

**STUDY OF THE BEHAVIOR OF INDUCTION MOTOR DIRECTLY  
CONNECTED TO A LOW VOLTAGE ELECTRICAL NETWORK VERSUS  
VOLTAGE SAGS**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL MOTOR DE INDUCCION  
CONECTADO DIRECTAMENTE A LA RED DE BAJA TENSION FRENTE A  
HUECOS DE TENSION**

**Ing. Dairis Pérez\*, Ing. Eider Cordero Muleth\*, PhD. Edwin García Quintero\*\***

**\* Universidad de Pamplona**, Facultad de Ingeniería  
Ciudadela Universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.  
Tel.: 57-7-5685303, Fax: 57-7-5685303. Ext. 156  
E-mail: daimape@hotmail.com, eikorfm@hotmail.com

**\*\* Universidad de Antioquia**, Departamento de Ingeniería Eléctrica  
Calle 67 No. 53-108. Medellín, Antioquia, Colombia.  
Tel.: 57-4-2198559, Fax: 57-4-2638282  
E-mail: egarciaq@udea.edu.co

**Abstract:** This paper describes the behavior of the squirrel-cage induction motor (IM) which is connected directly to the electrical network, when it is exposed to voltage sags. To observe the behavior of the IM, some simulations will carry out using the professional software Matlab<sup>®</sup> with the PowerSystem Toolbox, it will be applied to the power system prototype. This prototype contains the main elements that compound a real power system. Through the simulation, different kinds of voltage sags will be generated at medium voltage level, which are apply to the IM through a low voltage electrical network. Also, the most relevant variables (electrical torque, speed, phase current) of the IM will be simulated for three different IM, with and without the voltage sags generated. The changes presented in those variables are correlated with the three-phase voltage sag severity to see the impact of the voltage sags over this kind of motor.

**Keywords:** Power quality, voltage sag, induction motor.

**Resumen:** En este artículo se estudia el comportamiento del motor de inducción (MI), tipo jaula de ardilla, conectado directamente a la red eléctrica frente a huecos de tensión. Para ello se simulará (utilizando la Toolbox PowerSystem de MATLAB<sup>®</sup>) un sistema de potencia prototipo el cual reúne, de manera simplificada, los principales elementos que componen un sistema de potencia real. Mediante dicha simulación se generan diferentes tipos de huecos de tensión en media tensión (MT), los cuales se transportan hasta el MI en baja tensión (BT) por medio de la red eléctrica. También se simulará el comportamiento de las variables más relevantes (par, velocidad y corrientes de fase) para tres motores diferentes, de este tipo, sin y con presencia de los huecos de tensión generados. Los cambios presentados en dichas variables se correlacionan con la severidad de los huecos de tensión trifásicos para ver el impacto de ellos sobre este tipo de motor.

**Palabras clave:** Calidad de la energía, huecos de tensión, motor de inducción.

## 1. INTRODUCCION

En la última década la calidad de la energía eléctrica ha venido ganando cada vez más importancia y hoy día de se ha convertido en un tema de mucho interés tanto para las empresas generadoras y distribuidoras de energía eléctrica, como para los fabricantes de equipos y los usuarios finales (Martínez y Martin-Arnado, 2006), (Fuster *et al.*, 2000).

Con el avance de la electrónica y la utilización de elementos en los sistemas eléctricos, cada vez más sensibles a perturbaciones eléctricas, hoy en día son otros los fenómenos que acaparan la atención de los expertos a nivel mundial, como los huecos de tensión, ya que estos pueden traer consecuencias nefastas para los procesos industriales y/o los usuarios comerciales-residenciales, debido a su impacto negativo sobre algunos dispositivos conectados al sistema eléctrico, principalmente los de tipo electrónico y de control (Kosow, 2000).

Por estudios realizados se han caracterizado ciertos dispositivos sensibles a huecos de tensión como los elementos de cómputo, dispositivos de control de velocidad y variadores de frecuencia, maquinas de corriente alterna (CA) conectados directamente a la red, entre otros, los cuales ocupan un papel importante en los procesos industriales; por lo tanto, su buen funcionamiento es vital para ellos (Chapman, 2000; Bollen, 2000).

