

**ANALYSIS OF THE ADJUSTABLE-SPEED AC DRIVERS
UNDER VOLTAGE SAGS****ANALISIS DE LOS DISPOSITIVOS DE CONTROL DE VELOCIDAD DE CA
FRENTE A HUECOS DE TENSION****Ing. Eider Cordero Muleth*, Ing. Dairis Pérez*
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: eikorfm@hotmail.com, daimape@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 analyzes the behavior of the adjustable-speed AC Drivers (ASD's) under voltage sags. To observe the behavior of the ASD, some simulation will be applied using the professional software MATLAB[®] and the PowerSystem Toolbox, it will be applied to the power system prototype. This prototype contains the main elements that make up a real power system. Through this simulation, different kinds of voltage sags are generated in medium voltage level, which are apply to the ASD with a low voltage electrical network. Besides, the most relevant variables (dc voltage, voltages and currents output for the three phases) for three different ASD with or without voltage sags will be obtained. 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 drivers.

Keywords: Power quality, voltage sag, adjustable-speed AC drivers (ASD).

Resumen: En este trabajo se estudia el comportamiento del dispositivo de control de velocidad de CA (ASD) frente a huecos de tensión. Para ello se realiza la simulación (utilizando la Toolbox PowerSystem de MATLAB[®]) de un sistema de potencia prototipo; el cual reúne los principales elementos que componen un sistema de potencia real. Con esta simulación se generan diferentes tipos de huecos de tensión en media tensión (MT), los cuales se transportan hasta el ASD, en baja tensión (BT), por medio de la red eléctrica. Además, se obtiene el comportamiento de las variables más relevantes del ASD (tensión de la etapa de continua, tensión y corrientes de salida para las tres fases) para tres ASD diferentes, sin y en presencia de huecos de tensión. Los cambios presentados en dichas variables se correlacionan con la severidad de los huecos de tensión trifásicos para ver el impacto de estos últimos sobre este tipo de dispositivos.

Palabras clave: Calidad de la energía, huecos de tensión, dispositivos de control de velocidad de CA.

1. INTRODUCCION

La necesidad constante de automatizar los procesos productivos, junto con el avance de la electrónica de potencia, han propiciado un escenario idóneo para la introducción de nuevos dispositivos, cada vez más sofisticados, de control de los diferentes elementos que participan en los procesos industriales. Tal es el caso de los Dispositivos de Control de Velocidad de CA (ASD's), que se utilizan para el control de velocidad de motores de CA en una gran diversidad de industrias, los cuales se han proliferado enormemente en la última década hasta el punto en que la gran mayoría de las industrias a lo ancho del mundo hacen uso de ellos, por la gran flexibilidad y practicidad que ellos ofrecen al control de la velocidad de los diferentes tipos de motores de CA (Danfos, 2006; Kosow, 2000).

Pero como no todo puede ser ganancia, estos dispositivos han mostrado ser muy sensibles a diversos fenómenos que afectan la calidad de la energía eléctrica, siendo los huecos de tensión uno de los que más perturban el comportamiento de dichos dispositivos (Bollen, 2000). En este sentido, los huecos de tensión son un fenómeno que, si bien es cierto, en la última década se ha abordado suficientemente llegando a ser ampliamente caracterizado y determinado, el desarrollo de las investigaciones sobre su impacto en los diferentes elementos eléctricos, entre ellos los ADS's, apenas está empezando en el ámbito mundial (Fuster *et al.*, 2000; Shen y Lu, 2007). Debido a esto, en los últimos años el fenómeno de los huecos de tensión ha venido ganando cada vez más importancia y, hoy día, se ha convertido en un tema de interés para las compañías distribuidoras de energía eléctrica, para los fabricantes de equipos y los usuarios finales (Martínez y Martín-Arnedo, 2006).

