

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE MOTORES SINCRÓNICOS ANTE HUECOS DE TENSIÓN.

**N. A. LEMOZY\***  
Facultad de Ingeniería UBA  
Argentina  
[nlemozy@fi.uba.ar](mailto:nlemozy@fi.uba.ar)

**E. G. VINSON**  
Facultad de Ingeniería UBA  
Argentina  
[edgardovinson@yahoo.com.ar](mailto:edgardovinson@yahoo.com.ar)

**A. JURADO\***  
Facultad de Ingeniería UBA  
Argentina  
[ajurado@fi.uba.ar](mailto:ajurado@fi.uba.ar)

**Resumen** – Los huecos de tensión son eventos frecuentes en las redes de distribución, en muchas ocasiones provocados por fallas en otros circuitos vinculados al mismo nodo de alimentación, con una profundidad que depende del nivel de la corriente de cortocircuito, y una duración que depende de los ajustes de las protecciones. Estas perturbaciones pueden afectar al equipamiento electrónico, a los dispositivos de mando electromecánicos y a los motores eléctricos, y su consideración es importante a los efectos de mitigar o evitar la afectación de los procesos productivos. Los motores sincrónicos empleados en la industria son generalmente de potencia elevada, y el eventual efecto de un hueco de tensión, tal como la pérdida de sincronismo, puede tener consecuencias relevantes, lo que debe analizarse para tomar las precauciones del caso.

En el presente trabajo se estudia y efectúa el modelado del comportamiento electromagnético de un motor sincrónico, vinculado a una red de distribución primaria, durante huecos de tensión originados por fallas en dicha red.

**Palabras clave:** Motores sincrónicos, transitorios electromecánicos, huecos de tensión.

### 1 INTRODUCCIÓN

Los huecos de tensión son un problema importante para muchas industrias, puesto que pueden provocar salidas de servicio de equipamiento sensible, con el consecuente lucro cesante por detención de la actividad productiva, y pérdidas económicas por el material desechado.

Se entiende como hueco de tensión a una reducción del valor eficaz de la tensión de alimentación de entre 10% y 90% del valor previo, con una duración de entre medio ciclo y un minuto. Una profundidad de reducción mayor se considera una interrupción corta.

Los huecos de tensión están asociados generalmente a:

- Arranque de motores importantes.
- Energización de grandes transformadores.
- Fallas en la red asociada al punto de conexión. Por ejemplo, fallas en líneas derivadas del mismo transformador que alimenta al equipo afectado, o fallas en la misma línea de alimentación del equipo afectado que sean relevadas por un dispositivo de protección ubicado aguas abajo al punto de conexión de éste.

En particular, en los motores sincrónicos (MS) alimentados desde la red pueden producirse los siguientes efectos [1]:

- Picos de corriente luego del instante en que se produce la reducción de la tensión, y cuando se restituye el valor inicial, que pueden llegar a provocar el disparo indeseado de las protecciones de sobrecorriente.
- Picos de cupla electromagnética luego del instante en que se reduce la tensión de alimentación, y luego de restituirse, alcanzando en este último caso valores más severos aún [1]. Estos picos de

cupla pueden dañar mecánicamente a la misma máquina como también al equipamiento accionado.

- Riesgo de pérdidas de sincronismo: si la duración y profundidad del hueco es relevante, el ángulo de carga aumenta y puede alcanzar un valor tal que, al restitirse la tensión, puede no ser suficiente la energía acelerante disponible de la cupla electromagnética [2] para restituir el sincronismo.

Por tal motivo, es necesario evaluar el comportamiento electromagnético y dinámico mediante un modelo apropiado que permita establecer criterios protectivos a efectos de prevenir salidas de servicio innecesarias.

## 2 ANALISIS CONCEPTUAL DEL PROBLEMA

### 2.1 Características de los huecos de tensión y su modelado

Las características de los huecos de tensión comprenden:

- Las fases cuyo módulo de tensión se reduce, o su ángulo se modifica. Los huecos típicos presentan al menos simetría entre dos fases.
- La duración y profundidad de reducción de la/s fase/s cuyo módulo resulta afectado.

En la figura 1 puede observarse una tipificación obtenida de [3].