No obstante, aunque existe abundante documentación a nivel mundial sobre huecos de tensión, sigue siendo un fenómeno que requiere continua investigación, sobre todo con el fin de regular este fenómeno, evaluar su impacto sobre los elementos influenciados por ellos y, en consecuencia, poder mitigar dicho impacto (Shen y Lu, 2007).

## 2. HUECOS DE TENSION

De acuerdo a la norma CEI 61000 el hueco de tensión es un descenso brusco de la tensión en un punto de la red eléctrica, seguido de un restablecimiento de la tensión, después de un corto período de tiempo que va de algunos ciclos a algunos segundos (IEEE, 2002).

$$\begin{aligned} 1\% U_{ref} < U < 90\% U_{ref} \\ 10ms < \Delta t < 1min \end{aligned} \quad (1)$$

La norma UNE-EN 50160 define el hueco de tensión como: “disminución brusca de la tensión de alimentación a un valor situado entre el 90% y el 1% de la tensión de referencia  $U_{ref}$ , seguida del restablecimiento de la tensión después de un corto lapso de tiempo. Por convenio, un hueco de tensión dura de 10 ms a 1 min. La profundidad de un hueco de tensión es definida como la diferencia entre la tensión eficaz mínima durante el hueco de tensión y la tensión de referencia. Las variaciones de tensión que no reducen la tensión de alimentación a un valor inferior al 90% de la tensión de referencia  $U_{ref}$  no son consideradas como huecos de tensión” (IEEE, 2002).

## 3. ÍNDICE DE LA SEVERIDAD DEL HUECO

La severidad del hueco es cuantificada a través de un índice conocido como el factor de hueco,  $fh$ . Este factor se calcula a través de dos índices: el factor de descenso  $N$  y el factor de descenso medio cuadrático  $F_{dmc}$  (García, 2008).

### 3.1 Factor de descenso, $N$ .

Este factor es planteado en (García y Fuster, 2009), el cual consiste en una evaluación cuantitativa de los diferentes tipos de huecos de tensión trifásicos. El factor de descenso arroja un valor simple y unívoco, entre cero y tres, para todos los tipos de huecos de tensión, considerándolos como un fenómeno trifásico. El algoritmo para obtener este factor se representa mediante el diagrama de flujo mostrado en la figura 1.

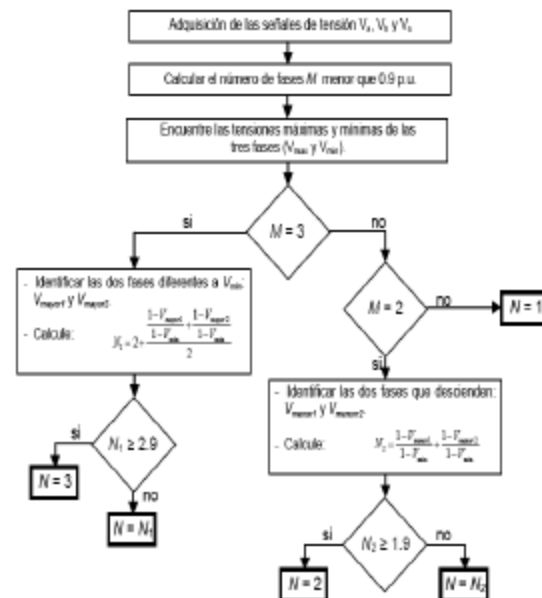


Fig 1. Diagrama de flujo para la evaluación de huecos de tensión (García y Fuster, 2009).

### 3.2 Factor de descenso cuadrático medio de tensión, $F_{dmc}$ .

Este factor es planteado en (García, 2008), y expresa la energía media que ha dejado de suministrar el hueco de tensión trifásico. Este factor se obtiene mediante la siguiente expresión.

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

Donde:  $i$  = cada fase,  $v_i$  = tensión de cada fase durante el hueco.

