

## **DEMANDAS INDUSTRIALES, SU REPRESENTACIÓN EN ESTUDIOS DINÁMICOS.**

**María B. Barbieri (\*)- Patricia L. Arnera – Mario C. Beroqui (P.P. CIC) – Julieta Z. Vernieri  
IITREE- UNLP (Argentina)**

### **RESUMEN**

La confiabilidad en el suministro eléctrico resulta un elemento fundamental para industrias electrodependientes, en las cuales se debe evaluar el comportamiento de la red ante condiciones estacionarias y dinámicas. El requerimiento de constancia en el suministro lleva a considerar la necesidad de implementación de islas eléctricas que garanticen la permanencia de cargas prioritarias de la industria, ante posibles contingencias de la red.

La representación de la carga en los estudios dinámicos es importante dado que su comportamiento determinará situaciones de colapso de tensión y/o de frecuencia. En particular para las redes industriales, la demanda posee una fuerte componente de motores de inducción, debiéndose centrar la atención en su representación.

Se realiza una búsqueda de datos reales de los motores y sus cargas (bombas, ventiladores, compresores, etc.) obtenidos de las características entregadas por los fabricantes.

Se evalúan distintos tipos de representaciones dinámicas y se realizan estudios de sensibilidad de los distintos parámetros de los modelos usados con objeto de clarificar cuales son los elementos determinantes en los distintos casos analizados.

Se realizan simulaciones dinámicas sobre un escenario tomado de referencia contemplando fallas de tensión donde se observa que la recuperación de la tensión depende fuertemente de la representación de la carga. Se presentan resultados correspondientes a los diversos modelos de cargas utilizados.

La dinámica de reaceleración de los motores es determinante en este tipo de transitorios, pudiendo provocar colapso de tensión.

### **PALABRAS CLAVES:**

Modelos de cargas industriales en estudios dinámicos. Motores de inducción. Reaceleración de motores. Colapso de tensión.

### **1.0 INTRODUCCIÓN**

En las empresas que se dedican a la exploración y extracción de petróleo, se ha difundido la idea de reemplazar los motores que alimentan a los Aparatos Individuales de Bombeo (AIB) por motores alimentados mediante energía eléctrica. Estas empresas desarrollan sus sistemas propios de generación y se conectan a la red pública para comprar un adicional de energía o bien para aumentar la confiabilidad y la calidad del suministro. Este tipo de sistemas se conectan en puntos de la red donde la potencia de cortocircuito suele ser débil, y están sometidos a distintas perturbaciones y fenómenos físicos que pueden ocasionar el colapso del mismo, por lo tanto ante perturbaciones en la red se desconectan de la misma y pasan a funcionar en isla eléctrica.

También existen plantas industriales relacionadas con el proceso del petróleo (refinerías y petroquímicas) conectadas a la red pública que constan de cargas constituidas en su mayoría por bombas centrífugas, compresores y en menor cantidad por algunos ventiladores. Los procesos químicos no pueden interrumpirse sin provocar efectos no deseados como la contaminación ambiental o riesgos para la seguridad de las personas, esto indica la necesidad de contar con un suministro eléctrico de alta confiabilidad.

El objeto de los estudios eléctricos sobre sistemas del tipo descripto, es evaluar el comportamiento de los mismos frente a transitorios electrodinámicos originados en fallas de la red tanto externas como internas.

Es de gran interés conocer el comportamiento de las Plantas industriales o las instalaciones eléctricas para la extracción del Petróleo en los transitorios de "Paso a Isla". Se pretende establecer mediante los estudios cuales son las situaciones tanto de la falla como operativas que permiten un paso a Isla satisfactorio sin generar una situación de colapso. Esto es poder evaluar la capacidad que tiene el sistema de reacelerar los motores luego de alguna falla, sin provocar la detención total de la planta.

(\*)Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos Eléctricos. FI-UNLP- 48 y 116 (B1900 AMF) La Plata. Argentina.

Cuando en la red se producen caídas de tensión la cupla acelerante de los motores asíncronos desciende, estos se frenan y absorben más corriente provocando una mayor caída de tensión, si el sistema no tiene capacidad suficiente de control de tensión (capacidad de entregar reactivo) el proceso deviene en un colapso de tensión. El proceso en el cual **los motores conectados a la red** se frenan y luego recuperan su velocidad se les llama proceso de **reaceleración**. Este proceso puede ser largo, provocando la actuación de protecciones de mínima tensión o de sobrecarga, tanto de los mismos motores como de transformadores y/o generadores.

Luego que un motor se desconecta de la red (ya sea por sus propias protecciones o por la actuación de los contactores), puede decidirse su reconexión mediante algún automatismo con una lógica tal que lo haga inmediatamente que se recupera la tensión o luego de algún tiempo permitiendo que se detenga totalmente. A este proceso se lo denomina **rearranque**.

En todo estos procesos transitorios es fundamental contar con los datos de la carga y su comportamiento eléctrico.

En este trabajo se presentan algunos datos de motores típicos recogidos de los fabricantes tanto para las plantas petroquímicas como para los AIB. En general es escasa este tipo de información.

Actualmente la tecnología permite contar con sistemas de protección que cuentan con registradores digitales que guardan información cada vez que se produce una falla (si es que se ajustan adecuadamente sus disparos), esta información procesada convenientemente permite identificar el funcionamiento real de la planta, mejorar los datos de los modelos y realizar correcciones tanto en los ajustes como en los criterios operativos para disponer de un servicio eléctrico más confiable.

En este trabajo también se muestran los resultados de registros obtenidos en una planta Petroquímica durante una falla del sistema de AT ante un *Pasaje a Isla*.

Un ítem importante no evaluado en este trabajo es la influencia de la capacidad de transformación en el tiempo de reaceleración de los motores. Este tiempo está directamente influenciado por la impedancia de cortocircuito del nodo donde se conectan. En nodos con potencia de motores superiores al 60% de la potencia nominal de transformación, la reaceleración suele ser inviable.

## 2.0 DATOS DINÁMICOS DE LOS MOTORES

### 2.1. Motores Típicos de las Plantas petroquímicas y/o Refinerías (Tipo A).

Los motores asíncronos de las plantas petroquímicas impulsan en su mayoría bombas centrifugas y compresores. Estos motores normalmente funcionan cargados entre un 90% a un 100% de su potencia nominal.

En las Tablas I y II se dan las características relevantes, y los parámetros eléctricos (resistencias e inductancia) de los modelos coincidentes con los datos característicos otorgados por fabricantes de algunos motores típicos.

Tabla I. Datos relevantes de los modelos de los motores de Planta.

$I_{arr}/I_n$	$T_{arr}/T_n$	$\cos\phi_{arr}$	$T_{max}/T_n$	$\cos\phi_n$	sn %	H	D
5 a 7	0.5	0.18	2.5	0.9	1 a 2	0.5 a 3	2

$I_{arr}/I_n$ : Corriente de arranque en por unidad

$T_{arr}/T_n$ : Cupla de arranque referida a la cupla nominal

$T_{max}/T_n$ : Cupla máxima referida a la cupla nominal

$\cos\phi_n$ : factor de potencia nominal

$\cos\phi_{arr}$ : factor de potencia en el arranque

sn% deslizamiento nominal en por ciento

H [seg.]: constante de inercia en por unidad de la potencia del motor

D: coeficiente de potenciación de la cupla resistente con la velocidad. D=2 significa una cupla que varía con la velocidad al cuadrado (una parábola)

Tabla II. Parámetros eléctricos de motor típico de Planta, representación simple jaula. [pu]

$R_a$	$L_a$	$L_m$	$R_1$	$L_1$	H
0.02	0.520	3.8	0.018	0.148	1.5

En la Figura 1 se muestran las curvas características del modelo de motor adoptado. En la misma se presenta tanto la variación del factor de potencia como la corriente y su cupla para diferentes velocidades.

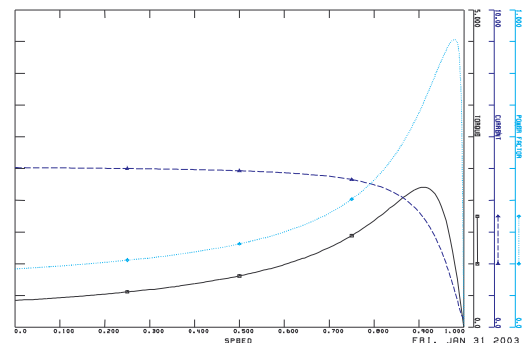


Figura 1. Curvas de Cupla, corriente, factor de potencia del modelo del motor tipo de Planta.

### 2.2. Motores de impulso de los AIB, para la extracción de Petróleo. (Tipo B)

Los motores que impulsan a los AIB son motores que tienen una carga irregular funcionan como una bomba de varillas, concentrando el mayor gasto de energía durante el tiempo de elevación del producto. Estos aparatos disponen de contrapesos (varillas) con el objeto de lograr una carga más uniforme. Esto indica que en promedio la carga de estos motores suele ser del orden del 65% al 75% de la carga máxima.

En las Tablas III y IV se dan las características relevantes, y los parámetros eléctricos (resistencias e inductancia) de los modelos coincidentes con los datos

característicos otorgados por fabricantes de algunos motores típicos.

Tabla III. Datos relevantes de los modelos de los motores AIB.

Iarr/In	Tarr/Tn	Cosfiarr	Tmax/Tn	cosfin	sn %	H	D
6	2.95	0.54	3.25	0.844	8	0.5	0.5

D: coeficiente de potenciación de la cupla resistente con la velocidad. D=0.5 significa una curva de cupla prácticamente constante en el rango de operación normal.

Tabla IV. Parámetros eléctricos de motor típico AIB, representación simple jaula. [pu]

Ra	La	Lm	R1	L1	H
0.007	0.07	2.22	0.088	0.07	0.5

En la Figura 2 se muestran las curvas características del modelo de motor adoptado. En la misma se presenta tanto la variación del factor de potencia como la corriente y su cupla para diferentes velocidades.

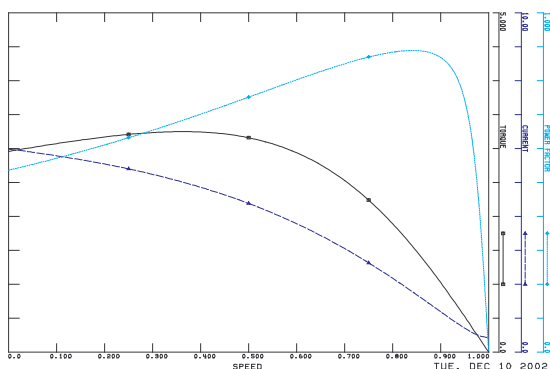


Figura 2. Curvas de Cupla, corriente, factor de potencia del modelo del motor tipo AIB.

### 3.0 MEDICIONES DE CORRIENTES Y TENSIONES ANTE UNA FALLA EN UNA PETROQUÍMICA.

Se dispone de mediciones obtenidas mediante registradores digitales de protección ubicados en una Petroquímica.

La Planta Petroquímica se alimenta desde la red pública mediante un transformador de 132/13.2 kV e internamente dispone de un generador conectado en 13.2 kV, de aproximadamente una potencia del orden de la mitad de su consumo. Ante fallas en la Red externa el generador pasa a isla junto con carga considerada prioritaria

La falla se origina en un cortocircuito monofásico externo, que dura alrededor de 340 ms. y luego se transforma en trifásico durante 200ms. El generador de la Planta se desconecta del sistema con la carga prioritaria aproximadamente a los 76 ms de comenzada la falla trifásica.

Se obtuvieron registros en las tres fases de la tensión de las barras de 13.2 kV (lado Generador y lado sistema) y de las corrientes del generador y de un

alimentador que ante la formación de la isla queda conectada del lado del sistema (Red Pública).

En los transitorios electrodinámicos, la secuencia directa es la que resulta importante para la definición de la cupla, ya que las cuplas de las otras secuencias resultan nulas en promedio, durante un período de la frecuencia fundamental de la red.

En la figura 3 se presenta el valor eficaz de la secuencia directa de la tensión en 13.2 kV de ambos lados, lado sistema y lado Generador de la Planta.

Se observa que se recupera rápidamente la tensión del lado del sistema, mientras que del lado del generador luego de aproximadamente un segundo que se forma la isla, la tensión se ubica en 0.60 pu. La reaceleración de los motores retrasa el crecimiento de la tensión del generador.

Los motores alimentados directamente de barras del Generador ante el pasaje a Isla están alimentados con tensiones bajas durante más de un segundo. Si los motores contasen con contactores de alterna sin fuente independiente, estos hubiesen abierto. En este caso particular, los contactores de la planta donde se realizaron las mediciones, funcionan con fuentes de continua, de alimentación independiente de la red

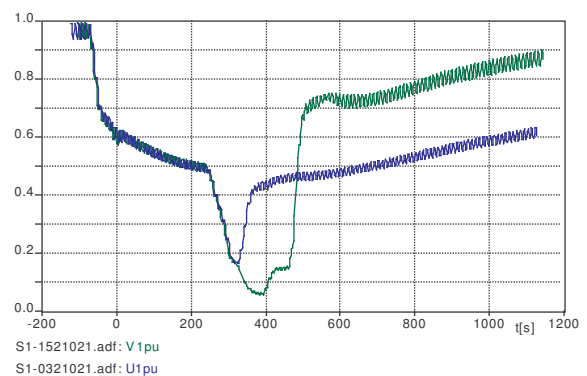


Figura 3. Tensión eficaz de secuencia directa en pu. barra 13.2 kV, del lado del Sistema externo y del lado del Generador de la Planta

La figura 4, muestra el valor eficaz de la corriente del generador de secuencia directa expresada en MVA.

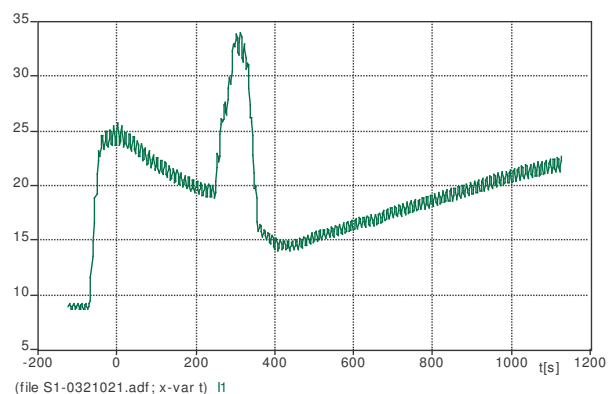


Figura 4. Corriente eficaz de secuencia positiva del Generador

Se observa que luego del pasaje a Isla (a partir de los 370 ms) la tensión y la corriente aumentan de modo tal que la relación entre la Corriente (figura 4) y la Tensión (figura 3),  $I1/U1$  es aproximadamente constante e igual a 4 veces el valor que tenía antes del transitorio. Esto muestra que la carga de motores que queda conectada al generador en el proceso de reaceleración absorbe una corriente del orden de 4 veces la nominal si la tensión fuese 1 pu., un poco menos que en un arranque directo, pero un valor significativo.

En la figura 5 se muestra la corriente de un alimentador de la planta con carga de motores de inducción que queda conectado a la red pública. Se observa que en alrededor de 0.7 segundos luego que se despeja la falla logra reacelerar. En este tiempo la tensión en 13,2 kV del lado del sistema supera 0.9 pu. La relación entre la corriente máxima de reaceleración y la tensión (entre 500 y 800 ms) se encuentran en alrededor de 3.5 veces la relación pre falla.

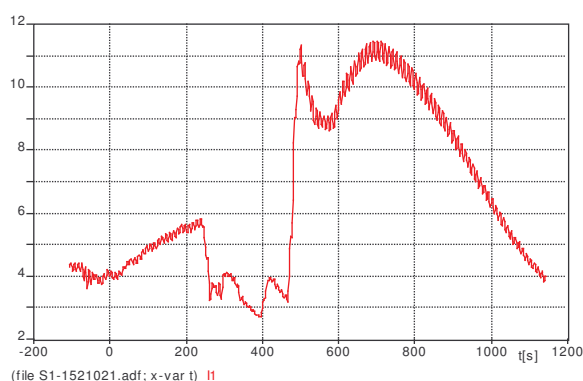


Figura 5. Corriente eficaz de secuencia directa expresada en MVA de un alimentador que queda conectado del lado del sistema.

#### 4.0 SIMULACIONES DINÁMICAS DE UN CASO EJEMPLO. SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.

Se realizan simulaciones dinámicas sobre un escenario tomado de referencia, se analizan casos con y sin formación de Isla, se evalúa el comportamiento del sistema.

Se analiza un sistema industrial hipotético constituido por una red eléctrica mostrada en la figura 6. Esta planta se conecta al resto del sistema de transmisión mediante un transformador de 132/13.2 kV de 45 MVA. La red consta de un generador de 15 MVA conectado directamente a la barra de 13.2 kV y tres alimentadores que a través de transformadores a 6.6 kV, a 2.3 kV y a BT llegan a centros de motores de inducción.

Se toma un escenario de referencia considerando el mismo estado previo de carga y generación, se adopta una falla de referencia consistente en un cortocircuito trifásico en la red de 132 kV de 200 ms. de duración, se simula la falla con y sin formación de Isla con tres modelos de carga:

- Con el motor típico de las refinerías o Petroquímicas. (Tipo A)
- Con el motor típico de las extracciones de Petróleo (Tipo B)
- Con la carga representada en la planta como de corriente e impedancia constante,  $P=80\%$  corriente constante, y 20 % de impedancia constante, y la potencia reactiva  $Q= 50\%$  de Corriente constante y 50% de impedancia constante. Esta representación es la que se usa habitualmente para realizar estudios de transitorios electromecánicos de grandes sistemas de potencia en Argentina (pej. el SADI). (Tipo C)

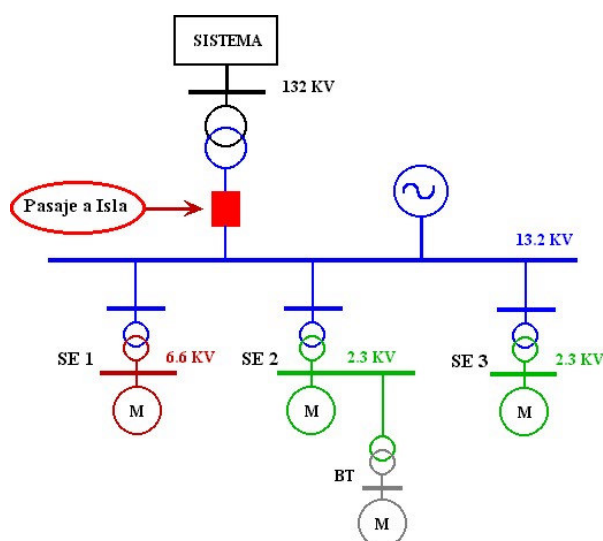


Figura 6: Esquema unifilar del sistema analizado.

#### 4.1. Caso sin formación de Isla., RAT Bus Fed.

Se simula la falla en el sistema de AT como fue descrita, se despeja a los 200ms, no desconecta la planta del sistema. En la figura 7 se observa la tensión en la barra del generador de la planta, en la figura 7b se observa la corriente del generador, en la figura 7c la corriente de un alimentador que va a un centro de motores en 6.6 kV y la figura 7d la desviación de velocidad del generador respecto a 50 Hz, en cada figura se representan los tres casos de representación de las cargas.

La tensión y la frecuencia quedan fijadas por el sistema externo, por lo tanto la corriente del generador no se ve afectada por el tipo de representación de la carga de la planta. La corriente que representa un centro de motores tiene un comportamiento diferente en cada caso. En el caso de la representación con motores de inducción, la corriente luego de la falla tiene un valor muy superior al valor de prefalla, debido al fenómeno de reaceleración de los máquinas, mientras que en la representación como impedancia y corriente no se observa este fenómeno. En el caso de los motores Tipo A la reaceleración tiene una sobrecorriente algo mayor que en el caso de los motores Tipo B.

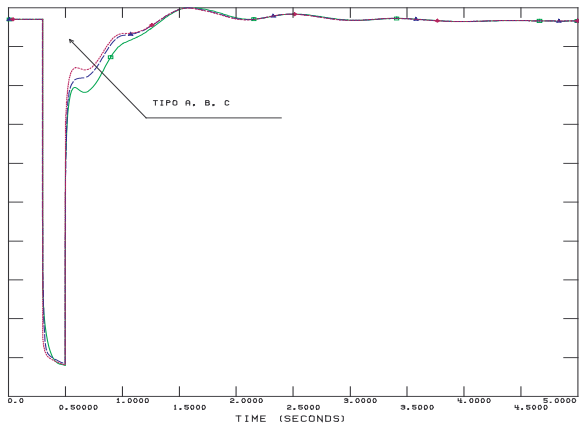


Figura 7a. Caso 1. Tensión barra 13.2 kV. Caso con motor Tipo A, B, y carga C. Escala [0.0, +1.0 pu.]

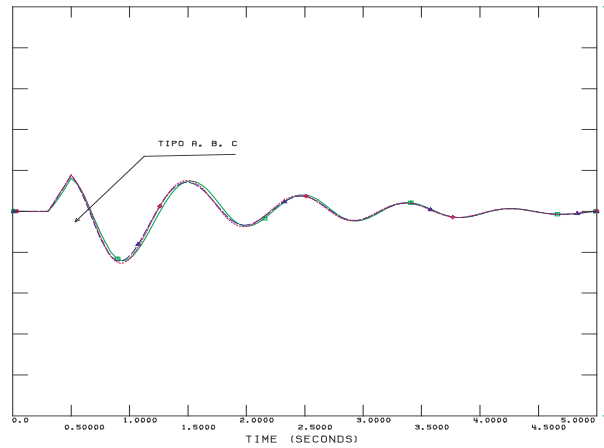


Figura 7 d. Caso 1. Desviaciones Velocidad del Generador Caso con motor Tipo A, B, y carga C. Escala [-2.0, +2.0 Hz]

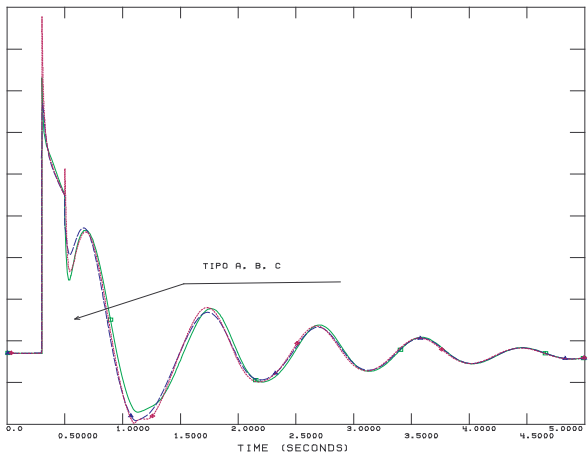


Figura 7 b. Caso 1. Corriente en pu. del Generador Caso con motor Tipo A, B, y carga C. Escala [0.0,+3.0 0.0 pu.]

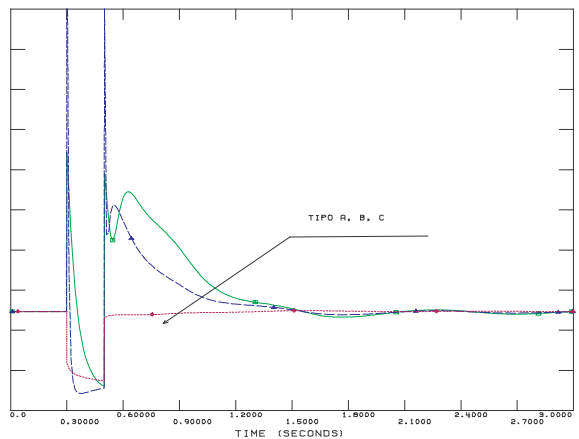


Figura 7c. Caso 1. Corriente del alimentador a un centro de motores Caso con motor Tipo A, B, y carga C. Escala [0.0, 15.0 MVA]

**4.2. Caso con formación de Isla. RAT Bus Fed.**

En este caso se simula que a los 200 ms. desde el inicio de la falla se forma la isla . El generador queda con toda la carga de la planta, la tensión no puede recuperarse, al cabo de 1 segundo se desconecta carga quedando una carga prioritaria de 3.2 MW (SE1). Se simula la respuesta para las tres representaciones de carga. Se considera en este caso que el regulador de tensión es del tipo "BUS FED", toma tensión desde bornes para alimentar la excitación. La tensión de campo queda limitada por la tensión en bornes, produciéndose una realimentación que no permite la recuperación de la tensión en tiempos breves.

Se observa en la figura 8a como la tensión se recupera inmediatamente del alivio de carga (1.5 seg.) si la carga es del Tipo C (I, Z); se recupera al cabo de 3 segundos de haber pasado a Isla, si la representación de la carga es del Tipo A y al cabo de 5 segundos si la representación es del Tipo B (AIB). Las corrientes de reaceleración de los motores duran más tiempo y son de mayor valor en el caso de la representación de la carga Tipo B. Con la representación C no existe sobrecorriente durante todo el transitorio.

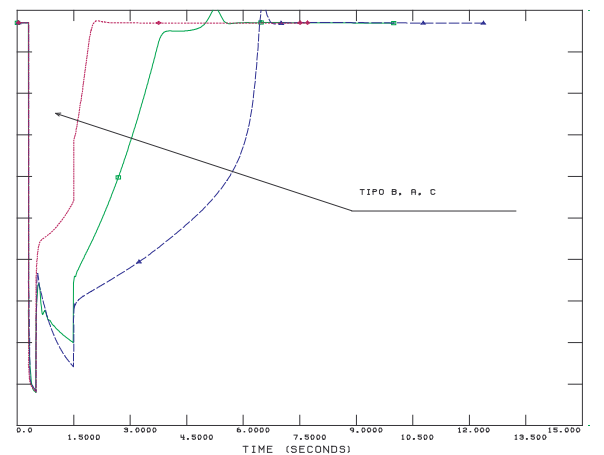


Figura 8a. Caso 2. Tensión barra 13.2 kV. Caso con motor Tipo A, B, y carga C. Escala [0.0,+1.0 pu.]

La señal de alivio de carga no puede ser la señal de frecuencia pues la frecuencia sube (figura 8d) luego de formar la isla debido al transitorio de tensión, la tensión es tan baja que la potencia consumida por los motores es menor a la despachada en el generador.

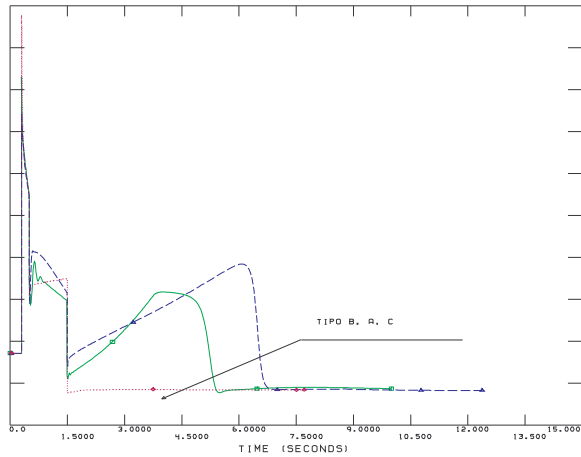


Figura 8b. Caso 2. Corriente en pu. del Generador Caso con motor Tipo A, B, y carga C. Escala [0.0 , 3.0 pu.]

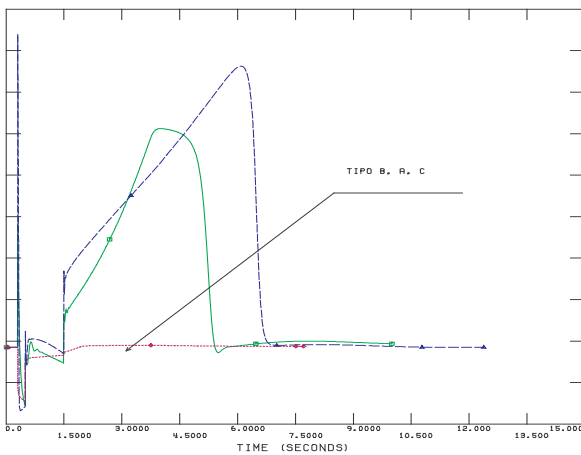


Figura 8c. Caso 2. Corriente en MVA. del alimentador a un centro de motores Caso con motor Tipo A, B, y carga C. Escala [0.0, 20 MVA]

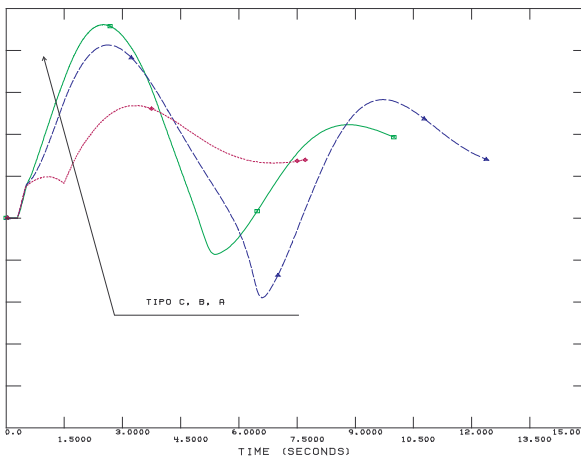


Figura 8 d. Caso 2. Desviaciones Velocidad del Generador Caso con motor Tipo A, B, y carga C. Escala [-2.5, +2.5 Hz]

4.3. Caso con formación de Isla. RAT Solid Fed.

En este caso se simula que a los 200 ms. desde el inicio de la falla se forma la isla . El generador queda con toda la carga de la planta, la tensión no puede recuperarse, al cabo de 1 segundo se desconecta carga quedando una carga prioritaria de 3.2 MW (SE1). El deslastre se realiza por acción de un relé de subtensión, en el caso de la representación Tipo A y B. En el caso de la representación de la carga Tipo C no se produce el deslastre de carga por subtensión pues esta logra recuperarse. Se considera en este caso que el regulador de tensión es del tipo "SOLID FED", toma tensión independiente para alimentar la excitación. La tensión de campo no queda limitada por la tensión en bornes, produciéndose una recuperación de la tensión terminal en tiempos notablemente más breves que en el Caso 2.

Se observa en la figura 9a que la tensión se recupera inmediatamente de pasar a Isla si la carga es del Tipo C. Sin embargo, si la carga se representa por motores tanto del Tipo A como Tipo B la tensión no logra recuperarse al pasar a Isla y al cabo de 1 segundo deben actuar los relé de cortes de carga por subtensión.

En este caso una vez que el generador queda con menos carga, la tensión se recupera inmediatamente con ambas representaciones de la carga. Luego que se recupera la tensión, la sobrecorriente de reaceleración de los motores se sostiene más tiempo en el caso de la representación con los motores Tipo A.

Si se considera la representación de la carga del Tipo C (I, Z) no sería necesario un alivio de carga por subtensión. Se debería prever un deslastre de carga por subfrecuencia (figura 9d).

Si la carga de una planta industrial está constituida por motores de inducción, considerar un modelo dinámico de la carga como de corriente e impedancia constante , puede llevar a un diseño errado de los sistemas de protección y control requeridos para un Paso a Isla.

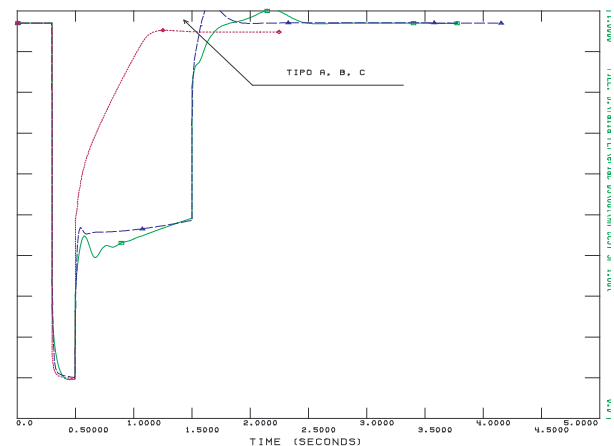


Figura 9a. Caso 3. Tensión barra 13.2 kV. Caso con motor Tipo A, B, y carga C. Escala [0.0, 1.0 pu.]

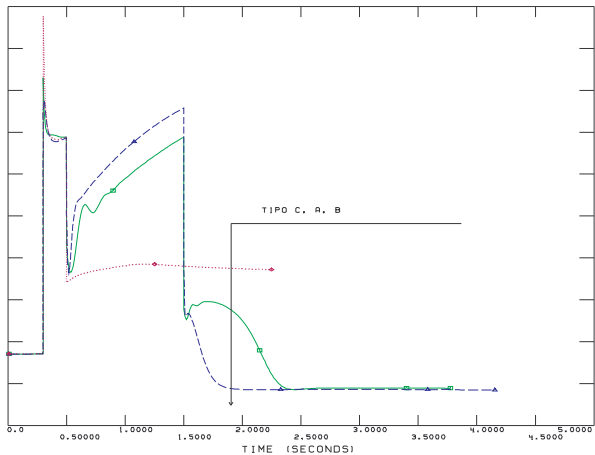


Figura 9 b. Caso 3. Corriente en pu. del Generador Caso con motor Tipo A, B, y carga C. Escala [0.0, 3.0 pu.]

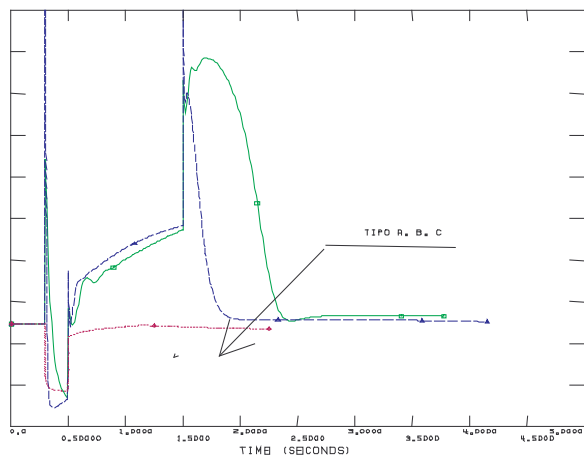


Figura 9c. Caso 3. Corriente en MVA. del alimentador a un centro de motores Caso con motor Tipo A, B, y carga C. Escala [0.0, 15.0 MVA]

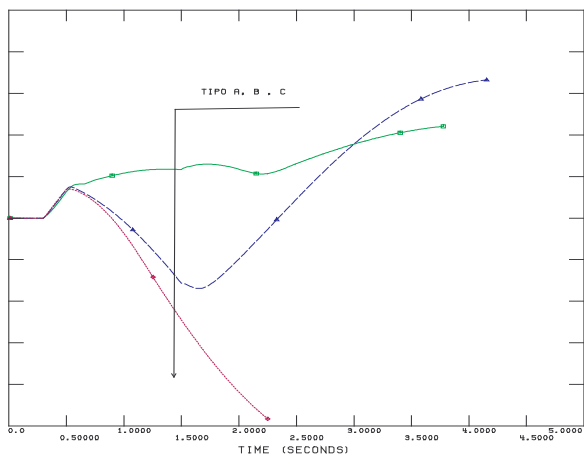


Figura 9 d. Caso 3. Desviaciones Velocidad del Generador Caso con motor Tipo A, B, y carga C. Escala [-2.5, +2.5 Hz]

## 5.0 CONCLUSIONES

El comportamiento dinámico de los motores de inducción es diferente de acuerdo al tipo de carga que deben accionar, y a su diseño específico para los distintos usos.

La representación de la carga es determinante en los casos de colapso de tensión y juegan un rol determinante si se quiere analizar la capacidad de un sistema en un *Paso a Isla*.

Los registros obtenidos de mediciones durante un paso a Isla en una planta Industrial del tipo Petroquímica permite visualizar la forma de la corriente en los motores que reacceleran, la cual se asemeja a la de la representación Tipo A. Se observa como luego de *Pasar a Isla* el Generador de la planta tarda en recuperar su tensión mucho más que el resto del Sistema. Al cabo de un segundo se ubica alrededor de 0.60 pu. Esta situación es determinante en las instalaciones que cuentan, en las conexiones de los motores, con *contactores de alterna* sin fuentes independientes de alimentación, ya que estos abren en su mayoría para tensiones inferiores a 0.7 pu.

La representación simple de la carga con parte de impedancia y parte de corriente constante para la potencia activa y reactiva, es inapropiada en los estudios de Paso a Isla de un sector de un sistema. Este tipo de representación no pone de manifiesto el fenómeno de reacceleración de los motores que interviene directamente en la velocidad de recuperación de la tensión y en la posibilidad de colapso.

En los casos de *Paso a Isla* de sistemas industriales, la señal de alivio de carga por subfrecuencia es inapropiada para evitar el colapso de tensión.

Los tiempos de recuperación de la tensión son fuertemente dependientes de la representación de la carga y del Tipo de motor.

## 6.0 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- *J. Aguero, M Beroqui, B. Barbieri.* Formación de Islas eléctricas conformadas por un generador, parte de una distribuidora eléctrica y plantas industriales. IX ERLAC Foz de Iguazú, Mayo 2001.
- *Juan Gomez, Medhat M. Moroco, Claudio Reineri, Gabriel Campetelli.* Behaviour of Induction Motor Due to Voltage Sags and Short Interruptions. IEEE Transaction on Power Delivery Vol. 17, N°2, April 2003.
- *Gursharan Sing Grewal, Stephen Pocsai, Maklouf M. Hakim.* Transient Motor Reacceleration Study in an Integrated Petrochemical Facility. IEEE Transactions on Industry Applications Vol 35. N° 4. July/August 1999.
- *M. Bollen.* The influence of Motor Reacceleration on Voltage Sags. IEEE Transactions on Industry Applications Vol 31. N° 4. July/August 1995.
- *Thomas S. Key.* Predicting Behaviour of Induction Motors During Service Faults and Interruptions. IEEE Industry Applications Magazine. Jan/Feb 1995.
- *Maurice Kenth, Wayne R. Schmus, F. McCrackin, Luther Wheeler.* Dynamic Modelling of Loads in Stability Studies. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. Vol 8, PASS-88 N°5, May 1969.