

Nuevo factor para la caracterización de huecos de tensión

New factor for voltage sags characterization

*Edwin García Quintero**, *Fernando Villada Duque*, *Diego Cadavid Carmona*

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia Calle 67 N° 53-108. Medellín, Colombia.

(Recibido el 26 de febrero de 2010. Aceptado el 17 de febrero de 2011)

Resumen

En el presente trabajo se plantea un nuevo factor que permite caracterizar cada hueco de tensión de manera individual, actuando como una reseña que lo identifica de manera unívoca. Para comprobar dicha caracterización se aplica el factor propuesto con otros reportados, como la energía no suministrada (contemplado en la norma IEEE P1564) que se utiliza ampliamente en la obtención de algunos índices importantes, a una serie de registros reales medidos sobre la red eléctrica y a otros obtenidos mediante simulaciones. También se analizan las repercusiones que tienen los huecos de tensión sobre el comportamiento de algunos elementos sensibles a ellos, con el fin de contrastar los resultados y superar algunas falencias presentadas por los factores de caracterización más utilizados actualmente. El nuevo factor propuesto puede ser útil para aplicaciones como obtención de índices, entre otros.

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

Abstract

A new factor which allows characterizing voltage sags in an individual way is presented in this paper. The factor acts revises and identifies voltage sags in a univocal way. In order to verify such characterization, the proposed factor is applied and compared with other reported factors, such as: not supplied energy (referred to in IEEE P1564 Norm) which is widely used for obtaining some important indexes for a series of real registrations measured on the electric network and to others obtained by simulations. The effect of voltage sags on the behavior of some sensitive elements is also analyzed. The idea is to contrast results and overcome some lacks presented by the most used

* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 4 + 219 85 59, fax: + 57 + 4 + 211 05 07, correo electrónico: egarciaq@udea.edu.co. (E. García)

characterization factors nowadays. The new proposed factor will be useful for obtaining indexes, among many other applications.

----- **Keywords:** Power quality, voltage sags, characterization of voltage sags, index for voltage sags

Introducción

La evaluación de la calidad de la energía eléctrica es un tema de gran importancia y en constante desarrollo que plantea grandes retos. Su estudio obedece principalmente a la exigencia cada vez mayor de los usuarios, así como la responsabilidad sobre la misma por parte de las compañías distribuidoras, lo cual ha conducido a diversos índices con el fin de cuantificarla [1-4].

Los índices elaborados para evaluar la calidad de la energía han tenido un desarrollo histórico en el cual han abordado principalmente las interrupciones del suministro, porque la continuidad del suministro eléctrico ha sido siempre lo más prioritario. Debido a esto dichos índices han sido ampliamente implementados. Entre ellos se destacan el *NIEPI (FES)* y el *TIEPI (DES)*, los cuales proporcionan, respectivamente, el número equivalente de interrupciones y el tiempo equivalente de interrupciones [5, 6]. Los índices *NIEPI* y *TIEPI* son utilizados en España mientras que *FES* y *DES* se usan en Colombia.

Debido a la evolución mencionada, actualmente los huecos de tensión son el fenómeno que acapara la atención mundial relativa a la calidad de la energía por sus consecuencias directas, efectos secundarios y frecuencia de aparición. Además, con la proliferación de dispositivos electrónicos como elementos de cómputo, elementos de mando y control, dispositivos de control de velocidad y variadores de frecuencia, entre otros, los sistemas eléctricos han aumentado su sensibilidad a huecos de tensión [5, 7, 8]. Adicionalmente, debido al impacto positivo de la evolución de la normalización y regulación de perturbaciones como armónicos e interrupciones, los usuarios han incrementado su interés sobre los huecos de tensión y su nivel de exigencia cada vez es mayor, logrando con esto que se empiecen a tomar iniciativas relacionadas con la

reglamentación de esta perturbación en el sector eléctrico de algunos países como Colombia y España, entre otros [9, 10].

En este sentido, se han propuesto diferentes formas de caracterizar los huecos de tensión, como es el caso de la energía no suministrada E_{VS} [11], la severidad del hueco S_e [12], la tabla profundidad-duración [6], las curvas *CBEMA*, *ITIC* y *SEMI* [3] y la caracterización fasorial [13], entre otros, siendo la E_{VS} una de las más utilizadas por su fácil implementación en la obtención de índices (contemplado en la norma IEEE P1564 [11]). Sin embargo, la mayoría de estas caracterizaciones no consideran al hueco de tensión como un fenómeno trifásico, ni tampoco se obtiene de ellos un valor único e irrepetible como una huella y, o bien se tiene en cuenta únicamente la fase de mayor profundidad, o bien se tienen en cuenta las tres fases por separado; lo cual supone una pérdida de información, dado que el hueco de tensión es un fenómeno único, cuyos efectos están estrechamente relacionados directamente con la manera en la que se producen los descensos de tensión en cada fase. En este trabajo se propone un nuevo factor para caracterizar los huecos de tensión, desde el punto de vista trifásico, asignándole un valor simple y unívoco, que permite asociar a cada hueco de tensión un factor que está relacionado tanto con la forma en que desciende la tensión en cada fase, N [14], como con la energía dejada de suministrar por el hueco, lo que lo hace irrepetible. Dicho factor está pensado para aplicarse en índices de calidad para huecos de tensión.