Por todo lo anterior, el presente trabajo abordará el estudio del comportamiento de los Dispositivos de Control de Velocidad de CA frente a huecos de tensión, con el fin de evaluar las repercusiones que hay en dichos dispositivos y su relación con la severidad del hueco.

2. HUECOS DE TENSIÓN

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).

$$1\% U_{ref} < U < 90\% U_{ref} \quad (1)$$

$$10ms < \Delta t < 1min$$

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 a continuación (Ver Fig. 1).

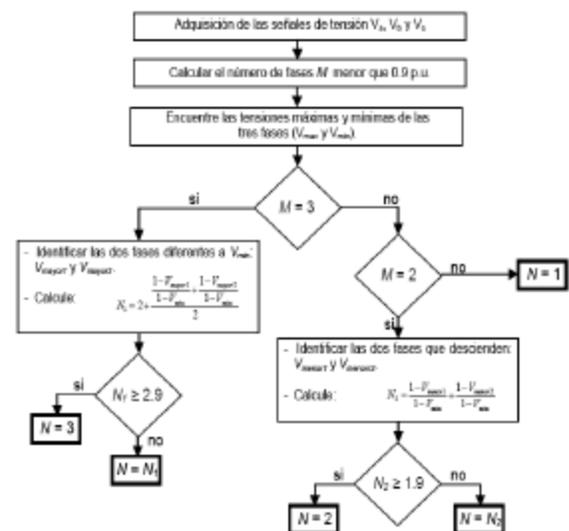


Fig 1. Diagrama de flujo para la evaluación de huecos de tensión (García y Fuster, 2009).

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. CASO DE ESTUDIO

En este estudio se implementan tres ADS's (ver tabla 1). Estos ADS's están inmersos en un sistema de potencia real, interactuando en conjunto con otros elementos que conforman el sistema en cuestión. 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 ADS's a través de la red eléctrica, con el fin de evaluar su impacto sobre ellos.

Tabla 1: Características de los ADS's utilizados.

ADS's	Características
ADS 1	4700 μ F, 15kW, 2.4kV, 60 Hz
ADS 2	5000 μ F, 50kW, 2.4 kV, 60Hz
ADS 3	10000 μ F, 315 kW, 2.4kV, 60Hz

4.1. Sistema de potencia implementado

El sistema de potencia implementado en este estudio es un modelo simplificado que reúne todos los elementos que componen un sistema de potencia real. En la figura 2 se muestra el sistema de potencia en cuestión.

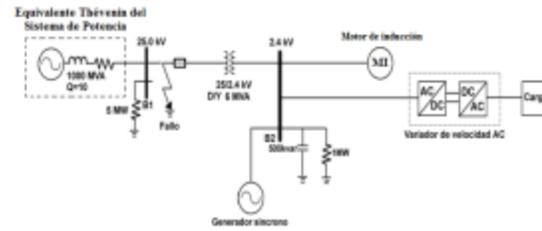


Fig. 2. Diagrama unifilar del sistema de potencia utilizado.

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

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

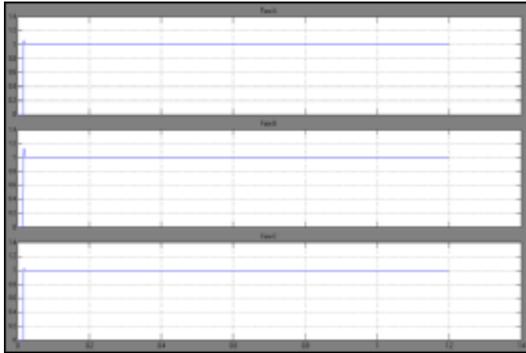
Elemento	Características
Fuente	Fuente simple RL, 25 kV, $S_{cc}=1000$ MVA, $Q=X/R=10$
Transformador	Dy, 25/2.4 kV, 6 MVA
Generador síncrono	3.125 MVA, 2.4 kV
Motores de Inducción	MI1 3 HP 2.4 kV 60 Hz Resist. estator: 0.435 (?) Resist. rotor: 0.816 (?) Induct. Estator: 4.0 mH Induct. Rotor: 2.0 mH Induct. Mutua: 69.31 mH
	MI2 50 HP 2.4 kV 60 Hz Resist. estator: 0.087 (?) Resist. rotor: 0.228 (?) Induct. Estator: 0.8 mH Induct. Rotor: 0.8 mH Induct. Mutua: 37.7 mH
	MI3 2250 HP 2.4 kV 60 Hz Resist. estator: 0.029 (?) Resist. rotor: 0.022 (?) Induct. Estator: 0.59 mH Induct. Rotor: 0.59 mH Induct. Mutua: 34.58 mH
Carga resistiva	5 MW, 25 kV
Carga capacitiva	500 kVAr, 1MW, 2.4 kV