### 3.3 Factor de hueco, $fh$ .

Este factor se plantea en (García, 2008). Él arroja un número unívoco y simple, comprendido entre cero y tres, que relaciona la fuerza de cada hueco ( $F_{dmc}$ ) con su tipología ( $N$ ). Además, arroja un valor grande (cerca a tres) cuanto más severo sea el hueco (aquellos en los cuales descienden mayor número de fases y más profundos) y, por el contrario, produce un valor pequeño (cerca a cero) para huecos poco severos (aquellos en los que solo desciende una fase y con poca profundidad). Este factor se obtiene mediante la expresión:

$$fh = N * F_{dcm} \quad (3)$$

## 4. DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL MI FRENTE A HUECOS DE TENSIÓN

Diversas referencias muestran que equipos como los MI (Motores de Inducción), conectados directamente a la red eléctrica, pueden resultar muy afectados por huecos de tensión. Lo cual es bastante preocupante si se tiene en cuenta que estos elementos se encuentran en la gran mayoría de las industrias (Kosow, 2000; Chapman, 2000).

Ante la presencia de un hueco de tensión, las características mecánicas del motor se afectan:

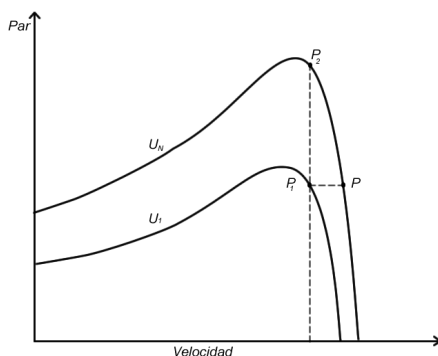


Fig. 2. Características mecánicas de un motor de inducción para tensiones  $U_N$  (nominal) y  $U_1$  (durante el hueco).

Para cada velocidad, el par  $t$  es proporcional al cuadrado de la tensión de alimentación  $U$  (Tomiyama *et al.*, 2003), es decir:

$$\frac{t_1}{t_N} = \left( \frac{U_1}{U_N} \right)^2 \quad (4)$$

Al producirse un hueco, suponiendo para simplificar, un par resistente constante:

- A). Si el nuevo par útil máximo es superior a resistente, el punto de funcionamiento que era  $P$ , figura 2, pasa a encontrarse en la recta  $P-P_1$ . El motor sigue funcionando a una velocidad inferior y dando menos potencia útil, y en caso de que la duración del hueco lo permita, se alcanza en  $P_1$  un nuevo equilibrio par motor-par resistente. Esto sucede, normalmente, para hueco de tensión de profundidad superior al 30% de la nominal.
- B). Si el par resistente es superior al nuevo par útil máximo, el motor se va frenando (falta de par). Cuanto mayor es la profundidad y duración del hueco, mayor será la ralentización del motor.

En general, para huecos de tensión de profundidad superior al 30% de la tensión nominal se producirá o no parada, dependiendo de la duración de los huecos y de la inercia del motor.

Cuando se restablece la tensión, son posibles dos situaciones:

- Los contactores están abiertos y precisa rearmar los motores manualmente. Si el rearme se realiza de forma automática, éste debe hacerse de forma secuencial y adecuada para evitar corrientes excesivas, accidentes y daños en la instalación.
- Los contactores han permanecidos cerrados, no se ha alcanzado el umbral de su apertura o están temporizados.

En este último caso:

Para la situación A) en el punto de funcionamiento pasa a ser el  $P_2$ , si se ha alcanzado el equilibrio durante el hueco o, en cualquier caso, un punto entre  $P_2$  y  $P$ ; requiriendo una intensidad inicial de 4 a 6 veces la nominal, si la perturbación ha sido del orden de 1 s. A continuación el motor se acelera hasta alcanzar el punto  $P$  de funcionamiento a régimen. Cuando existen varios motores de cierta potencia bajo estas circunstancias, se puede producir una elevada demanda de corriente en la red que origine un nuevo hueco por la caída de tensión en las impedancias de la misma, que puede agravar el efecto del primero, u ocasionar un corte por sobre intensidad.

Para la situación B) ocurre algo similar a la situación A), pero requiriendo una corriente inicial relativamente superior, que puede ser hasta 8 veces la nominal, dependiendo de la velocidad residual de la máquina. Hay que tener en cuenta que en las dos situaciones anteriores no actuaban los dispositivos de arranque del motor, por lo que la corriente inicial, al restablecerse la tensión, puede ser superior a la de arranque (Fuster *et al.*, 2000).