Inconvenientes de las caracterizaciones existentes

Ya se ha hablado de las dificultades que presentan las caracterizaciones existentes, bien porque no consideran los huecos de tensión como

un fenómeno trifásico, o bien porque son de difícil aplicación para la obtención de índices, o simplemente porque requieren información que hace que no sean aplicables a todos los dispositivos existentes, aunque ofrecen aportes importantes en otros ámbitos. En este sentido:

- a) *Las curvas CBEMA, ITIC y SEMI* [6], se utilizan para representar la capacidad de tolerancia de los equipos informáticos frente a huecos de tensión. Ellas presentan el problema de considerar los huecos como un fenómeno monofásico, únicamente, y además no se pueden implementar para la obtención de índices.
- b) *La tabla Profundidad-Duración* [6], es utilizada para obtener información de tipo estadístico y homogenizar los datos provenientes de distintas fuentes de medidas. Al igual que las curvas anteriores, esta también presenta el inconveniente de considerar los huecos como un fenómeno monofásico, además no es cuantificable y en consecuencia no genera un valor unívoco que pueda ser implementado para la obtención de índices.
- c) *La energía no suministrada E_{VS}* , su expresión se muestra en la ecuación (1) y la norma IEEE P1564 la define como la duración de una interrupción que conduce a la misma pérdida de energía, para una impedancia de carga, que la que produce un hueco de tensión a esa misma impedancia de carga [11].

$$E_{VS} = \left[1 - \left(\frac{V}{V_{nom}} \right)^2 \right] * T \quad (1)$$

donde V es la tensión mínima durante el hueco, V_{nom} es la tensión nominal y T es el tiempo de duración del hueco.

Esta caracterización es una de las más ampliamente utilizadas porque produce un valor relacionado con la energía del hueco que es usado para la obtención de índices

para huecos como el *SEI* y *ASEI* [7], pero presenta el inconveniente de considerar los huecos de tensión como un fenómeno monofásico, teniendo en cuenta solo la fase que más desciende, conduciendo a una pérdida de información en lo que respecta a la caracterización total del hueco y a su relación con el comportamiento de los equipos, entre otros.

- d) *La severidad del hueco S_e* , su expresión está dada por la ecuación (2) y es una medida adimensional que busca cuantificar la profundidad del hueco mediante una relación comparativa con otra tensión [12].

$$S_e = \frac{1 - V}{1 - V_{curva}} \quad (2)$$

donde V es la tensión durante el hueco y V_{curva} es la tensión de la curva con la cual se desea comparar.

Esta caracterización presenta los inconvenientes siguientes: por una parte también considera los huecos de tensión como un fenómeno monofásico y, por otro, lado que la comparación con las tensiones de las curvas es una tarea difícil, además solo se puede aplicar a los dispositivos que cuenten con estas curvas. Aunque ofrece la ventaja de poder ser usado para la obtención de algunos índices.

- e) *La caracterización fasorial*, es planteada por M. Bollen en sus trabajos [6, 13]. Es ampliamente utilizada y difundida, y considera tanto el módulo como el ángulo de las tres fases de tensión durante el hueco. De acuerdo a esta caracterización se pueden clasificar los huecos de tensión en siete tipos. Esta caracterización considera los huecos de tensión como un fenómeno trifásico, pero su aplicación para la obtención de índices es muy difícil, incluso existe una gran variedad de huecos que no los logra caracterizar [14].

Metodología

Factor de caracterización propuesto

En esta sección se propone un nuevo factor que caracteriza todos los tipos de huecos de tensión mediante un valor simple y unívoco que identifica cada tipo de hueco de tensión. Estos huecos son obtenidos para este trabajo mediante mediciones reales y simulaciones en baja tensión, o en media tensión sin la componente homopolar. Este factor de caracterización tiene en cuenta la magnitud de la tensión de las tres fases durante el hueco de tensión y es llamado *factor de hueco, fh*, el cual está comprendido entre 1 y 3, dependiendo de la tipología del hueco, recogido mediante el *factor de descenso N* [14], y de la energía media dejada de suministrar durante el hueco por las tres fases, la cual se explicará abajo y se nombrará *factor de descenso medio cuadrático, F_{dmc}*.

Factor de descenso, N

Este factor está ampliamente descrito en la referencia [14], y se obtiene a partir de las ecuaciones (3), (4) y (5), las cuales involucran el número de fases que descienden, la diferencia relativa entre ellas y la magnitud de dichos descensos.

i. Si desciende una sola fase

$$N=1 \quad (3)$$

ii. Si descienden dos fases

$$N = 1 + \frac{1 - V_{menor1}}{1 - V_{min}} \quad (4)$$

donde V_{menor1} es la mayor de las dos fases que descienden y V_{min} es la menor de todas.

iii. Si descienden tres fases

$$N_1 = 2 + \frac{\left(\frac{1 - V_{mayor1}}{1 - V_{min}} + \frac{1 - V_{mayor2}}{1 - V_{min}} \right)}{2} \quad (5)$$

donde V_{min} es la misma que la de la ecuación (4), V_{mayor1} es la fase que menos desciende de las tres

y V_{mayor2} es la que desciende en medio de las dos anteriores.

Factor de descenso medio cuadrático, F_{dmc}

Este factor se obtiene a partir de la expresión de la ecuación (6), la cual se expresa a partir de la energía media dejada de suministrar durante el hueco por las tres fases, y puede intuirse como la “fuerza” de cada hueco de tensión. Su expresión es:

$$F_{dmc} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (1 - v_i^2) \quad (6)$$

donde v_i es la magnitud de cada fase i durante el hueco de tensión. Este factor está dado en por unidad, ya que las tensiones v_i también están dadas en por unidad.

De acuerdo a la ecuación (6), entre más profundas sean las caídas de las fases mayor será el factor F_{dmc} . Por consiguiente, F_{dmc} sirve para diferenciar a dos huecos distintos que presentan el mismo N ; pero también puede ocurrir el caso que dos huecos distintos presenten el mismo factor F_{dmc} y N diferentes, como se muestra en la tabla 1.

En esta tabla se presentan cuatro tipos de huecos obtenidos mediante medidas reales. Como se observa, cuando los huecos presentan igual N , arrojan valores diferentes para el factor F_{dmc} y viceversa.

Finalmente, se requiere de un factor que tenga en cuenta tanto el factor de fase (N) como la energía dejada de suministrar durante el hueco (F_{dmc}), este factor se expresa mediante la ecuación (7) y es llamado *factor de hueco, fh*, y su expresión es:

$$fh = N * F_{dmc} \quad (7)$$

El factor fh , de acuerdo a la definición de hueco de tensión dado en la norma EN (ver referencias [11] y [12]). En la ecuación (8) se presentan sus valores límites.

$$fh = \begin{cases} 0,0633, & \text{cuando } Va = Vb = 1 \text{ p.u., } Vc = 0,9 \text{ p.u.} \\ 3, & \text{cuando } Va = Vb = 0 \text{ p.u., } Vc = 0,01 \text{ p.u.} \end{cases} \quad (8)$$

Tabla 1 Cálculo de N y F_{dmc} para algunos huecos de tensión reales [12]

<i>Magnitud de fases (p.u)</i>			<i>Figura</i>	N	F_{dmc} (p.u)
Hueco 1	Va	0,88		1	0,14
	Vb	0,95			
	Vc	0,95			
Hueco 2	Va	0,98		2	0,14
	Vb	0,90			
	Vc	0,90			
Hueco 3	Va	0,95		2	0,22
	Vb	0,85			
	Vc	0,85			
Hueco 4	Va	0,88		3	0,22
	Vb	0,88			
	Vc	0,88			

De acuerdo a la ecuación (8), el factor fh contiene todo un espectro continuo de valores que están entre 0,0633 p.u y 3 p.u. Este rango de valores incluye todos los posibles tipos de

huecos, siendo mayor el factor fh , cuanto más “crítico” sea el hueco (es decir, cuantas más fases descendán y mayor profundidad tenga los descensos).

Desde el punto de vista de los dispositivos sensibles a huecos de tensión, este rango de valores tiene sentido porque cuando existe una caída leve ($V_a=V_b=1$ p.u y $V_c=0,9$ p.u) los dispositivos no suelen sufrir alteraciones [8, 15] y esto puede cuantificarse con un valor muy pequeño ($fh=0,0633$); mientras que para huecos muy profundos y de muchas fases caídas ($V_a=V_b=0$ y $V_c=0,01$ p.u), los dispositivos presentan grandes alteraciones en su comportamiento, incluso desconexiones y hasta daños en los mismos, lo cual debe asociarse a un valor grande de este factor ($fh=3$).

En la figura 1 se muestra gráficamente el rango de valores para fh . Es importante resaltar de esta figura que estos rangos de valores se solapan dependiendo del número de fases caídas. Esto es debido a que en medio de los límites están incluidas todas las profundidades posible de las fases caídas y no caídas (las fases no caídas, o que no descienden por debajo del umbral de tensión, se tienen en cuenta por que ellas también pueden variar su magnitud entre 0,9 p.u y 1,0 p.u, lo cual incide en el cálculo de F_{dmc} y, por tanto, en el de fh).

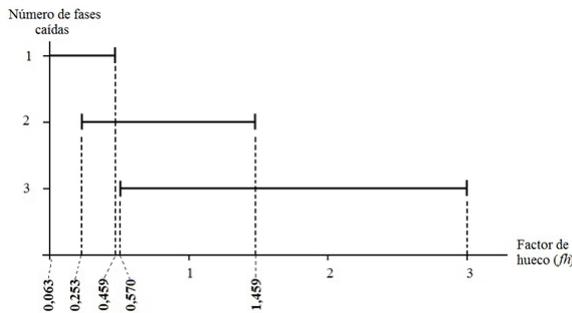


Figura 1 Valores límites entre los que varía fh para diferentes fases caídas

El solapamiento entre los rangos, visto en la figura 1, sugiere que hay huecos en los que descienden menos fases, por debajo del valor umbral de tensión, cuyo impacto en los dispositivos puede ser peor (mayor fh) que para algunos donde descienden más fases, debido a que las fases que descienden en los primeros son

de mayor profundidad que la que descienden en los segundos, lo cual puede provocar mayores efectos negativos en los dispositivos sensibles a huecos de tensión.

Con el fin de aplicar este factor y contrastarlos con el factor E_{VS} , a continuación se obtendrán sobre un número de registros obtenidos tanto de medidas reales como de simulaciones.

Resultados y discusión

Aplicaciones

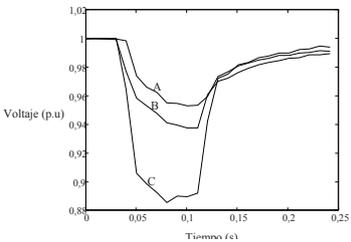
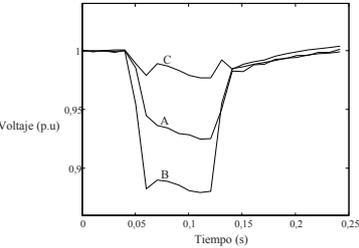
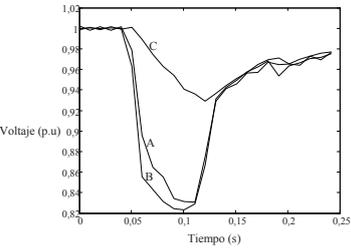
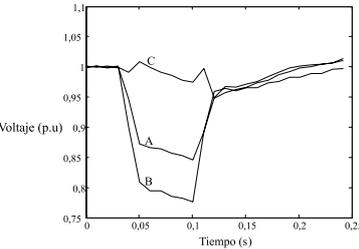
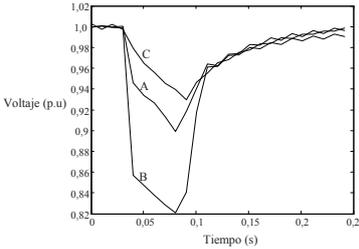
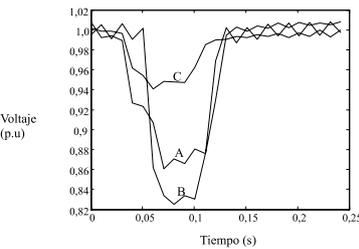
En esta sección se aplicarán tanto el factor propuesto fh como el factor E_{VS} . Este último se toma en consideración por su amplia difusión y utilización en la obtención de índices para huecos de tensión. Además, en su aplicación no se tendrá en cuenta el tiempo de duración de cada hueco, pues este parámetro depende del tiempo de disparo de las protecciones el cual es igual para todas las fallas en media tensión, que es el nivel de tensión en que se generaron los huecos considerados, aunque se hayan medido en baja tensión. Estos factores se aplicarán a registros reales y a registros obtenidos mediante simulaciones, y se obtendrá su relación frente al comportamiento de algunos dispositivos sensibles a huecos de tensión. Esto último se obtuvo mediante la técnica de simulación en los trabajos [15, 16].

Aunque el factor de severidad S_e también es aplicable para este fin, no se utilizará en este estudio porque, por un lado es de difícil aplicación debido a su comparación con otras curvas y, por otra parte, esas curvas actualmente solo existen para los elementos de cómputo (CBEMA, ITIC, SEMI), lo cual limitaría el estudio a ese tipo de dispositivos únicamente.

Aplicación sobre registros reales

Los resultados de aplicar los dos factores (fh y E_{VS}) a algunos de los huecos obtenidos de medidas reales se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 Aplicación sobre huecos reales de los factores E_{vs} y Fh

<i>Tensión (p.u)</i>	<i>Figura</i>	E_{vs}	Fh
0,89 I 0,95 0,94		0,2079	0,1406
0,98 II 0,92 0,88		0,2256	0,1396
0,93 III 0,83 0,82		0,3276	0,5015
0,95 IV 0,85 0,78		0,3916	0,4298
0,82 V 0,90 0,93		0,3276	0,3384
0,94 VI 0,86 0,82		0,3276	0,4174

En esta tabla se observa como varían los dos factores de acuerdo al tipo de hueco de tensión. Se puede ver que para los huecos I y II, donde solo desciende una fase, el factor E_{vs} es mayor que el factor fh , significando que fh es más consecuente con los efectos que estos dos tipos de huecos producirían en los equipos influenciados por ellos, pues para diversos tipos de equipos sensibles estos son poco afectados por huecos desbalanceados monofásicos [15-19], por tanto, estos tipos de huecos deberían ser representado por un factor de poco valor, tal y como sucede para el factor fh comparado con E_{vs} .

Para los huecos III a VI, donde descienden dos fases en cada uno de ellos, se puede ver que el factor de hueco aumenta su valor por encima de 2,5 veces respecto a los dos huecos anteriores, lo cual es muy consecuente con los efectos perjudiciales que estos tipos de huecos pueden producir sobre los equipos sensibles frente a los que producirían los huecos monofásicos. Además, se nota cómo los huecos III, V y VI, cuya fase mínima es igual para todos, producen un factor E_{vs} igual, pero desde el punto de vista de los equipos sensibles sus impactos no son iguales, ya que las otras fases también juegan un papel fundamental en su comportamiento [15-19]. Por tanto, los valores arrojados por este factor no son consecuentes con el comportamiento de los equipos sensibles. Por otro lado, para estos mismos huecos el factor fh varía de acuerdo a la magnitud en que descienden todas las fases. Por ejemplo el hueco III, para el que las otras dos fases (distintas a la que más cae) presentan mayor descenso promedio y pueden provocar efectos más negativos sobre los equipos sensibles, es el que presenta mayor fh de los tres; mientras que el hueco V, el cual presenta menor descenso promedio en las dos fases distintas a la que más cae, y en consecuencia produciría efectos menos negativos sobre los dispositivos sensibles, presenta un valor menor entre los tres.

Continuando con el análisis, el hueco IV produce un valor del factor E_{vs} mayor que el del hueco III, debido a que el primero presenta mayor profundidad en la fase más caída que el segundo.

En cambio, para el fh el comportamiento es inverso, porque para las otras dos fases restantes la caída es mayor en promedio para el hueco III que para el IV, lo cual hará que de estos dos huecos en cuestión el hueco III sea quien produzca un peor comportamiento de los equipos sensibles influenciados por ellos.

En resumen, se deduce que el factor fh arroja valores más acorde al efecto que los huecos de tensión pueden producir sobre los dispositivos sensibles que los arrojados por E_{vs} y, en consecuencia, su aplicación para la obtención de índices es más apropiada. Para seguir corroborando esto último, a continuación se correlacionan estos dos factores con el comportamiento de algunas variables relevantes de dos dispositivos esenciales en los procesos industriales: el motor de inducción (MI) y el variador de velocidad (ADS de su sigla en inglés).

Correlación entre fh y E_{vs} frente al comportamiento de algunos dispositivos sensibles

En las referencias [15-19] se muestra el comportamiento de algunos dispositivos sensibles a huecos de tensión, lo cual ha sido obtenido mediante simulaciones. Esos datos se utilizan a continuación para mostrar el comportamiento de algunas variables de dichos dispositivos frente a los factores E_{vs} y fh . Los dispositivos en cuestión son motores de inducción conectados directamente a la red eléctrica y variadores de velocidad.

B.1) Para el MI

En esta sección se consideran tres MI de diferentes capacidades: 3 HP, 50 HP y 2250 HP, con el fin de observar su comportamiento frente a huecos de tensión y la influencia de la capacidad en dicho comportamiento. Para este fin se presentan algunas figuras del MI de 2250 HP. En este sentido, en la figura 2 se presenta la variación en el tiempo de estas variables en presencia de un hueco de tensión cuyas fases descienden a un 79% para la fase A, 82% para la fase B y 96% para la fase C.

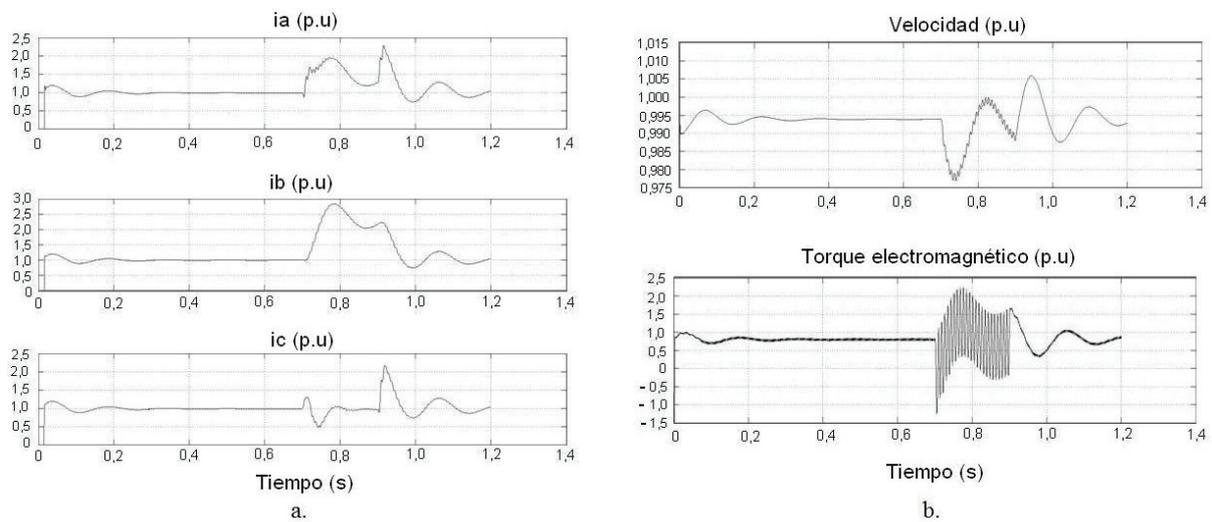


Figura 2 Comportamiento del MI de 2250 HP en presencia de un hueco de tensión. a) Corrientes de estator rms en p.u. b) Velocidad y torque rms en p.u. [15]

En esta figura se nota que las variables mantienen un comportamiento constante en 1 p.u. mientras no hay presencia de hueco (hasta 0,7 segundos), pero en presencia del hueco este comportamiento inicial se altera y las variables toman valores elevados y oscilantes, lo cual puede ocasionar

mal funcionamiento del MI, o su envejecimiento prematuro e incluso el daño del mismo.

Las correlaciones entre E_{vs} y fh , obtenidos de una base de datos de diferentes tipos de huecos, y las variables del MI de 2250 HP, se muestran en la figura 3.

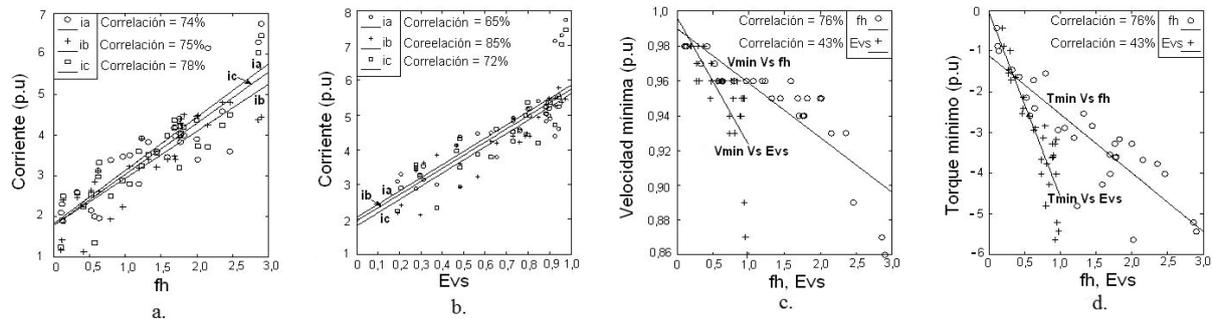


Figura 3 Curvas de correlación para el MI de 2250 HP, entre: a) Corrientes del estator y fh . b) Corrientes del estator y E_{vs} . c) Velocidad mínima y los factores fh y E_{vs} . d) Torque mínimo y los factores fh y E_{vs} [15]

Los resultados estadísticos para los tres MI se dan en la tabla 3.

De la tabla 3 se observa que aunque las correlaciones entre las variables de los tres MI y los factores fh y E_{vs} son muy similares, en promedio siempre termina siendo mayor

dicha correlación para fh (73.2%, 72%, 75.8%) que para E_{vs} (72.6%, 70.2%, 68.8%). Esto significa que fh ofrece una mejor descripción del comportamiento del equipo que E_{vs} , tal como se había previsto antes. Además, se observa que la capacidad del MI no influye su comportamiento frente a huecos.

Tabla 3 Valores de correlación entre las diferentes variables de los tres MI y los factores fh y E_{vs}

MI 3 HP	Correlaciones		
	E_{vs}	fh	
Corrientes de estator	ia	86%	78%
	ib	75%	75%
	ic	80%	86%
Par Mínimo	53%	60%	
Velocidad mínima	69%	67%	

MI 50 HP	Correlaciones		
	E_{vs}	fh	
Corrientes de estator	ia	70%	73%
	ib	62%	55%
	ic	88%	74%
Par Mínimo	72%	81%	
Velocidad mínima	59%	77%	

MI 2250 HP	Correlaciones		
	E_{vs}	Fh	
Corrientes de estator	ia	65%	74%
	ib	85%	75%
	ic	72%	78%
Par Mínimo	79%	76%	
Velocidad mínima	43%	76%	

B.2) Para el ADS

Aquí se consideran tres dispositivos ADS de distintas capacidades: 15 kW, 50 kW y 315 kW. Sus características se pueden observar en la referencia [16]. Al igual que para los MI, se observa la influencia de su capacidad y su comportamiento frente a huecos de tensión. En la figura 4 se muestra la variación en el tiempo de algunas variables de los ADS en presencia de un hueco de tensión que presenta los siguientes descensos: 50% en la fase A y 90% en las fases B y C.

Como se observa en la figura 4a, al caer la tensión de alimentación también cae la tensión en la etapa

de continua dependiendo del valor de capacitancia. Y en la figura 4b se nota que la corriente a la salida del ADS cae proporcionalmente al hueco de tensión. Lo anterior puede ocasionar el mal funcionamiento del dispositivo y la posible parada del motor que controla.