4.2. Dispositivos de control de velocidad de CA

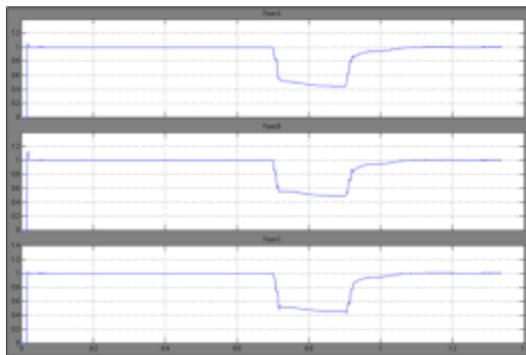
Para este trabajo se implementaron tres tipos diferentes de ADS's, de cara a evaluar y contrastar entre ellos el efecto de los distintos huecos de tensión. Las características de estos ADS's se muestran en la tabla 1.

5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Después de realizar las simulaciones al sistema de potencia de la figura 2, se obtuvo los siguientes resultados gráficos para las variables más relevantes de los ADS's utilizados. Esas gráficas se muestran a continuación para el caso del ADS3.



a.



b.

Fig. 3. Tensiones de fase rms en p.u. a la entrada del ADS3. a) En ausencia de hueco, b) En presencia de hueco

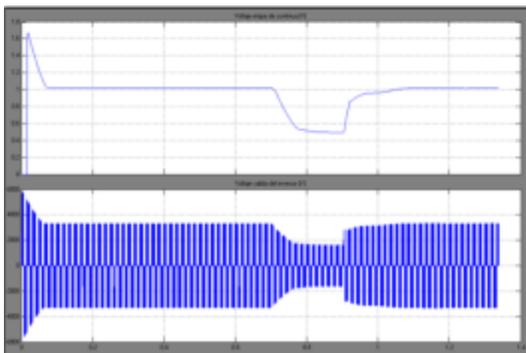


Fig. 4. Tensión de la etapa de continua (arriba) y de fase rms en p.u. a la salida del ADS3 (abajo), en presencia de hueco.

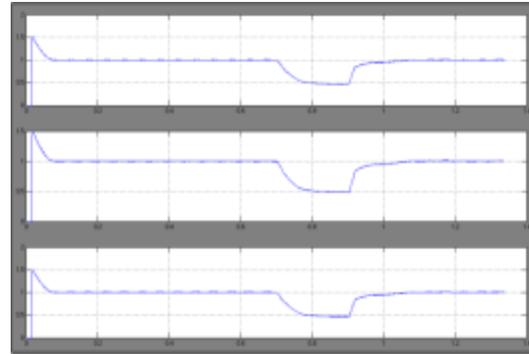


Fig. 5. Corrientes de fase rms en p.u. a la salida del ADS3, en presencia de hueco.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

De acuerdo a las gráficas obtenidas para el ADS3 (figuras 3 a 5), se observa que este elemento en presencia de huecos (hueco trifásico para este caso, donde las fases a, b y c caen al 45%, 49% y 46%, respectivamente) presenta alteración en la estabilidad de las variables, así:

- Para la tensión de la etapa de continua (parte superior de la figura 4), este cae proporcional al hueco trifásico, hasta un valor del 49%. Este pequeño valor de tensión remanente puede producir directamente el disparo de las protecciones de subtensión del ADS3, o puede afectar la frecuencia y la tensión a la salida del mismo, y por tanto la velocidad del motor que controla.
- Para la tensión de fase a la salida del ADS3 (parte inferior de la figura 4), esta experimenta un descenso en su valor quedando un hueco del 50%, el cual puede causar directamente el disparo en las protecciones o mal funcionamiento de la carga (motor) que controla.
- Las corrientes de fase a la salida del ADS3 (figura 5), caen durante este hueco de tensión hasta un 50% de su valor de prehueco, lo cual junto con la caída de tensión produce a una disminución de la potencia de alimentación a la carga que controla. Esto puede causar el disparo en las protecciones del ADS3 por subcorriente, o disparo en las protecciones de la carga por pérdida de sus funciones debido a la disminución de la potencia de alimentación.

Además de los resultados anteriores, también se muestra el comportamiento estadístico de los tres ADS's utilizados, en presencia de 30 tipos de huecos de tensión con diferentes severidades. Esto se muestra en las figuras 6 a 8, por medio de las curvas de correlación entre las variables en estudio de los tres ADS's y la severidad de los huecos (f_h).

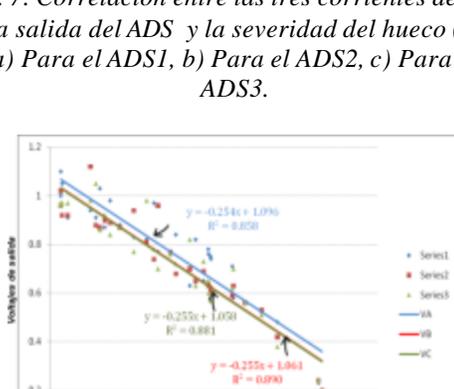
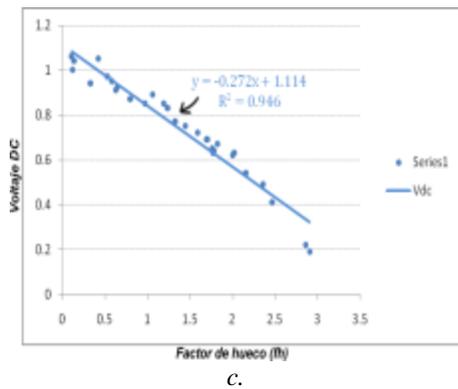
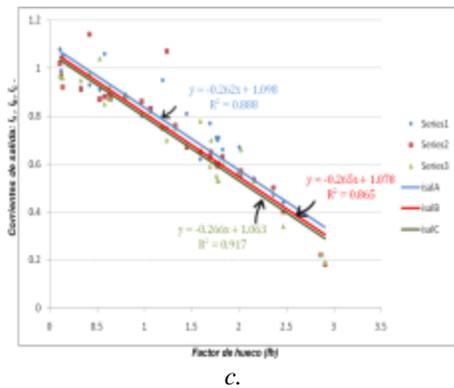
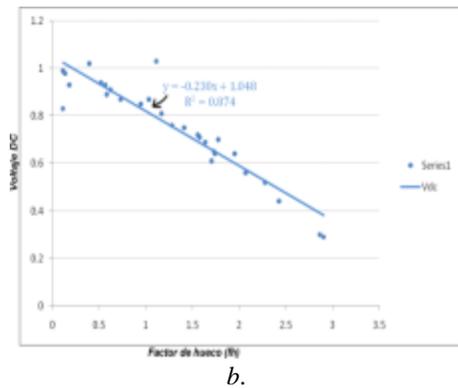
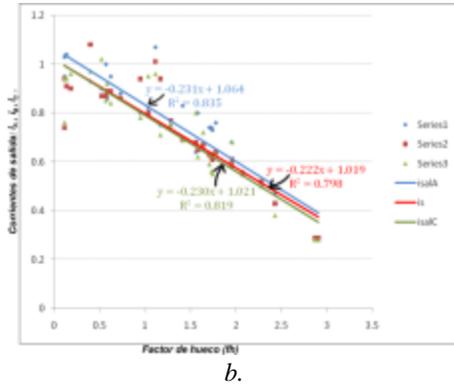
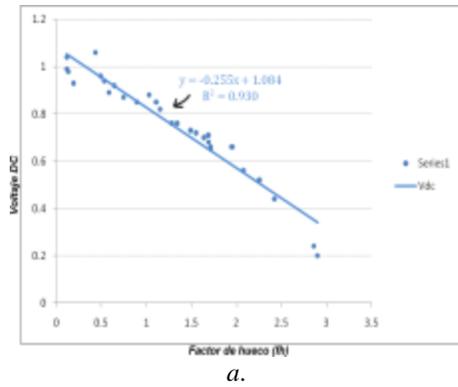