Resumiendo, podemos decir que para huecos de profundidad superior al 30% de la tensión nominal se producirá o no parada, dependiendo de la duración de aquellos y de la inercia del motor. Este proceso tiene lugar de forma simultánea en todos los motores de cualquier instalación industrial afectada por un hueco de tensión.

## 5. CASO DE ESTUDIO

Para este trabajo se implementan tres motores de inducción cuyas características se dan en la tabla 1.

*Tabla 1: Características de los motores de inducción bajo estudio.*

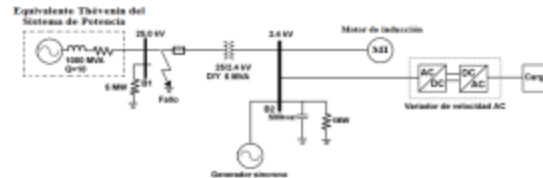
Motor	Características
MI 1	3 HP 2.4 kV 60 Hz
	Resistencia estator: 0,435 ( ? )
	Resistencia rotor: 0,816 ( ? )
	Inductancia Estator: 4,0 mH
	Inductancia Rotor: 2,0 mH
MI 2	50 HP 2.4 kV 60 Hz
	Resistencia estator: 0,087 ( ? )
	Resistencia rotor: 0,228 ( ? )
	Inductancia Estator: 0,8 mH
	Inductancia Rotor: 0,8 mH
MI 3	2250 HP 2.4 kV 60 Hz
	Resistencia estator: 0,029 ( ? )
	Resistencia rotor: 0,022 ( ? )
	Inductancia Estator: 0,59 mH
	Inductancia Rotor: 0,59 mH
	Inductancia Mutua: 34,58 mH

Estos motores están inmersos en un sistema de potencia real, interactuando paralelamente con otros elementos que conforman dicho sistema. En el sistema de potencia se generan una gama de huecos de tensión de diversas tipologías, a partir de diferentes tipos de cortocircuitos en el lado de MT, y que se transportan hacia los MI a través de la red eléctrica, con el fin de evaluar su impacto sobre ellos.

### 5.1 Sistema de potencia utilizado

El sistema de potencia utilizado para este estudio es un modelo simplificado que reúne todos los elementos que componen un sistema de potencia real.

En la figura 3 se muestra el sistema de potencia en cuestión.



*Fig. 3. Diagrama unifilar del sistema de potencia utilizado.*

Las características de los diferentes elementos, excepto los motores, que conforman el sistema de potencia en estudio se resumen en la tabla 2.

*Tabla 2: Características de los elementos del sistema de potencia.*

Elemento	Características
Fuente	Fuente simple RL, 25 kV, $S_{cc}=1000$ MVA, $Q=X/R=10$
Transformador	Dy, 25/2,4 kV, 6 MVA
Generador síncrono	3,125 MVA, 2,4 kV
Variador de velocidad	4700 $\mu$ F, 15kW, 2,4kV, 60 Hz 5000 $\mu$ F, 50kW, 2,4 kV, 60Hz 10000 $\mu$ F, 315 kW, 2,4kV, 60Hz
Carga resistiva	5 MW, 25 kV
Carga capacitiva	500 kVAR, 1MW, 2,4 kV
Líneas	---

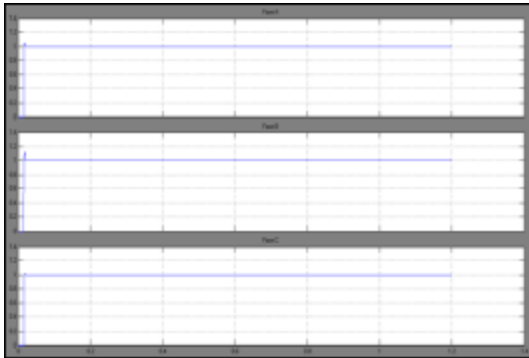
### 5.2 Motores de inducción

En este estudio se utilizaron tres motores con capacidades diferentes, con el fin de evaluar y contrastar entre ellos el impacto de los distintos huecos de tensión.