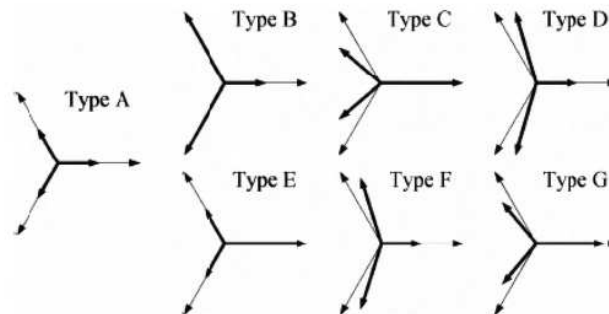


Figura 1: diferentes formas típicas de huecos de tensión

Para modelar los huecos de tensión, en general se asume que se produce directamente una variación en las tensiones de fase aplicadas a la máquina, durante el tiempo establecido, y luego se restituye el valor anterior [1][2][3].

Un modo más ajustado a la realidad es modelar la red incluyendo la línea de MT en que se produce la hipotética falla y el transformador de alimentación, de forma que el hueco de tensión que se produce en la máquina considere también el efecto de ésta durante el cortocircuito. No obstante, con la modalidad indicada en el párrafo anterior los resultados son más conservativos.

La duración de los huecos debidos a fallas en la red será generalmente menor cuanto mayor sea su profundidad, dado que las protecciones actualmente empleadas en cabecera de las líneas son de tiempo dependiente. Por ejemplo, un hueco con una tensión remanente de 50% o menos puede tener una duración de 80 ms, y un hueco con una tensión remanente del 80% puede tener una duración del orden de 150 ms, dependiendo del ajuste de protecciones aplicado.

En caso que el hueco sea asimétrico, la respuesta transitoria de corrientes y cupla instantánea difieren según el instante en que se produce el defecto, en cambio si es simétrico, resultan independientes [2].

### 2.2 Análisis simplificado del comportamiento en el instante de reducción y restitución de la tensión

En [1] se efectúa un análisis que permite comprender el comportamiento transitorio electromagnético durante las transiciones de tensión de alimentación.

Este análisis considera que son despreciables las resistencias de inducido y, que en los intervalos de transición, la velocidad no sufre modificaciones.

Se puede asumir por lo tanto que el flujo concatenado por el estator resulta directamente impuesto por la tensión aplicada en éste. Se puede representar el flujo concatenado por el estator referido a ejes fijos al mismo, aplicando el concepto de vector de flujo (expresado como número complejo). Asumiendo que para el instante inicial el rotor había recorrido un ángulo  $\gamma$  respecto del eje de referencia, y un ángulo de carga  $\delta$ , el vector de flujo resulta:

$$\bar{\lambda}_{e(0)} = \lambda_{e(0)} \cdot e^{j(\delta+\gamma)} \quad (1)$$

Con el hueco la tensión en bornes del MS se reduce, quedando una tensión remanente por unidad “ $s$ ” respecto a la previa. En régimen permanente el flujo concatenado se reducirá entonces en el factor  $s$  y la tensión inducida por es nuevo flujo será:

$$\bar{u}_{e(s)} = \lambda_{e(0)} \cdot \omega \cdot s \cdot e^{j(\delta+\gamma+\pi/2)} \cdot e^{j\omega t} \quad (2)$$

La variación del flujo desde el instante inicial hasta otro “ $t$ ” resultará aproximadamente igual a la integral del nuevo valor de tensión en el tiempo, resultando:

$$\Delta \lambda_{e(0)} = \int_0^t \bar{u}_{e(s)} \cdot dt = \lambda_{e(0)} \cdot s \cdot e^{j(\delta+\gamma)} \cdot [e^{j\omega t} - 1] \quad (3)$$

Se observa que la variación de flujo concatenado presenta una componente que gira con el rotor y otra fija en el espacio.

Ahora, el vector flujo concatenado total estático  $\lambda_{e(s)}$ , referido a ejes estáticos, resulta de la suma de (1) y (3). Para referir este flujo resultante a ejes fijos al rotor, se lo debe afectar por el fasor de posición relativa,  $e^{-j(\gamma+\alpha)}$  y resulta la expresión siguiente:

$$\lambda_{e(s)}^r = \lambda_{e(s)} \cdot e^{-j(\gamma+\alpha)} = \lambda_{e(0)} \cdot e^{j\delta} \cdot [s + (1-s) \cdot e^{-j\omega t}] \quad (4)$$

Se observa que, en proporción directa con la profundidad del hueco  $(1-s)$ , aparece una componente de flujo que gira respecto al rotor a velocidad sincrónica en sentido regresivo, y otra componente, proporcional a la tensión remanente  $s$  que está fija al rotor. La interacción de la primera con la excitación produce una cupla pulsante que se agrega a la cupla unidireccional que produce la segunda, dando lugar a importantes picos transitorios de cupla.

Por otra parte, como se analiza en [1], si la tensión se restituye en sólo medio ciclo, el flujo en la máquina pasará por un mínimo (la componente unidireccional de flujo resulta opuesta a la componente rotante) mientras que el forzado por la alimentación resultará igual al flujo original, resultando una componente unidireccional de flujo del doble de la anterior. No obstante, considerando los tiempos de actuación de las protecciones tradicionales, y la constante de tiempo unidireccional de los MS, de unos pocos ciclos, es de esperar que cuando se produce la restitución de la alimentación, la componente unidireccional de flujo sea pequeña.

### 3 MODELADO ANALITICO SIMPLIFICADO PARA TRANSITORIO INICIAL

#### 3.1 Modelo de análisis para el transitorio inicial

Para el estudio de regímenes transitorios se aplica el modelo de máquina referida a ejes  $d$ - $q$  fijos a la excitación [4]. El arrollamiento trifásico de inducido, giratorio respecto de la excitación, se transforma en un arrollamiento cuasi-estacionario asimilable a un arrollamiento de colector con escobillas según ejes  $d$ - $q$ , en las que aparecen tensiones de rotación.

Las ecuaciones de tensión del inducido resultan:

$$\begin{aligned} u_d &= R_a \cdot i_d + p \cdot \lambda_d + \omega \cdot \lambda_q \\ u_q &= R_a \cdot i_q + p \cdot \lambda_q - \omega \cdot \lambda_d \end{aligned} \quad (5)$$

Los flujos concatenados por el arrollamiento de inducido según eje  $d$  y  $q$ , considerando los arrollamientos amortiguadores ( $jD$  y  $jQ$ ), resultan:

$$\begin{aligned} \lambda_d &= L_d \cdot i_d + M_{d,jD} \cdot i_{jD} + M_{d,f} \cdot i_f \\ \lambda_q &= L_q \cdot i_q + M_{d,jQ} \cdot i_{jQ} \end{aligned} \quad (6)$$

El modelo de máquina en ejes  $d$ - $q$  puede asimilarse a dos conjuntos de circuitos eléctricos magnéticamente acoplados en ejes  $d$  y  $q$  respectivamente. El circuito asociado a cada eje incluye una fuente

de tensión controlada que representa la fuerza electromotriz de rotación en el inducido captada por las escobillas de ese eje, proporcional al flujo concatenado por el inducido según el otro eje y a la velocidad de rotación.

Si se pretende analizar el comportamiento electromagnético del MS ante una variación del valor eficaz de la tensión de alimentación, asumiendo que la velocidad en los primeros ciclos posteriores al inicio del hueco permanece constante y por lo tanto el ángulo de carga, es conveniente asumir que la tensión aplicada a los circuitos de ejes  $d$  y  $q$  está compuesta por la tensión original, y fuentes de tensión incremental que representan la variación.

En la figura siguiente pueden observarse los circuitos equivalentes antes mencionados.

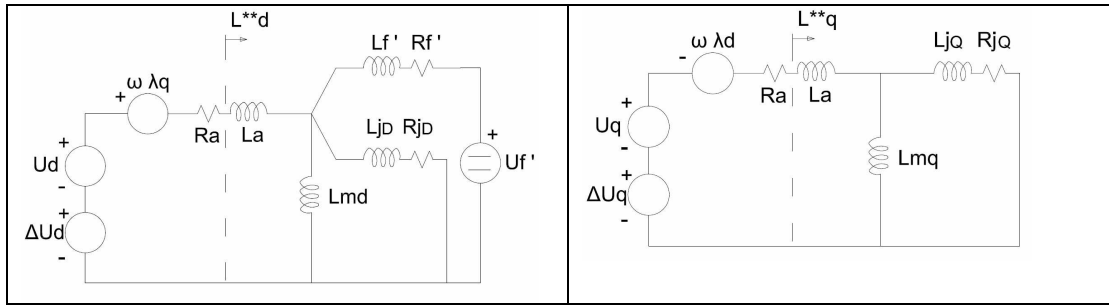


Figura 2: circuitos equivalentes de MS en eje directo y transversal

Luego se puede analizar el transitorio en los primeros instantes, por superposición de efectos, considerando la variación transitoria de la corriente debido a las fuentes que representan la variación de la tensión de alimentación, como función escalón.

Cada uno de los circuitos equivalentes de la figura anterior se pueden asimilar, excluyendo  $R_a$ , a inductancias operacionales denominadas inductancias amortiguadas de eje  $d$  y  $q$  respectivamente ( $L_d^{**}$  y  $L_q^{**}$ ) [5], permitiendo relacionar las variaciones de tensión y las de corriente a través de una notación sintética, considerando la expresión (5) anterior.

$$\begin{bmatrix} \Delta u_d \\ \Delta u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ra + p \cdot L_d^{**}(p) & \omega \cdot L_q^{**}(p) \\ -\omega \cdot L_d^{**}(p) & Ra + p \cdot L_q^{**}(p) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \end{bmatrix} \quad (7)$$

Dado que se busca evaluar el transitorio electromagnético al inicio del hueco, las inductancias operacionales pueden asimilarse con aproximación aceptable a las subtransitorias, ajustando además el valor de la resistencia para representar adecuadamente las pérdidas joule. Los circuitos equivalentes y ecuaciones resultan:

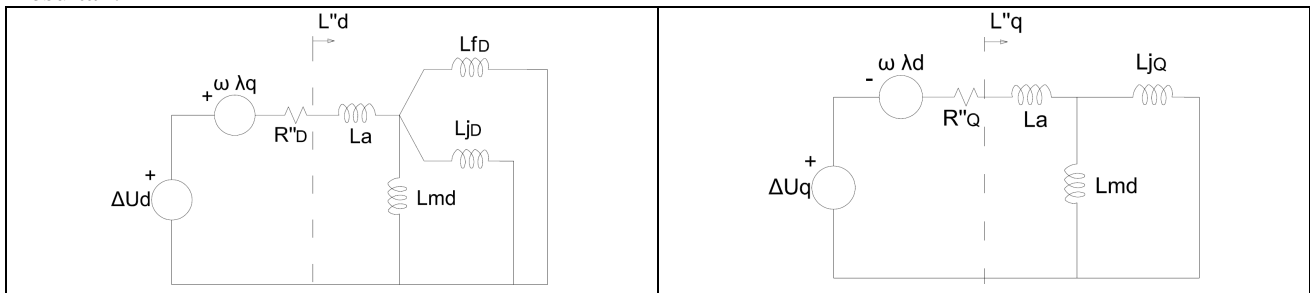


Figura 3: circuitos equivalentes simplificados de MS en eje directo y transversal

$$\begin{bmatrix} \Delta u_d \\ \Delta u_q \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} R_d'' + p \cdot L_d'' & \omega \cdot L_q'' \\ -\omega \cdot L_d''(p) & R_q'' + p \cdot L_q'' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \end{bmatrix} \quad (8)$$

Las raíces de la ecuación son complejas conjugadas  $-\alpha_0 \pm j\omega_0$ , donde:

$$\alpha_0 = \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{R_d''}{L_d''} + \frac{R_q''}{L_q''} \right] = -\frac{1}{\tau_a} \quad (9)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\omega^2 + \frac{R_d''}{L_d''} \cdot \frac{R_q''}{L_q''} - \frac{1}{\tau_a^2}} \quad (10)$$

Asumiendo que las relaciones  $R/L$  son bastante menores que la velocidad de giro en radianes eléctricos/segundo, la pulsación natural es prácticamente igual a la de red.

Para el caso de hueco de tensión simétrico, se asume que los escalones de variación de tensión son constantes, y que el ángulo de carga inicial no varía al variar el módulo de la tensión ( $U_d/U_q$  constante). En tales condiciones las corrientes en ejes d-q, aplicando las condiciones iniciales, resultan:

$$\begin{bmatrix} I_{d0} + \Delta i_d \\ I_{q0} + \Delta i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{d0} - \frac{\Delta u_q}{\omega \cdot L_d''} + \frac{\Delta u_d}{\omega \cdot L_d''} \cdot \frac{e^{-t/\tau_a}}{\cos \delta} \cdot \cos(\omega \cdot t + \delta) \\ I_{q0} + \frac{\Delta u_d}{\omega \cdot L_q''} + \frac{\Delta u_q}{\omega \cdot L_q''} \cdot \frac{e^{-t/\tau_a}}{\sin \delta} \cdot \sin(\omega \cdot t - \delta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{d0} - \frac{\Delta u \cdot \cos \delta}{\omega \cdot L_d''} - \frac{\Delta u}{\omega \cdot L_d''} \cdot e^{-t/\tau_a} \cdot \cos(\omega \cdot t + \delta) \\ I_{q0} - \frac{\Delta u \cdot \sin \delta}{\omega \cdot L_q''} + \frac{\Delta u}{\omega \cdot L_q''} \cdot e^{-t/\tau_a} \cdot \sin(\omega \cdot t - \delta) \end{bmatrix} \quad (11)$$

Se observa que el incremento del valor pico de la corriente respecto del valor previo dependerá de la amplitud de variación de la tensión, tal como se observara en el modelado computacional efectuado en [3]. Al transformar las corrientes de ejes d-q a las corrientes en el arrollamiento trifásico abierto real de inducido, aparecerán componentes de frecuencia de red, asociadas a las componentes de corriente permanente y subtransitoria, y unidireccional y de doble frecuencia de red, asociadas a la componente periódica amortiguada en ejes  $d$ - $q$ .

Para obtener las corrientes referidas a los arrollamientos de inducido reales, es necesario antitransformar las corrientes en ejes d-q a través de la matriz inversa de la transformación de Park.

No obstante, puede obtenerse fácilmente una cota máxima del pico de corriente componiendo los valores máximos de corriente en cada eje proporcionados por la expresión (11).

La cupla instantánea puede evaluarse mediante la expresión:

$$C_{em} = i_d \cdot \lambda_q - i_q \cdot \lambda_d \quad (12)$$

Los flujos concatenados serán el resultado de la superposición de los provocados por las corrientes resultantes de las fuentes de tensión incremental, más los provocados por las corrientes de inducido y excitación previas al inicio del hueco.

$$\lambda_d = \Delta i_d \cdot L_d'' + I_{d0} \cdot L_d + I_{f0} \cdot L_{md} \quad (13)$$

$$\lambda_q = \Delta i_q \cdot L_q'' + I_{q0} \cdot L_q \quad (14)$$

No obstante, y conforme a las hipótesis con que fue concebido, el método de cálculo sólo es válido en los instantes posteriores a la alteración de la tensión de alimentación.

### 3.1 Evolución del ángulo de carga hasta la restitución de la tensión

Para evaluar la evolución de la velocidad y el ángulo de carga durante el hueco en forma aproximada puede resolverse la ecuación dinámica aplicando como cupla motora la obtenida para el modelo de MS en régimen transitorio, de forma análoga al análisis de estabilidad transitoria de generadores sincrónicos.

Las expresiones son:

$$C_r = \frac{J}{p_p} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} + C_m(\delta) \quad (15)$$

Donde  $C_r$  es la cupla resistente, y  $C_m$  es la cupla motora función del ángulo de carga, determinada para el MS en régimen transitorio, de acuerdo a la expresión:

$$C_m(\delta) = \frac{(U - \Delta U) \cdot E_f'}{\Omega_s \cdot X_d'} \text{sen}(\delta) + \frac{(U - \Delta U)^2}{\Omega_s \cdot 2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d'} \right) \text{sen}(2 \cdot \delta) \quad (16)$$

Donde  $U$  es la tensión compuesta,  $\Delta U$  es la variación de tensión compuesta, y  $E_f'$  es la tensión de excitación detrás de la reactancia transitoria, para el inicio del transitorio.

Efectuando la integración aproximada de esta expresión se puede determinar el ángulo de carga al momento de restitución de la tensión. A partir de este punto se puede evaluar la corriente y cupla transitorias con expresiones análogas a las expuestas en 3.1, y la evolución posterior del ángulo de carga, con expresión análoga a (15).

#### 4 APLICACIÓN DEL MODELO PARA EVALUACION DE LA CORRIENTE Y CUPLA TRANSITORIAS

Se aplicó el modelo expuesto a un motor sincrónico de las siguientes características:

Potencia	4700 kW
Tension	13,2 kV
wla	0,18 pu
wLmd	1,4 pu
wLmq	0,9 pu
wlf	0,17 pu
wljD	0,075 pu
wljQ	0,08 pu
Xd	1,58 pu
Xq	1,08 pu
X''d	0,230 pu
X''q	0,253 pu
Ta	0,1 s

Se consideró un hueco de tensión tal que la tensión remanente sea 70%, o sea, la variación de la tensión por unidad resulta 0,3 del valor inicial nominal, y se asumió un factor de potencia del motor previo al hueco de 0,85 capacitivo.

Se observan en el gráfico las corrientes de eje directo y transversal, y la resultante para fase "a" del sistema.

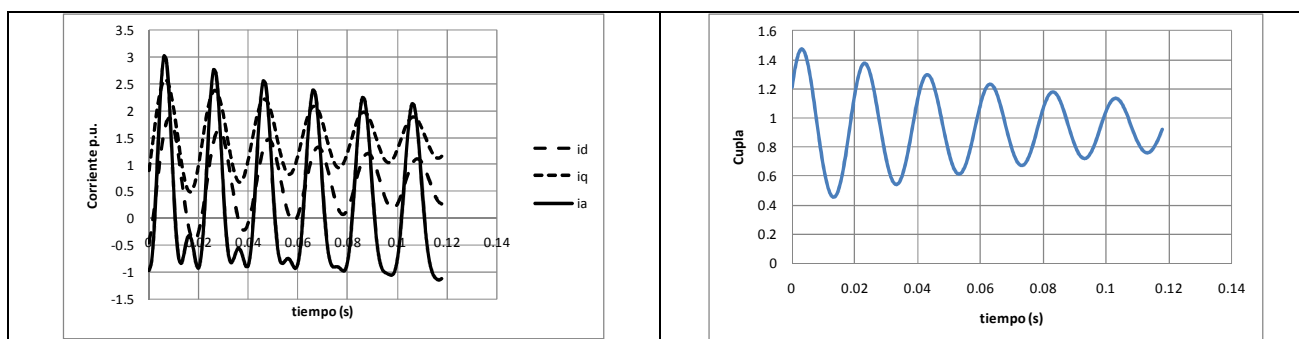


Figura 4: Gráficas de corriente y cupla al inicio del hueco

Se pone de manifiesto en la corriente de inducido un pico relevante, y la aparición de armónico de doble frecuencia y componente unidireccional. Asimismo, la cupla presenta una componente oscilatoria superpuesta, debido a las componentes transitorias de corriente.

Ambas características son compatibles con las gráficas obtenidas mediante los modelos implementados en [6] y [3].

## 5 CONCLUSIONES

Los dos efectos mas relevantes asociados a los huecos de tensión son los picos de corriente y de cupla que se producen durante el inicio del hueco, pudiendo provocar el disparo indeseado de protecciones de sobrecorriente el primero, y fatiga mecánica el segundo. En el instante de restitución de la tensión este inconveniente puede ser mas relevante aún, pero sólo si ésta se produce en tiempos mucho menores a los típicos tiempos de actuación de las protecciones, condicionados por el sistema mecánico.

La metodología expuesta permite determinar la corriente de cresta y el pico de cupla esperados en el inicio de un hueco de un modo sencillo y con datos de la máquina normalmente disponibles.

Disponiendo el valor de la corriente transitoria esperado se pueden ajustar las protecciones convenientemente para evitar disparos indeseados, con la consecuente interrupción de los procesos productivos.

Complementando esta metodología con el estudio del comportamiento dinámico del sistema aplicando el modelo transitorio de la MS, puede determinarse si la máquina puede atravesar exitosamente un hueco de duración y profundidad determinados.

## 6 REFERENCIAS

- [1] Carlsson Fedrik, H.P. Nee, C. Sadarangani: "Analysis of peak torque of line-operated synchronous machines subjected to symmetrical voltajes sags". Power Electronics, Machines and Drives, 16-18 April 2002.
- [2] Aguilar Daniel, Luna Alvaro, Rolan Alejandro, Vazquez Gerardo: "Modeling and simulation of synchronous machine behaviour against voltaje sags". IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Año 2009.
- [3] Carlsson, Fedrik: "Explanation to irregularities in the dependence between voltaje sag magnitude and the tripping level for line operated synchronous machines". Año 2003. IEEE
- [4] Norberto A. Lemozy, Alejandro Jurado: "Modelo circuital de máquina sincrónica para el estudio de cortocircuitos", .
- [5] Norberto A. Lemozy. Apuntes de Cátedra de Teoría de Máquinas Eléctricas.
- [6] Narayan C. Kar, Ahmed El-Serafi, "Effect of voltaje sag on the transient performance of saturated synchronous motors", IEEE CCECE/CCGEI, Ottawa, Mayo 2006.
- [7] C.V.JONES: "Unified Theory of Electrical Machines"; Ed. Butterworth, 1967.