Por otro lado, las correlaciones entre E_{vs} y fh , obtenidos de una nube de diferentes tipos de huecos, y las variables del ADS de 15 kW se muestran en la figura 5.

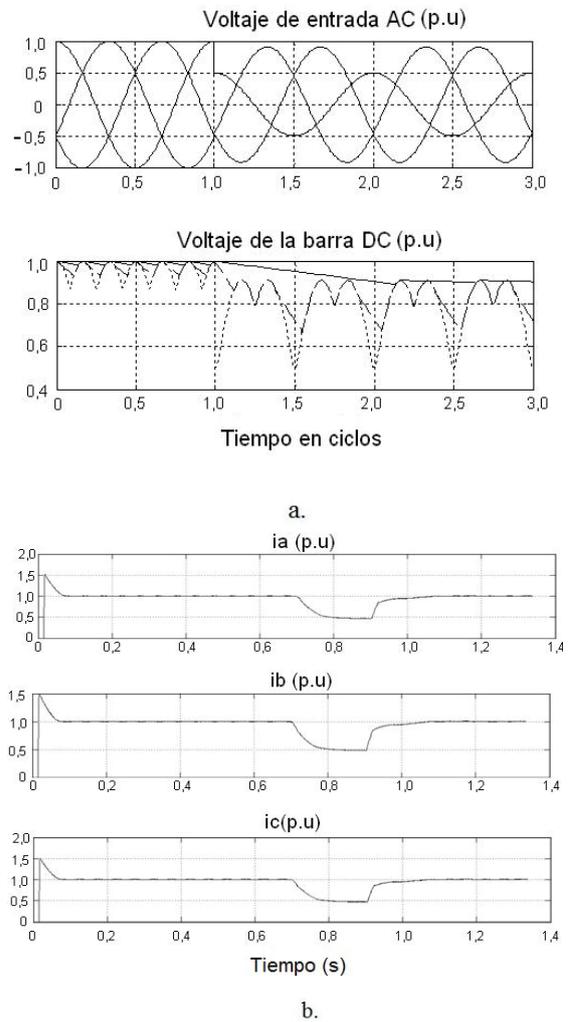


Figura 4 Comportamiento del ADS de 15 kW en presencia de un hueco de tensión. a) Tensión de la barra de continua para distintas capacidades. b) Corrientes de salida rms en p.u. [16]

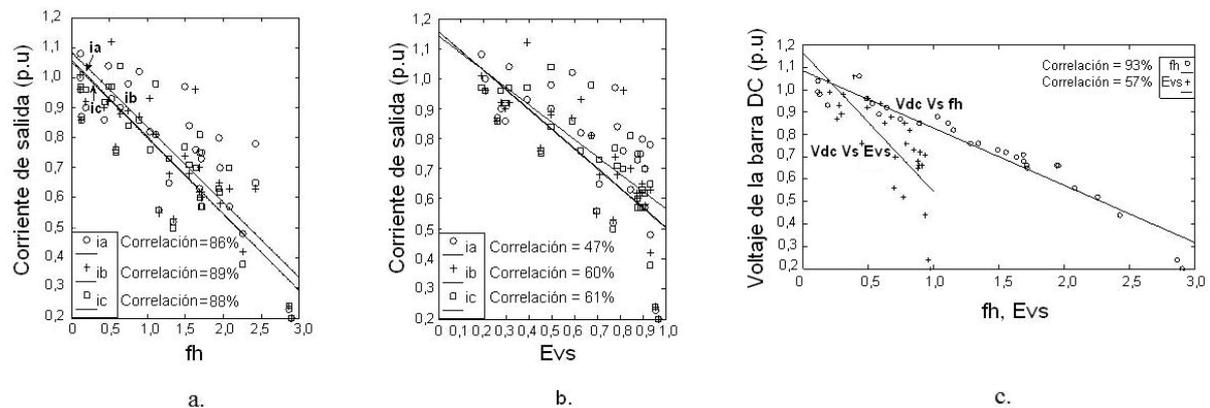


Figura 5 Curvas de correlación para el ADS de 15 kW, entre: a) Corrientes de salida y fh . b) Corrientes de salida y E_{vs} . c) Tensión de la etapa de continua y los factores fh y E_{vs} [16]

Los resultados estadísticos para los tres ADSs se dan en la tabla 4.

Tabla 4 Valores de correlación entre las variables de los tres ADSs y los factores fh y E_{vs}

ADS de 15 kW		CORRELACIONES	
		E_{vs}	Fh
Corrientes de salida	ia	47%	86%
	ib	60%	89%
	ic	61%	88%
Tensión barra DC		57%	93%

ADS de 50 kW		CORRELACIONES	
		E_{vs}	Fh
Corrientes de salida	ia	53%	90%
	ib	58%	87%
	ic	68%	92%
Tensión barra DC		61%	95%

ADS de 315 kW		CORRELACIONES	
		E_{vs}	Fh
Corrientes de salida	ia	45%	84%
	ib	46%	80%
	ic	53%	82%
Voltaje de barra DC		51%	88%

En esta última tabla se muestra que las correlaciones entre las variables de los tres ADS y el factor fh (89%, 91%, 84%) son, en promedio, bastante mayores que para el factor E_{vs} (56.3%, 60%, 48.8%). Esto significa que fh ofrece una mejor descripción del comportamiento del equipo frente a huecos de tensión que E_{vs} , tal como se había previsto antes. En esta tabla también se observa que la capacidad del ADS no influye en el comportamiento del mismo frente a huecos.

Adicionalmente, comparando los resultados estadísticos de los dos elementos, se observa que los ADS son significativamente más sensibles a huecos de tensión que los MI, lo cual se esperaba si se tiene en cuenta que el primero es un elemento con componentes de estado sólido, lo que lo hace muy sensible a la disminución súbita de la tensión de alimentación.

Conclusiones

El nuevo factor propuesto para caracterizar los huecos de tensión tiene en cuenta el descenso presentado en las tres fases, así como la tipología del hueco.

Este nuevo factor es más fácil de aplicar que algunas caracterizaciones existentes en la literatura, además es aplicable a cualquier tipo de dispositivo que sea alimentado con energía eléctrica.

Las caracterizaciones de huecos existentes en la literatura de más amplia difusión y utilización para la obtención de índices presentan inconvenientes porque, por una parte se pueden implementar en algunos dispositivos específicos, además de la dificultad que presentan en su aplicación (S_{ϕ}); y por otro lado solo tienen en cuenta la fase que más desciende (E_{VS}).

El factor de hueco propuesto fh representa mejor el comportamiento de los dispositivos que el factor E_{VS} propuesto en la literatura, y además caracteriza todo tipo de hueco de tensión a partir de un valor único y simple, que va entre 1 y 3, dependiendo de la severidad del mismo, su tipología y teniendo en cuenta que el hueco es un fenómeno trifásico. Además, este factor es aplicable para evaluar el comportamiento frente a huecos de tensión de todo tipo de dispositivo alimentado con energía eléctrica.

Por lo anterior puede ser una herramienta altamente eficaz para obtener índices para huecos de tensión que tengan en cuenta su carácter trifásico, su tipología y su repercusión en los usuarios. En este sentido puede ser complementado con otros aspectos del hueco de tensión, tales como su profundidad máxima, duración, área, etc.

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. Martín 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". *Transmission and Distribution Conference and Exhibition IEEE PES*. 2006. pp. 229-234.
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. Ed. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. 2005. pp. 1-128.
6. M. Bollen. *Understanding Power Quality Problems*. Ed. IEEE press series on power engineering. New York. 2000. pp. 2-387.
7. 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.
8. J. A. Martínez, J. Martín-Arnedo, J. V. Milanovic. "Load Modeling for Voltage Sag Studies". *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 18. 2003. pp. 2508-2513.
9. Comisión Reguladora de Energía y Gas (CREG), Ministerio de Minas y Energía. República de Colombia. "Calidad del Servicio Eléctrico". *Resoluciones 2001-2007*. 2007. pp. 1-45.
10. Boletín Oficial del Estado (BOE), Ministerio de Economía de España. *Calidad del Servicio Eléctrico. Decretos y enmiendas 2000-2006*. 2007. pp. 20-24. 14170-14176, 46013-46019.
11. Norma IEEE. *Recommended Practice for the Establishment of Voltage Sag Indices*. IEEE P1564. 2004. pp. 1-23.
12. E. García. *Valoración de la Calidad de la Energía Eléctrica Respecto a Huecos de Tensión: Índices y Niveles de Calidad*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. España. 2008. pp. 1-213.
13. M. Bollen, E. Styvaktakis. "Characterization of Three-Phase Unbalanced Dips". *IEEE Trans. on Power Delivery*. Vol. 2. 2000. pp. 274-300.
14. E. García, V. Fuster. "Metodología para la evaluación de huecos de tensión". *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, Nº. 53. 2010. pp. 196-204.
15. D. Pérez. *Análisis del comportamiento de un motor de inducción conectado directamente a la red de baja tensión frente a huecos de tensión*. Trabajo de pregrado. Universidad de Pamplona. Pamplona. 2009. pp. 1-176.
16. E. Cordero. *Análisis del Dispositivo de Control de Velocidad de CA Frente a Huecos de Tensión*. Trabajo de pregrado. Universidad de Pamplona. Pamplona. 2009. pp. 1-160.
17. J. Chan, J. Milanovic. "Severity Indices for Assessment of Equipment Sensitivity to Voltage Sag and Short Interruptions". *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 7. 2007. pp. 1298-1304.
18. M. Chilukuri, M. Lee, Y. Phang. "Voltage sag sensitivity of home appliances and office equipment". *CIREED 20th International Conference on Electricity Distribution Prague*. 8 - 11 de junio. 2009. pp. 1-6.
19. D. Aguilar, A. Luna, A. Rolan, G. Vázquez, G. Acevedo. "Modeling and simulation of synchronous machine and its behaviour against voltage sags". *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. 2009. pp. 729-733.