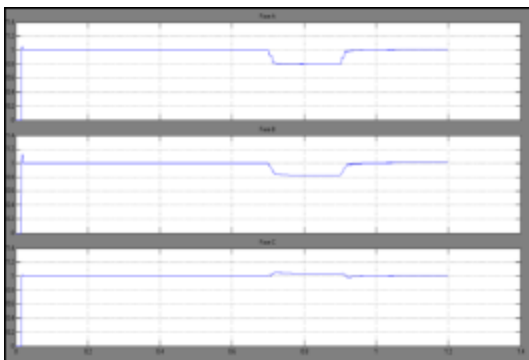
Las características de estos motores se muestran en la tabla 1.

## 6. COMPORTAMIENTO DEL MI FRENTE A HUECOS DE TENSIÓN

Después de realizar las simulaciones al sistema de potencia de la figura 3, se obtuvo los resultados de las variables más relevantes, para los tres MI utilizados, las cuales se muestran a continuación para el MI 3.

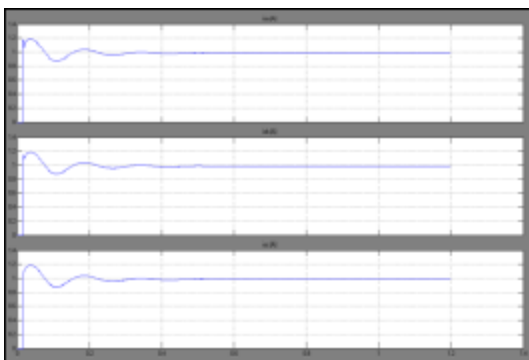


a.

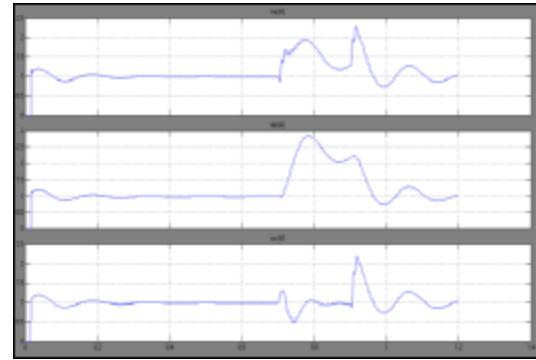


b.

Fig. 4. Tensiones de fase rms en p.u. en bornes del MI 3, en función del tiempo. a) En ausencia de hueco, b) En presencia de hueco.

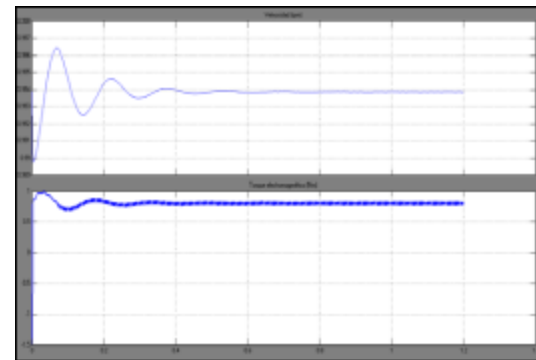


a.

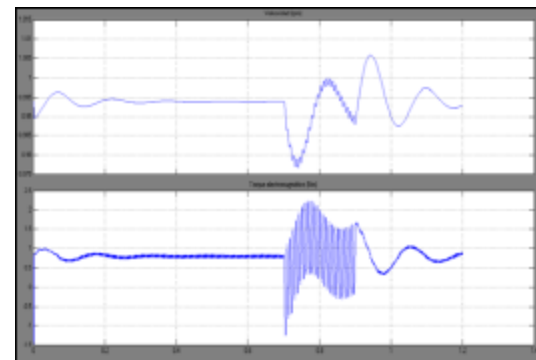


b.

Fig. 5. Corrientes rms, en p.u., de fase del estator del MI 3, en función del tiempo. a) En ausencia de huecos, b) En presencia de huecos.



a.



b.

Fig. 6. Velocidad y par en p.u. del MI 3, en función del tiempo. a) En ausencia de hueco, b) En presencia de hueco.