Fig. 6. Correlación de la tensión de la etapa de continua y la severidad del hueco (fh). a) Para el ADS1, b) Para el ADS2, c) para el ADS3.

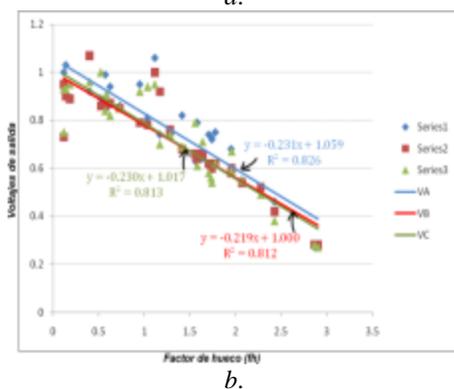
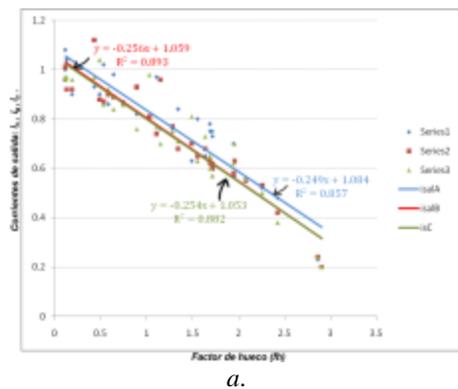
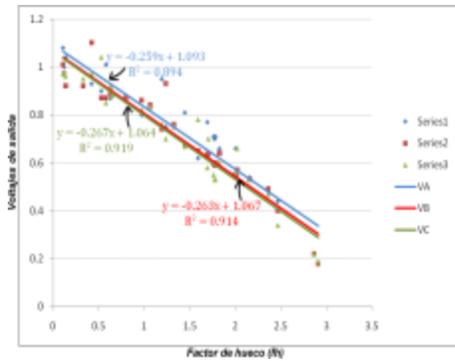


Fig. 7. Correlación entre las tres corrientes de fase a la salida del ADS y la severidad del hueco (fh). a) Para el ADS1, b) Para el ADS2, c) Para el ADS3.



c.

Fig. 8. Correlación entre las tres tensiones de fase a la salida del ADS y la severidad del hueco (f_h).

a) Para el ADS1, b) Para el ADS2, c) Para el ADS3.

Tal y como se expresó antes, las figuras 6 a 8 muestran la dependencia entre el comportamiento de las variables de los ADS's y la severidad de los huecos.

En la figura 6 se observa que la dependencia entre la tensión de la etapa de continua de los ADS's y la severidad de los huecos (f_h) se aproxima fuertemente a una recta con pendiente negativa (alta dependencia inversa). La mayor correlación inversa se presenta en el ADS3 de mayor potencia y mayor capacitancia (94.6%), mientras que la menor se presenta en el ADS2, de potencia y capacitancia media (87.4%). En general la correlación es muy alta, lo que implica que la tensión en la etapa de continua es muy sensible a la severidad de los huecos de tensión, por tanto, huecos muy severos afectan el desempeño de estos dispositivos.

En la figura 7, se nota que la dependencia entre las corrientes de fase a la salida de los ADS's y la severidad de los (f_h) es de tipo lineal con pendiente negativa (alta dependencia inversa). La mayor correlación inversa se presenta en el ADS3, de mayor potencia y mayor capacitancia (92%), mientras que la menor se presenta en el ADS2 (80%). Sin embargo, la correlación inversa sigue siendo alta, lo cual implica que las corrientes de fase son muy sensibles a la severidad de los huecos y, en consecuencia, los huecos severos van a afectar la potencia de salida de los equipos.

En la figura 8 se observa un comportamiento similar a los dos casos anteriores, lo que sugiere que la magnitud de las tensiones de fase a la salida del ADS es muy sensible a la severidad de los huecos. En este caso la correlación inversa mayor se obtiene para el ADS3 con un 92%, mientras que el menor se obtiene para el ADS2 con un 81%.

En general, para los tres tipos de ADS estudiados, sus variables más relevantes presentan gran sensibilidad frente a la severidad de los huecos de tensión.

7. CONCLUSIONES

Después de realizada la investigación se puede concluir lo siguiente.

Las variables estudiadas del variador de velocidad de CA, como la tensión en la etapa de continua, tensiones y corrientes de fase a la salida de los ADS's varían fuertemente con la severidad del hueco (f_h).

El modelo de fuente de potencia se implementó en este trabajo debido a que son los que más se utilizan en la industria y son fáciles de diseñar.

Todas las variables presentan una correlación lineal con la severidad del hueco superior al 80%; por lo tanto, ella sí influye fuertemente sobre el comportamiento del variador de velocidad de CA.

Los huecos trifásicos son los que provocan mayores repercusiones sobre las variables más relevantes de los ADS's, debido a que son los que presentan mayor f_h , pero estos se presentan con poca frecuencia. Al contrario de lo anterior, los huecos de tensión monofásicos son los más comunes, pero sus efectos sobre los variadores no son tan severos.

La tensión mínima en la etapa de continua de los ADS's suele producirse coincidiendo con el valor mínimo del hueco, y el pico de corriente mayor sucede cuando se recupera la tensión. En consecuencia, se deben tener en cuenta estos dos instantes del hueco.

El rizado de la tensión de continua es mayor durante el hueco de tensión que durante el funcionamiento normal, lo cual puede generar problemas de funcionamiento.

Una adecuada elección de la capacitancia de la etapa de CD del variador, así como la selección del umbral mínimo de las protecciones, pueden ayudar a mitigar los efectos de los huecos de tensión.

En general, la severidad de los huecos de tensión afecta con más "fuerza" a los ADS's de mayor y menor capacidad, y afectan menos a los de capacidad media.

En definitiva, los huecos de tensión son una perturbación de gran importancia sobre los que hay que centrar la atención, ya que su influencia sobre el comportamiento de los ADS's puede llevar a la parada, mal funcionamiento o daños de estos, junto con sus nefastas repercusiones sobre los procesos productivos y las consecuentes pérdidas económicas.

REFERENCIAS

- Danfoss A. (2006). *Generalidades, variadores y arrancadores suaves*, Tercera Edición, México.
- Kosow L. (2000). *Máquinas eléctricas, transformadores y controles*, Prentice Hall, Segunda edición, Madrid.
- Bollen M. (2000). *Understanding power quality problems*. IEEE press, USA.
- Fuster V., Romualdo F., Marín J., y Ferrandis F. (2000). *Las perturbaciones eléctricas y la industria cerámica*, Instituto de Tecnología Eléctrica, Iberdrola. Valencia, España.
- 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.
- 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.
- 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.