, 11 y 12:

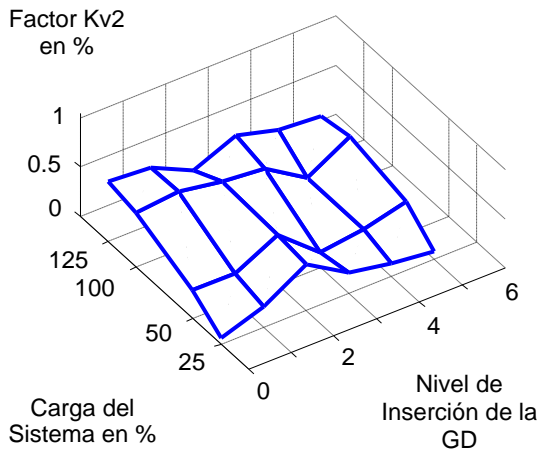


Fig. 9: Coeficiente del Desbalance Kv2 en nivel de MT del usuario TOL II

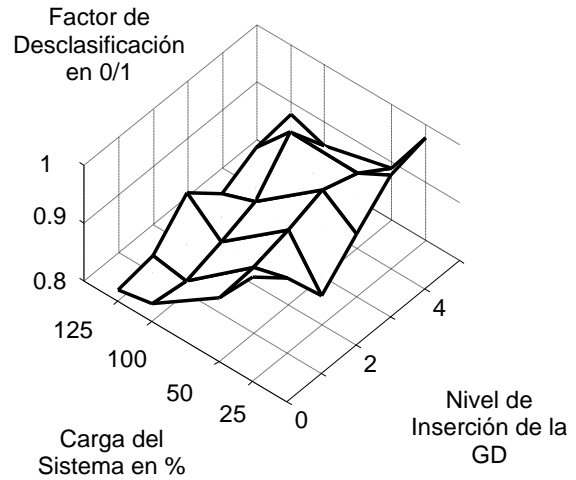


Fig. 10: Factor de Desclasificación en nivel de MT del usuario TOL II

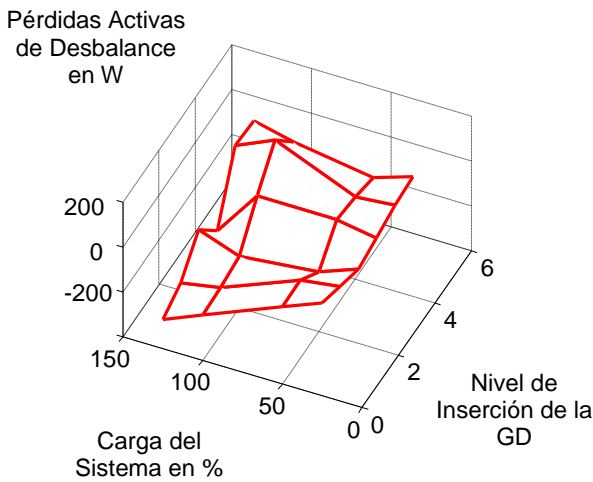


Fig. 11: Potencia Activa de Desbalance en nivel de MT del usuario TOL II

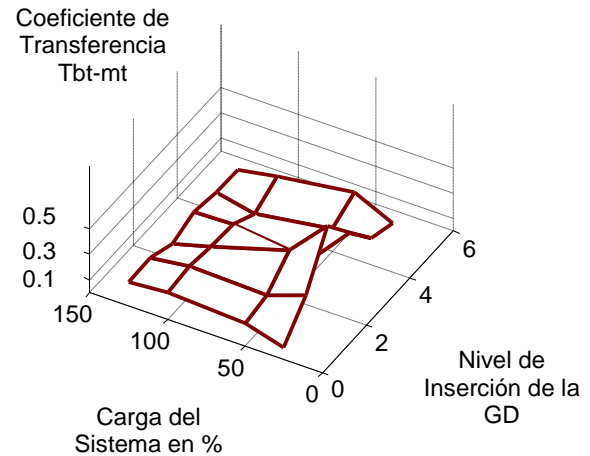


Fig. 12: Coeficiente de Transferencia del Desbalance en nivel de MT del usuario TOL II

Tabla 5: Factor de Desbalance Ki2 en MT del Usuario TOL II

Carga %	sin GD	Mínimo en la carga 1/4 de C. Max	en resto aliment	Medio en la carga igual a C. Máx	en la carga 3 veces C. Max	Máximo 3 veces C. max con resto Alim	Δ%
25	30,79	29,8	31,14	29,7	30,95	29,74	-3,41
50	30,44	29,65	31,94	30,35	30,87	31,32	2,89
100	30,29	30,2	30,1	29,5	30,4	29,94	-1,16
125	28,91	29,74	30	29,27	30,1	29,48	1,97
Δ%	-6,11	-0,20	-3,66	-1,45	-2,75	-0,87	

En el estudio en el extremo del alimentador D4, cuya carga es básicamente rural, el índice de desbalance Kv2, siempre mejora con el incremento de la GD, siendo más notorio cuando el sistema se encuentra más cargado, pero descargado se observa un incremento aún en presencia de importantes valores de GD, mientras que el factor de desbalance de corrientes posee poca variación entre los extremos del índice de penetración. En cuanto a la desclasificación, la misma mejora con valores altos de inyección de GD siendo más favorable a medida que aumenta la carga ya que para los estados de baja carga no se logra una

mejoría. En cuanto a la potencia activa perdida por desbalance, la disminución es importante, superando el 75% para la mayoría de los estados de carga lo que muestra una mejora en la eficiencia del rendimiento del sistema y con respecto al coeficiente de transferencia del desbalance del nivel de BT (en donde se genera el desbalance) a MT, este coeficiente también muestra una disminución para los estados de carga altos y a medida que aumenta la potencia inyectada de la GD, aspecto que no se logra con bajo nivel de carga.

En el nivel de BT, se aprecia que el factor de desbalance en el usuario también sufre una variación con los niveles de GD, observándose una disminución a medida que aumenta el nivel de inyección de la GD como se observa en la siguiente Tabla 6:

Tabla 6: Factor de Desbalance Kv2 en nivel BT del Usuario TOL II

Carga %	sin GD	Mínimo en la carga 1/4 de C. Max	en resto aliment	Medio en la carga igual a C. Máx	en la carga 3 veces C. Max	Máximo 3 veces C. max con resto Alim	$\Delta\%$
25	0,71	0,66	0,69	0,71	0,62	0,58	-18,31
50	1,62	1,37	1,36	1,29	1,19	1,2	-25,93
100	2,73	2,63	2,59	2,57	2,34	2,41	-11,72
125	3,16	3,13	3,1	3,09	2,92	2,95	-6,65
$\Delta\%$	345,07	374,24	349,28	335,21	370,97	408,62	

CONCLUSIONES

Las soluciones para atenuar el desbalance permanente en la redes de distribución, es el balanceo de cargas y el replanteo de cargas monofásicas y bifásicas (Gomez, 2005), pero con los resultados de este estudio debemos considerar a la Generación Distribuida (GD) como mitigador de los factores del desbalance de tensión de manera básica y natural en un sistema de distribución. De las variables estudiadas, son más relevantes el nivel de inserción de la GD (I_p) y la variación del nivel de carga del sistema, que el índice de dispersión (I_d). Otro aspecto observado es que un punto del sistema robusto (con mayor Pcc) y con mayor inserción de GD, tiene mejor comportamiento y se mejoran todos los indicadores analizados del desbalance, que uno con menor Pcc, con menor nivel de GD y de manera dispersa.

Por lo tanto podemos indicar que el desbalance es un problema de eficiencia energética en los sistema eléctricos de potencia, que produce demandas y pérdidas de energía adicionales generalmente desatendidos por las compañías y por los usuarios polifásicos. El coeficiente de Desclasificación, que indica la asimetría del sistema, es una alternativa que permite caracterizar el desbalance en el sistema eléctrico. Con su disminución crece la eficiencia energética en el sistema y se aprovecha su capacidad de transporte y distribución.

La inserción de GD (potencia simétrica) atenúa el desbalance de tensión, lo que se traduce en mejora de la Calidad de Potencia tanto para la distribuidora por su mejora de la eficiencia en las redes, como para el usuario en aumento del rendimiento energético de las cargas polifásicas. La presencia y el incremento de la GD en las redes, disminuye la potencia activa de pérdida total por desbalance en las redes de transporte y distribución, mejorando la relación de potencia activa útil distribuida con respecto a la pérdida. Se reduce la propagación del desbalance a niveles superiores de tensión, disminuyendo el Coeficiente de Transferencia.

La recomendación que surge de este estudio, es que la inclusión de la GD en redes de distribución por parte de las distribuidoras o de los usuarios, es un aspecto importante y positivo a tener presente, el cual se debe favorecer e incentivar con políticas de generación sustentable y que además las empresas involucradas en el transporte y distribución deben controlar las condiciones técnicas de acoplamiento e incorporar dispositivos para la automatización del monitoreo, control y accionamiento de manera de predecir, diagnosticar y vigilar la Calidad de Potencia.

REFERENCIAS

Bollen, M.H.J., *Definitions of voltage unbalance*, IEEE Power Eng. Rev., vol. 22, no. 11, pp. 49-50, Nov. 2002, (2002).

Desmet, J.J., Sweertvaegher, I., Vanalme, G., Stockman, K., Belmans, R.J.M., *Analysis of the neutral conductor current in a three-phase supplied network with nonlinear single-phase loads*, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, no. 3, pp. 587-593, May 2003, (2003).

Elnady, A., Salama, M.M.A., *Mitigation of voltage disturbance using adaptive perception-based control algorithm*, IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 1, pp. 309–318, Jan. 2005, (2005).

Gomez-Targarona, J.C., *Calidad de Potencia: para usuarios y empresas eléctricas*, 1ra Edición Editorial Edigar S.A., Buenos Aires, Argentina, (2005).

IEC/TR 61000-3-13, *Assessment of Emission Limits for the Connection of Unbalanced Installations to MV, HV and EHV Power Systems*, (2008).

IEEE 1159, IEEE Tech. Rep. 1995, *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, (1995).

Keane, A., Denny, E., O'Malley, M., *Quantifying the Impact of Connection Policy on Distributed Generation*, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol 22, No 1, Pages: 189-196, March 2007, (2007).

Loi Lei Lai, Tze Fun Chan, *Distributed Generation Induction and Permanent Magnet Generator* (ed). John Wiley & Sons, Ltd. Inglaterra, (2007).

Lopes Peças, J.A., *Integration of Dispersed Generation on Distribution Networks-Impact Studies*, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol 1, pages 323-328, 27-31 Jan 2002, (2002).

Paranavithana, P.; Perera, S.; Koch, R.; Emin, Z., *Global Voltage Unbalance in MV Power Systems Due to Line Asymmetries*, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 24, no. 4, pp. 2353-2360, Oct. 2009, (2009).

Peralta, J., de León, F., Mahseredjian, J., *Unbalanced multiphase load-flow using a positive-sequence load-flow program*, IEEE Trans. Power Syst., vol. 23, no. 2, pp. 469–476, May 2008, (2008).

Pillay, P.; Manyage, M., *Definitions of voltage unbalance*, IEEE Power Eng. Rev. Mag., vol. 5, pp. 50-51, May 2001, (2001).

Piumetto, M., Gomez Targarona, J.C., *Characterization of Voltage Sags and its Impact on Sensitive Loads in a MV System with Distributed Generation for Single-phase Fault*, IEEE Latin American Transactions Vol. 11 N° 1 Feb.2013, (2013).

Roeper, R., *Corrientes de Cortocircuito en Redes Trifásicas*- 2° Edición, Marcombo S.A., Barcelona, España, (1985).

Vaschetti J., Gomez Targarona J.C., Arcurio, J., *Simulation of a Wind-Power Plant Linked to a Transmission Grid-Part I: Modeling the Basic Wind Farm*, IEEE Latin American Transactions Vol. 11 N° 1 Feb.2013, (2013).

Zhu, Y., Tomsovic, K., *Adaptive power flow method for distribution systems with dispersed generation*, IEEE Trans. Power Del., vol. 17, no. 3, pp. 822–827, Jul. 2002, (2002).