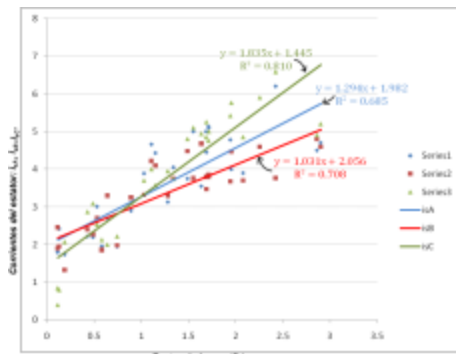
## 7. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

A partir de las gráficas obtenidas para el MI3 (figuras 4 a 6) se observa que las variables más relevantes de este elemento se comportan de manera estable en ausencia de huecos de tensión,

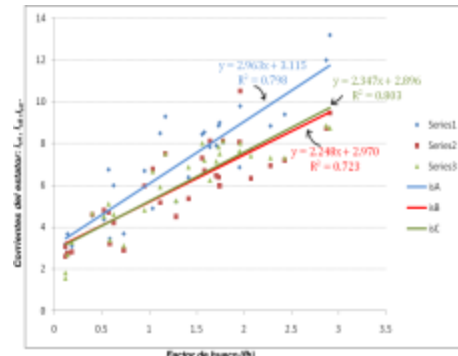
pero una vez haya presencia de huecos (huecos bifásico para este caso, donde las fases a y b caen al 79% y 82%, respectivamente) se altera el comportamiento estable de las variables, así:

- Para las corrientes de fase del estator, estas empiezan a oscilar durante el hueco alcanzando valores máximos de 2.3 veces la corriente nominal para la fase a, 2.9 veces para la fase b y 2.2 veces para la c. Estos valores máximos pueden causar un disparo en las protecciones contra sobrecorriente, además de un envejecimiento prematuro del sistema aislante y, en consecuencia, la disminución de la vida útil del mismo.
- Para la velocidad, esta oscila durante el hueco alcanzando valores mínimos de 0.87 p.u y máximos de 1.011 p.u, los cuales pueden provocar el disparo de las protecciones de subvelocidad del motor o generar inestabilidad mecánica en el mismo.
- Para el par, este también oscila durante el hueco, disminuyendo hasta cero, incluso a valores negativos de hasta -1.2 veces el valor nominal; y a valores positivos de hasta 2.2 veces el valor nominal. Además, estos valores los alcanza por pulsaciones de alta frecuencia, pudiendo llevar al desgaste mecánico del motor o al deterioro de algunas partes mecánicas y, en consecuencia, a la disminución de su vida útil.

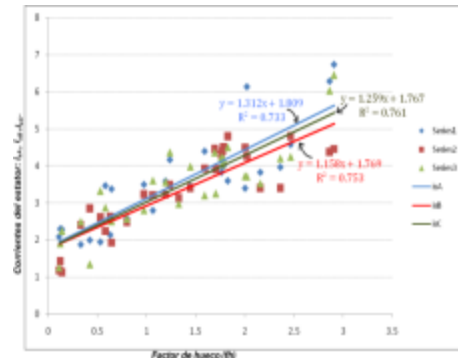
Además de los resultados mostrados y analizados previamente, se obtuvo el comportamiento de las tres variables en cuestión, para los tres MI, en presencia de 30 tipos de huecos de tensión con diferentes severidades. Estos resultados se muestran en las figuras 7 a 9, a partir de las curvas de correlación entre las variables en estudio de los tres MI y la severidad de los huecos (*fh*).



a.

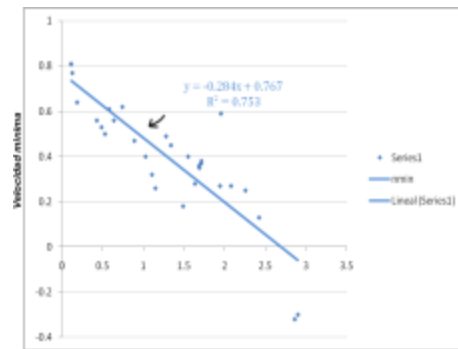


b.

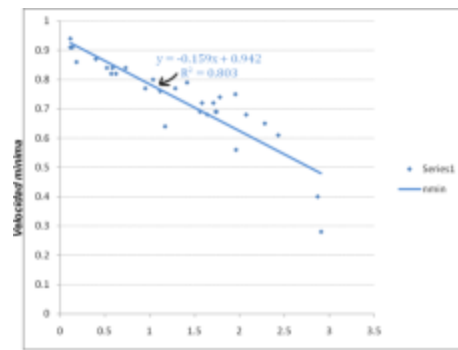


c.

