

## Metodología para la evaluación de huecos de tensión

## Methodology for evaluation of voltage sags

*Edwin García Quintero\**, *Vicente Fuster Roig*

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Calle 67 N.º. 53-108. Medellín, Colombia.

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, Edificio 6C. Valencia, España.

(Recibido el 16 de enero de 2009. Aceptado el 15 de febrero de 2010)

### Resumen

Se plantea una nueva metodología que permite evaluar los huecos de tensión y paliar algunas deficiencias encontradas en las metodologías de clasificación existentes en la literatura. Para ello se aplica la metodología fasorial, encontrada en la literatura, y la nueva metodología propuesta sobre una base de datos de registros reales medidos en una campaña de medidas sobre la red eléctrica española. El objetivo es contrastar las deficiencias y ventajas encontradas. La metodología propuesta será útil para aplicaciones como la obtención de índices.

----- *Palabras clave:* Calidad de la energía, huecos de tensión, clasificación de huecos de tensión

### Abstract

A new methodology for the evaluation of voltage sags and a decrease of the insufficiency found in some classification methodologies on literature are presented. To achieve this, the phasorial method is applied from the literature, and a new methodology suggested on a real register data base from measurements campaigns on the power supply in Spain. The insufficiencies and the advantages are contrasted. The new proposed method will be useful on applications such as getting indexes.

----- *Keywords:* Power quality, voltage sags, classification of voltage sags

---

\* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 4 + 219 85 59, correo electrónico: egarciaq@udea.edu.co (E. García)

## Introducción

La necesidad de la evaluación de la calidad de la energía eléctrica, generada por la exigencia cada vez mayor de los usuarios, y la responsabilidad sobre la misma por parte de las compañías distribuidoras, ha conducido a la búsqueda de diversos índices que permitan cuantificar y hacer un seguimiento de dicha calidad [1-4].

Históricamente, los primeros índices desarrollados se han referido a interrupciones del suministro, dado que la continuidad del suministro ha sido siempre lo más prioritario. Ello ha dado lugar a que los índices relativos a interrupciones de larga duración (superior a algunos minutos) tengan un grado de implantación relativamente amplio. Entre ellos, cabe destacar el *NIEPI (FES)* y el *TIEPI (DES)*, los cuales proporcionan, respectivamente, el número equivalente de interrupción y el tiempo equivalente de interrupciones [5, 6]. Los índices *NIEPI* y *TIEPI* son utilizados en España y, *FES* y *DES* en Colombia.

Por tanto, en la actualidad, el foco se centra en los huecos de tensión, que son también perturbaciones de gran relevancia por sus consecuencias directas, efectos secundarios y frecuencia de aparición. Con el avance y proliferación de los dispositivos electrónicos, en los sistemas eléctricos cada vez hay más dispositivos sensibles a huecos de tensión como los elementos de cómputo, elementos de mando y control, dispositivos de control de velocidad y variadores de frecuencia, entre otros, los cuales ocupan un papel importante en los procesos industriales y, por tanto, su buen funcionamiento es vital para ellos [1, 5-7].

Además, debido a los resultados positivos sobre la evolución respecto a la normalización y regulación de perturbaciones como armónicos e interrupciones, los usuarios del sector eléctrico han redireccionado e incrementado su interés sobre los huecos de tensión y su nivel de exigencia, en esta dirección, es cada vez mayor.

En este sentido, diversos autores han propuesto índices para huecos de tensión, como por ejemplo el *SARFI* [8], *ASIDI* [2], *SEI* y *ASEI* [9], entre

otros, cuyo objetivo es evaluar la calidad de suministro desde el punto de vista de los huecos de tensión.

No obstante, la mayoría de estos índices no consideran al hueco de tensión como un fenómeno trifásico y, o bien se tiene en cuenta únicamente la fase de mayor profundidad, o bien se tienen en cuenta las tres fases por separado. Ello supone una pérdida de información, dado que el hueco de tensión es un fenómeno único, y los efectos del mismo están relacionados muy directamente con la manera en la que se producen los descensos de tensión en cada fase.

