



*E. T. S. I. Industriales
Depto. de Ingeniería Eléctrica*



Modelos Dinámicos Para el Análisis de Estabilidad de Tensión

Profesor :

Dr. Angel Pérez C.

Alumnos :

Rosa Maria de Castro

Heracio Nelson Diaz

Madrid - Julio 2001

ÍNDICE

1.-	INTRODUCCIÓN	1
2.-	MODELOS DINAMICOS.....	2
2.1.-	Motor de Inducción.....	2
2.2.-	Transformador con cambio automático de tomas.....	2
2.3.-	Carga Termostática	4
2.4.-	Generador Síncrono con control de excitación.....	6
3.-	EJEMPLOS DE APLICACIÓN	9
3.1.-	Caso A.....	13
3.2.-	Caso B.....	17
3.3.-	Caso C	25
	BIBLIOGRAFÍA.....	33
	ANEXOS.....	34
	Anexo I :	
	Programas en Matlab	
	Anexo II:	
	Calovic, Milan, “Modeling and Análisis of Under-Load Tap-Changing Transformer Control Systems”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 7, July 1984.	
	Anexo III:	
	P. Anderson, “Power System Stability”.	

1.- INTRODUCCIÓN

En este trabajo se describen y desarrollan los modelos dinámicos necesarios para realizar análisis de estabilidad de tensión desde el punto de vista del largo plazo.

Los dispositivos que se analizan son:

- Transformador con cambio automáticos de tomas (LTC).
- Carga Termostática.
- Generador Síncrono con control de sobreexcitación.

Para cada uno de los cuales se desarrolla un modelo en Simulink que es verificado con un ejemplo sencillo.

2.- MODELOS DINÁMICOS

En este capítulo se presentarán los modelos dinámicos desarrollados en Simulink para los siguientes elementos:

- Motor de Inducción.
- Transformador con cambio automáticos de tomas (LTC).
- Carga Termostática.
- Generador Síncrono con control de sobreexcitación.

2.1.- Motor de Inducción

Este modelo fue desarrollado completamente en la referencia [1].

2.2.- Transformador con cambio automático de tomas

El modelo del transformador con cambio automático de tomas que se ha implementado en Simulink corresponde al desarrollado en la referencia [2], que se incluye en el anexo II . El Diagrama de Simulink se muestra en la Fig. 1.

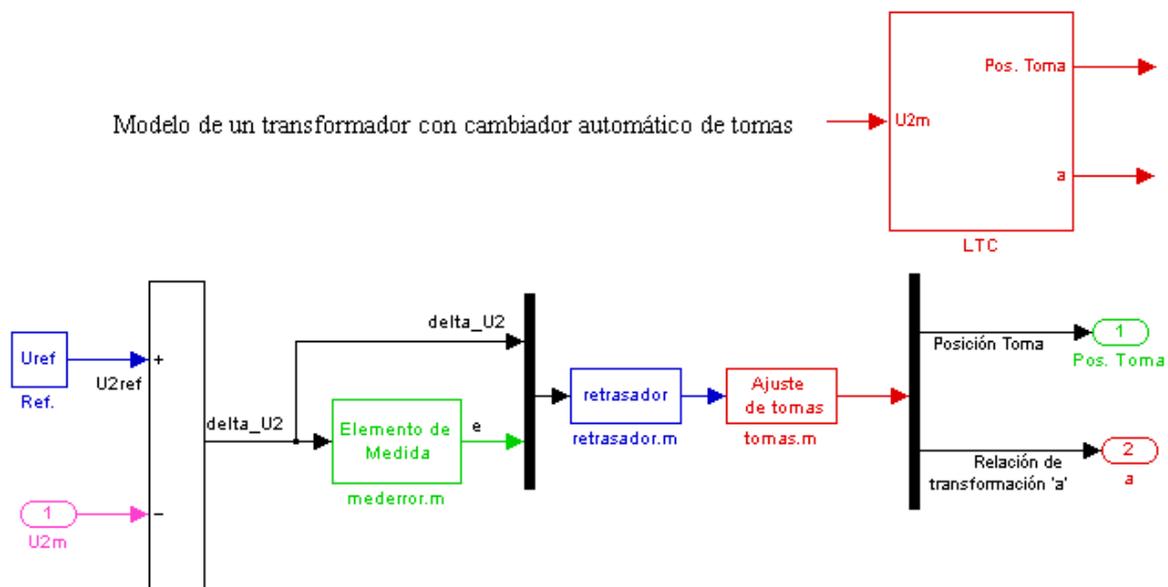


Fig. 1.- Diagrama de bloques en Simulink del LTC.

El bloque que representa al LTC tiene las siguientes entradas, salidas y parámetros:

Entradas:

U_{2m} : Módulo de la tensión a controlar incluyendo “line drop”.

Salidas :

Pos. Toma : Posición instantánea de la toma del transformador.

a : Relación de transformación instantánea.

Parámetros :

Los parámetros de este bloque se ingresan a través de un menú desplegable realizado en Simulink, tal como se muestra en la Fig. 2.

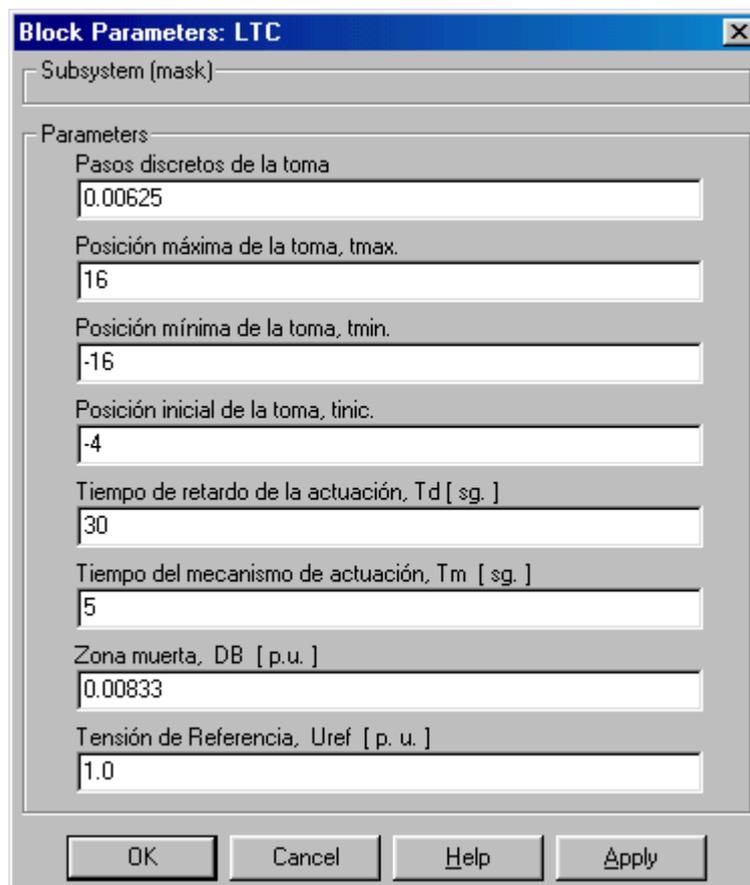


Fig. 2.- Definición de Parámetros del LTC.

Los bloques más importantes de este modelo son :

Bloque Elemento de Medida :

Este bloque tiene la función de detectar la diferencia entre la tensión de referencia (U_{ref}) y la tensión del nudo a controlar (U_{2m}). Básicamente esta función es un relé con zona muerta ajustable (DB), es decir cuando detecta una variación de tensión superior al valor de la zona muerta definida origina un pulso de actuación. Este bloque se ha implementado en Simulink haciendo uso de una S-function llamada *mederror.m* que se detalla en el anexo I.

Bloque retrasador :

Este bloque tiene la función de introducir un retardo en la orden de actuación del motor que controla el mecanismo de movimiento de las tomas para evitar cambios innecesarios de las tomas debido a variaciones momentáneas de la tensión, ya que solamente entregará un pulso de salida si la variación de tensión detectada (entrada a este bloque) se mantiene por un tiempo superior al tiempo de retardo. Este bloque se ha implementado en Simulink haciendo uso de una S-function llamada *retrasador.m* que se detalla en el anexo I.

Este retardo es una función de la diferencia de tensión detectada, así como del valor de la zona muerta y se ha expresado como:

$$\text{Tiempo de retardo} = \frac{Td}{|\Delta U / DB|} \quad \text{donde: } Td \text{ es la constante del tiempo de retardo.}$$

Bloque ajuste de tomas :

Este bloque representa al motor y los mecanismos que producen el cambio de la toma desde una posición a otra, se considera un tiempo de retardo del motor T_m desde el momento en que llega la orden de actuación a este bloque.

2.3.- Carga Termostática

El análisis dinámico de una carga termostática responde a un modelo de potencia activa constante y por lo tanto lo que varía en el tiempo es el valor de la conductancia, de manera que contrarreste el efecto de la variación de la tensión del nudo donde está conectada esta carga.

Matemáticamente el modelo de una carga termostática es el siguiente:

$$\text{Situación inicial :} \quad P_{ter} = G_0 \cdot U_0^2$$

$$\text{Otra situación :} \quad P'_{ter} = G \cdot U^2$$

Como en todo instante se cumple que $P_{ter} = P'_{ter}$

$$\text{Entonces : } G_0 \cdot U_0^2 = G \cdot U^2 \quad ; \quad G_0 \cdot \left(\frac{U_0}{U} \right)^2 - G = 0$$

Por lo tanto el nuevo valor de la conductancia G para cada instante de tiempo debe cumplir la ecuación anterior. Además, el modelo incluye un retardo en la actuación T_{ter} y un valor máximo para el valor de la conductancia $KI G_0$.

Esto se ha realizado en Simulink como se muestra en la Fig. 3, donde el integrador ha sido inicializado con un valor G_0 .

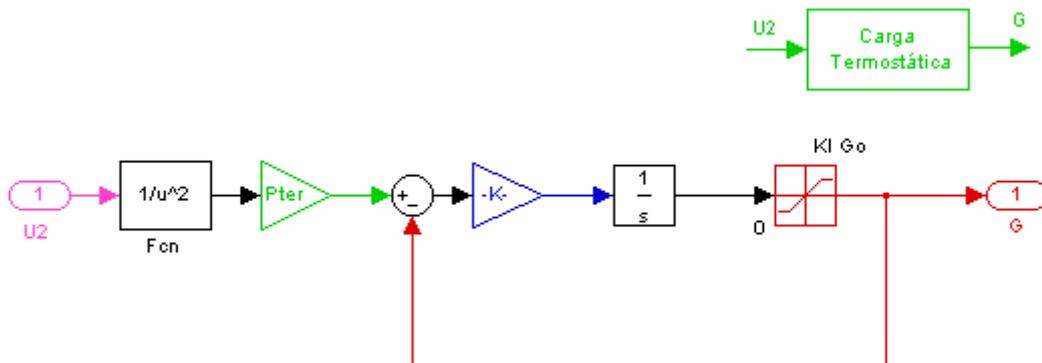


Fig. 3.- Diagrama de bloques en Simulink de la carga termostática.

El bloque que representa la carga termostática tiene las siguientes entradas, salidas y parámetros:

Entradas:

U_2 : Módulo de la tensión del nudo donde se conecta la carga termostática.

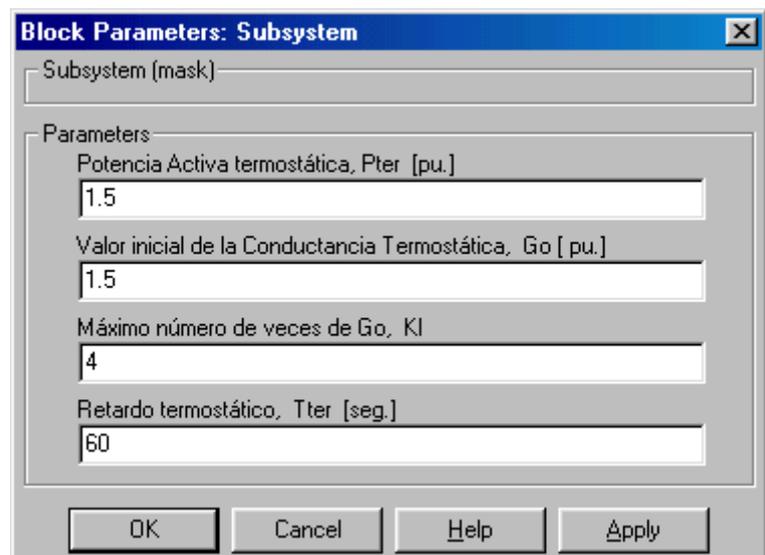
Salidas :

G : Conductancia de la carga termostática.

Parámetros :

Los parámetros de este bloque se ingresan a través de un menú desplegable realizado en Simulink, tal como se muestra en la Fig. 4.

Fig. 4.- Definición de parámetros de la carga termostática.



2.4.- Generador Síncrono con control de excitación

El modelo dinámico del generador síncrono desarrollada a partir de [1] incluye el control de sobreexcitación y el diagrama de bloques en Simulink se muestra en la Fig. 5, el cual tiene las siguientes entradas, salidas y parámetros:

Entradas :

U_{3real} : Parte real de la tensión en el nudo del generador (p.u.).

U_{3imag} : Parte imaginaria de la tensión en el nudo del generador (p.u.).