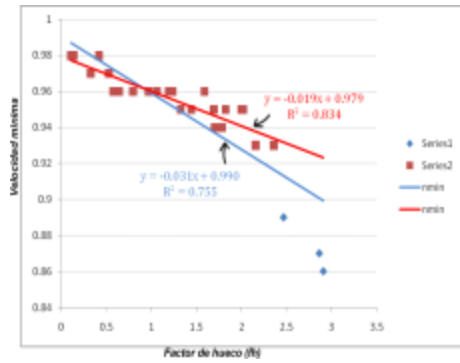
Fig. 7. Correlación entre las tres corrientes de fase y la severidad del hueco (*fh*). a) Para el MI1, b) Para el MI2, c) Para el MI3.



a.



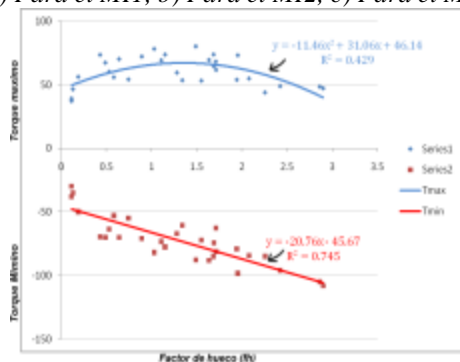
b.



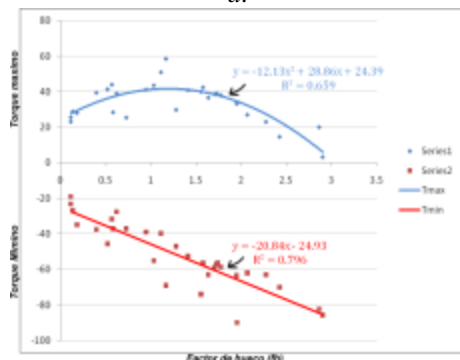
c.

Fig. 8. Correlación entre la velocidad y la severidad del hueco (fh).

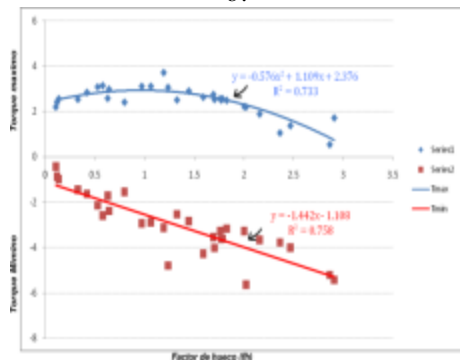
a) Para el MI1, b) Para el MI2, c) Para el MI3.



a.



b.



c.

Fig. 9. Correlación entre el par y la severidad del hueco (fh).

a) Para el MI1, b) Para el MI2, c) Para el MI3.

Como se señaló antes, las figuras 7 a 9 muestran la dependencia entre el cambio del comportamiento de las variables de los MI y la severidad de los huecos de tensión.

En la figura 7 se observa que la dependencia entre las corrientes de fase del estator y la severidad de los huecos (fh) se aproxima bastante a una recta con pendiente positiva (alta dependencia directa), para los tres MI, donde la mayor correlación se obtiene para la fase c del MI1 (81%) y la menor se obtiene para la fase a del mismo MI1 (69%). Todas las demás están comprendidas entre este estrecho margen.

La figura 8 muestra que la dependencia entre la velocidad y la severidad de los huecos se aproxima bastante a una recta con pendiente negativa (alta dependencia inversa), para los tres MI. La mayor correlación inversa se obtiene para el MI2 (80.3%), mientras que los MI1 y MI3 tienen una correlación aproximadamente igual (75%). Adicionalmente, se observa en la figura 8c que si se suprimen los huecos más severos la correlación aumenta significativamente (de 75% a 83%, en este caso). Esto último es viable si se tiene en cuenta que los huecos más severos se deben a faltas trifásicas francas a tierra, las cuales son muy escasas en los sistemas eléctricos.