Entre las clasificaciones que tienen en cuenta las tres fases, la clasificación fasorial [6] es quizás la más importante por su amplia difusión y utilización en numerosos estudios. Esta clasificación tiene en cuenta, tanto el cambio en la magnitud como el salto del ángulo de fase. Sin embargo, tanto ésta como otras [6, 10] son de difícil aplicación para índices de huecos de tensión. Ello es debido a dos razones fundamentales: en primer lugar son clasificaciones que asignan los huecos a un determinado tipo, pero no queda claro el peso que dicho tipo debe tener en el índice en segundo lugar, la determinación del tipo de hueco de tensión no siempre es sencilla en el caso de registros reales.

En este artículo se propone una nueva metodología para evaluar los huecos de tensión, desde el punto de vista trifásico, que tiene una aplicación simple y unívoca, y que permite asociar a cada hueco de tensión un factor que está relacionado con la forma en que descende la tensión en cada fase. Dicho factor está pensado para utilizarse en índices de calidad para huecos de tensión.

### **Problemática de utilizar clasificaciones trifásicas**

Como ya se ha comentado, las clasificaciones propuestas en la bibliografía para huecos de tensión presentan dificultades a la hora de clasificar algunas tipologías de huecos trifásicos y de aplicarlas para la obtención de índices, aunque

ofrecen aportes importantes en otros ámbitos. Por ejemplo, la metodología propuesta en [11] está asociada a la sensibilidad de los equipos frente a huecos de tensión y clasifica los huecos en 10 rangos, los cuales consisten en la variación de la magnitud de tensión en un 10%, desde 0 hasta 1 p.u. Por otra parte, la metodología propuesta en [10] clasifica los huecos de acuerdo a su tipología, ofreciendo la gran ventaja de abarcar todos los tipos de huecos, pero, al igual que la anterior, no los cuantifica, es decir, no asigna un valor a cada tipo de hueco, de forma que pueda ser empleado directamente en un índice, lo que hace difícil su aplicación. Respecto a la clasificación fasorial,

debido a su amplia utilización y difusión, será utilizada en este artículo para contrastarla con la metodología de evaluación propuesta.

### Clasificación fasorial

La caracterización fasorial de huecos de tensión es planteada por M. Bollen en sus trabajos [6, 12]. Esta caracterización considera tanto el módulo como el ángulo de los fasores de tensión en las tres fases durante el hueco de tensión. De acuerdo a esta caracterización se pueden clasificar los huecos de tensión en siete tipos cuyo diagrama fasorial se muestra en la tabla 1.

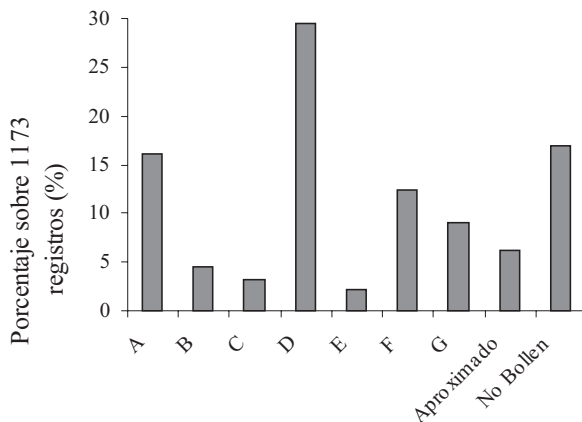
**Tabla 1** Clasificación fasorial

| Tipo | Diagrama | Tipo | Diagrama | Tipo | Diagrama |
|------|----------|------|----------|------|----------|
| A    |          | C    |          | E    |          |
| B    |          | D    |          | F    |          |
|      |          | G    |          |      |          |

### Aplicación

Para poder aplicar la metodología de clasificación fasorial y eliminar las subjetividades que ella presenta, se ha tomado el siguiente escenario: las fases aparejadas (las que mantienen magnitudes similares durante el hueco de tensión) son aquellas que presentan diferencias de magnitud no mayores a 0,02 p.u.; las fases aparejadas “próximas” son aquellas cuya diferencia de magnitud está comprendida entre 0,02 y 0,04 p.u., y las fases no aparejadas son las que presentan diferencias de magnitud superior a 0,04 p.u. Esta consideración obedece al hecho que para la mayoría de los huecos de tensión analizados, el 76,6%, sus fases aparejadas no superan la diferencia de 0,02 p.u.

Al aplicar la clasificación fasorial a un conjunto de 1.173 registros obtenidos en la red de baja tensión (BT), y que corresponden a 39 puntos de medida, se obtienen los resultados de la figura 1. Se pone de manifiesto que para el 6,6% de los huecos, sus fases aparejadas están próximas (entre 0,02 y 0,04 p.u.) y, más crítico aún, que hay un 16,9% de huecos que no se pueden clasificar, a pesar del escenario considerado.



**Figura 1** Porcentajes para cada tipo de hueco de acuerdo a la clasificación fasorial

Además, en esta figura se observa que para la clasificación fasorial, los huecos tipos D son los que más se presentan en BT, con un 29,2%, y los

tipo A con un 16,1%. Los que menos se presentan son los tipo E, con una participación del 2,3%.

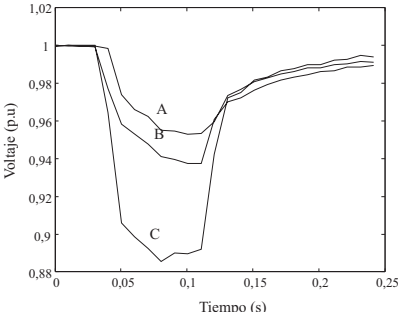
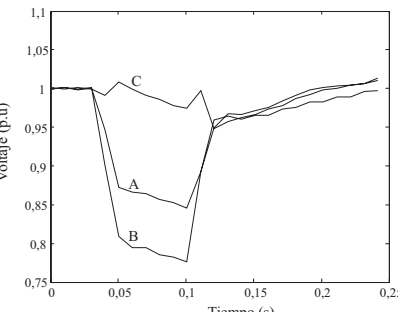
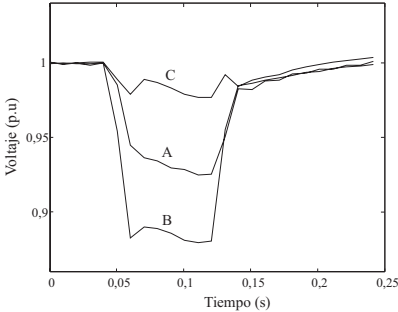
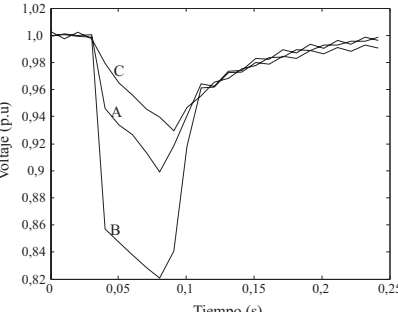
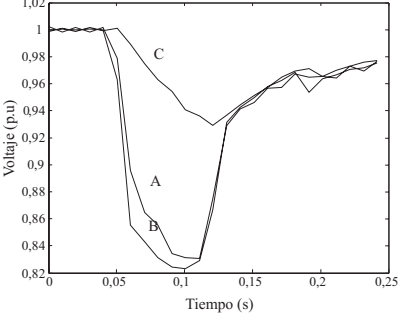
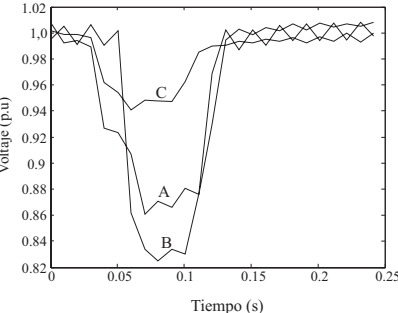
### Huecos de difícil clasificación

Como se ha puesto de manifiesto, hay un conjunto de huecos que aparecen al monitorear la red eléctrica cuya tipología no puede ser clasificada por la clasificación fasorial. En la tabla 2 se recogen algunos ejemplos. Dos de ellos (huecos II y IV) aparecen con frecuencia en las medidas y no corresponden a ningún tipo. Todas las tipologías de huecos, incluidos estos dos, están entre la gran gama de posibilidades de variaciones de las magnitudes de sus tres fases, entre 0 y 1 p.u. En la tabla 2 se observa que las magnitudes de las fases, incluso las aparejadas, para los dos tipos de huecos, presentan una diferencia importante en su magnitud.

### Metodología propuesta

En esta sección se propone una metodología que evalúa todos los tipos de huecos de tensión medidos en baja tensión, o en media tensión sin la componente homopolar. Este método de evaluación tiene en cuenta la magnitud de la tensión de las tres fases durante el hueco de tensión. La aplicación de esta metodología arroja un valor unívoco y simple para cada tipo de hueco de tensión que depende de la forma en que desciende la tensión en cada fase, llamado *factor de descenso*,  $N$ , el cual está comprendido entre 1 y 3, dependiendo del número de fases que desciendan por debajo del umbral de tensión establecido (En el ámbito de este trabajo se toma el umbral de tensión de acuerdo a la norma EN 50160, que define hueco de tensión cuando la tensión mínima es menor que el 90% de la tensión de referencia) y de las diferencias relativas entre sus magnitudes. Así, un hueco de tensión con igual descenso en las tres fases, tendría un  $N=3$ , Si el descenso es en sólo dos fases, y de la misma magnitud,  $N=2$ , y si es en una sola fase,  $N=1$ . En el resto de casos, con descensos de diferente magnitud, se obtiene un valor de  $N$  que no es un número entero.

**Tabla 2** Registros de huecos de tensión medidos en la red eléctrica española y su clasificación fasorial

| Tensión (p.u)               | Figura  | Tipo                | Tensión (p.u)                      | Figura   | Tipo                      |
|-----------------------------|---|---------------------|------------------------------------|--|---------------------------|
| I<br>0,89<br>0,95<br>0,94   |    | D.                  | IV<br>1,1<br>0,95<br>0,85<br>0,78  |    | Sin correspondencia       |
| II<br>0,98<br>0,92<br>0,88  |   | Sin correspondencia | V<br>1,02<br>0,82<br>0,90<br>0,93  |   | Se aproxima a tipo F o D. |
| III<br>0,93<br>0,83<br>0,82 |  | G.                  | VI<br>1,02<br>0,94<br>0,86<br>0,82 |  | Se aproxima a tipo G.     |

**Planteamiento**

Esta metodología de evaluación se divide en 8 pasos, que se resumen en el diagrama de flujo de la figura 2 y se describen a continuación:

**Paso 1.** Consiste en obtener las señales de tensión de las tres fases ( $V_a$ ,  $V_b$  y  $V_c$ ), con el equipo de monitorización.

**Paso 2.** Se encuentra la tensión mínima de las tres fases ( $V_{min}$ ) y se comprueba si es o no hueco de

tensión, en función de si supera o no una tensión de referencia. Por ejemplo  $V_{min} \leq 0,9V_{nominal}$

**Paso 3.** Se encuentra el número de fases  $M$  que descienden por debajo del umbral de tensión (0,9 p.u).

**Paso 4.** Si las tres fases caen por debajo del umbral de tensión ( $M=3$ ), se calcula el factor de descenso en dos pasos:

- Se identifican las dos fases diferentes a la tensión mínima, denominadas  $V_{mayor1}$  y  $V_{mayor2}$ .
- Luego se calcula el factor de descenso a partir de la siguiente expresión:

$$N_1 = 2 + \left( \frac{1 - V_{mayor1}}{1 - V_{min}} + \frac{1 - V_{mayor2}}{1 - V_{min}} \right) \quad (1)$$

Este factor de descenso  $N_1$  produce un valor que puede ser diferente a un entero y está entre 2 y 3. Si las tres fases descienden la misma cantidad (independiente de la magnitud del descenso) por debajo del valor umbral, entonces  $N_1=3$ ; sino, produce un valor real, no entero, menor que 3 y mayor que 2. Esos valores no enteros son los que caracterizan a toda la gama de huecos cuyas tres fases descienden de manera desigual, siendo mayor  $N_1$  cuanto menor sea la diferencia relativa entre las tres fases.

**Paso 5.** Si la diferencia relativa entre las fases del hueco, del paso anterior, es “pequeña” de tal forma que  $N_1 \geq 2,9$ , entonces el valor para el factor de descenso es  $N=3$ . Si por el contrario, la diferencia relativa es grande y  $N_1 < 2,9$ , entonces  $N=N_1$ .

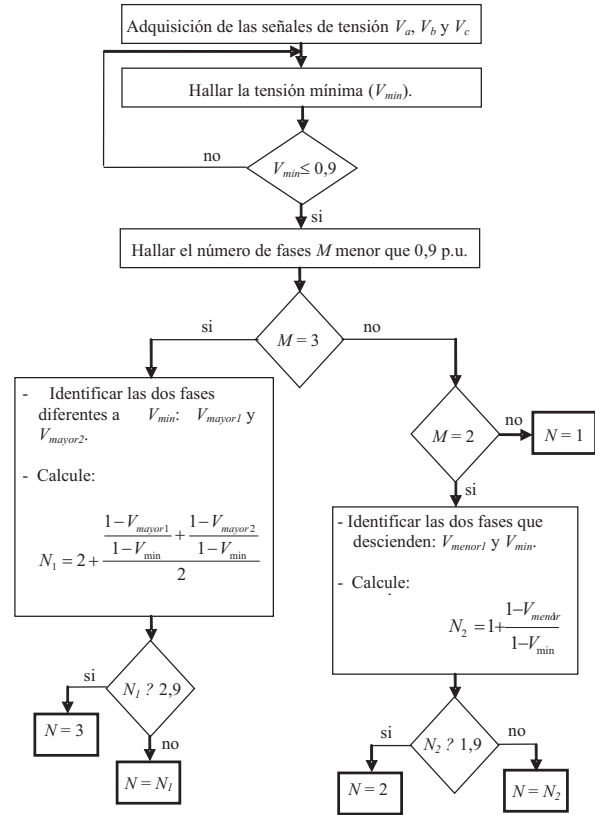
**Paso 6.** Si  $M < 3$  (en el paso 3), se debe consultar si dos fases descienden por debajo del umbral de tensión ( $M=2$ ). Si es afirmativo, se debe calcular el factor de descenso en dos etapas, a saber:

- De las dos fases que descienden, se identifica la fase diferente a  $V_{min}$ , denominada  $V_{menor1}$ .
- Se calcula el factor de descenso a partir de la expresión:

$$N_2 = 1 + \frac{1 - V_{menor1}}{1 - V_{min}} \quad (2)$$

Al igual que para la ecuación (1), este factor de descenso puede ser diferente a un entero. Si las dos fases descienden la misma cantidad (independiente de la profundidad), entonces  $N_2=2$ ; sino, produce un valor no entero menor

que 2 y mayor que 1. Estos valores no enteros, al igual que en la ecuación (1), cuantifican el hecho que las dos fases que descienden, por debajo del umbral de tensión, presenten diferencias relativas de magnitud.



**Figura 2** Diagrama de flujo para la evaluación del factor de descenso  $N$

**Paso 7.** Este paso es consecuencia del anterior y similar al paso 5. Aquí se considera que: si las dos fases que descienden presentan una diferencia relativa “pequeña” entre sus magnitudes, de tal forma que  $N_2 \geq 1,9$ , entonces el valor del factor de descenso es  $N=2$ . Si la diferencia relativa es importante y  $N_2 < 1,9$ , entonces  $N=N_2$ .

**Paso 8.** Si el paso sexto es negativo, es decir, si  $M=1$ , entonces el factor de descenso es directamente  $N=1$ . Aunque a priori pudiera considerarse un caso extraño, en el contexto de los huecos de tensión, hay que tener en cuenta que se consideran únicamente las fases que

superan la tensión umbral, por que esta situación se presenta frecuentemente en huecos de pequeña profundidad

El valor unívoco arrojado por esta metodología para cada tipología de hueco de tensión es una cantidad fácil de aplicar a otros propósitos, como la obtención de índices de calidad, entre otros.

**Aplicación y comparación con la clasificación fasorial**

En esta sección se recogen los resultados de aplicar, sobre la base de datos de registros reales de huecos de tensión descrita anteriormente, la metodología propuesta. Como punto de referencia, al objeto de comparación, se ha empleado la clasificación fasorial, por las razones que ya fueron expuestas previamente.

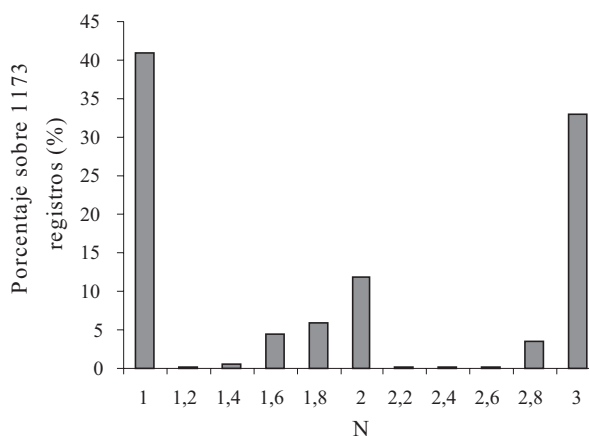
En la tabla 3 se muestran, a modo de ejemplo, los factores de descenso obtenidos para los registros de la tabla 2.

**Tabla 3** Aplicación de la nueva metodología y comparación con la clasificación fasorial

| Hueco | Clasificación fasorial | Factor de descenso |
|-------|------------------------|--------------------|
| I     | D                      | 1                  |
| II    | Sin correspondencia    | 1                  |
| III   | G                      | 2                  |
| IV    | Sin correspondencia    | 1,84               |
| V     | Se aproxima a F o D    | 1,78               |
| VI    | Se aproxima a tipo G   | 1,89               |

En la figura 3 se representa la distribución del factor de descenso para los registros analizados. Se observa que todos los huecos están evaluados por medio de un valor asignado que está entre 1 y 3, tal como ya se ha mencionado. También se puede apreciar claramente en esta figura que los huecos que más se presentan son aquellos en los que desciende una sola fase, con el 40,1%. Ello es debido a la contribución de los huecos de menor

magnitud, como ya se ha comentado. Le siguen los que presentan descensos iguales en las tres fases, con el 32,7%, y los que presentan descensos iguales en las dos fases, con el 11,5%. Además, se observa que entre los valores enteros hay un porcentaje de huecos que corresponden a aquellos que presentan diferencia relativa importante en sus fases aparejadas. Este porcentaje es del 11,3%, para diferencias relativas de magnitud importante entre dos fases aparejadas y 4,4% para cuando la diferencia relativa importante se da entre tres fases aparejadas. Si se hubieran eliminado de la muestra los huecos de tensión de pequeña magnitud de descenso, hubieran sido estos últimos los de más peso en la distribución estadística.



**Figura 3** Porcentajes para cada tipo de hueco de acuerdo a la nueva metodología propuesta

En la figura 4 se representa la distribución del factor de descenso en relación con algunos tipos de huecos de la clasificación fasorial. En concreto para los tipos A y D, que eran los mayoritarios según la figura 1, y aquellos de difícil clasificación.

En la figura 4a se observa que para los huecos tipo A (los debido a faltas trifásicas) su mayor contribución en el factor de descenso es para N=3. Aunque también se presentan algunos porcentajes muy pequeños para otros valores del factor de descenso (como N=1 y N=2), lo cual se debe a que para algunos huecos tipo A analizados las tres fases no descienden completamente por debajo

del valor umbral de tensión. La figura 4b, por otro lado, muestra que para la mayoría de los huecos tipo D la contribución más importante, de acuerdo a la nueva metodología descrita, es para un factor de descenso igual a 1. En la figura 4c se ve que los huecos “Aproximados” de la clasificación fasorial tienen los aportes más importantes para  $N=1$  y  $N=3$ , pero también aparecen porcentajes no despreciables para factor de descenso con valores no enteros, lo cual se debe a que los huecos tipo “Aproximado” incluyen algunos que presentan diferencias relativas importantes entre sus fases

aparejadas. Finalmente, en la figura 4d se observa que los huecos que no han podido ser clasificados mediante la clasificación fasorial, sí presentan un valor de  $N$  según la metodología propuesta, siendo la mayor contribución cuando  $N=1$  y  $N=3$ . Además, también se nota que hay una contribución superior a la de los casos anteriores, de valores no enteros para el factor de descenso, lo cual se explica si se tiene en cuenta que los huecos que no han podido ser clasificados mediante la clasificación fasorial presentan importante diferencia de magnitud entre sus fases aparejadas.

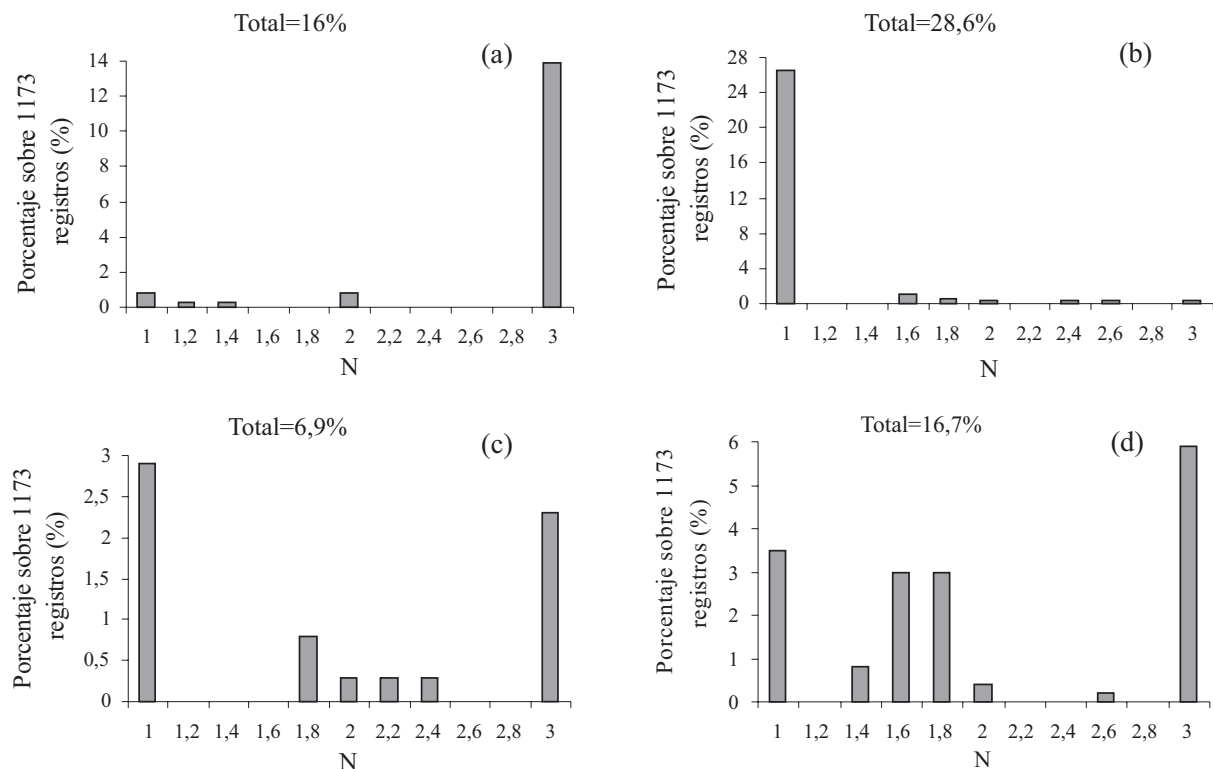


Figura 4 Factor de descenso para huecos: (a) Tipo A. (b) Tipo D. (c) Aproximados. (d) No fasorial

### Conclusiones

Se ha presentado una metodología de caracterización de huecos de tensión, que tiene en cuenta el descenso que se presenta en cada fase.

Su necesidad parte del hecho de que al aplicar las clasificaciones propuestas a un conjunto extenso de registros reales, se presenta la dificultad de

clasificar algunas tipologías de huecos y de la implementación para la obtención de índices.

La caracterización propuesta a partir del *factor de descenso*,  $N$ , evalúa todo tipo de hueco de tensión asignándole a cada uno de ellos un valor unívoco y simple, que va entre 1 y 3, teniendo en cuenta que el hueco es un fenómeno trifásico.



Esta nueva metodología elimina las subjetividades a la hora de evaluar las tipologías de huecos y solo depende de la magnitud de los huecos, lo que la hace simple y directa a la hora de implementarla.

Por ello puede ser una herramienta muy adecuada para su utilización en índices para huecos de tensión que tengan en cuenta su carácter trifásico. Ahí se puede complementar con otros aspectos del hueco de tensión, tales como su profundidad máxima, duración, área, etc. para conformar un índice que permita evaluar la repercusión en los receptores.

### Referencias

1. X. Xiangning, T. Shun, B. Tianshu, X. Yonghai. "Study on Distribution Reliability Considering Voltage Sags and Acceptable Indices". *IEEE Trans. on Power Delivery*. Vol. 22. 2007. pp. 1003-1008.
2. J. Martínez, J. Martin Arnedo. "Voltage Sag Studies in Distribution Networks – Part III: Voltage Sag Index Calculation". *IEEE Trans. on Power Delivery*. Vol. 21. 2006. pp. 1689-1697.
3. M. Bollen, D. Daniel. "International Coordination for Voltage Sag Indices". *IEEE Trans. on Power Delivery*. 2006. pp. 1-6.
4. G. Olguin, F. Vuinovich, M. Bollen. "An Optimal Monitoring Program for Obtaining Voltage Sag System Indexes". *IEEE Trans. on Power Systems*. Vol. 21. 2006. pp. 378-384.
5. V. Fuster, F. Romualdo, J. Marín, F. Ferrandis. *Las perturbaciones eléctricas y la industria cerámica*. Instituto de Tecnología Eléctrica – Iberdrola. Valencia (España). 2005. pp. 1-281.
6. M. Bollen. *Understanding Power Quality Problems*. IEEE press. New York (USA). 2000.
7. J. Milanovic, C. Gupta. "Probabilistic Assessment of Financial Losses due to Interruptions and Voltage Sags - Part I: The Methodology". *IEEE Trans. on Power Delivery*. Vol. 21. 2006. pp. 918-924.
8. J. Martinez, J. Martin Arnedo. "Calculation of Voltage Sag Indices for Distribution Networks". *International Conference on Power Systems Transients (IPST'05)*. Montreal. Canada. Paper No. IPST05-046. 2005. pp. 671-680.
9. C. Shen, C. Lu. "A Voltage Sag Index Considering Compatibility Between Equipment and Supply". *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 22. 2007. pp. 996-1002.
10. V. Fuster. *Perturbaciones Eléctricas: tipos y caracterización*. Editorial Universidad Politécnica de Valencia. Valencia (España). 2001. pp. 1-78.
11. S. Djokić, J. Milanović, D. Chapman, M. McGranagh, D. Kirschen. "A New Method for Classification and Presentation of Voltage Reduction Events". *IEEE Trans. on Power Delivery*. Vol. 20. 2005. pp. 2576-2584.
12. M. Bollen, E. Styvaktakis. "Characterization of Three-Phase Unbalanced Dips". *IEEE Trans. on Power Delivery*. 2000. pp. 274-300.
13. J. Martinez, J. Martin Arnedo, J. Milanovic. "Load Modeling for Voltage Sag Studies". *IEEE Trans. on Power Delivery*. Vol. 18. 2003. pp. 2508-2513.
14. J. Martínez, J. Martin Arnedo. "Voltage Sag Analysis Using an Electromagnetic Transients Program". *IEEE Trans. on Power Delivery*. 2002. pp. 1135-1140.
15. J. Milanovic, R. Gnativ, K. Chow. "The influence of loading conditions and network topology on voltage sags". *9th ICHQP*. Orlando (FL). October 2000. pp. 172-179.
16. J. Martinez, J. Martin Arnedo. "Voltage sag stochastic prediction using an electromagnetic transients program". *IEEE Trans. on Power Delivery*. Vol. 19. 2004. pp. 1975-1982.
17. IEEE Standard 1159. *Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. IEEE. New York (USA). 1995. pp. 611-623.