Salidas :

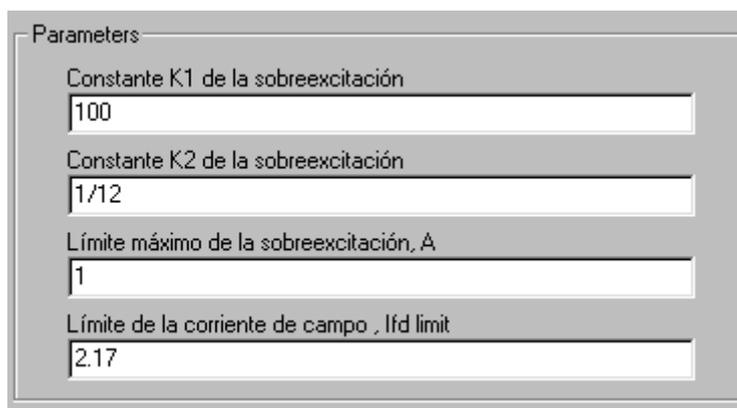
I_{3real} : Parte real de la intensidad inyectada por el generador (p.u.).

I_{3imag} : Parte imaginaria de la intensidad inyectada por el generador (p.u.).

$\Delta \omega_r$: Variación de la velocidad del rotor del generador síncrono (p.u.).

Parámetros:

Los parámetros de este bloque son los mismos que los del modelo presentado en [1], salvo que aparecen nuevos parámetros debido al control de la excitación que se muestran en la Fig. 5.



Parameters	
Constante K1 de la sobreexcitación	100
Constante K2 de la sobreexcitación	1/12
Límite máximo de la sobreexcitación, A	1
Límite de la corriente de campo , Ifd limit	2.17

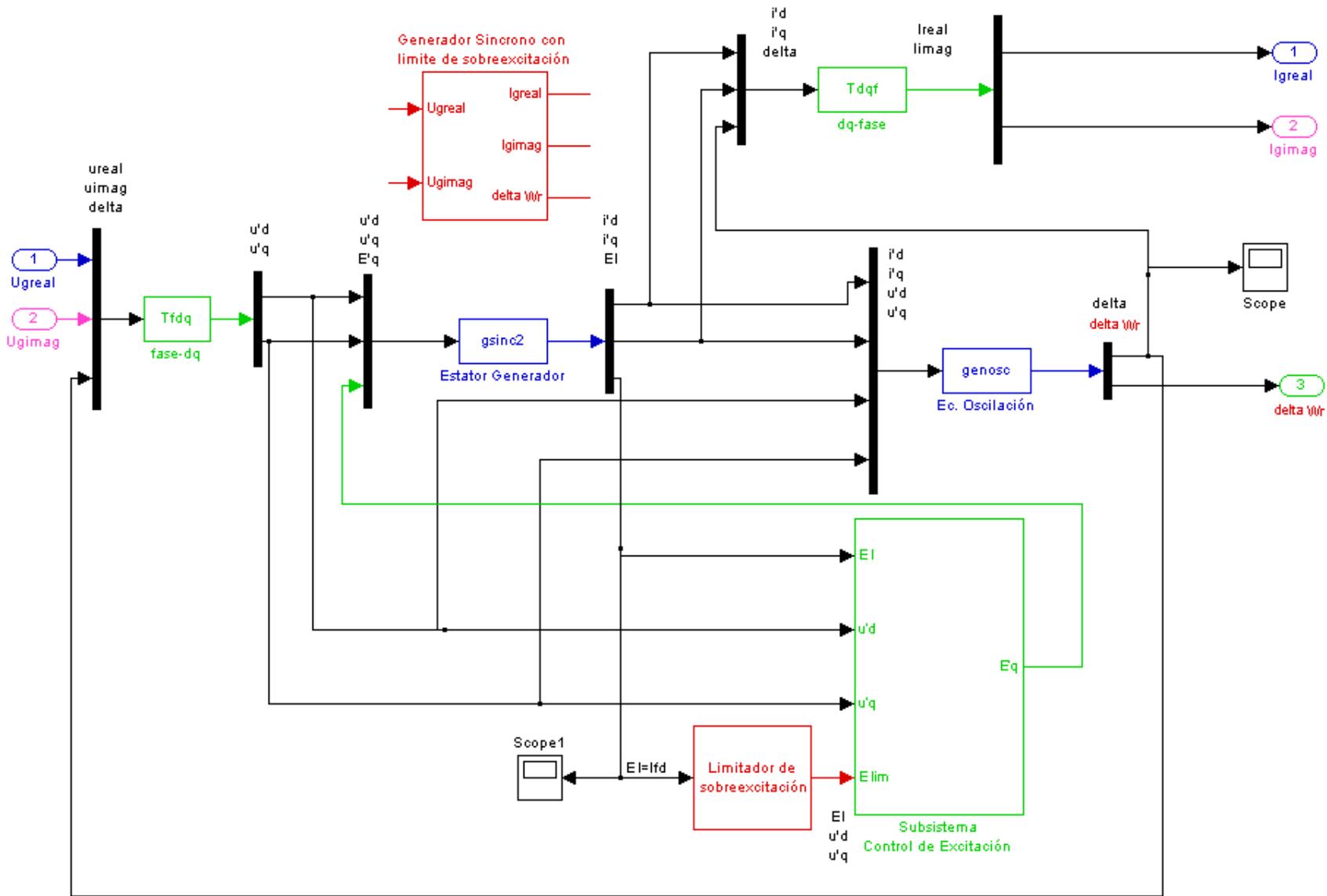


Fig. 5.- Definición de parámetros del control de excitación.

En la Fig. 6 el único bloque diferente al analizado en [1] corresponde al bloque limitador de sobreexcitación que se muestra en la Fig. 7.

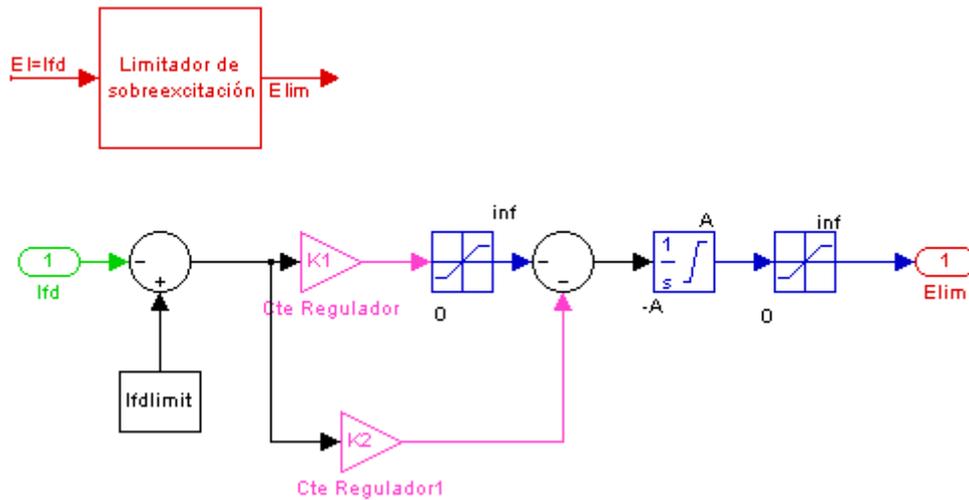


Fig. 6.- Diagrama de bloques en Simulink del limitador de sobreexcitación.

Entradas :

I_{fd} : Intensidad de excitación.

Salidas :

Elim. : Tensión de salida del limitador

Los parámetros del bloque limitador de sobreexcitación se muestran en la Fig. 8.

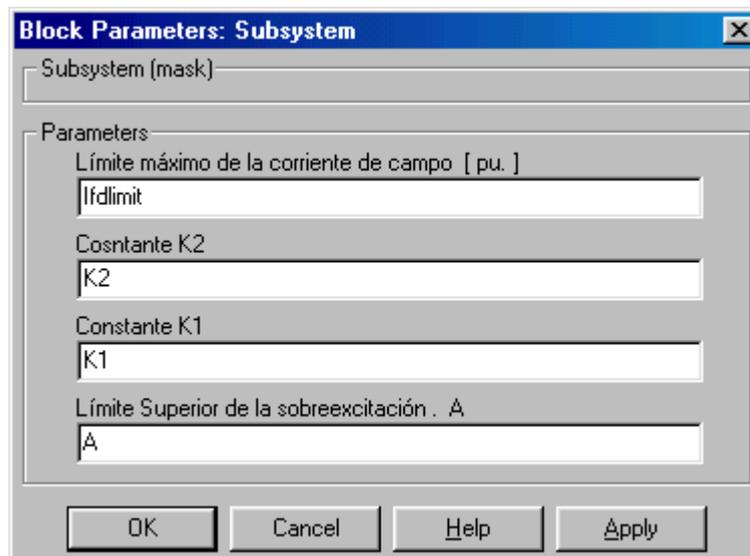


Fig. 7.- Parámetros del bloque limitador de sobreexcitación.

Donde $K1 \gg K2$, para mayor información ver el anexo III, que es parte de la referencia [3].

3.- EJEMPLOS DE APLICACIÓN

En este capítulo se presentan ejemplos simples de aplicación de los modelos presentados. Para ello se considera el sistema de la Fig. 9, que corresponde al ejemplo presentado en [4].

Los supuestos y simplificaciones que se han considerado para el análisis son :

- a) Los elementos de este sistema que se representarán con un modelo dinámico son los siguientes :
 - Motor de inducción del nudo Ind-13.8 (Carga Industrial).
 - Transformador LTC3.
 - Carga termostática del nudo Res-13.8 (Carga Residencial/Comercial).
 - Generador Ge3.
- b) Se considera que la tensión en el nudo Gen3-500 en régimen permanente es el valor de un generador de potencia infinita que se conectará en este nudo.
- c) Se analiza de forma independiente cada rama conectada al nudo Gen3-500.
Analizándose los siguientes casos :

Caso A :

Motor de inducción del nudo Ind-13.8 conectado al nudo Gen3-500 a través del transformador LTC1, que se considera con toma constante.

Caso B :

Carga residencial/comercial del nudo Res-13.8 considerada la mitad como carga termostática conectada al nudo Gen3-500 a través del transformador LTC3 con control automático de tomas, la línea de subtransmisión y el transformador LTC2, que se considera con toma constante.

Caso C :

Generador Ge3 conectado al nudo Gen3-500 a través del transformador T6, que se considera con toma constante.

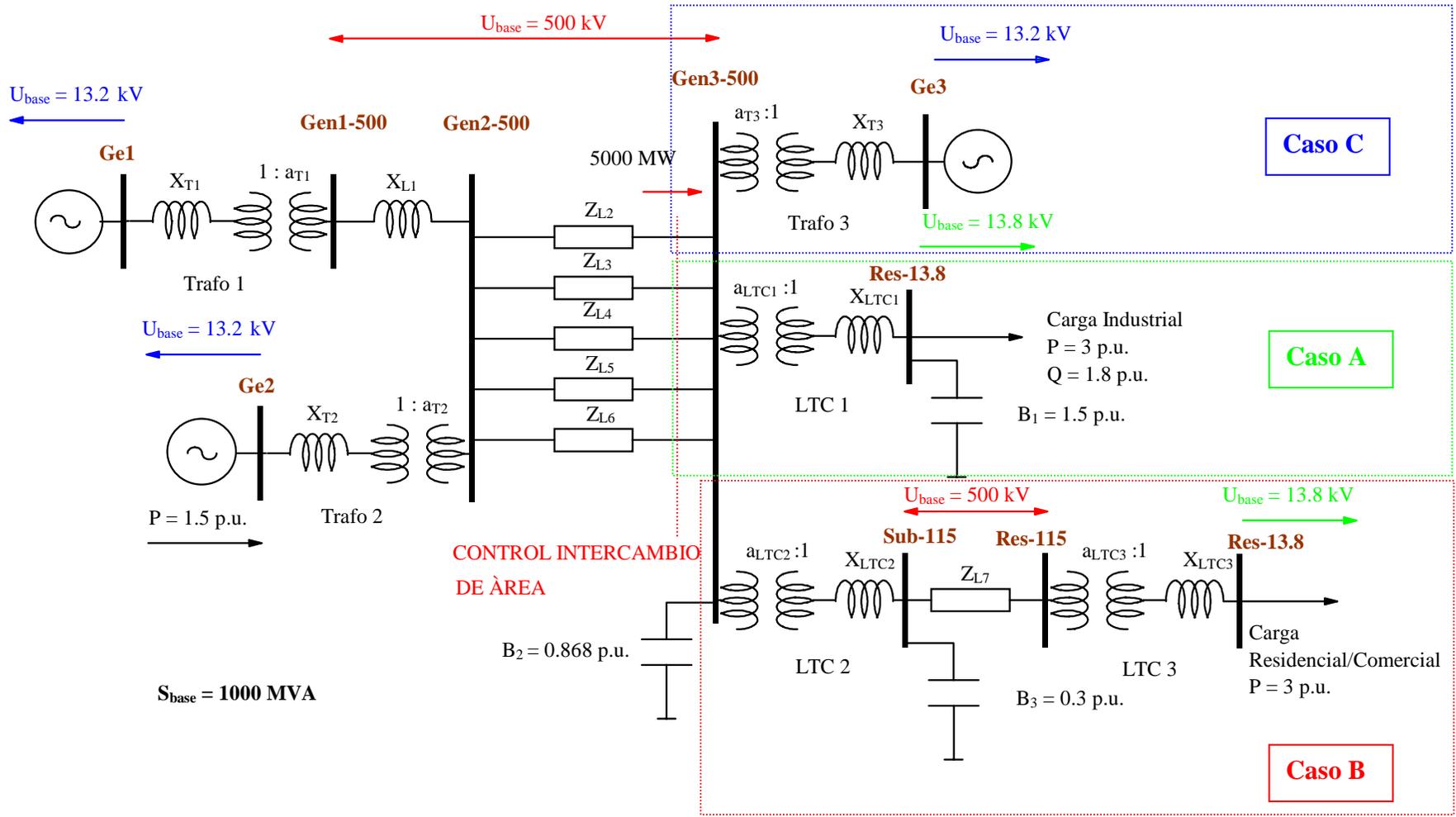


Fig. 9.- Modelo de la red en por unidad.

Con el objeto de calcular la tensión en régimen permanente del nudo Gen3-500 se realiza un estudio de flujo de cargas, considerando que las tensiones en las cargas deben ser 1.0 p.u. Este análisis es similar al realizado en [4], salvo que ahora no se considera que las tomas del transformador LTC3 son continuas, puesto que en el análisis dinámico se considerará este elemento, así con una toma de este transformador de -4 y una relación de transformación de LTC2 igual a 1.0563 se logra el objetivo propuesto.

Los datos y resultados del flujo de carga se muestran en las tablas siguientes:

Datos de los nudos :

nombre	tipo	Umod	Uarg	Pgen	Bcomp	Pcarga	Gcarga	Qcarga	Bcarga	Qgen	Q/Umax	Q/Umin
Ge1-13.2	Ua	1.0245	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ge2-13.2	PU	1.0078	0.0000	1.5000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.7250	-0.2000
Ge3-13.2	PU	1.0165	0.0000	1.0940	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.7000	-0.2000
Gen1-500	PQ	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Gen2-500	PQ	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Gen3-500	PQ	1.0000	0.0000	0.0000	0.8680	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ind-13.8	PQ	1.0000	0.0000	0.0000	1.5000	3.0000	0.0000	0.9000	0.9000	0.0000	0.0000	0.0000
Subt-115	PQ	1.0000	0.0000	0.0000	0.3000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Res-115	PQ	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Res-13.8	PQ	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.5000	1.5000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Datos de las líneas :

nombre	nudo 1	nudo 2	R	X	G	B	R0	X0	G0	B0
Linea1	Gen1-500	Gen2-500	0.0000	0.0400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Linea2	Gen2-500	Gen3-500	0.0150	0.2880	0.0000	0.2346	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Linea3	Gen2-500	Gen3-500	0.0150	0.2880	0.0000	0.2346	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Linea4	Gen2-500	Gen3-500	0.0150	0.2880	0.0000	0.2346	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Linea5	Gen2-500	Gen3-500	0.0150	0.2880	0.0000	0.2346	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Linea6	Gen2-500	Gen3-500	0.0150	0.2880	0.0000	0.2346	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Linea7	Subt-500	Res-110	0.0100	0.0333	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Datos de los transformadores :

nombre	primario	secundario	Rcc	Xcc	G0	B0	rt	Rpt	Xpt	Rps	Xps
Trafo1	Gen1-500	Ge1-13.2	0.0000	0.0200	0.0000	0.0000	1.0800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Trafo2	Gen2-500	Ge2-13.2	0.0000	0.0450	0.0000	0.0000	1.0800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Trafo3	Gen3-500	Ge3-13.2	0.0000	0.0625	0.0000	0.0000	1.0600	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Trafo4	Gen3-500	Ind-13.8	0.0000	0.0300	0.0000	0.0000	1.0650	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Trafo5	Gen3-500	Subt-115	0.0000	0.0300	0.0000	0.0000	1.0563	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Trafo6	Res-115	Res-13.8	0.0000	0.0100	0.0000	0.0000	0.9750	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Resultados del flujo de carga:

Nudo	Limite	Tensión	ángulo(°)	Pgen	Qgen	Pcarga	Qcarga	Qcomp
Ge1-13.2	1.0245	0.0000	3.5662	0.6306	0.0000	0.0000	0.0000
Ge2-13.2	1.0078	-6.9899	1.5000	0.0243	0.0000	0.0000	0.0000
Ge3-13.2	1.0165	-21.2939	1.0940	0.0165	0.0000	0.0000	0.0000
Gen1-500	1.0957	-3.9346	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Gen2-500	1.0897	-10.7963	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Gen3-500	1.0788	-25.0836	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0101
Ind-13.8	1.0000	-30.1810	0.0000	0.0000	3.0000	1.8000	1.4999
Subt-115	1.0143	-30.2253	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3086
Res-115	0.9754	-35.9680	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Res-13.8	1.0000	-37.6865	0.0000	0.0000	2.9999	0.0000	0.0000

Flujo de potencias por las líneas :

Línea	Nudo-A	Nudo-B	P(A->B)	Q(A->B)	P(B->A)	Q(B->A)
Linea1	Gen1-500	Gen2-500	3.5662	0.3807	-3.5662	0.0478
Linea2	Gen2-500	Gen3-500	1.0132	-0.0246	-1.0001	0.0011
Linea3	Gen2-500	Gen3-500	1.0132	-0.0246	-1.0001	0.0011
Linea4	Gen2-500	Gen3-500	1.0132	-0.0246	-1.0001	0.0011
Linea5	Gen2-500	Gen3-500	1.0132	-0.0246	-1.0001	0.0011
Linea6	Gen2-500	Gen3-500	1.0132	-0.0246	-1.0001	0.0011
Linea7	Subt-115	Res-115	3.0945	0.4053	-2.9999	-0.0900

Flujo de potencias por los transformadores :

Trafo	Primario	Secundario	P(Prim.)	Q(Prim.)	P(Secun.)	Q(Secun.)
Trafo1	Gen1-500	Ge1-13.2	-3.5662	-0.3807	3.5662	0.6306
Trafo2	Gen2-500	Ge2-13.2	-1.5000	0.0754	1.5000	0.0243
Trafo3	Gen3-500	Ge3-13.2	-1.0940	0.0559	1.0940	0.0165
Trafo4	Gen3-500	Ind-13.8	3.0000	0.5727	-3.0000	-0.3000
Trafo5	Gen3-500	Subt-115	3.0945	0.3761	-3.0945	-0.0966
Trafo6	Res-115	Res-13.8	2.9999	0.0900	-2.9999	0.0000

De estos resultados se observa que la tensión en las cargas es 1.0 p.u. tal como se deseaba y para los efectos del estudio dinámico se considerará como referencia la tensión del nudo Ind-13.8, por lo tanto las tensiones relevantes para este estudio se muestran en la tabla siguiente:

Resultados de interés para el estudio dinámico:

NUDO	Módulo de Tensión [p.u.]	Ángulo de la Tensión [°]
Gen3-500	1.0788	5.0972
Ge3-13.2	1.0165	8.8847
Ind-13.8	1.0	0
Res-13.8	1.0	-7.5054

3.1.- Caso A

En este caso se desea analizar el comportamiento dinámico del motor de inducción del nudo Ind-13.8 conectado al nudo Gen3-500 a través del transformador LTC1, que se considera con toma constante. Para estos efectos se ha desarrollado un programa en Simulink cuyo diagrama en bloques se muestra en la Fig. 10.

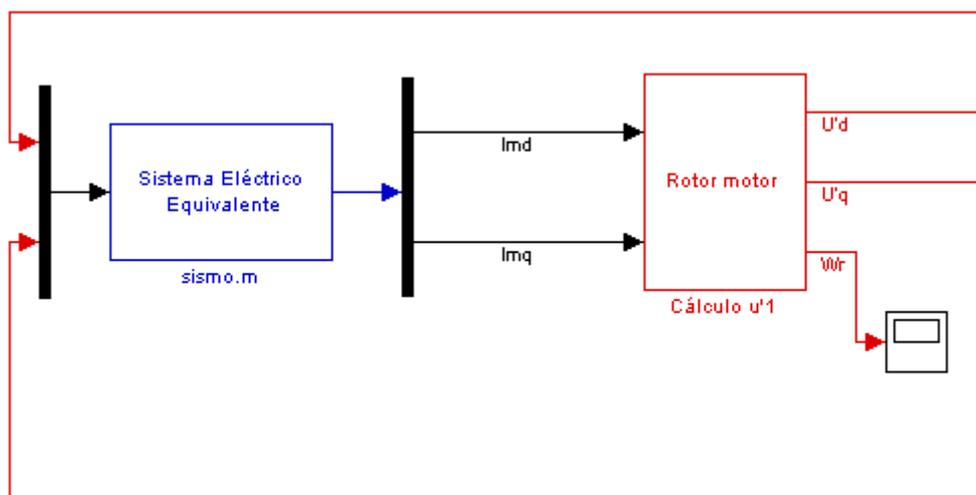


Fig. 10.- Diagrama de bloques en Simulink del Caso A.

En la Fig. 10 pueden observarse dos bloques, de los cuales el motor de inducción fue analizado en [1].

Bloque del rotor del motor de inducción:

Se ha considerado un único motor de potencia nominal 3875 MVA, que es la suma de las potencias nominales de los motores considerados en la referencia [4]. El cual tiene los siguientes parámetros :

MOTOR DE INDUCCIÓN ($S_{base} = 3875$ MVA)	
Resistencia estator, R_s (p.u.)	$0.013 \cdot \frac{1000}{3875} = 0.0033548$
Reactancia estator, X_s (p.u.)	$0.067 \cdot \frac{1000}{3875} = 0.01729$
Reactancia magnetización, X_m (p.u.)	$3.8 \cdot \frac{1000}{3875} = 0.9806$
Resistencia rotor, R_r (p.u.)	$0.009 \cdot \frac{1000}{3875} = 0.0023225$
Reactancia rotor, X_r (p.u.)	$0.17 \cdot \frac{1000}{3875} = 0.043871$
Constante de inercia, H (seg.)	$1.5 \cdot \frac{3875}{1000} = 5.8125$
Factor A del par mecánico	1
Factor B del par mecánico	0
Factor C del par mecánico	0
$X' \text{ (p.u.)} = X_s \text{ (p.u.)} + \frac{X_m \text{ (p.u.)} \cdot X_r \text{ (p.u.)}}{X_m \text{ (p.u.)} + X_r \text{ (p.u.)}}$	0.059282

Con estos parámetros y utilizando la función *cinic.m* [1] se obtiene que la potencia reactiva del motor es 1.56825, valor que no coincide con en el especificado que es igual a 1.8. Por lo tanto para solucionar esta discrepancia se ha adoptado la decisión de variar el banco de condensadores B_1 conectado al nudo del motor para compensar esta discrepancia. Esto significa que el nuevo valor de B_1 con que se trabajará es $B_1=1.56825-(1.8-1.5)=1.26825$ p.u.

Bloque sistema eléctrico equivalente:

Este bloque tiene como función representar el equivalente Thévenin, visto desde el rotor del motor de inducción, el cual se puede obtener a partir de la Fig. 11.

El bloque sistema eléctrico equivalente calcula la corriente inyectada al motor y para ello necesita conocer como datos de entrada el valor del equivalente de la red eléctrica que se conecta al motor, el cual se obtiene como:

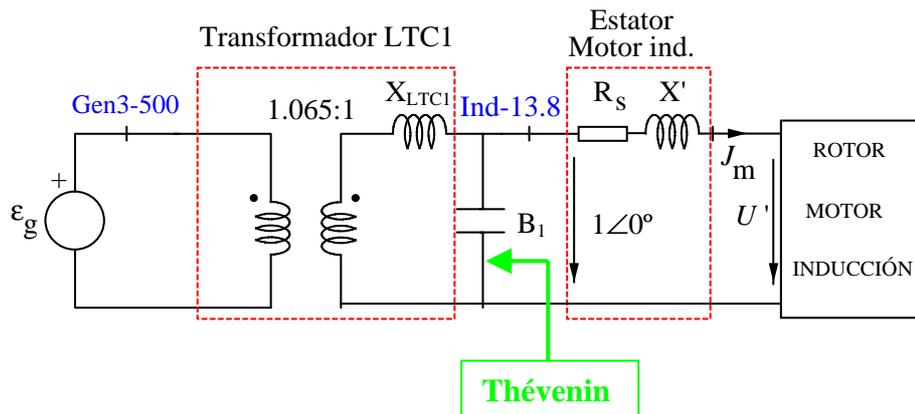


Fig. 11.- Motor de inducción conectado al nudo Gen3-500.

$$U_{Th} = \frac{\varepsilon_g}{1.065} \cdot \frac{\frac{1}{j \cdot B_1}}{j \cdot X_{LTC1} + \frac{1}{j \cdot B_1}} = 0.97610 \cdot \varepsilon_g \text{ p.u.}$$

$$Z_{Th} = \frac{j \cdot X_{LTC1} \cdot \frac{1}{j \cdot B_1}}{j \cdot X_{LTC1} + \frac{1}{j \cdot B_1}} = j \cdot 0.03118657 \text{ p.u.}$$

Por lo tanto el calculo de la intensidad consumida por el motor será:

$$J_m = \frac{U_{Th} - U'}{Z_{Th} + R_s + jX'}$$

Todo este bloque se ha realizado con una función S-function llamada *sismo.m* que se incluye en el anexo I.

Por lo tanto los parámetros del bloque sistema eléctrico equivalente y del motor son los siguientes:

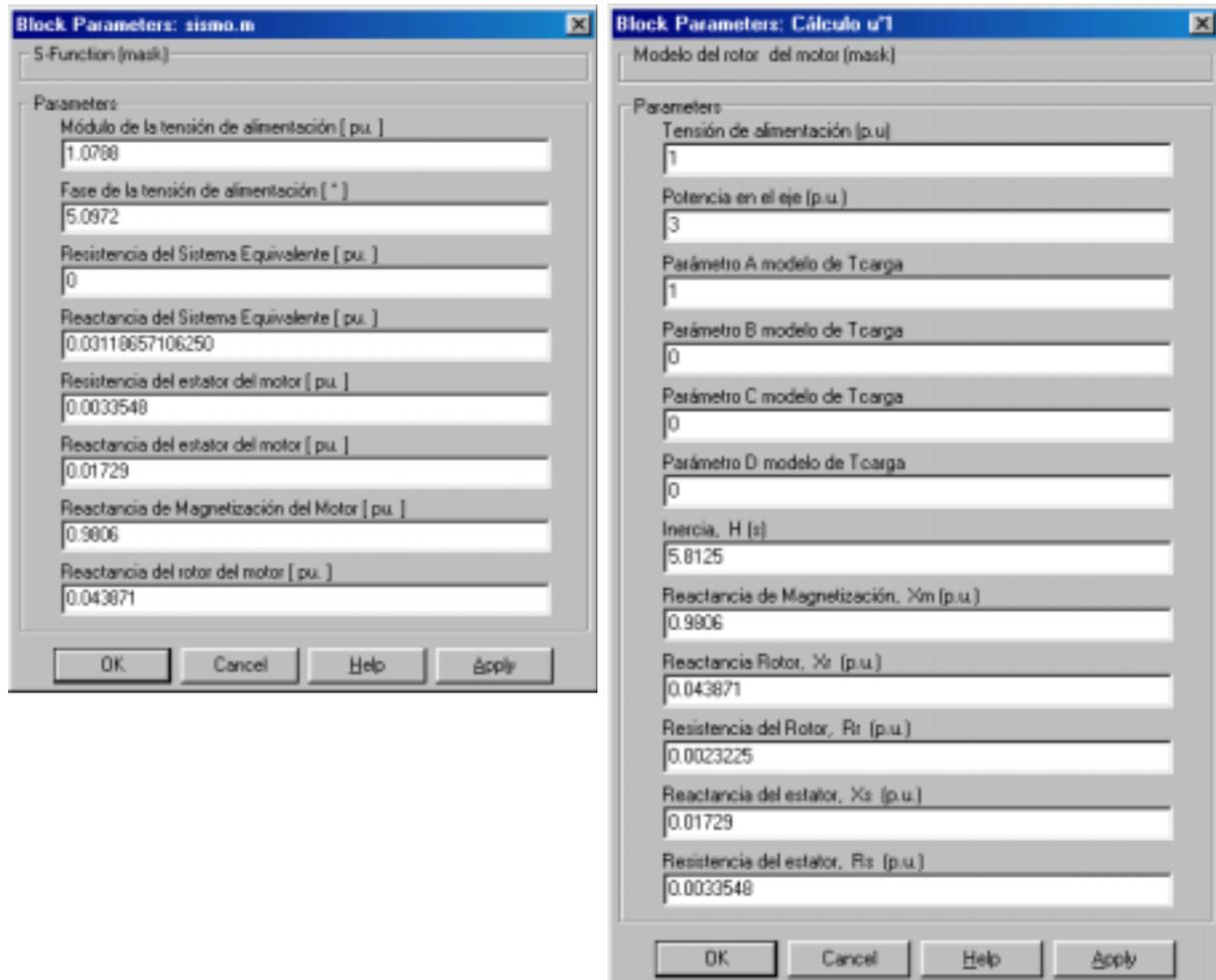


Fig. 12.- Parámetros del motor de inducción y del sistema eléctrico equivalente.

Los resultados de la simulación se muestran en la Fig. 13. Como era de esperar la velocidad del motor es constante e igual 0.9245 p.u. cuando la tensión de alimentación corresponde al valor de régimen permanente del sistema, en otra situación se observa que la velocidad no es constante.

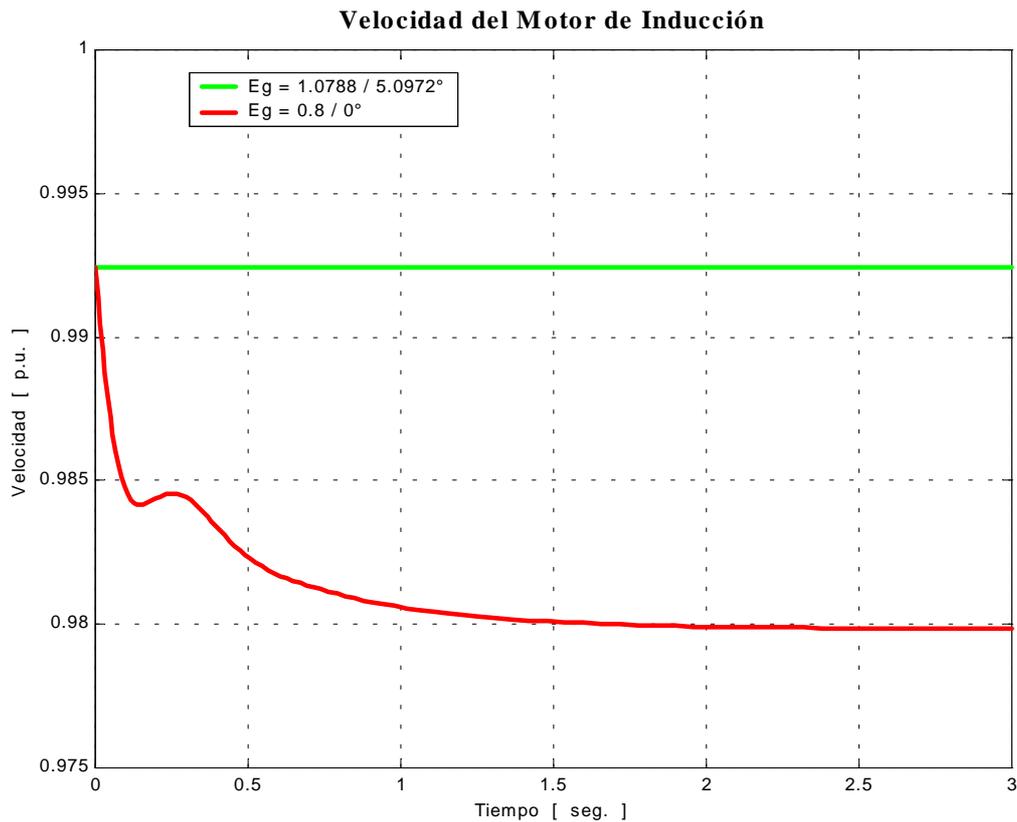


Fig. 13.- Velocidad del motor de inducción para dos tensiones de alimentación distintas.

3.2.- Caso B

En este caso se trata de analizar el comportamiento dinámico del LTC3 y de la carga termostática, para ello se estudiarán dos casos :

Caso B1 :

Se considera que la mitad de la carga residencial/comercial es de naturaleza termostática y la otra mitad es de potencia activa constante.

Caso B2:

Se considera que la mitad de la carga residencial/comercial es de naturaleza termostática y la otra mitad es de impedancia constante.

Para analizar estos casos se ha desarrollado un programa en Simulink cuyo diagrama en bloques se muestra en la Fig. 14.

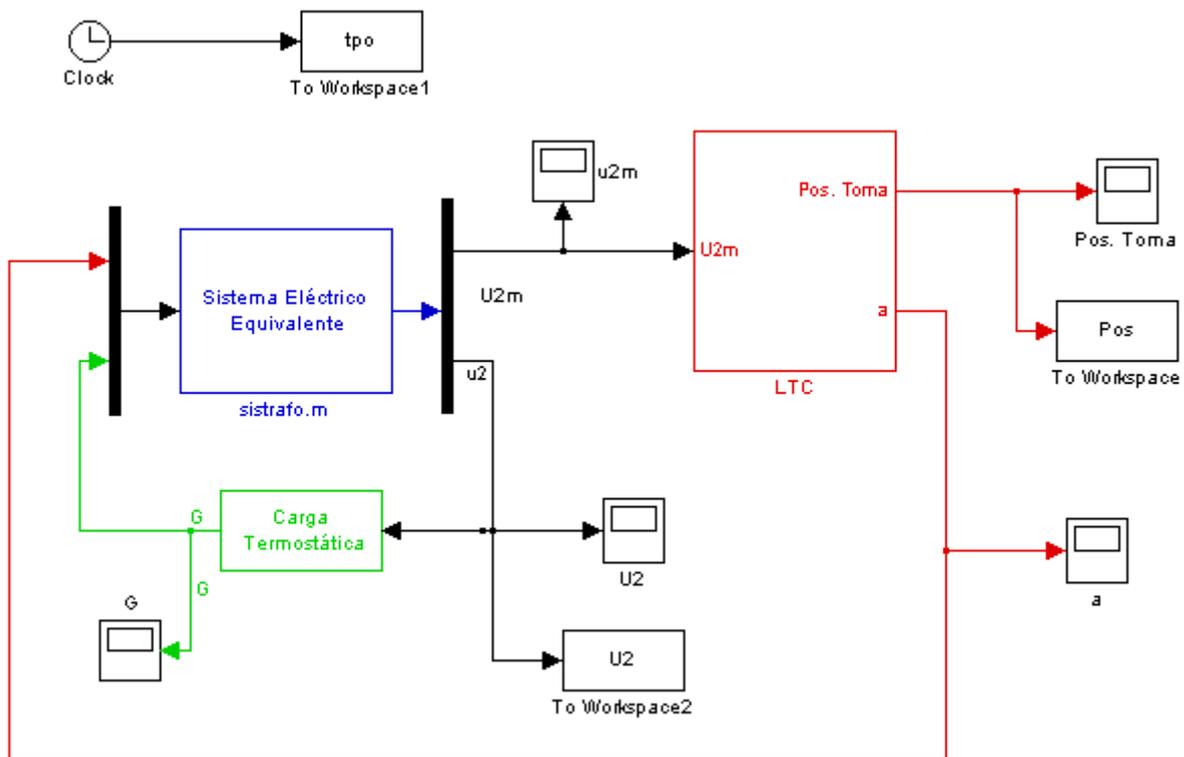


Fig. 14.- Diagrama en bloques Simulink del Caso B.

En la Fig. 14 pueden observarse tres bloques, de los cuales el LTC y la carga termostática fueron analizados en el capítulo 2.

Bloque del LTC:

Este bloque tiene como función simular el cambio automático de tomas del transformador LTC3, su análisis se ha descrito en el capítulo 2.2 y se han considerado los siguientes parámetros [4] :

Banda muerta (DB) = ± 0.0833 p.u.

Constante del tiempo de retardo (Td) = 30 seg.

Tiempo actuación del mecanismo del motor (Tm) = 0 seg.

Pasos discretos de las tomas = $5/8 \%$ = 0.00625

Como la relación de transformación está limitada a los valores 0.9 y 1.1, esto significa que el valor máximo y mínimo de la posición de la toma es :

$$\text{Número de Posiciones de la toma} = \pm \frac{1.1 - 0.9}{2} \cdot \frac{1}{0.00625} = \pm 16$$

Bloque de la Carga Termostática:

El análisis de este bloque se realizó en el capítulo 2.3. En este problema se ha considerado que la mitad de la carga residencial/comercial es de naturaleza termostática, es decir de valor $P_{ter} = 1.5$ p.u. .Esto quiere decir que $G_0 = 1.5$ p.u., pues inicialmente la tensión en la carga es 1.0 p.u. El cambio de la conductancia no se considera instantáneo, sino que, de acuerdo a la referencia [4], se ha empleado una constante de tiempo $T = 30$ seg. También se ha establecido un valor máximo de la conductancia igual a 4 (Kl) veces su valor inicial.

Bloque del Sistema Eléctrico Equivalente :

Este bloque tiene como función representar la red eléctrica vista desde el transformador LTC3 tal como se observa en la Fig. 15 para calcular la tensión U_2 .

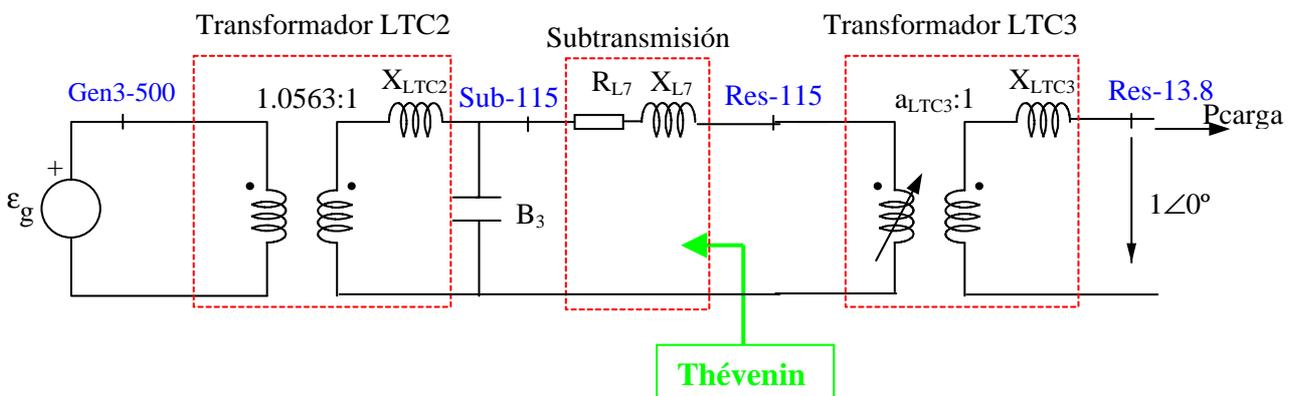


Fig. 15.- Carga residencial/comercial conectada al nudo Gen3-500

El equivalente de Thévenin se puede obtener como :

$$U_{Th} = \frac{\varepsilon_g}{1.0563} \cdot \frac{\frac{1}{j \cdot B_3}}{j \cdot X_{LTC2} + \frac{1}{j \cdot B_3}} = 0.95523 \cdot \varepsilon_g \text{ p.u.}$$

$$Z_{Th} = \frac{j \cdot X_{LTC2} \cdot \frac{1}{j \cdot B_3}}{j \cdot X_{LTC2} + \frac{1}{j \cdot B_3}} + R_{L7} + X_{L7} = 0.01 + j \cdot 0.0636057 \text{ p.u.}$$

Cálculo de U_{2m} :

Se calcula U_{2m} a partir de la potencia de carga P_{carga} y traspasando la impedancia Thévenin al lado secundario del transformador, tal como se muestra en la Fig. 16, donde además se incluye compensación “line drop”.

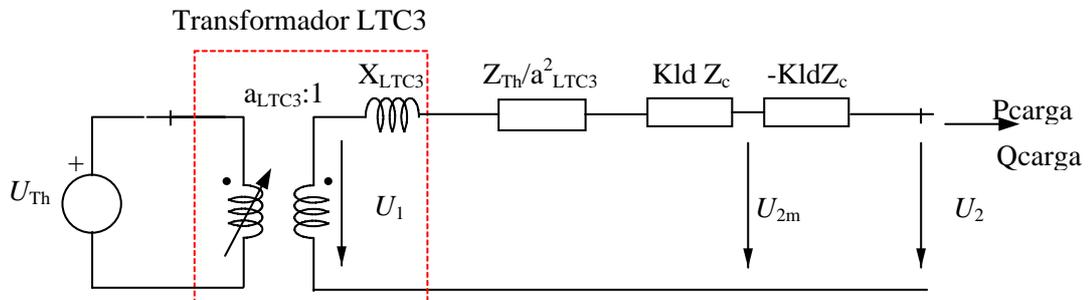


Fig. 16.- Circuito de la Fig. 15 incluyendo compensación “line drop”.

De la Fig 16 se puede obtener que :

$$U_1 = U_2 + (R_T + j \cdot X_T) \cdot \left(\frac{S_{carga}}{U_2} \right)^*$$

donde :

$$U_1 = \frac{U_{Th}}{a_{LTC3}}$$

$$R_T + j \cdot X_T = X_{LTC3} + \frac{Z_{Th}}{a_{LTC3}^2}$$

por lo tanto :

$$U_1 \cdot U_2^* = U_2 \cdot U_2^* + (R_T + j \cdot X_T) \cdot \left(\frac{S_{carga}}{U_2} \right)^* \cdot U_2^*$$

de donde se puede obtener la siguiente ecuación de cuarto grado :

$$U_2^4 + (2 \cdot R_T \cdot P_{carga} + 2 \cdot X_T \cdot Q_{carga} - U_1^2) \cdot U_2^2 + (R_T^2 + X_T^2) \cdot (P_{carga}^2 + Q_{carga}^2) = 0$$

Considerando un caso de carga activa general :

$$P_{carga} = P_{cte} + G_{Ter} \cdot U_2^2 + G_{cte} \cdot U_2^2$$

donde :

P_{cte} : Modelo de carga a potencia constante.

G_{Ter} : Modelo de carga de naturaleza termostática

G_{cte} : Modelo de carga de resistencia constante.

Sustituyendo esta expresión en la ecuación anterior, se obtiene el módulo de la tensión U_2

$$A \cdot U_2^4 + B \cdot U_2^2 + C = 0$$

donde :

$$A = \left(1 + 2 \cdot R_T \cdot (G_{Ter} + G_{cte}) + (R_T^2 + X_T^2) \cdot (G_{Ter} + G_{cte})^2\right)$$

$$B = \left(2 \cdot R_T \cdot P_{cte} + 2 \cdot X_T \cdot Q_{carga} + (R_T^2 + X_T^2) \cdot 2 \cdot (G_{Ter} + G_{cte}) \cdot P_{cte} - U_1^2\right)$$

$$C = (R_T^2 + X_T^2) \cdot (P_{cte}^2 + Q_{carga}^2)$$

En consecuencia :

$$U_{2m} = U_1 - J_2 \cdot (R_T + j \cdot X_T + Kld \cdot Z_c)$$

donde :

$$J_2 = \frac{P_{carga} - j \cdot Q_{carga}}{U_2^*}$$

$$U_2 = U_2 \angle \theta_2$$

$$\theta_2 = \theta_1 - \arcsin\left(\frac{X_T \cdot P_{carga} - R_T \cdot Q_{carga}}{U_1 \cdot U_2}\right)$$

Este conjunto de ecuaciones se ha simulado en Simulink con una S-function llamada *sistrafo.m* que se encuentra en el anexo I. Los parámetros de este bloque son los que se muestran en la Fig. 17.

Block Parameters: sistrafo.m

S-Function (mask)

Parameters

Módulo de la tensión del primario [pu.]
1.0788

Angulo de la Tensión del Primario [°]
5.0972

Resistencia del Sistema Equivalente [pu.]
0.01

Reactancia del Sistema Equivalente [pu.]
0.0636057

Resistencia del Trafo [pu.]
0.00

Reactancia del Trafo [pu.]
0.01

Resistencia de Compensación Line Drop [pu.]
0.0

Reactancia de compensación Line Drop [pu.]
0.0

Factor de compensación Line Drop
0

Potencia Activa de la Carga constante [pu.]
1.5

Modelo carga termostática (1: si 0: no)
1

Resistencia de carga constante [pu.]
0

Potencia Reactiva de la carga constante [pu.]
0

OK Cancel Help Apply

Fig. 17.- Parámetros del bloque sistema eléctrico equivalente.

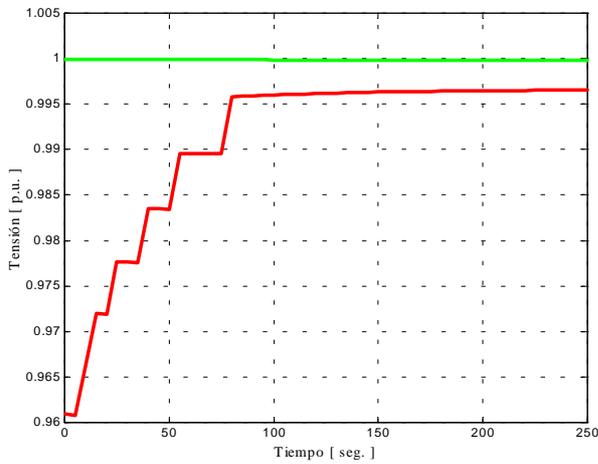
En el ejemplo desarrollado no se ha considerado la compensación “line drop”, por lo que $U_2 = U_{2m}$ y además para incluir el modelo de la carga termostática se debe colocar un “1” y para el caso contrario un “0”.

Los resultados de la simulación se muestran en la Fig. 18.

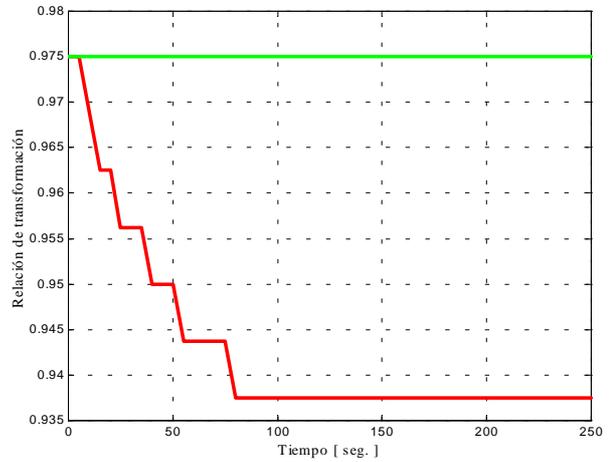
Caso B1 :

En este caso se ha considerado que:

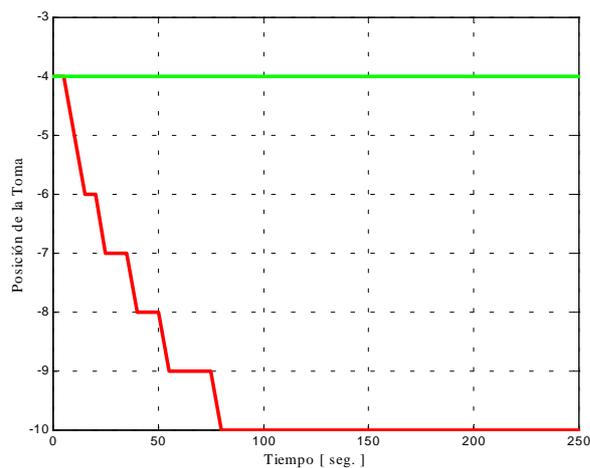
$$P_{cte} = 1.5 \text{ p.u.} ; G_{Ter0} = 1.5 \text{ p.u.} ; G_{cte} = 0$$



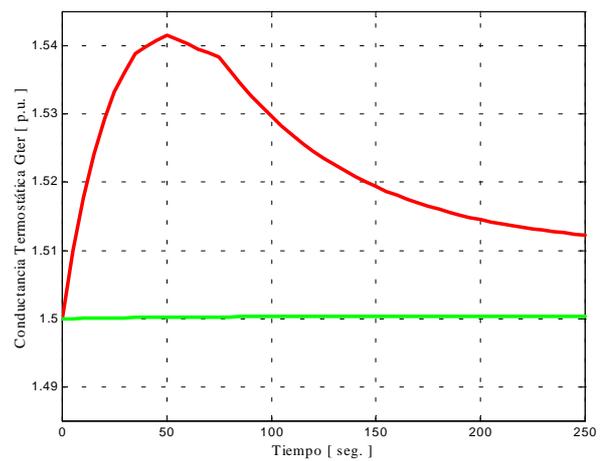
a)



b)



c)



d)

Fig. 18.- Resultados del caso B1.

a) Tensión en el nudo Res-13.8 en p.u.

c) Posición de la toma del transformador
LTC3.

b) Relación de transformación del LTC3.

d) Conductancia termostática en p.u.

— Condiciones de régimen permanente con $Q_{carga} = 0$

— Condición de operación al agregar $Q_{carga} = 0.5 \text{ p.u.}$

Caso B2 :

En este caso se ha considerado que:

$$P_{cte} = 0 \text{ p.u.} \quad ; \quad G_{Ter0} = 1.5 \text{ p.u.} \quad ; \quad G_{cte} = 1.5 \text{ p.u.} \Rightarrow R_{cte} = 0.6666 \text{ p.u.}$$

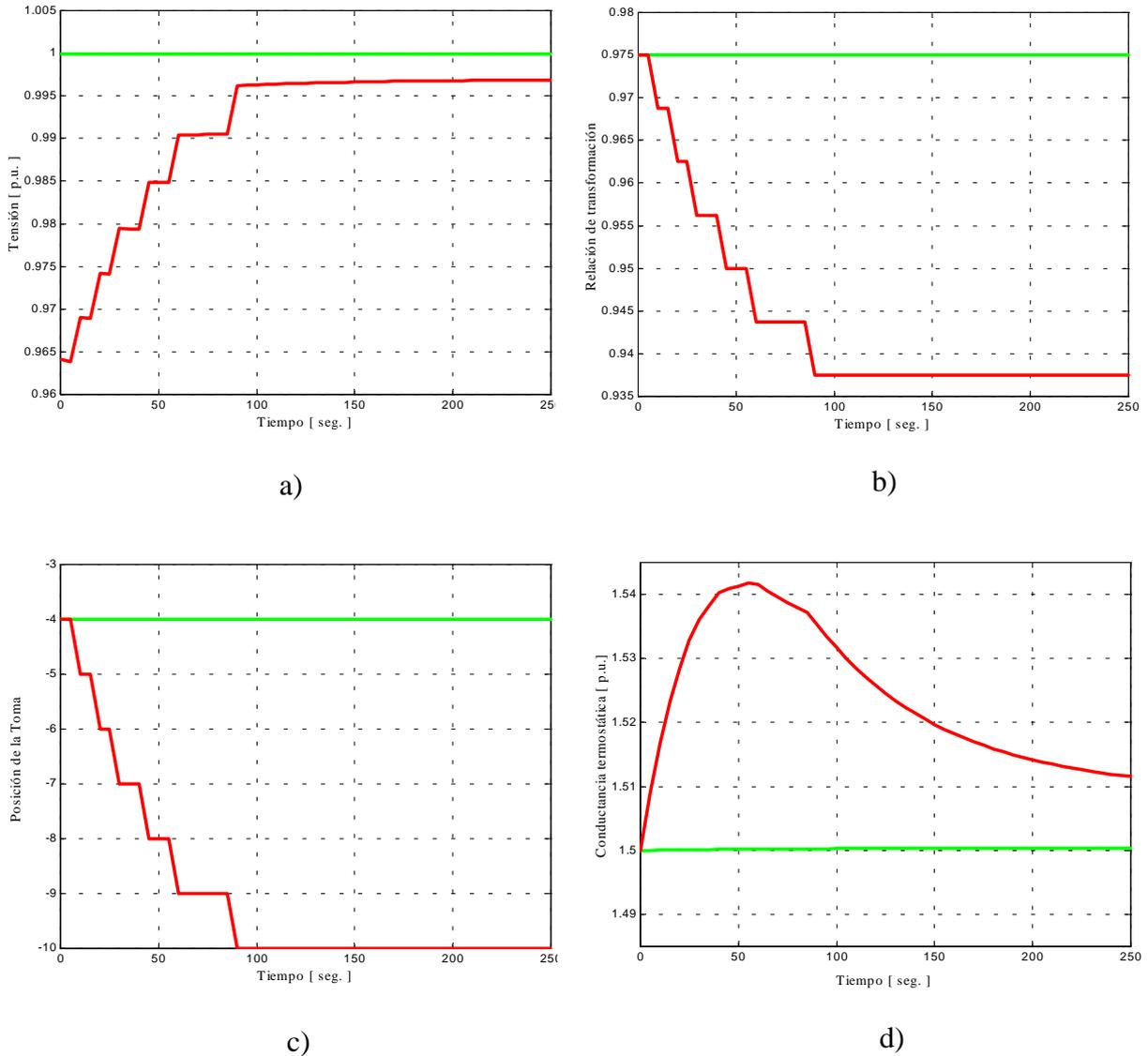


Fig. 19.- Resultados del caso B2.

c) Tensión en el nudo Res-13.8 en p.u.

c) Posición de la toma del transformador LTC3.

d) Relación de transformación del LTC3.

d) Conductancia termostática en p.u.

— Condiciones de régimen permanente con $Q_{carga} = 0$

— Condición de operación al agregar $Q_{carga} = 0.5 \text{ p.u.}$

3.3.- Caso C

En este caso se desea analizar el comportamiento dinámico del generador síncrono con control de sobreexcitación Ge3 conectado al nudo Gen3-500 a través del transformador 3, que se considera con toma constante igual a 1.06. Para estos efectos se ha desarrollado un programa en Simulink cuyo diagrama en bloques se muestra en la Fig. 20.

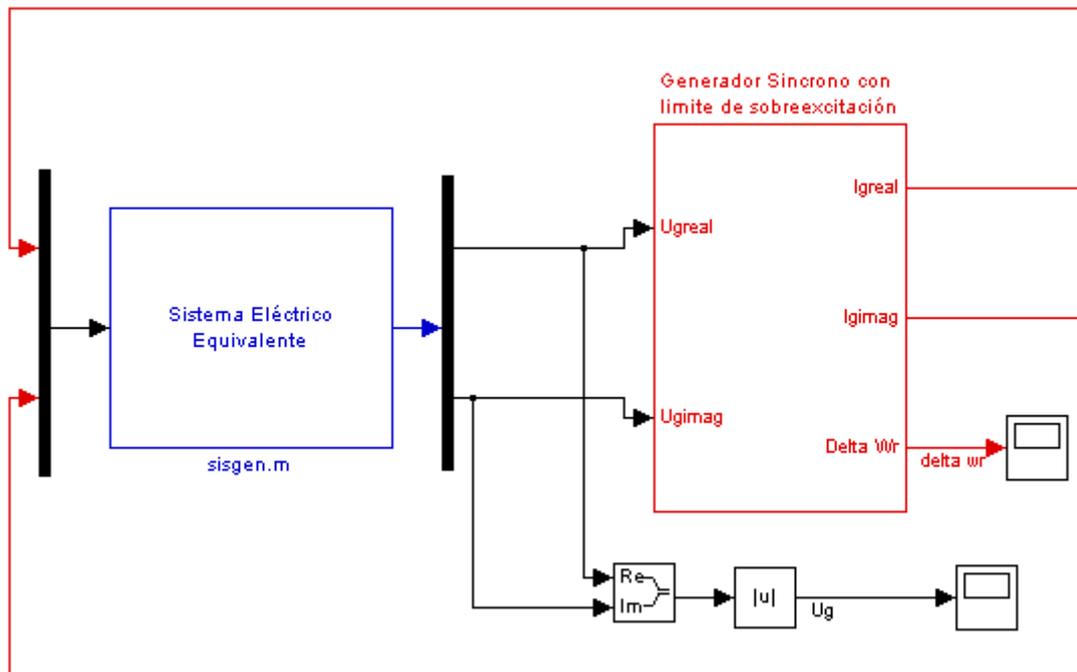


Fig. 20.- Diagrama en bloques Simulink del Caso C.

En la Fig. 20 pueden observarse dos bloques, de los cuales el generador síncrono fue analizado en [1] y el limitador de sobreexcitación ha sido analizado en el capítulo 2.4.

Bloque sistema eléctrico equivalente:

Este bloque tiene como función representar el equivalente Thévenin, visto desde el generador síncrono, el cual se puede obtener a partir de la Fig. 21 para calcular la tensión U en bornes de este elemento conocida la intensidad J .

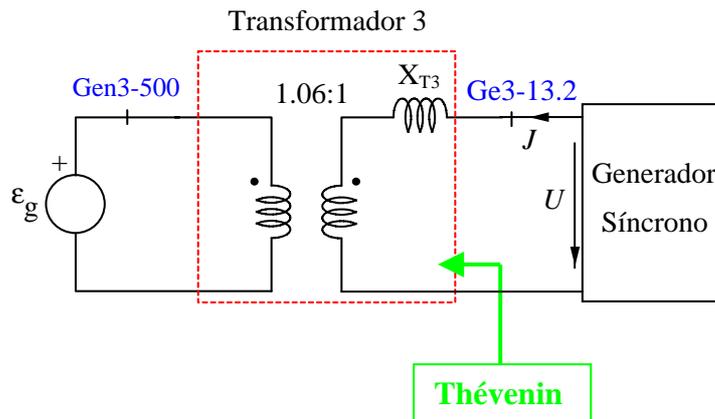


Fig. 21.- Generador Síncrono conectado al nudo Gen3-500.

$$U_{Th} = \frac{\epsilon_g}{1.06}$$

$$Z_{Th} = X_{T3} = j \cdot 0.0625 \text{ p.u.}$$

luego:

$$U = U_{Th} + Z_{Th} \cdot J$$

Todo este bloque se ha realizado con una función S-function llamada *sisgen.m* que se incluye en el anexo I.

Por lo tanto los parámetros del bloque sistema eléctrico equivalente son los siguientes:

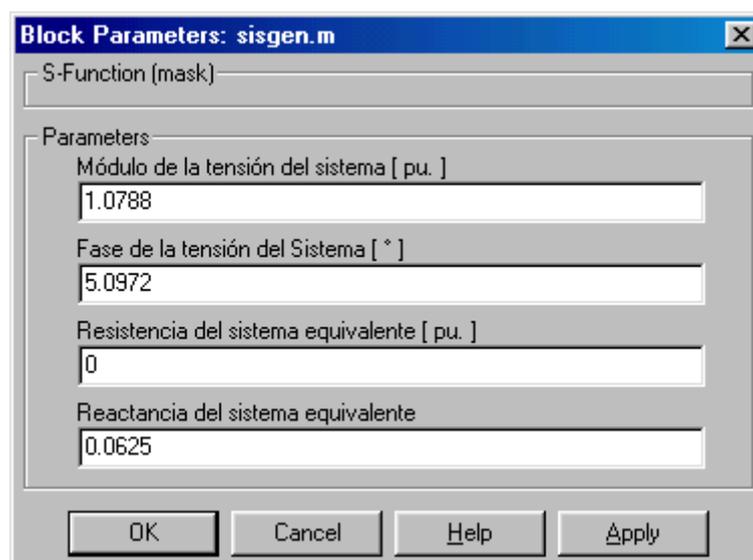


Fig. 22.- Parámetros del sistema eléctrico equivalente del Caso C.

Bloque del generador síncrono con control de sobreexcitación

Los parámetros del generador síncrono se han obtenido de la referencia [3], que se incluyen como parte del anexo III.

COMPENSADOR SÍNCRONO ($S_{\text{base}} = 1600 \text{ MVA}$)	
Resistencia estator, R_s (p.u.)	$0.0046 \cdot \frac{1000}{1600} = 0.002875$
Reactancia desde estator con rotor a c.a., X_d (p.u.)	$2.11 \cdot \frac{1000}{1600} = 1.31875$
Reactancia desde estator con rotor a c.c., X'_d (p.u.)	$0.28 \cdot \frac{1000}{1600} = 0.175$
Reactancia estator del eje q, X_q (p.u.)	$2.02 \cdot \frac{1000}{1600} = 1.2625$
Constante de tiempo del rotor, T'_{do} (seg.)	4.25
Constante de inercia, H (seg.)	$2.32 \cdot \frac{1600}{1000} = 3.712$
Valor máximo de la excitación, $E_{fd\text{max}}$ (p.u.)	5.73
Valor mínimo de la excitación, $E_{fd\text{min}}$ (p.u.)	-5.73

Las condiciones iniciales para el generador síncrono se calculan de la siguiente forma:

Condiciones iniciales del Generador Síncrono

El cálculo de las condiciones iniciales se realiza a partir de la información del régimen permanente. De esta situación se conoce la tensión en bornes del generador, así como la potencia activa y reactiva cedida., que para este caso son las siguientes:

$$P_g = 1.094 \text{ pu.}$$

$$Q_g = 0.0165 \text{ pu.}$$

$$U = 1.0165 \angle 8.8871^\circ$$

como los parámetros del generador son :

$$R_s = 0.002875 pu.$$

$$X_d = 1.31875 pu.$$

$$X'_d = 0.175 pu.$$

$$X_q = 1.2625 pu.$$

luego :

$$J = \frac{P_g - j \cdot Q_g}{(U)^*} = 1.0764 \angle 8.0230^\circ pu.$$

de la ecuación

$$\varepsilon_q = U + (R_s + j \cdot X_q) \cdot J$$

$$E_q = 1.7111 \angle 61.4532^\circ pu.$$

de donde :

$$\delta_0 = 61.4532^\circ$$

Luego es posible las variables instantáneas de eje d-q a partir de:

$$\begin{bmatrix} i_d^s \\ i_q^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen}(\delta_0) & -\text{cos}(\delta_0) \\ \text{cos}(\delta_0) & \text{sen}(\delta_0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{real}^s \\ I_{imag.}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.8645 \\ 0.6413 \end{bmatrix} pu.$$

$$\begin{bmatrix} u_d^s \\ u_q^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen}(\delta_0) & -\text{cos}(\delta_0) \\ \text{cos}(\delta_0) & \text{sen}(\delta_0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{real}^s \\ U_{imag.}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.8072 \\ 0.6179 \end{bmatrix} pu.$$

también :

$$J_d^s = i_d^s \angle (\delta_0 - \pi / 2) = 0.8645 \angle -28.5468^\circ pu.$$

$$J_q^s = i_q^s \angle \delta_0 = 0.6413 \angle -61.4532^\circ pu.$$

$$U_d^s = u_d^s \angle (\delta_0 - \pi / 2) = 0.8072 \angle -28.5468^\circ pu.$$

$$U_q^s = u_q^s \angle \delta_0 = 0.6179 \angle -61.4532^\circ pu.$$

con lo cual :

$$\varepsilon_q' = U_q^s + R_s \cdot J_q^s + j \cdot X_d' \cdot J_d^s$$

$$\varepsilon_q' = 0.7710 \angle 61.4532^\circ pu.$$

también :

$$\varepsilon_l = \varepsilon_q + j \cdot (X_d - X_q) \cdot J_d^s$$

$$\varepsilon_l = 1.7597 \angle 61.4532^\circ pu.$$

El par mecánico inicial se puede obtener como :

$$T_{m0} = T_{e0} = u_d^s \cdot i_d^s + u_q^s \cdot i_q^s = 1.094$$

resultado lógico dado que en por unidad como $w_r(pu.) = 1.0 pu.$ y por lo tanto

$$P_g(pu.) = T_{m0}(pu.)$$

El cálculo de todas estas condiciones iniciales se encuentra en el archivo *cinicgs.m* en el anexo I.

Los parámetros del bloque de sobreexcitación se calcularon como se indica a continuación:

Para obtener las constantes K_1 , K_2 y A , se utiliza la información del anexo III :

$$t = \frac{A}{K_2 \cdot (I_{fd} - I_{fd \text{ limit}})}$$

donde :

$$I_{fd \text{ limit}} = 1.05 \cdot I_{fdnom} = 2.17 \text{ p.u.} \quad ; \text{ referencia [4]}$$

De la Fig. 23, obtenida del anexo III, se obtiene que para $t = 55$ seg. se obtiene :

$$I_{fd} = 1.166 \cdot I_{fdnom}$$

luego:

$$55 = \frac{A}{K_2 \cdot (1.166 - 1.05) \cdot I_{fdnom}}$$

$$6.38 = \frac{A}{K_2 \cdot I_{fdnom}}$$

de las condiciones iniciales se tiene que:

$$I_{fdnom} = I_{fdpermanente} = E_l = 1.7597 \text{ p.u.}$$

por lo tanto:

Si se toma un valor de $A = 1$ entonces

$$K_2 = \frac{1}{1.7597 \cdot 6.38} = 0.089$$

entonces como $K_1 \gg K_2$ se ha elegido

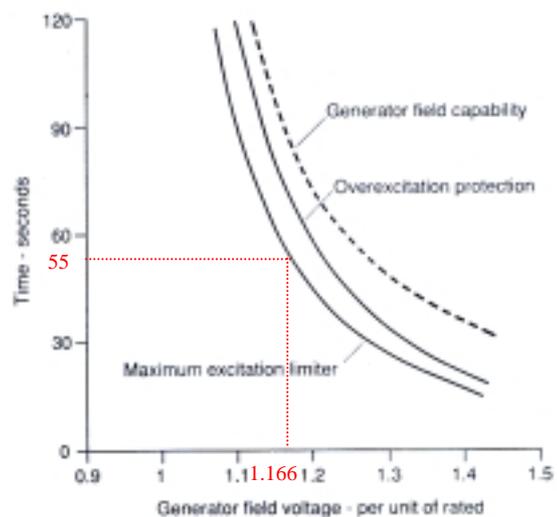


Fig. 23.- Coordinación del límite de sobreexcitación.

$$K_1 = 100 \quad ; \quad K_2 = 0.08$$

Los parámetros del generador síncrono con control de sobreexcitación que se utilizan en Simulink son los que se muestran en la Fig. 24.

Parameters	
Módulo de la tensión de alimentación [pu.]	1.0165
Fase de la tensión de alimentación [°]	8.8871
Potencia activa generada inicial [pu.]	1.094
Potencia reactiva generada inicial [pu.]	0.0165
Reactancia Síncrona de Eje d, X _d (p.u.)	1.31875
Reactancia Síncrona de Eje q, X _q (p.u.)	1.2625
Reactancia Subtransitoria de eje d, X' _d (p.u.)	0.175
Resistencia de Estator, R _a (p.u.)	0.002875
Constante de Inercia H (s)	3.712
Límite Inferior Regulador de Tensión, E _{fmin}	-5.73
Límite Superior Regulador, E _{fmax}	5.73
Constante de Tiempo del Rotor T' _d (s)	4.2
Ganancia del Regulador de tensión K	200
Constante K ₁ de la sobreexcitación	100
Constante K ₂ de la sobreexcitación	1/12
Límite máximo de la sobreexcitación, A	1
Límite de la corriente de campo, I _{fd limit}	2.17

Fig. 24.- Parámetros del generador síncrono con control de sobreexcitación.

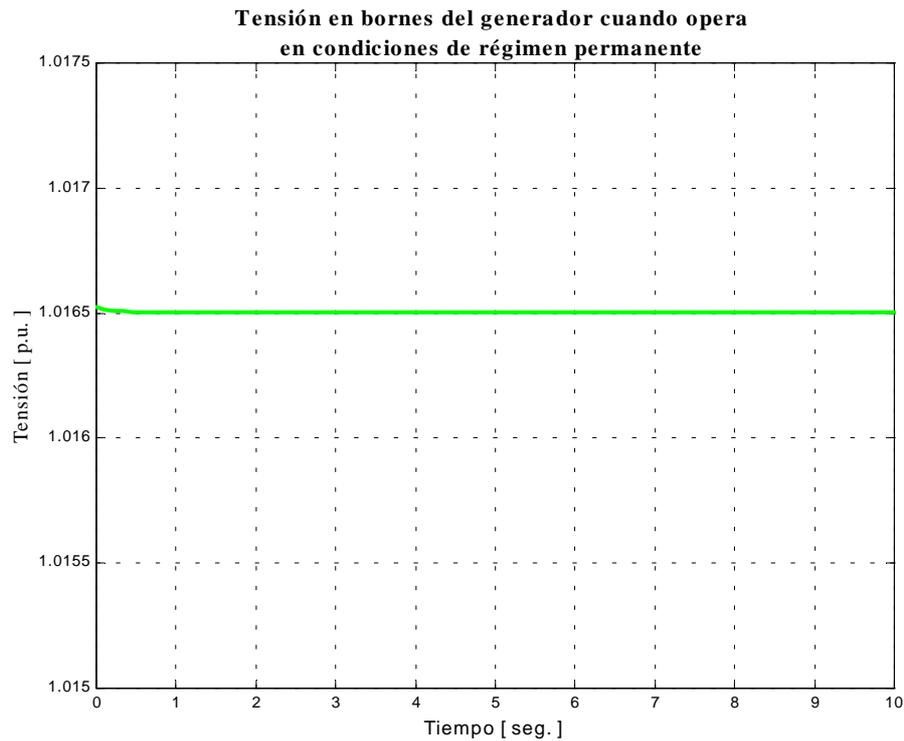


Fig. 25.- Tensión en bornes del generador síncrono cuando opera en las condiciones de régimen permanente.

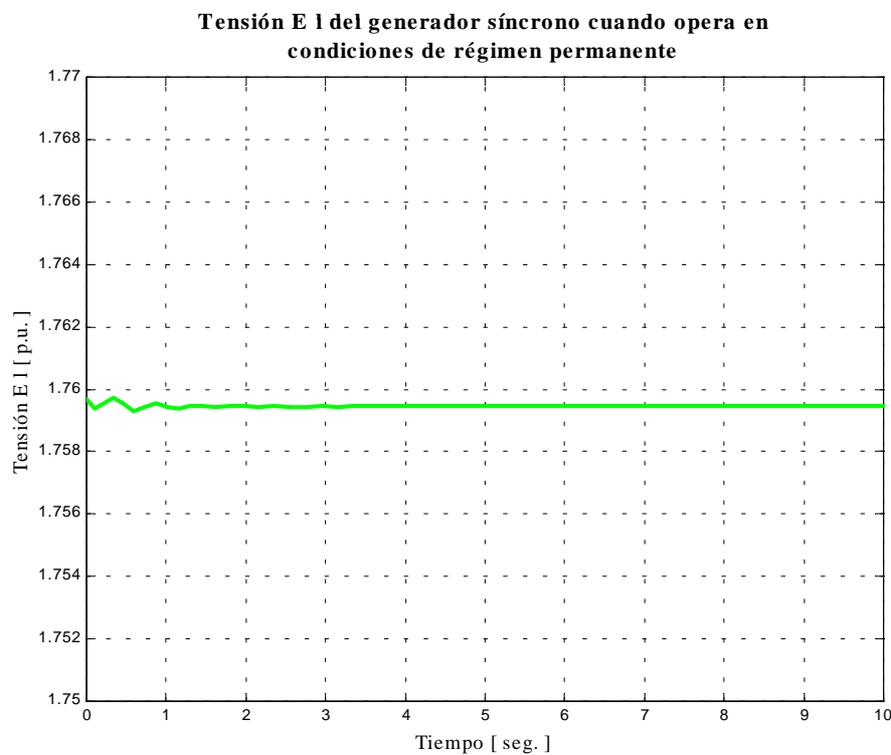


Fig. 26.- Tensión E l del generador síncrono cuando opera en las condiciones de régimen permanente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. M^a de Castro, H. N. Díaz, “Análisis Dinámico de la Estabilidad de Tensión de un Sistema de Potencia”. Informe Ejercicio 1 Capítulo VI del texto C.W.Taylor.
- [2] Calovic, Milan, “Modeling and Análisis of Under-Load Tap-Changing Transformer Control Systems”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 7, July 1984.
- [3] P. Anderson, “Power System Stability”.
- [4] C.W. Taylor, “Power System Voltaje Stability”.

ANEXO I
Programas en Matlab

```

% Descripción:  sistrafo.m
%
% Este bloque S-function actua como una subrutina ejecutada en Matla
b.
% no existen variables continuas (derivadas)
% se evalua la salida como:
% y = f(u)
% u : entradas
% y : Salidas  son  devueltas en sys
%
% Objetivo :
%
% Representar sistema eléctrico equivalente conectado a la carga te
rmostática y LTC

function [sys, x0 ]=sistrafo(t,x,u,flag,U1,gU1,Rtrafo,Xtrafo,Rc,Xc,K
ld,P2t,Q2t,Kg,Rload,Rsis,Xsis)

% Parámetros :
% U1 : Módulo tensión del primario
% gU1: ángulo en grados de la tensión del primario
% Rtrafo,Xtrafo : Parámetros trafo
% Rc, Xc: Compensación line drop (va en serie con sec. trafo)
% Kld : Factor de compensación line drop
% P2t, Q2t : Carga en sec. trafo.
% Kg : Variable auxiliar que toma los siguientes valores:
%     Kg = 1      Modelo con carga termostática
%     Kg = 0      Modelo sin carga termostática
% Rload : Resistencia de carga independiente de la tensión
% Rsis  : Resistencia del sistema equivalente conectado al trafo
% Xsis  : Reactancia del sistema equivalente conectado al trafo
% Variables de Salida
% sys(1) = u2m      : Tensión en punto de compensación line drop
% sys(2) = u2      : Tensión en la carga
% Variables de entrada:
% u(1) = Relación de transformación
% u(2) = G termostática (variable en el tiempo con el cuadrado de l
a tensión)

if flag==3
    %salida del sistema
    U1=U1*0.95523*exp(j*gU1*pi/180); %Tensión del equivalente del sis
tema
    Rtrafo=Rtrafo+Rsis/u(1)^2;
    Xt=Xtrafo+Xsis/u(1)^2;
    if Rload==0
        Gload=0;
    else
        Gload=1/Rload;
    end
    if Kg==0
        G=Gload;
    else
        G=u(2)+Gload;
    end
end

```

```

end
A=1 + 2*Rtrafo*G + (Rtrafo^2 + Xt^2)*G^2;
B=2*Rtrafo*P2t + 2*Xt*Q2t + (Rtrafo^2 + Xt^2)*2*P2t*G - (abs(U1)
/u(1))^2;
C=(P2t^2 + Q2t^2)*(Rtrafo^2 + Xt^2);
u2=max(roots([A B C])); %Cuadrado de la tension en la c
arga u2
Pt=P2t+G*u2;
Qt=Q2t;
St=Pt+j*Qt;
teta2=gU1*pi/180 - asin( (Xt*Pt-Rtrafo*Qt) / ( abs(U1)/u(1)*sqrt(
u2) ) );
u2t=sqrt(u2)*exp(j*teta2);
I2=conj(St/u2t);
U2m=U1/u(1) - I2*(Rtrafo+Kld*Rc+j*(Xt+Kld*Xc));
sys(1)=abs(U2m);
sys(2)=sqrt(u2);
%sys(2)=abs(U2m+Kld*(Rc+j*Xc));
%pause
%sys(2)=7;
elseif flag==0
    %parametros y condiciones iniciales
    %1ro: Numero de estados continuos
    %2do: Numero estados discretos
    %3ro: Numero de salidas X
    %4to: Numero de entradas U
    % los otros cero
    sys=[0;0;2;2;0;1];
    x0=[];
else
    sys=[];
end
end

```

```

% Descripción : mederror.m
%
% Este bloque S-function actua como una subrutina ejecutada en Matla
b.
% no existen variables continuas (derivadas)
% se evalua la salida como:
% y = f(u)
% u : entradas
% y : Salidas son devueltas en sys
%
% Objetivo :
% Determinar actuación de las tomas del LTC en función de la
% variación de la tensión de entrada.

function [sys, x0] =mederror(t,x,u,flag,DB)
global aux ; variable auxiliar de tipo global
% Parámetros :
% DB : Zona Muerta, variacion de tensión que detecta (pu.)
% Variables de Salida:
% sys(1) = 'e' +1: Incrementar toma
% -1: decrementar toma
% 0: Mantener toma
% Variables de entrada:
% u(1) = Error de variación de tensión = Uref - Umedido

if flag==3
%salida del sistema
if t==0;
aux=0;
end
if u(1) >= -DB & u(1)<=DB
sys(1)=0;
elseif u(1) > DB
sys(1)=1;
elseif u(1) < -DB
sys(1)=-1;
end
aux=u(1);
elseif flag==0
%parámetros y condiciones iniciales
%1ro: Número de estados continuos
%2do: Número estados discretos
%3ro: Número de salidas X
%4to: Número de entradas U
% los otros cero
sys=[0;0;1;1;0;1];
x0=[];
else
sys=[];
end
end

```

```

% Descripción :   retrasador.m
%
% Este bloque S-function actua como una subrutina ejecutada en Matla
b.
% no existen variables continuas (derivadas)
% se evalua la salida como:
% y = f(u)
% u : entradas
% y : Salidas   son   devueltas en sys
%
% Objetivo :
%   Producir un retraso en la actuación del LTC
%
function [sys, x0 ]=retrasador3(t,x,u,flag,DB,Tdo)
global tlast contador contadorb
%Parámetros
% DB      : Zona Muerta, variacion de tensión que detecta
% Tdo     : Retraso inicial
%Variables de Salida
% sys(1) = b      1:  Ordena actuacion del motor que cambia tomas (
sube)
%
%              -1:  Ordena actuacion del motor que cambia tomas (
baja)
%
%              0:  No actuacion del motor
%Variables de entrada:
% u(1) : Error de variación de tensión   =  Uref - Umedido
% u(2) : e          +1: Incrementar toma
%
%              -1: decrementar toma
%
%              0: Mantener toma
if flag==3
    %salida del sistema
    if t==0
        tlast=0;
        contador=0;
        contadorb=0;
    end
    if u(1)== 0
        Td=Tdo;
    else
        Td=Tdo/abs(u(1)/DB);
    end
if u(2)==0
    sys(1)=0;
    contador=0;
    contadorb=0;
elseif u(2)==1
    contador=contador+(t-tlast);
    contadorb=0;
    if contador>Td
        sys(1)=1;
        contador=0;
        contadorb=0;
    else
        sys(1)=0;

```

```

end
elseif u(2)==-1
contadorb=contadorb+(t-tlast);
contador=0;
if contadorb>Td
    sys(1)=-1;
    contadorb=0;
    contador=0;
else
    sys(1)=0;
end
end
tlast=t;
elseif flag==0
    %parametros y condiciones iniciales
    %1ro: Número de estados continuos
    %2do: Número estados discretos
    %3ro: Número de salidas X
    %4to: Número de entradas U
    %Los otros cero
    sys=[0;0;1;2;0;1];
    x0=[];
else
    sys=[];
end
end

```

```

% Descripción :   tomas.m
%
% Este bloque S-function actua como una subrutina ejecutada en Matla
b.
% no existen variables continuas (derivadas)
% se evalua la salida como:
% y = f(u)
% u : entradas
% y : Salidas   son   devueltas en sys
%
% Objetivo :
% Cambiar la toma del LTC de una posición a otra

function [sys, x0 ]=tomas(t,x,u,flag,incrtoma,tinic,tmin,tmax)
global toma
% Parámetros:
% incrtoma: incremento de tomas (delta_a)
% tinic   : Posición inicial de la toma
% tmin    : Posicion minima de la toma
% tmax    : Posicion máxima de la toma
% Variables de Salida
% sys(1) : Posición de la toma entre [-10,10]
% sys(2) : Relación de transformación actualizada
% Variables de entrada:
% u(1) : Salida retrasador (b)   -1: Incrementar toma
%                                     +1: decrementar toma
%                                     0: Mantener toma (no actua motor)
if t==0
    toma=tinic;      %Posición inicial de la toma entre [-10,10] de un
o en uno
end
if flag==3
% salida del sistema
    if u(1)==-1 delta_n=1;end
    if u(1)==0 delta_n=0; end
    if u(1)==1 delta_n=-1; end
    toma=toma+delta_n;
    if toma > tmax
        toma=tmax;
    elseif toma<tmin
        toma=tmin;
    end
    sys(1)=toma;
    sys(2)=1+toma*incrtoma
elseif flag==0
    %parámetros y condiciones iniciales
    %1ro: Número de estados continuos
    %2do: Número estados discretos
    %3ro: Número de salidas X
    %4to: Número de entradas U
    % los otros cero
    sys=[0;0;2;1;0;1];
    x0=[]; toma=tinic;
else

```

```
end      sys=[];
```

```

% Descripción : sismo.m
%
% Este bloque S-function actua como una subrutina ejecutada en Matla
b.
% no existen variables continuas (derivadas)
% se evalua la salida como:
% y = f(u)
% u : entradas
% y : Salidas son devueltas en sys
%
% Objetivo :
% Representar el sistema equivalente conectado al motor de inducció
n

function [sys, x0 ]=sismo(t,x,u,flag,U1,gU1,Rsis,Xsis,Rs,Xs,Xm,Xr)

% Parámetros :
% U1 : Módulo tensión del primario
% gU1 : ángulo en grados de la tensión del primario
% Rsis : Resistencia del sistema equivalente conectado al motor
% Xsis : Reactancia del sistema equivalente conectado al motor
% Rs : Resistencia del estator del motor
% Xs : Reactancia del estator del motor
% Xm : Reactancia de magnetización
% Xr : Reactancia del rotor
% Variables de Salida
% sys(1) = imd : Parte real de la intensidad del motor
% sys(2) = imq : Parte imaginaria de la intensidad del motor
% Variables de entrada:
% u(1) = upd : Parte real de la tensión del rotor del motor
% u(2) = upq : Parte imaginaria de la tensión del rotor del m
otor

if flag==3
    %salida del sistema
    %Tensión del equivalente del sistema conectado al trafo (para est
e caso particular)
    U1=U1*0.97610551056340*exp(j*gU1*pi/180);

    Zeq=Rsis+j*Xsis+Rs+j*(Xs+Xm*Xr/(Xm+Xr));
    Im=(U1-(u(1)+j*u(2)))/Zeq;
    sys(1)=real(Im);
    sys(2)=imag(Im);

elseif flag==0
    %parametros y condiciones iniciales
    %1ro: Numero de estados continuos
    %2do: Numero estados discretos
    %3ro: Numero de salidas X
    %4to: Numero de entradas U
    % los otros cero
    sys=[0;0;2;2;0;1];
    x0=[];
else

```

```
end      sys=[];
```

```

% Descripción:  sisgen.m
%
% Este bloque S-function actua como una subrutina ejecutada en Matla
b.
% no existen variables continuas (derivadas)
% se evalua la salida como:
% y = f(u)
% u : entradas
% y : Salidas  son  devueltas en sys
%
% Objetivo :
% Representar el sistema equivalente al que se conecta el generador
síncrono
%
function [sys, x0 ]=sisgen(t,x,u,flag,U1,teta,Rsis,Xsis)

% Parámetros :
% U1      : Módulo tensión del primario
% teta    : ángulo en grados de la tensión del primario
% Rsis    : Resistencia del sistema equivalente conectado al motor
% Xsis    : Reactancia del sistema equivalente conectado al motor
% Variables de Salida
% sys(1) = ur          : Parte real de la tensión del generador
% sys(2) = ui          : Parte imaginaria de la tensión del generad
or
%Variables de entrada:
% u(1) = ir            : Parte real de la corriente cedida por el g
enerador
% u(2) = ii            : Parte imaginaria de la corriente cedida po
r el generador
if flag==3
    %salida del sistema
    U1=U1/1.06*exp(j*teta*pi/180);          %Tensión del equivalente del
sistema
    Ug=U1+(Rsis + j*Xsis)*(u(1)+j*u(2));
    sys(1)=real(Ug);
    sys(2)=imag(Ug);

elseif flag==0
    %parametros y condiciones iniciales
    %1ro: Numero de estados continuos
    %2do: Numero estados discretos
    %3ro: Numero de salidas X
    %4to: Numero de entradas U
    % los otros cero
    sys=[0;0;2;2;0;1];
    x0=[];
else
    sys=[];
end

```

```

% Descripción : gsinc2.m
%
% Este bloque S-function actua como una subrutina ejecutada en Matla
b.
% no existen variables continuas (derivadas)
% se evalua la salida como:
% y = f(u)
% u : entradas
% y : Salidas son devueltas en sys
%
% Objetivo :
% Representar el generador sincrono

function [sys, x0 ]=gsinc2(t,x,u,flag,Ra,Xd,Xq,Xdp)

% Parámetros :
% Ra : Resistencia del estator
% Xd : Reactancia de eje d
% Xq : Reactancia de eje q
% Xdp : Reactancia Xd'
% Variables de Salida
% sys(1) = i'd
% sys(2) = i'q
% sys(3) = El
% Variables de entrada:
% u(1) = u'd
% u(2) = u'q
% u(3) = E'q

if flag==3
    %salida del sistema
    A=[-Ra Xq ; -Xdp -Ra];
    udq=[u(1) u(2)]';
    B=[0 u(3)]';
    Idq=inv(A)*(udq-B);
    El=u(3)+(Xd-Xdp)*Idq(1);
    sys =[Idq(1) Idq(2) El];

elseif flag==0
    %parametros y condiciones iniciales
    %1ro: Numero de estados continuos
    %2do: Numero estados discretos
    %3ro: Numero de salidas X
    %4to: Numero de entradas U
    % los otros cero
    sys=[0;0;3;3;0;1];
    x0=[];
else
    sys=[];
end

```

```

% Descripción : genosc.m
%
% Este bloque S-function actua como una subrutina ejecutada en Matla
b.
% no existen variables continuas (derivadas)
% se evalua la salida como:
% y = f(u)
% u : entradas
% y : Salidas son devueltas en sys
%
% Objetivo :
%
% Resolver la Ecuación de oscilación del Generador síncrono
%

function [sys, x0]=genosc(t,x,u,flag,H,Ug,teta,Pg,Qg,Ra,Xd,Xq,Xdp,K)
% Parámetros :
% H : Constante de Inercia
% Ug : Modulo de la tensión del nudo
% teta : Fase de la tensión del nudo
% Pg : Potencia activa generada
% Qg : Potencia reactiva generada
% Ra : Resistencia del estator
% Xd : Reactancia de eje d
% Xq : Reactancia de eje q
% Xdp : Reactancia Xd'
% K : Constante del Regulador
% Variables de estado
% x(1) = delta
% x(2) = Incremento de velocidad del rotor Wr
% Variables de entrada:
% u(1) = i'd
% u(2) = i'q
% u(3) = u'd
% u(4) = u'q

%Ecuación de Oscilación del Generador

if abs(flag)==1
    %variables de estado del sistema
    sys(1) = x(2)*2*pi*60; %Debe multiplicar
se por Wbase
    sys(2) = 1/(2*H)*(Pg - u(1)*u(3) - u(2)*u(4)); %Tmo(pu) = Pg(pu.
)
elseif flag==3
    %salida del sistema
    sys=[x(1); x(2)];
elseif flag==0
    %parametros y condiciones iniciales
    %1ro: Numero de estados continuos
    %2do: Numero estados discretos
    %3ro: Numero de salidas X
    %4to: Numero de entradas U
    sys=[2;0;2;4;0;0];

```

```
        [delta0]=cinicgs(Ug,teta,Pg,Qg,Ra,Xd,Xq,Xdp,K); %Calculo de
delta inicial
        x0=[delta0 ; 0];
    else
        sys=[];
end
```

```

% Descripción : cinicgs.m
%
% Objetivo :
% Calcular las condiciones iniciales de operación del generador sín
crono
% del Ge3-13.2 del problema taylor 2 dinámica.

function [delta]=cinicgs(Ug,teta,Pg,Qg,Ra,Xd,Xq,Xdp,K)
%Ug=1.0165; teta=8.8871; Pg=1.094; Qg=0.0165; Xd=1.31875; Xdp=0.175;
Xq=1.2625
%Ra=0.002875; K=200;

%Definición de Parámetros:
%Ug : Módulo de la tensión en bornes del generador
%Teta : Fase de la tensión en bornes del generador
%Pg : Potencia activa generada por el generador
%Qg : Potencia reactiva generada por el generador
%Ra : Resistencia del estator del generador
%Xd : Reactancia de eje directo del generador
%Xq : Reactancia de eje en cuadratura del generador
%Xdp : Reactancia de eje directo prima del generador X'd
%K : Constante del regulador

Ug=Ug*exp(j*teta*pi/180); %Tensión en
bornes del generador
Ig=(Pg-j*Qg)/conj(Ug); %Corriente e
ntregada por el generador
Eq=Ug+(Ra+j*Xq)*Ig;
delta=angle(Eq);

%valores instantáneos de las corrientes y tensiones de eje d y q
A=[sin(delta) cos(delta); -cos(delta) sin(delta)];
idq=inv(A)*[real(Ig); imag(Ig)];
udq=inv(A)*[real(Ug); imag(Ug)];

%fasores de las corrientes y tensiones de eje d y q
Id=idq(1)*exp(j*(delta-pi/2));
Iq=idq(2)*exp(j*delta);
Ud=udq(1)*exp(j*(delta-pi/2));
Uq=udq(2)*exp(j*delta);
%Tensión E'q
Eqp =abs( Uq + Ra*Iq + j*Xdp*Id);

%Tensión El
El = abs(Eq + j*(Xd - Xq)*Id);

%Tensión de referencia para el regulador de tensión de la excitación
Uref=El/K + abs(Ug);

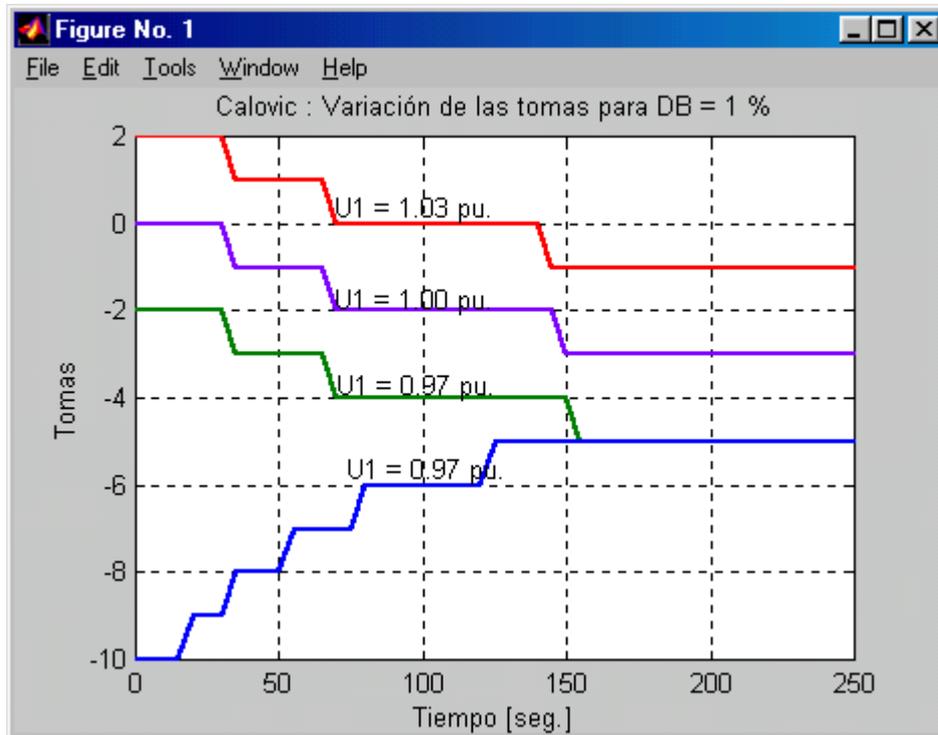
```

ANEXO II
Paper Calovic, Milan

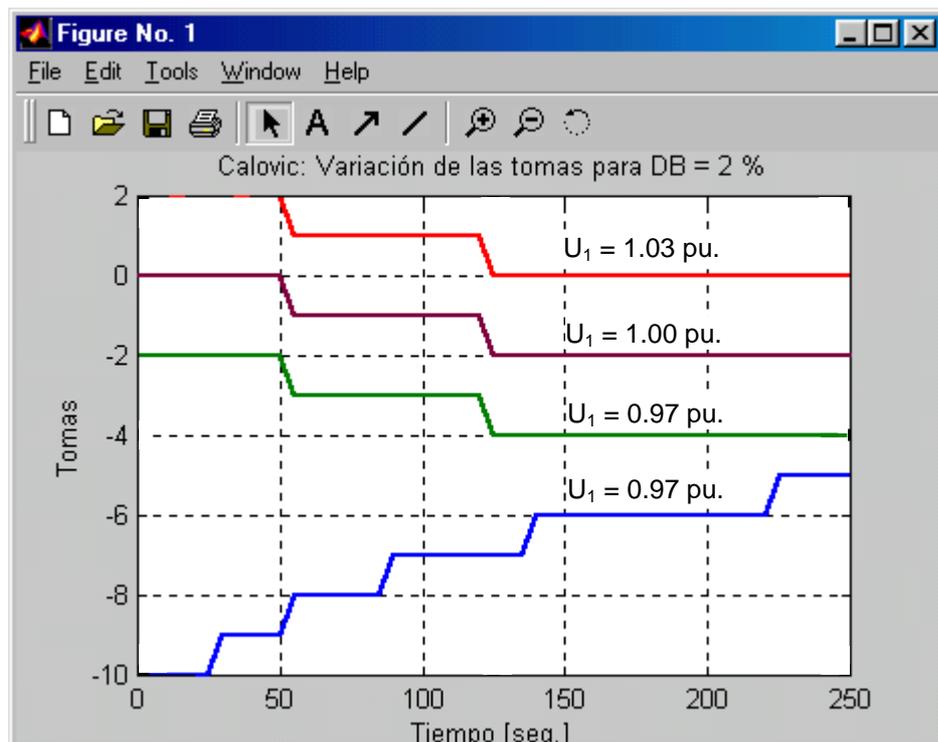
Nota.- En el documento original se incluye el Paper al que se hace referencia en la Bibliografía.

Resultados del modelo en Simulink del transformador con cambiador automático de tomas

Caso 1 : DB = 1 %



Caso 2 : DB = 2%



ANEXO III

P. Anderson, “Power System Stability”

Nota.- En el documento original se incluyen fragmentos (pags. 90, 120, 121, y 442-443 del Apéndice D) de la publicación a la que se hace mención en la bibliografía.