La figura 9 muestra que la dependencia entre el par máximo y la severidad del hueco es de tipo cuadrático, mientras que para el par mínimo es de tipo lineal con pendiente negativa (dependencia inversa). De los tres motores el que más presenta un comportamiento cuadrático (es decir, para el par máximo) es el MI3 (figura 9c), con una correlación del 73%, mientras que el MI1 (figura 9a) es el que menos presenta este tipo de comportamiento, con una baja correlación del 43%. Por otra parte, para el par mínimo el que presenta alta dependencia lineal es el MI2, con una correlación inversa del 80% (figura 9b), mientras que los MI1 y MI3 presentan una dependencia similar, con una correlación inversa aproximada a 75% (figuras 9a y 9c).

## 8. CONCLUSIONES

Después de realizada esta investigación se concluye que:

- Las variables estudiadas del motor de inducción como corrientes de estator, velocidad y par, varían con la severidad del hueco (fh).

- Estas variables presentan en su mayoría una correlación lineal con la severidad del hueco ( $f_h$ ) por encima del 70%, por lo tanto, ella influye fuertemente sobre el comportamiento del MI.
- A excepción de lo anterior, el par máximo está relacionado con el cuadrado del  $f_h$ , siendo mayor la correlación entre mayor sea la potencia del MI y viceversa.
- Como comportamiento general se observa que el máximo pico de corriente en el estator y del par sucede al inicio del hueco de tensión y después de la recuperación de la tensión. En consecuencia, estos dos estadios del hueco de tensión deben ser tenidos en cuenta con el fin de reducir esos sobrepicos.
- Los altos sobrepicos y oscilaciones del par causan a su vez fatiga mecánica y por tanto, pueden producir rotura en el eje del MI.
- Los huecos de tensión monofásicos son los más comunes, pero como su severidad ( $f_h$ ) es pequeña, no producen efectos tan nefastos en los MI.
- En general, la severidad de los huecos de tensión afecta con más fuerza a los MI más pequeños (o de menor capacidad).
- En resumen, los huecos de tensión son un fenómeno que afecta directamente y de manera contundente el comportamiento de los motores de inducción que están sometidos a ellos. Por consiguiente hoy en día son un fenómeno de gran importancia que deben ser tenidos en cuenta, pues por todo lo anterior pueden llevar a la parada, mal funcionamiento o daños de los MI, junto con sus nefastas repercusiones sobre los procesos productivos y, en consecuencia, las pérdidas económicas que esto pueda producir.

## REFERENCIAS

- Martínez J. y Martín-Arnedo J. (2006). "Voltage Sag Studies in Distribution Networks – Part III: Voltage Sag Index Calculation". IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 21, no. 3, pp. 1689-1697.
- Fuster V., Romualdo F., Marín J., y Ferrandis F. (2000). *Las perturbaciones eléctricas y la industria cerámica*, Instituto de Tecnología Eléctrica, Iberdrola. Valencia, España.
- Danfoss A. (2006). *Generalidades, variadores y arrancadores suaves*, Tercera Edición, México.
- Kosow L. (2000). *Máquinas eléctricas, transformadores y controles*, Prentice Hall, Segunda edición, Madrid.
- Chapman S. (2000). *Máquinas Eléctricas*, McGraw Hill, Tercera edición, México.
- Bollen M. (2000). *Understanding power quality problems*. IEEE press, USA.
- Shen C. y Lu C. (2007). "A Voltage Sag Index Considering Compatibility Between Equipment and Supply". IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 22, No. 2, pp. 996-1002.
- Tomiyama K., Ueoka S. y Takano T. (2003). "Modeling of Load During and After Systems Fault Base on Actual Field Data". IEEE PES General Meeting, Toronto.
- IEEE SCC-22-IEEE. (2002). *Standards Coordinating Committee on Power Quality*, USA
- García E. (2008). *Valoración de la Calidad de la Energía Eléctrica Respecto a Huecos de Tensión: Índices y Niveles de Calidad*. Editorial Universidad Politécnica de Valencia, España.
- García E. y Fuster V. (2009). "Metodología Para La Evaluación de Huecos de Tensión". En proceso de publicación por Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín.