

INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL  
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
SECCION DE GRADUADOS.



BIBLIOTECA  
SECCION GRADUADOS

24 " ESTUDIO DE ESTABILIDAD DINAMICA  
EN SISTEMAS MULTIMAQUINAS " 22

TESIS, QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL  
GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN-  
INGENIERIA ELECTRICA EN SISTEMAS DE POTENCIA PRE-  
SENTA DANIEL OLGUIN SALINAS.

MEXICO, D.F., ABRIL 1976.



BIBLIOTECA  
SECCION GRADUADOS

## RECONOCIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a las siguientes personas.

M. en C. Gilberto Enriquez Harper, por su asesoría y colaboración en el desarrollo de este trabajo.

Dr. Florencio Aboytes por sus consejos y orientación, lo cual fue de gran valía para mi trabajo.

Así como al personal de operación de los centros de Computación de:

" Centro Nacional de Cálculo del I.P.N."

e

" Imperial College of Science and Technology "

Quiero mencionar especialmente al " Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología ", ya que la ayuda económica recibida fue fundamental para el desarrollo de mis estudios.

También quiero agradecer la colaboración de mi madre Sra. Luz Ma. Salinas en la transcripción del trabajo final.

BGT-376

A mis abuelos Horacio y Elisa

A mi madre Luz Ma. Salinas E.

A mis tíos Armando, Dulce Ma,  
Esther y Artemis .

A mis hermanos Ma. del Pilar, Horacio, Pepe,  
Armendo y Patricia.

A mi esposa Amparo

A mi hija Marisol

# I N D I C E.

	PAGINA
INTRODUCCION - - - - -	1
CAP. I.- EL CONCEPTO DE ESTABILIDAD EN LOS SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA - - - - -	4
1.1.- CONCEPTO DE ESTABILIDAD - - - - -	4
1.2.- ECUACION DEL ANGULO DE POTENCIA - - - - -	6
1.3.- EL ESTUDIO DE ESTABILIDAD - - - - -	8
1.4.- ECUACION DE OSCILACION - - - - -	12
1.5.- COMBINACION DE MAQUINAS - - - - -	15
CAP. II.- FORMACION DEL MODELO DE LA RED Y ESTUDIO DE FLUJOS NECESARIO - - - - -	19
2.1.- FORMACION DEL MODELO DE LA RED PARA LA SOLUCION DE FLUJOS - - - - -	19
2.2.- ANALISIS DEL PROBLEMA DE FLUJOS DE CARGA EN UN SISTEMA DE POTENCIA - - - - -	23
2.3.- METODO DE GAUSS-SEIDEL - - - - -	27
2.4.- FACTORES DE ACELERACION - - - - -	29
2.5.- SOLUCION DEL PROBLEMA DE FLUJOS POR EL METODO DE ADMITANCIA NODAL Y BUS Y GAUSS SEIDEL - - - - -	30
2.6.- APLICACION DEL METODO PARA LA RED EN ES- TUDIO - - - - -	35
CAP. III.- EL ESTUDIO DE ESTABILIDAD A SISTEMAS MULTIMAQUINAS POR LOS METODOS DE RED SIMPLIFICADA Y NODOS RETENIDOS - - - - -	41
3.1.- ESTABILIDAD TRANSITORIA EN SISTEMAS MULTIMAQUINAS CON REDUCCION DE LA - RED A LAS BARRAS INTERNAS DE LAS MAQUINAS -	43
3.2.- REPRESENTACION DE LAS CARGAS - - - - -	49
3.3.- METODO DE RUNGE KUTTA PARA LA SOLUCION DE LAS ECUACIONES DE OSCILACION - - - - -	56
3.4.- RESUMEN DE LOS PASOS PARA EL ESTUDIO DE ESTABILIDAD TRANSITORIA POR EL METODO DE REDUCCION DE LA RED. - - - - -	60
3.5.- ESTUDIO DE ESTABILIDAD TRANSITORIA EN SISTE- MAS MULTIMAQUINAS POR EL METODO DE BARRAS - RETENIDAS - - - - -	64

	PAGINA
CAP. IV.- ANALISIS DE RESULTADOS EN EL MODELO EMPLEADO - - - - -	71
4.1.- RESULTADOS PARA EL METODO DE REDUCCION DE LA RED - - - - -	72
4.2.- RESULTADOS PARA EL METODO DE NODOS RETENIDOS. CONSIDERANDO TRES TIPOS DE REPRESENTACION DE LA CARGA - - - - -	85
CAP. V .- ESTUDIO DE ESTABILIDAD DINAMICA EN SISTEMAS MULTIMAQUINAS - - - - -	110
5.1.- METODO DE ANALISIS PARA LA MAQUINA SINCRONA - - - - -	111
5.2.- CONTROL DE MAQUINAS SINCRONAS - - - - -	112
5.3.- ECUACIONES GENERALES DE LA MAQUINA - - - - -	113
5.4.- MODELOS DE MAQUINAS SINCRONAS PARA ES - TUDIOS DE ESTABILIDAD - - - - -	116
5.5.- REGULADORES DE VOLTAJE - - - - -	125
5.6.- REGULADORES DE VELOCIDAD - - - - -	133
5.7.- REPRESENTACION DEL SISTEMA DINAMICO DE ECUACIONES, EN FORMA DE VARIABLES DE ESTADO. - - - - -	134
5.8.- RESULTADOS OBTENIDOS - - - - -	137
CONCLUSIONES - - - - -	164
RECOMENDACIONES PARA INVESTIGACIONES FUTURAS - - - - -	167
REFERENCIAS - - - - -	168

## INTRODUCCION

El crecimiento de los sistemas eléctricos de potencia, - aunado a la complejidad tecnológica actual, ha manifestado una situación crítica, y que es su operación desde un punto de vista óptimo, es decir dicho sistema deberá ser confiable, tanto en el estado permanente como en el transitorio. Así, <sup>de</sup> la capacidad que existe en un sistema para detectar y corregir esta situación dependerá, la confiabilidad del mismo.

En el presente trabajo se analizará uno de los problemas críticos a que enfrenta un sistema eléctrico de potencia y que es el " Estudio de estabilidad transitoria y dinámica en sistemas-multimáquinas". El problema de estabilidad se puede detectar físicamente cuando el rotor de las máquinas oscile ya sea debido a pequeñas perturbaciones ( estado permanente ), ó debido a grandes perturbaciones las cuales son ocasionadas por fallas en el sistema. - Aquí en particular se considerará el comportamiento del sistema - después de que ocurre una falla de corto circuito trifásico en una de las barras de un generador.

Dos métodos son utilizados para éste estudio:

- 1.- El método de reducción de la red a los nodos internos de las máquinas.
- 2.- El método de nodos retenidos.

En el primer método solo se analiza el estado transitorio, y se puede considerar como un método optimista. El segundo método es utilizado tanto para el estado transitorio como para el estado-dinámico, éste método se puede considerar mas exacto ya que no se-

hace ninguna reducción de la red como en el primero y además se puede hacer una representación más adecuada para cada uno de los elementos que intervienen en la red.

Antecedente fundamental para el presente trabajo fue entre otras, la referencia [8], de donde se obtuvo el modelo de sistema utilizado: el cual consta de cuatro máquinas, siete líneas y seis barras.

Como introducción a éste estudio, en el capítulo I se enunciarán una serie de antecedentes teórico-prácticos como: concepto de estabilidad, límite de estabilidad, ecuación de oscilación, y se da una breve explicación como trabajar con máquinas equivalentes. Para cualquier estudio de estabilidad es fundamental el conocer las condiciones iniciales del sistema, en el capítulo II se da una descripción del método utilizado, en el que se analiza un estudio de flujos de carga para el sistema en consideración, mediante el método numérico de Gauss - Seidel. En el capítulo III se describen los métodos enunciados (1,2) y se aplican al estudio de estabilidad transitoria, considerando diferentes tiempo de liberación de la falla, así como diferentes representaciones de carga. Posteriormente en el capítulo IV, se analizan los resultados obtenidos por los métodos descritos. Finalmente en el capítulo V se hace el estudio de estabilidad dinámica considerando el efecto de saliencia en los generadores, así como la acción del sistema de excitación y el sistema de regulación de velocidad, haciendo la representación de las ecuaciones diferenciales en la forma de variables de estado, y por último se dan los resultados obtenidos.

Es importante mencionar que en la actualidad la forma usual de atacar este tipo de problemas es con la ayuda de computadoras di



giales aplicadas a la solución del modelo matemático que representa al sistema real, vía análisis numérico; en el presente trabajo tres programas fueron utilizados.

- 1.- Programa aplicado al estudio de flujos de carga basado en referencia [2], con modificaciones para cambiar el método de análisis numérico con objeto de obtener una convergencia mas rápida en la solución.
- 2.- Programa utilizado para el estudio de estabilidad transitoria en sistemas multimáquinas por el método de reducción de la red, basado en referencia [8].
- 3.- Programa utilizado para el análisis de estabilidad en sistemas multimáquinas por el método de nodos retenidos. Dos casos pueden ser tratados mediante este programa: Estabilidad transitoria y estabilidad dinámica, siendo posible considerar diferentes modelos de máquinas Sincronas.

Para la obtención de resultados referentes al ángulo de carga se utilizo una subrutina de biblioteca llamada MICFOR.

El trabajo de computación fue realizado en computadoras CDC.

## CAPITULO I

## EL CONCEPTO DE ESTABILIDAD EN LOS SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA.

El término estabilidad de sistemas eléctricos de potencia, es un concepto que se aplica a los sistemas eléctricos de corriente alterna, donde la tendencia del sistema, ó de sus partes componentes a desarrollar fuerzas para mantener el sincronismo y el equilibrio se conoce como Estabilidad.

## 1.1 CONCEPTO DE ESTABILIDAD.

Se dice que un sistema es estable cuando todas sus máquinas síncronas permanecen en sincronismo ó en paso.

La inestabilidad es lo contrario, es decir, el sistema es inestable cuando alguna ó algunas de las máquinas salen de sincronismo.

Otro concepto de importancia es lo que se conoce como límite de estabilidad, éste se considera como el máximo flujo de energía posible que puede pasar por un punto particular determinado del sistema, cuando todo el sistema ó parte de él está en régimen de estabilidad.

La estabilidad en sistemas eléctricos de potencia se divide en tres estudios:

- a).- Estabilidad en estado transitorio con una escala de tiempo de 0-1seg.
- b).- Estabilidad en estado dinámico, con escala en tiempo de 1 - 300 Seg.
- c).- Estabilidad en estado permanente, para mas de 300 Seg.

Los términos de estabilidad y límite de estabilidad se aplican tanto al régimen permanente como al transitorio. El límite de estabilidad en régimen permanente se refiere al máximo flujo posible de energía que puede pasar por un punto determinado sin que haya pérdida de estabilidad cuando se aumenta energía gradualmente. El límite de estabilidad transitorio se refiere al máximo flujo de energía posible por un punto determinado, sin pérdida de estabilidad al presentarse una brusca perturbación.

En éste trabajo se tratará lo referente a los problemas de estabilidad transitoria y dinámica en un sistema multimáquinas, ya que son los puntos de interés para el desarrollo completo del tema.

Los estudios de estabilidad transitoria y dinámica dan información acerca de si el sistema permanece en sincronismo durante disturbios causados por pérdidas de generación, cambios bruscos de carga, cortos circuitos momentaneos u otros cambios en la red. También dara los cambios en corrientes, voltajes, ángulos de carga, potencias, durante e inmediatamente despues del disturbio.

La perdida de sincronismo de las máquinas originan fenómenos -- muy desagradables como son:

- a).- Una redistribución de la potencia eléctrica en la red, al modificar se sus condiciones normales.
- b).- Dicho cambio brusco de potencia eléctrica que entra a la red causa un desequilibrio en los pares aplicados a los rotores de las máquinas, ya que la potencia mecánica que entra a cada máquina no cambia inmedistamente. Este desequilibrio es lo que se conoce como potencia de aceleración.
- c).- La respuesta electromecánica está proxima con una redistribución de la potencia de salida de las máquinas, de acuerdo con la energía cinética de las masas rotatorias. Si en el sistema existen motores -- grandes, sus inercias también se afectan por esta redistribución de carga.
- d).- Si la inestabilidad del sistema fue originada por una falla (corto circuito), la liberación de dicha falla no hace que necesariamente sea estable el sistema.
- e).- Se producen fluctuaciones de voltaje que pueden continuar aun despues de liberar la falla.

- f).- Los generadores cuando salen de sincronismo pueden no - constituir una fuente de potencia eléctrica, sino que, - al contrario demandan energía del sistema, es decir se - comportan como motores.
- g).- Una máquina ó grupo de máquinas puede quedar en sincro - nismo o fuera de sincronismo después de la liberación de la falla.
- h).- Se tiene una operación incorrecta de los relevadores es - decir, que los relevadores pueden operar en falso de tal forma que los interruptores pueden interrumpir circuitos innecesarios.

De todo lo anterior se puede concluir que la inestabilidad es un fenómeno indeseable en los sistemas de potencia, ya que produce un mal efecto en la calidad del servicio y como consecuencia un sistema de potencia deberá ser diseñado y operado de tal forma que la inestabilidad ocurra muy rara vez.

Para introducirnos al concepto de estabilidad conviene analizar un sistema elemental generador Bus infinito conectado a través de una línea de transmisión y se analiza su comportamiento en el estado permanente, haciendolo extensivo al estado transitorio.

### 1.2. Ecuación del ángulo de Potencia.

Para simplificar las ideas lo mejor posible, la resistencia del generador será despreciada, en la práctica esta suposición es usualmente razonable. Las figuras 1.1 y 1.2 muestran un diagrama esquemático de una máquina conectada a un bus infinito y su diagrama vectorial correspondiente.

Si las pérdidas son despreciadas la potencia de la turbina es igual a la potencia del generador.

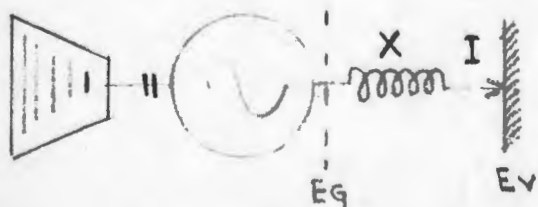


FIG 1.1

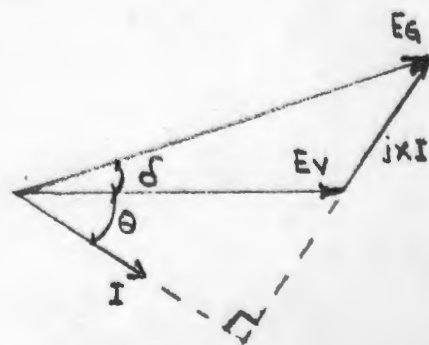


FIG 1.2

$$\bar{E}_G = \bar{E}_V + J X \bar{I}$$

Tomando como referencia a  $E_V$

$$\bar{E}_V = E_V \angle 0^\circ$$

$$\bar{E}_G = E_G \angle \delta$$

$$\bar{E}_G^* = E_G \angle -\delta$$

La potencia que el generador entrega al sistema:

$$P = \operatorname{Re}(\bar{E}_G^* \bar{I})$$

$$I = \frac{\bar{E}_G - \bar{E}_V}{J X}$$

$$P = \operatorname{Re}\left(\bar{E}_G^* \frac{\bar{E}_G - \bar{E}_V}{J X}\right)$$

$$P = \operatorname{Re}\left(E_G \angle -\delta \frac{E_G \angle \delta - E_V \angle 0^\circ}{X \angle 90^\circ}\right)$$

Desarrollando y simplificando:

$$P = \frac{E_G E_V}{X} \operatorname{Sen} \delta \quad \text{1.1}$$

La ecuación 1.1 se conoce como ecuación del ángulo de potencia y se ve que la potencia transmitida del generador al sistema depende del defasamiento entre  $E_G$  y  $E_V$ .

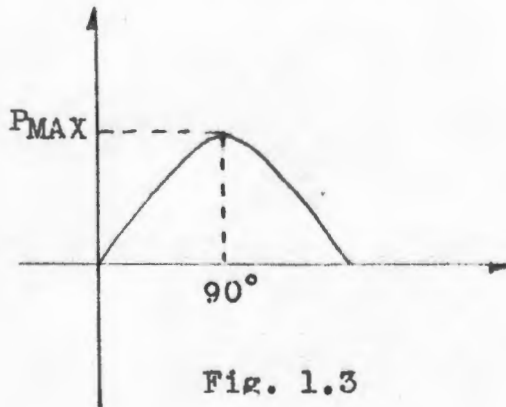
La máxima potencia transmitida en estado permanente del generador al sistema ocurre cuando  $\delta = 90^\circ$

$$P_{MAX} = \frac{E_G E_V}{X} \quad \text{1.2}$$

Se dice que  $P_{MAX}$  es el límite de estabilidad en estado permanente

nente y representa la máxima potencia que puede transmitirse sin perder el sincronismo.

La ecuación 1.1 se puede graficar y se obtiene lo que se conoce como curva del ángulo de potencia.



La potencia transmitida durante un disturbio especificado se conoce como límite de estabilidad transitoria, abajo de tal límite el sistema es estable y por arriba de él el sistema es inestable.

### 1.3 El estudio de la estabilidad.

El problema de la estabilidad en los sistemas de potencia ha sido objeto de una intensa investigación, efectuándose métodos experimentales en laboratorios y desarrollándose métodos analíticos que se han comprobado con pruebas.

Dentro de los métodos experimentales se tiene el estudio de estabilidad por medio del tablero analizador de redes, éste método en la actualidad para fines prácticos es poco usado debido a que las computadoras digitales desarrollan el mismo trabajo con mucha mayor rapidez y admiten problemas de mayor magnitud.

Otro método experimental corresponde a la Micro-Red que es un modelo dinámico sobre el cual es representado a escala un sistema y además tiene la ventaja de que puede trabajar en tiempo real. En éste método

do todo es mas preciso relativamente, ya que tanto máquinas como elementos de control no se representan por modelos matemáticos sino que se simulan a una escala adecuada. La limitación de éste método está dada por el tamaño de la red, pero resulta excelente desde un punto de vista pedagógico para el estudio del comportamiento de los generadores durante el transitorio.

Dentro de los métodos analíticos desarrollados para el estudio de estabilidad se tienen:

- 1).- Método de Clarke ( Diagramas circulares )  
para el estudio del comportamiento de los sistemas de potencia en estado permanente.  
Este método es aplicable solo a dos máquinas.
- 2).- Dos máquinas con dibujo de la curva de oscilación, empleando los métodos de peso a paso para la solución de las ecuaciones diferenciales, particularmente la ecuación de oscilación, dando la posición angular del rotor de las máquinas contra el tiempo.
- 3).- Estudio de estabilidad transitoria para dos máquinas ó dos grupos de máquinas por el criterio de áreas iguales.
- 4).- Estudio de estabilidad transitoria en un sistema multimáquinas con reducción de la red a las barras internas de las máquinas.
- 5).- Estudio de estabilidad transitoria en un sistema multimáquinas por el método de barras retenidas.

De los métodos mencionados anteriormente, en este trabajo trataremos con los últimos dos, ya que son los que tienen aplicación actualmente, utilizando computadoras digitales.

El análisis de cualquier sistema de potencia para determinar su estabilidad en régimen transitorio, lleva consigo la consideración de algunas de las propiedades mecánicas de las máquinas del sistema, ya que después de una perturbación cualquiera, las máquinas han de ajustar los angu

los relativos de sus rotores para cumplir las condiciones impuestas de transferencia de potencia. El problema es tan mecánico como eléctrico y es preciso tener bien presentes ciertos principios mecánicos al considerarlo. En la tabla 1.1 se dan las magnitudes que aparecen en los problemas relativos a la mecánica del movimiento rectilíneo ó de traslación, así como las magnitudes correspondientes a la mecánica de rotación. Las relaciones para los sistemas de rotación se aplican a la solución de los problemas de estabilidad transitoria, obteniéndose mas clara por comparación con las relaciones mas familiares de traslación.

TABLA 1.1 COMPARACION DE LAS MAGNITUDES UTILIZADAS EN LA MECANICA DE TRASLACION Y DE ROTACION.

Magnitud	TRASLACION			ROTACION			
	Simbolo	Ecuación	Unidad MKS	Magnitud	Simbolo	Ecuación	Unidad MKS
Longitud	S	- - - -	metro	DESPLAZAMIENTO Angular	$\theta$	$\theta = \frac{S}{R}$	Radian
Masa	M	- - - -	KILOGRAMO	Momento De Inercia	I	$I = \int r^2 dm$	KILO GRAM Metro <sup>2</sup>
Tiempo	T	- - - -	segundo	Tiempo	t	- - - -	Segundo
Velocidad	v	$v = \frac{ds}{dt}$	METRO/SEG	VELOCIDAD Angular	$\omega$	$\omega = \frac{d\theta}{dt}$	Radian/Seg
Aceleración	a	$a = \frac{dv}{dt}$	METRO/SEG <sup>2</sup>	ACELERACION Angular	$\alpha$	$\alpha = \frac{d\omega}{dt}$	Radian/seg <sup>2</sup>
Fuerza	F	$F=ma$	Newton	Par	T	$T=Fr=I\alpha$	NEWTON - METRO JOULE / RADIAN
Cantidad de Movimiento	M'	$M' = mv$	NEWTON-SEG	MOMENTO ANGULAR CINÉTICO	M	$M = I\omega$	JOULE-SEG/RADIAN
TRABAJO	W	$w = \int F ds$	Joule	Trabajo	W	$w = \int T d\theta$	Joule
POTENCIA	P	$P = \frac{dw}{dt}$	Watt	Potencia	P	$P = \frac{dw}{dt} = T\omega$	Watt

La energia cinetica de un cuerpo con movimiento de rotación es-  
ta dada por:

$$E. C. = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad \text{Joules} \quad 1.3$$



que es análoga a la energía cinética de traslación  $\frac{1}{2} m v^2$ .

Puesto que  $\omega$  esta en radianes/seg. de la ecuación 1.3 se puede expresar en Joules - SEG por radianes al cuadrado; de lo cual se deriva la unidad de momento angular o cinético  $M$  que es Joule - SEG / Radian.

Es mas comun expresar la energía almacenada por una máquina eléctrica en megajoules y en ingeniería los ángulos se miden en grados. De acuerdo con esto el momento cinético se mide en megajoules-SEG/Grado eléctrico. Cuando  $M$  se calcula a partir de  $M = I_w$ , con  $W$  igual a la velocidad sincrónica de la máquina, se le llama constante de inercia. Esto nos puede llevar a una confusión, puesto que existe otro término designado por  $H$  al que también se le dá el nombre de Constante de inercia. La constante  $H$  se define como los mega joules de energía almacenada en una máquina a la velocidad sincrónica dividida por la potencia aparente -- de regimen de la máquina.

$$H = \frac{\text{Energía almacenada en Mega joules}}{\text{Regimen de la maquina en mega-voltamperes}}$$

Si  $G =$  Mega volt-Amperes de la máquina

$GH =$  Energía almacenada en Mega Joules de la ecuación 1.3

$$\text{ENERGIA ALMACENADA} = \frac{1}{2} I_w^2 = \frac{1}{2} MW \quad \text{--- 1.4}$$

Si  $M$  esta en megajoules- Seg/grado y  $W$  en grados por segundo, la energía almacenada estará dada en la ec 1.4 en megajoules.

También se tiene que  $W = 2\pi f$  grados eléctricos por segundo, siendo  $f$  la frecuencia en ciclos por segundo, entonces:

$$GH = \frac{1}{2} M ( 2\pi f )$$

$$M = \frac{GH}{\pi f} \text{ Mega -Joules- Seg/grado - 1.5.}$$

Como veremos posteriormente,  $M$  se debe determinar para estudiar --

la estabilidad en régimen transitorio, M depende del tamaño y tiro de máquina, mientras que H no varía mucho con el tamaño, hay un reajuste para cada clase de máquina dependiendo de su capacidad.

#### 1.4 ECUACION DE OSCILACION.

Las leyes de rotación son aplicables al movimiento de las máquinas sincronas así el par aplicado a la máquina es igual al producto del momento de inercia por la aceleración.

$$T = I \alpha \quad 1.6$$

Si  $\theta$  es el desplazamiento angular en radianes

$$\alpha = \frac{d^2 \theta}{d t^2}$$

Por lo que la ecuación 1.6 queda:

$$T = I \frac{d^2 \theta}{d t^2} \quad 1.7$$

Para el caso de una máquina sincrona T es el par neto ó sea suma algebraica de todos los pares actuando en la máquina, incluyendo el par en el eje, el par debido a pérdidas rotacionales y el par electromagnético.

Si  $T_m$  es el par en el eje corregido para el par debido a las pérdidas electromagnéticas  $T_e$ , ambos positivos para la acción generador ( entrada mecánica y salida eléctrica) y negativos para la acción motor.

El par neto que produce aceleración es la diferencia algebraica del par en el eje y el par electromagnético de retardación.

$$T_a = T_m - T_e \quad 1.8$$

En estado permanente esta diferencia es cero y no hay aceleración. Durante los disturbios considerados en el estudio de estabilidad transitoria esta diferencia existe y es de aceleración ó retardación,-

dependiendo de si la diferencia es positiva o negativa.

La ecuación 1.7 queda como:

$$I \frac{d^2 \theta}{d t^2} = T_a = T_m - T_e \quad 1.9$$

Ahora el problema es resolver la ecuación 1.9 para determinar la posición angular  $\theta$  del rotor de la máquina como función del tiempo.

Es mas conveniente medir la posición angular y la velocidad angular con respecto a un eje de referencia que gira a la velocidad de sincronismo que medirla con respecto a un eje fijo, así si  $\omega_s$  es la velocidad de sincronismo y  $\delta$  es el desplazamiento angular del rotor con respecto al eje que gira a la velocidad de sincronismo.

$$\delta = \theta - \omega_s t \quad 1.10$$

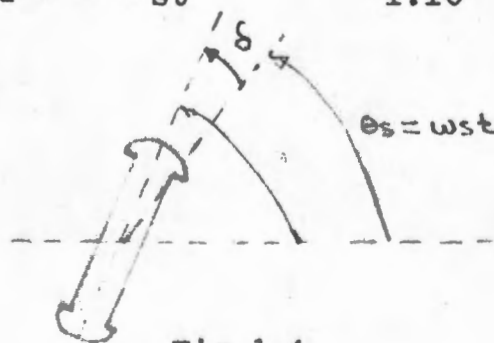


Fig 1.4

Derivando 1.10 con respecto al tiempo:

$$\begin{aligned} \frac{d\delta}{dt} &= \frac{d\theta}{dt} - \omega_s \\ \frac{d^2\delta}{dt^2} &= \frac{d^2\theta}{dt^2} \end{aligned} \quad 1.11$$

De 1.9 y 1.11 resulta:

$$I \frac{d^2\delta}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad 1.12$$

Si multiplicamos la ecuación 1.12 por la velocidad  $W$ .

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad 1.13$$

La ecuación 1.13 se conoce como ecuación de oscilación, es la que gobierna el movimiento de cada máquina. La solución de esta ecuación da a  $\delta$  como función del tiempo y la gráfica se conoce como curva de oscilación.

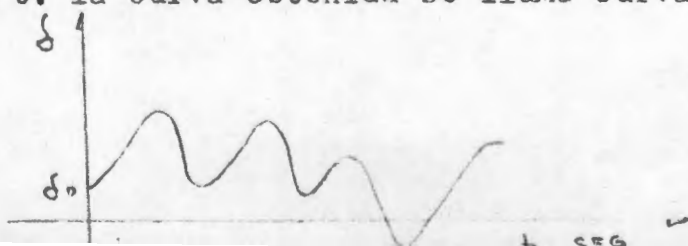
Para un sistema de varias máquinas se tendrán tantas ecuaciones como 1.13, como máquinas se tengan en el sistema ó sea en forma general.

$$M_i \frac{d^2\delta_i}{dt^2} = P_{mi} - P_{ei} \quad 1.13'$$

$$i = 1, 2 \dots n \text{ de máquinas.}$$

Si el sistema consta de una a tres máquinas ó de mas máquinas que puedan reducirse en máquinas equivalentes cuyo número no sea mayor de tres, se puede resolver por integración numerica aunque en ocasiones esto resulta tedioso; para mas de tres máquinas se emplea el analizador de redes y actualmente este tipo de problemas o sea para sistemas multi-máquinas se resuelve por medio de computadora digital. Siempre para resolver el problema es necesario primero conocer las condiciones iniciales del problema.

Con los valores de  $\delta$  para distintos tiempos se suelen graficar ó sea  $\delta$  contra  $t$ . la curva obtenida se llama curva de oscilación



Si la curva de oscilación indica que el ángulo  $\delta$  empieza a disminuir después de pasar por un máximo, el sistema normalmente no perderá la estabilidad y las oscilaciones de  $\delta$  alrededor del equilibrio se harán cada vez más pequeñas hasta desaparecer.

### 1.5 COMBINACION DE MAQUINAS.

Aparentemente la cantidad de trabajo de un estudio de estabilidad se ve aumentado considerablemente si el número de máquinas síncronas es grande, especialmente si la red se resuelve algebraicamente.

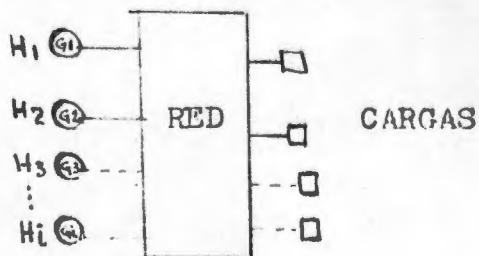
Con objeto de simplificar el trabajo es conveniente reducir el número de máquinas que se representan separadamente a un mínimo.

El número de máquinas puede reducirse combinando varias máquinas que oscilan en la misma forma o en forma parecida, por una máquina equivalente, siempre y cuando sea posible.

Si varias máquinas acopladas mecánicamente (con tal relación de polos y velocidad y que todas generen a la misma frecuencia), se pueden forzar a oscilar igual, es decir que tengan iguales velocidades y aceleraciones aunque no tengan la misma posición angular. Entonces la constante de inercia puede definirse como la potencia requerida para producir aceleración unitaria y entonces la potencia ó el par requerido para producir igual aceleración en todas las máquinas, es la suma de las potencias ó pares requeridos para acelerar las máquinas individuales, la constante de inercia del grupo, es la suma de las constantes de inercia de las máquinas individuales.

Si las máquinas oscilan en la misma forma, aunque no estén mecánicamente acopladas, las condiciones en una red son las mismas que si estuvieran mecánicamente acopladas. Por tanto: La Constante de Inercia de la máquina equivalente se toma como la suma de las constantes de Inercia de las Maquinas Individuales (referidas a una potencia base común-

en  $MVA$ , si la potencia esta en por unidad). es decir.



$$H_e = \sum_{i=1}^n H_i$$

$n = \text{n}^\circ \text{ de máquinas.}$

Si las máquinas que se van a combinar estan en paralelo en sus terminales, entonces por el teorema de Thevenin, el efecto sobre la red es el mismo, que si fueran reemplazadas por una fuente. de f.e.m. sencilla, igual al voltaje de circuito abierto del grupo de maquinas, en serie con una impedancia sencilla, igual a la impedancia vista desde las terminales cuando las f.e.m. son cero.

Por lo tanto si despreciamos resistencia, LA REACTANCIA DE LA MAQUINA EQUIVALENTE ES UNA REACTANCIA IGUAL A LA COMBINACION EN PARALELO DE LAS REACTANCIAS DE LAS MAQUINAS INDIVIDUALES ( Referidas a una base comun si estan en P.v. ).

$$X_e = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{X_i}}$$

$n = \text{número de máquinas.}$

La F. e.m. equivalente es un promedio de las f.e.m. de las máquinas individuales.

Si las máquinas oscilan igual, la f.e.m. equivalente es constante en magnitud y tiene la misma frecuencia que las f.e.m. individuales.

LA F.E.M. DE LA MAQUINA EQUIVALENTE ES TAL QUE LA MAQUINA EQUIVALENTE SUMINISTRA INICIALMENTE A LA RED LAS MISMAS POTENCIAS ACTIVAS Y REACTIVAS QUE EL GRUPO DE MAQUINAS REEMPLAZADO.

Si las máquinas por combinarse no estan en paralelo en sus terminales, sus reactancias no pueden combinarse. Los puntos ficticios entre la reactancias y las fuentes de voltajes internos de cada máquina son conectados también, sin embargo, conectando en paralelo varias fuentes de voltaje y conectando a un mismo punto todas las reactancias y los otros puntos los cuales son diferentes puntos de la red.

Las fuentes de voltaje conectadas en paralelo son reemplazadas por una fuente única la cual, como en el caso anterior se ajusta para suministrar inicialmente a la red las mismas potencias activas y reactivas como las fuentes que se reemplazaron.

Decidir si un grupo de máquinas puede combinarse o no para obtener una máquina equivalente no es un problema sencillo, ya que la única prueba de si un grupo de máquinas puede combinarse en un caso dado, sin tener mucho error en las curvas de oscilación relacionadas con la estabilidad del sistema, es que se calculen las curvas de oscilación primero con las máquinas sin combinar y luego con las máquinas combinadas en una equivalente y comparar resultados.

Si las curvas de oscilación obtenidas con las máquinas no combinadas muestran que un grupo de máquinas oscila en forma semejante esto nos indica que estas máquinas pueden ser combinadas sin mucho error en una máquina equivalente. Aunque ninguno de estos dos criterios nos simplifica el trabajo en el caso de que sean aplicados, ya que para combinar las máquinas se tendrá que conocer primero la curva de oscilación de cada máquina, y en este caso la combinación de máquinas duplicaría el trabajo.

Por tal razón para combinar las máquinas en una máquina equivalente se toman experiencias que fueron desarrolladas en circunstan --

cias semejantes para un problema dado.

Algunos lineamientos que pueden tomarse para la combinación de máquinas son los siguientes:

- 1).- Una disminución de la impedancia de conexión entre ellas ó que la impedancia sea baja ( acoplamiento rígido).
- 2).- La proximidad de sus posiciones angulares iniciales.
- 3).- La similitud de sus constantes de inercia.
- 4).- La distancia a que se encuentren de la falla.

Es costumbre combinar todas las máquinas de una misma estación ( si la estación no es operada en forma seccionada). Aunque las máquinas tengan diferentes capacidades, impedancias, constantes de inercia.

Dos o mas estaciones que están conectadas por medio de impedancias bajas pueden ser combinadas.



## CAPITULO II

## FORMACION DEL MODELO DE LA RED Y ESTUDIO DE FLUJOS NECESARIO.

En cualquier estudio de estabilidad, un estudio de flujos de carga se debe hacer primero para obtener las condiciones iniciales del sistema. El método de Gauss Seidel fue utilizado en la solución de este cálculo de flujos de carga para el sistema multimáquinas.

El método de flujos de carga descrito en este capítulo básicamente se puede definir como un análisis de circuitos. Los estudios de flujos de carga básicamente dan la información de voltajes, corrientes, flujos de potencia real y reactiva de cada bus y cada línea del sistema.

La formulación de las técnicas de solución pueden considerarse como:

- a).- Primeramente seleccionar un modelo ó marco de referencia de la red
- b).- Implementación de un método de análisis numerico.
- c).- Modificación de la tecnica de solución basica que permita la simulación de los buses de voltaje, controlado, intercambiadores de Taps de los transfr.

El estudio de flujos de carga está basado en una representación de la red con un marco de referencia en base a buses y la solución de tal estudio se obtiene mediante el planteamiento de un sistema de ecuaciones para la red y la implementación de un método matemático para la solución de las ecuaciones planteadas. Para plantear estas ecuaciones se hace uso de las leyes de Kirchhoff.

## 2.1 FORMACION DEL MODELO DE LA RED PARA LA SOLUCION DE FLUJOS.

Como se menciona anteriormente el método que se aplicará es el método de buses ó admitencia de bus ( $Y_{bus}$ ) por facilidad y además porque existe una relación directa entre la red real en base de bus y la red equivalente en base de nodos.

El método de  $Y_{Bus}$  se basa en las soluciones de circuitos por el método de nodos por tal motivo veremos un desarrollo elemental para comprenderlo en el siguiente circuito.

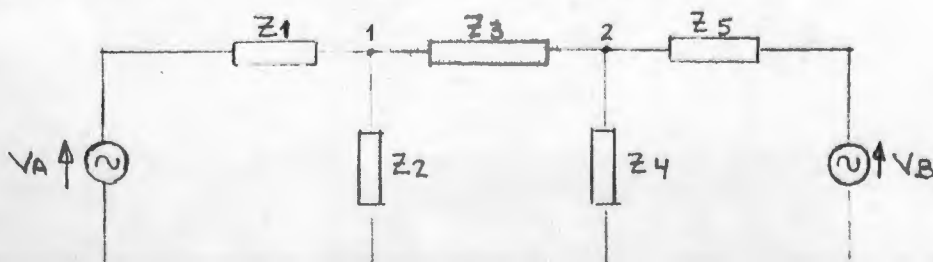


Fig 2.1

Por el método de nodos se trata de determinar los voltajes - de nodo que son aquellos medidos entre un nodo cualquiera con respecto a un nodo de referencia.

Para determinar los voltajes se determinan primeramente las - corrientes, haciendo uso de la Ley de Kirchhoff de corrientes.

Aplicando la Ley de Kirchhoff de corrientes para el nodo 1.

$$\sum I \text{ Nodo} = 0$$

$$\frac{V_1 - V_A}{Z_1} + \frac{V_1}{Z_2} + \frac{V_1 - V_2}{Z_3} = 0$$

$$V_1 \left( \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} \right) - \frac{V_2}{Z_3} = \frac{V_A}{Z_1} \quad 2.1$$

Para el nodo 2

$$\frac{V_2 - V_1}{Z_3} + \frac{V_2}{Z_4} + \frac{V_2 - V_B}{Z_5} = 0$$

$$V_2 \left( \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_4} + \frac{1}{Z_5} \right) - \frac{V_1}{Z_3} = \frac{V_B}{Z_5} \quad 2.2$$

$$\text{Como } Y = \frac{1}{Z}$$

Las ecuaciones 2.1 y 2.2 quedan:

$$V_1 (Y_1 + Y_2 + Y_3) - V_2 Y_3 = I_A \quad 2.3$$

$$V_2 (Y_3 + Y_4 + Y_5) - V_1 Y_3 = I_B \quad 2.4$$

Se define como admitancia propia del nodo a la suma de admittancia que inciden a el. Y la admitancia entre nodos se le conoce como admitancia mutua. Asi que:

$$Y_1 + Y_2 + Y_3 = Y_{11} \text{ Admittancia propia del nodo 1}$$

$$Y_3 + Y_4 + Y_5 = Y_{22} \text{ Admittancia propia del nodo 2}$$

$$Y_3 = Y_{12} = Y_{21} \text{ Admittancia mutua entre dos nodos 1 y 2.}$$

Por lo que las ecuaciones 2.3 y 2.4 se pueden escribir como:

$$V_1 Y_{11} + V_2 Y_{12} = I_A \quad \text{2.5}$$

$$V_1 Y_{21} + V_2 Y_{22} = I_B \quad \text{2.6}$$

Las incognitas son los voltajes  $V_1$  y  $V_2$

En forma matricial:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \end{bmatrix} \quad \text{2.7}$$

En forma compacta.

$$Y V = I \quad \text{2.8}$$

Para un sistema de mayor número de nodos se procede en forma semejante y se puede obtener:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \dots & Y_{1K} & \dots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & & Y_{2K} & & Y_{2N} \\ Y_{K1} & Y_{K2} & Y_{K3} & & Y_{KK} & & Y_{KN} \\ Y_{N1} & Y_{N2} & Y_{N3} & & Y_{NK} & & Y_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_K \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_K \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} \quad \text{2.9}$$

Desarrollando para la fila K.

$$Y_{K1} V_1 + Y_{K2} V_2 + Y_{K3} V_3 + \dots + Y_{Kk} V_k + \dots + Y_{KN} V_N = I_K \quad \text{2.10}$$

En forma compacta se puede escribir como:

$$\sum_{k=1}^N Y_{JK} V_k = I_K \quad \text{2.11}$$

$\bar{j} = 1, 2, \dots, N$

Se debe considerar que en una red intervienen basicamente generadores y cargas, y ademas tecnicamente deben ser controlables las potencias activa y reactiva, la tensión y la frecuencia en la red, ya sea en el suministro o en la carga según sea el caso. Todo esto obliga a tener una representación conveniente de la red que considere a estos factores.

De acuerdo a lo anterior los buses de un sistema eléctrico de potencia, para un estudio de flujos de carga se clasifican en tres tipos.

- 1.- Bus de Compensación (SLACK)
- 2.- Bus de generación.
- 3.- Bus de carga.

Las variables que intervienen en este estudio son: Tensión ( $V$ ), ángulo de fase ( $\delta$ ), potencia activa ( $P$ ) y Potencia reactiva ( $Q$ ). De estas cuatro variables dos son fijadas para cada bus dependiendo del tipo de que se trate, así tenemos la siguiente información relativa a estos buses.

- 1.- Bus de compensación (Slack)

El nodo compensador es aquel que se encuentra siempre a una estación generadora y en el que se fijan como cantidades conocidas el voltaje  $V$  y el ángulo de fase  $\delta$  y además esta máquina es tomada como referencia para medir el ángulo de fase (posición angular de los rotores) es decir en esta planta se hace  $\delta = 0$ . Las cantidades desconocidas son  $P$  y  $Q$ . La función en teoría de esta planta es la de suministrar las pérdidas de la red, es decir se supone que las pérdidas totales de un sistema se le cargan a una sola planta y el resto solo alimenta carga y potencia reactiva.

- 2.- Bus de generación.

Un Bus de generación es aquel que se encuentra conectado siempre a una estación generadora y en este bus se le da por conocidas la potencia activa  $P$  y el voltaje  $V$  ya que son cantidades físicamente controlables en una planta. Hay tantos Buses de generación como estaciones generadoras tenga la red menos uno, ya que una planta representa el bus Slack.

### 3.- BUS DE CARGA.-

Un bus de carga en un sistema de potencia es aquel en el que se encuentran conectadas cargas, entendiéndose estas: redes de distribución, unidades o circuitos de unidades, esto depende del sistema por analizar.

Para las cargas se conocen siempre las potencias activa  $P$  y reactiva  $Q$  dándose por desconocidas a  $v$  y  $\delta$ . Es decir cada bus tiene cuatro variables ( $P, Q, V, \delta$ ) de las cuales dos son conocidas, con lo cual tenemos dos incógnitas por bus, es decir se tiene

Tipo de Bus	Cantidades Conocidas	Cantidades Desconocidas
Compensador	$V, \delta$	$P, Q$
Generación	$P, V$	$Q, \delta$
Carga	$P, Q$	$V, \delta$

De lo anterior se puede ver que en un sistema de  $n$  buses se tienen  $2n$  incógnitas.

### 2.2.- ANALISIS DEL PROBLEMA DE FLUJOS DE CARGA EN UN SISTEMA DE POTENCIA.

Este método de solución parte de la aplicación de L.K.C. de cada bus.

Suponiendo que se tiene el siguiente sistema:

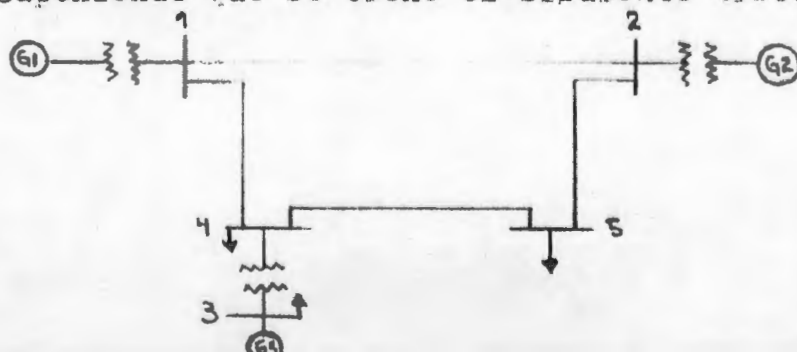


Fig. 2.2

Se plantean las ecuaciones para la solución del circuito - por el método de buses en forma matricial.

$$\begin{array}{|c|} \hline I_1 \\ \hline I_2 \\ \hline I_3 \\ \hline I_4 \\ \hline I_5 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} \\ \hline Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} \\ \hline Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} \\ \hline Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} \\ \hline Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline V_1 \\ \hline V_2 \\ \hline V_3 \\ \hline V_4 \\ \hline V_5 \\ \hline \end{array} \quad \text{2.12}$$

En general para un bus K tenemos de las ecuaciones 3.10 y 3.11 :

$$I_K = Y_{K1}V_1 + Y_{K2}V_2 + Y_{K3}V_3 + \dots + Y_{KK}V_K + \dots + Y_{Kn}V_n$$

$$I_K = Y_{KK}V_K + \sum_{\substack{j=1 \\ K \neq j}}^n Y_{Kj}V_j \quad \text{2.13}$$

$K = 1, 2, \dots, n$

$Y_{KK}, Y_{Kj}$  - elementos de la matriz y bus

$V_K, V_j$  - tensiones medidas de los buses K, j

$I_K$  - Corriente inyectada al bus K.

Para un sistema de n buses se tienen n ecuaciones como 2.13 y como se menciono anteriormente siempre se tienen dos cantidades desconocidas en cada bus ( $P, Q, V, \delta$ ) es decir 2 incognitas. Y como solamente se tienen n ecuaciones como 2.13 se requieren otras n ecuaciones. Estas ecuaciones son planteadas para cada bus y se conocen como ecuaciones de potencia, ya que expresan la potencia compleja o sus componentes, la función de la tensión del bus y su corriente inyectada: es decir para el bus K se tiene:

$$S_K = V_K^* I_K \quad \text{-----} \quad 2.14$$

$V_K^*$  es el conjugado de la tensión en el Bus K.

$$S_K = V_K^* I_K = P_K - j Q_K \quad \text{-----} \quad 2.15$$

De las ecuaciones 2.13 y 2.15 se obtiene la ecuación general para el bus K.

$$S_K = P_K - jQ_K = V_K^* \left( Y_{KK} V_K + \sum_{\substack{j=1 \\ K \neq j}}^n Y_{Kj} V_j \right) \quad 2.16$$

De acuerdo con la solución adoptada usando Y Bus como modelo matemático de la red la solución inmediata de 2.16 es la determinación de las tensiones para cualquier bus K .

Así de la ecuación 2.16:

Despejando la tensión para el Bus K

$$V_K = \frac{1}{Y_{KK}} \left( \frac{P_K - jQ_K}{V_K^*} - \sum_{\substack{j=1 \\ K \neq j}}^n Y_{Kj} V_j \right) \quad 2.17$$

Hay tantas ecuaciones iguales a 2.17 como buses tenga el sistema y se puede observar que una incógnita queda en función de su conjugado ( $V_K^*$ ) y el resto de las incógnitas ( $V_j$ ) lo cual hace que el sistema de ecuaciones sea no lineal y los métodos de solución tienen que ser iterativos.

También hay que agregar las cantidades  $P_K$  y  $Q_K$  las cuales dependen del tipo de bus que se trate.

Conviene sistematizar el método de solución por lo que la ecuación 2.17 se acostumbra escribirla en una forma simplificada haciendo los siguientes cambios:

$$L_K = \frac{1}{Y_{KK}} \quad \text{2.18}$$

$$CL_K = (P_K - jQ_K) L_K \quad \text{2.19}$$

$$YL_{Kj} = Y_{Kj} L_K = \frac{Y_{Kj}}{Y_{KK}} \quad \text{2.20}$$

De esta forma la ec. 2.17 queda:

$$V_K = \frac{CL_K}{V_K^*} - \sum_{\substack{j=1 \\ K \neq j}}^n YL_{Kj} V_j \quad \text{2.21}$$

El procedimiento normal para un estudio de flujos de carga es suponer un sistema balanceado y usar una representación unifilar-equivalente para la red de secuencia positiva. Puesto que no hay -- acoplamiento mutuo, la matriz YBus se puede formar por inspección y muchos de sus elementos serán cero. Seleccionando el bus 3 como el bus compensador en el sistema de cinco nodos se tienen las siguientes ecuaciones:

$$V_1 = \frac{CL_1}{V_1^*} - (YL_{12} V_2 + YL_{13} V_3 + YL_{14} V_4 + YL_{15} V_5) \quad \text{2.22}$$

$$V_2 = \frac{CL_2}{V_2^*} - (YL_{21} V_1 + YL_{23} V_3 + YL_{24} V_4 + YL_{25} V_5) \quad \text{2.23}$$

$$V_3 = \text{valor fijo especificado por ser el nodo compensador.} \quad \text{2.24}$$

$$V_4 = \frac{CL_4}{V_4^*} - (YL_{41} V_1 + YL_{42} V_2 + YL_{43} V_3 + YL_{45} V_5) \quad \text{2.25}$$

$$V_5 = \frac{CL_5}{V_5^*} = (YL_{51} V_1 + YL_{52} V_2 + YL_{53} V_3 + YL_{54} V_4) \quad \text{2.26}$$

En el caso del bus compensador el valor inicial de P y Q es cero. En un bus de generación se conoce P pero se desconoce Q.

Así que de:

$$S_K = V_K^* I_K$$

$$I_K = Y_{KK} V_K + \sum_{\substack{j=1 \\ K \neq j}}^n Y_{Kj} V_j$$



$$S_K = V_K^* \left( Y_{KK} V_K + \sum_{\substack{J=1 \\ K \neq J}}^n Y_{KJ} V_J \right) \quad 2.27$$

$$S_K = P_K - J Q_K \quad \text{-----} \quad 2.28$$

$$P_K = \operatorname{Re} \left\{ V_K^* Y_{KK} V_K + V_K^* \sum_{\substack{J=1 \\ K \neq J}}^n Y_{KJ} V_J \right\} \quad 2.29$$

$$Q_K = -\operatorname{Im} \left\{ V_K^* Y_{KK} V_K + V_K^* \sum_{\substack{J=1 \\ K \neq J}}^n Y_{KJ} V_J \right\} \quad 2.30$$

Como ya se dijo anteriormente, cada incognita de voltaje queda en función de las demas incognitas, por lo que no es posible aplicar métodos directos de solución y entonces se requiere del empleo de metodos iterativos.

En este trabajo como se dijo al principio de este capítulo aplicaremos el método de Gauss Seidel, por lo cual se dará una explicación en que consiste dicho método:

### 2. 3 METODO DE GAUSS- SEIDEL.

Este método es mas usado que el de Gauss, debido a que la solución converge en menos iteraciones y consiste basicamente en una variante del método de Gauss y consiste en el calculo de la variable siguiente en cada paso de iteración usando el valor calculado para la variable anterior en el mismo paso de iteración.

El sistema de ecuaciones por resolver se plantea en la misma forma que para el método de Gauss y se parte de los valores iniciales supuestos

$$x_1^0, x_2^0, x_3^0 \quad \text{o sea:}$$

$$x_1 = \frac{1}{a_{11}} [b_1 - (a_{12} x_2 + a_{13} x_3)]$$

$$x_2 = \frac{1}{a_{22}} [b_2 - (a_{21} x_1 + a_{23} x_3)]$$

$$x_3 = \frac{1}{a_{33}} [b_3 - (a_{31} x_1 + a_{32} x_2)]$$

1a. Iteración:

$$x_1^1 = \frac{1}{a_{11}} [b_1 - (a_{12} x_2^0 + a_{13} x_3^0)]$$

$$x_2^1 = \frac{1}{a_{22}} [b_2 - (a_{21} x_1^1 + a_{23} x_3^0)] \quad 2.31$$

$$x_3^1 = \frac{1}{a_{33}} [b_3 - (a_{31} x_1^1 + a_{32} x_2^1)]$$

Se calcula la diferencia entre el valor calculado y el valor anterior en valor absoluto y se compara con la tolerancia fijada.

$$|x_1^1 - x_1^0| \leq \epsilon$$

$$|x_2^1 - x_2^0| \leq \epsilon$$

$$|x_3^1 - x_3^0| \leq \epsilon$$

Si los valores no se encuentran dentro de la tolerancia, se calcula la siguiente iteración.

2a. Iteración.

$$x_1^2 = \frac{1}{a_{11}} [b_1 - (a_{12} x_2^1 + a_{13} x_3^1)]$$

$$x_2^2 = \frac{1}{a_{22}} [b_2 - (a_{21} x_1^2 + a_{23} x_3^1)] \quad 2.32$$

$$x_3^2 = \frac{1}{a_{33}} [b_3 - (a_{31} x_1^2 + a_{32} x_2^2)]$$

El procedimiento se repite hasta llegar a la solución de todas las variables.

El criterio de convergencia es el mismo que para el método de Gauss

$$\frac{1}{|a_{KK}|} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq K}}^n a_{Kj} \leq 1$$

#### 2.4. FACTORES DE ACELERACION.

Con objeto de que la convergencia en las soluciones iterativas de los sistemas de ecuaciones no lineales aceleren su convergencia se emplean estos factores.

Para aplicar los factores de aceleración es necesario que se calcule lo que se conoce como las variables de diferencia.

Supongase que:

$x^{K+1}$  es el valor calculado y  $x^K$  es el valor anterior la variable de diferencia es

$$x^{K+1} - x^K = \Delta x^{K+1} \quad \text{-----} \quad 2.33$$

Antes de pasar a la siguiente iteración se calcula el valor acelerado para la iteración actual.

$$x^{K+1}_{\text{acel}} = x^{K+1} + \alpha \Delta x^{K+1} \quad \text{-----} \quad 2.34$$

$\alpha$  Se conoce como factor de aceleración y si la variable es del tipo compleja, se tendrá un factor de aceleración para la parte real y un factor de aceleración  $\beta$  para la parte imaginaria, normalmente

$$\alpha = \beta$$

Aplicados estos factores a un sistema de ecuaciones cuya solución es a partir del método de Gauss Seide se tiene:

valores iniciales  $x_1^0, x_2^0, x_3^0$

La primera iteración

$$x_1^1 = \frac{1}{a_{11}} [b_1 - (a_{12} x_2^0 + a_{13} x_3^0)] \quad 2.35$$

$$x_1^1 - x_1^0 = \Delta x_1^1 \quad 2.36$$

$$x_1^1 \text{ acel} = x_1^1 + \alpha \Delta x_1^1 \quad 2.37$$

$$x_2^1 = \frac{1}{a_{22}} [b_2 - (a_{21} x_1^1 \text{ acel} + a_{23} x_3^0)] \quad 2.38$$

$$x_2^1 - x_2^0 = \Delta x_2^1$$

$$x_2^1 \text{ acel} = x_2^1 + \alpha \Delta x_2^1$$

$$x_3^1 = \frac{1}{a_{33}} [b_3 - (a_{31} x_1^1 \text{ acel} + a_{32} x_2^1 \text{ acel})] \quad 2.39$$

$$x_3^1 - x_3^0 = \Delta x_3^1$$

$$x_3^1 \text{ acel} = x_3^1 + \alpha \Delta x_3^1$$

$$|x_1^1 \text{ acel} - x_1^0| \leq \epsilon$$

$$|x_2^1 \text{ acel} - x_2^0| \leq \epsilon$$

$$|x_3^1 \text{ acel} - x_3^0| \leq \epsilon$$

Si los valores anteriores no se encuentran dentro de la tolerancia, se calculan las siguientes: iteraciones en la misma forma que la primera y el proceso se repite,

## 2.5 SOLUCION DEL PROBLEMA DE FLUJOS POR EL METODO DE ADMITANCIA NODAL YBUS Y GAUSS SEIDEL.

La solución de un problema de flujos de carga consiste en -

primer instancia en la determinación de los voltajes de Bus y los flujos de potencia activa y reactiva entre buses.

Primeramente ilustraremos esto con nuestro sistema de 5 nodos y se darán los pasos a efectuar por un estudio de flujos de carga por último aplicaremos todo lo anterior a un sistema en particular donde los resultados obtenidos nos servirán para obtener las condiciones de dicho sistema, que son necesarias para efectuar el estudio de estabilidad necesario.

La solución por Gauss Seidel se da por las siguientes ecuaciones:

$$V_1^{i+1} = \frac{CL_1}{(V_1^i)^*} - Y_{L12}V_2^i - Y_{L13}V_3^i - Y_{L14}V_4^i - Y_{L15}V_5^i \quad 2.40$$

$$V_2^{i+1} = \frac{CL_2}{(V_2^i)^*} - Y_{L21}V_1^i - Y_{L23}V_3^i - Y_{L24}V_4^i - Y_{L25}V_5^i \quad 2.41$$

$$V_3^i = \text{valor previamente dado por ser el nodo compensador.} \quad 2.42$$

$$V_4^{i+1} = \frac{CL_4}{(V_4^i)^*} - Y_{L41}V_1^i - Y_{L42}V_2^i - Y_{L43}V_3^i - Y_{L45}V_5^i \quad 2.43$$

$$V_5^{i+1} = \frac{CL_5}{(V_5^i)^*} - Y_{L51}V_1^i - Y_{L52}V_2^i - Y_{L53}V_3^i - Y_{L54}V_4^i \quad 2.44$$

Con los valores finales del voltaje de Bus y conociendo los valores de las admitancias de las líneas ( $Y_{jk}/2$ ) y las admitancias a tierra que representan cargas; se calculan los flujos de potencia en las líneas como sigue:

$$S_{jk} = V_j^* I_j^1 = V_j^* ( I_{jk} + I_{jk}^1 ) \quad 2.45$$

$$S_{jk} = V_j^* \left[ (V_j - V_k) Y_{jk} - V_j \frac{Y_{jk}}{2} \right] \quad 2.46$$

$$P_{jk} = \text{Re} \left\{ V_j^* \left[ (V_j - V_k) Y_{jk} - V_j \frac{Y_{jk}}{2} \right] \right\} \quad 2.47$$

$$I_{jk} = I_m \left\{ V_j^* \left[ (V_j - V_k) Y_{jk} - V_j \frac{Y_{jk}}{2} \right] \right\} \quad 2.48$$

Así por ejemplo, el flujo en la línea

1 - 2

$$P_{12} - jQ_{12} = V_1^* (V_1 - V_2) Y_{12} - V_1^* V_1 \frac{Y_{12}}{2}$$

El procedimiento general para la solución, por el método de Gauss Seidel se puede resumir brevemente como:

- 1).- El primer paso de solución consiste en representar sobre un diagrama unifilar o en tablas, los valores de tensiones iniciales, - potencias activa y reactiva. Todos los valores en P.V. y referidos a bases previamente establecidas.
- 2).- Suponer que se conoce las tensiones en todos los nodos del sistema, y el valor de función previamente establecido para el nodo compensador.
- 3).- Formar la matriz de admitancias de Bus.

YBUS.

- 4).- Formar los promedios de las ecuaciones de voltaje.

$CL_K$  , y  $YL_{kj}$

donde:

$$CL_K = (P_k - jQ_k) \frac{1}{V_{kk}}$$

$$YL_{kj} = Y_{kj} L_k = \frac{Y_{kj}}{Y_{kk}}$$

- 5).- Fijar el máximo cambio de tensión y probar para el nodo compensador.
- 6).- Resolver para el nodo K con la ecuación de voltaje

$$v_k^{i+1} = \frac{GL_k}{(v_k^i)^*} - \sum_{\substack{j=1 \\ k \neq j}}^n Y_{L_{kj}} v_j^{i+1}$$

7).- Calcular el cambio en el voltaje en el nodo K

$$\Delta v_k^i = v_k^{i+1} - v_k^i$$

Y probar para el máximo cambio de voltaje.

8).- Con el último valor de voltaje para el nodo K, calcular la potencia en el Bus Slack y los flujos en las líneas por medio de la ecuación

$$P_{jk} - jQ_{jk} = v_j^* (v_j - v_k) Y_{jk} - v_j^* v_j \frac{Y_{jk}}{2}$$

El diagrama de bloque para flujos de carga por el método iterativo de Gauss Seidel es:

1  
 LEA: 1.- NUMERO DE BUSES, NUMERO DE LINEAS, BUS SLACK Y FACTOR DE ACELERACION  
 2.- DATOS DE IMPEDANCIAS DE LINEAS Y ADMITANCIAS A TIERRA  
 3.- POTENCIAS ACTIVAS Y REACTIVAS, VOLTAJE DE BUSES

2  
 FORMA YBUS POR INSPECCION

3  
 HACE LAS SUPOSICIONES INICIALES DE  $V_k^0$  PARA  $k=2,3,\dots,NB$

4  
 CALCULA:  
 $AL_k$  Y  $Y_{LKj}$

5  
 INICIA ITERACIONES  
 $N=1$

6  
 INICIA EL CONTEO DE BUSES A PARTIR DE  $k=2$  Y PONE EL MAXIMO CAMBIO DE VOLTAJE  
 $\Delta V_{MAX} = 0$

7  
 CALCULA VOLTAJES CON EL ALGORITMO.  

$$V_k^{i+1} = \frac{AL_k}{V_k^i} - \sum_{j=1}^{NB} Y_{LKj} V_j^{i+1}$$
 $k=2,3,\dots,NB$

8  
 CALCULA  $\Delta V_k^{i+1}$

9  
 $|V_k^{i+1}| \geq \Delta V_{MAX}$

SI

10  
 PONE  
 $\Delta V_{MAX} = |\Delta V_k^{i+1}|$

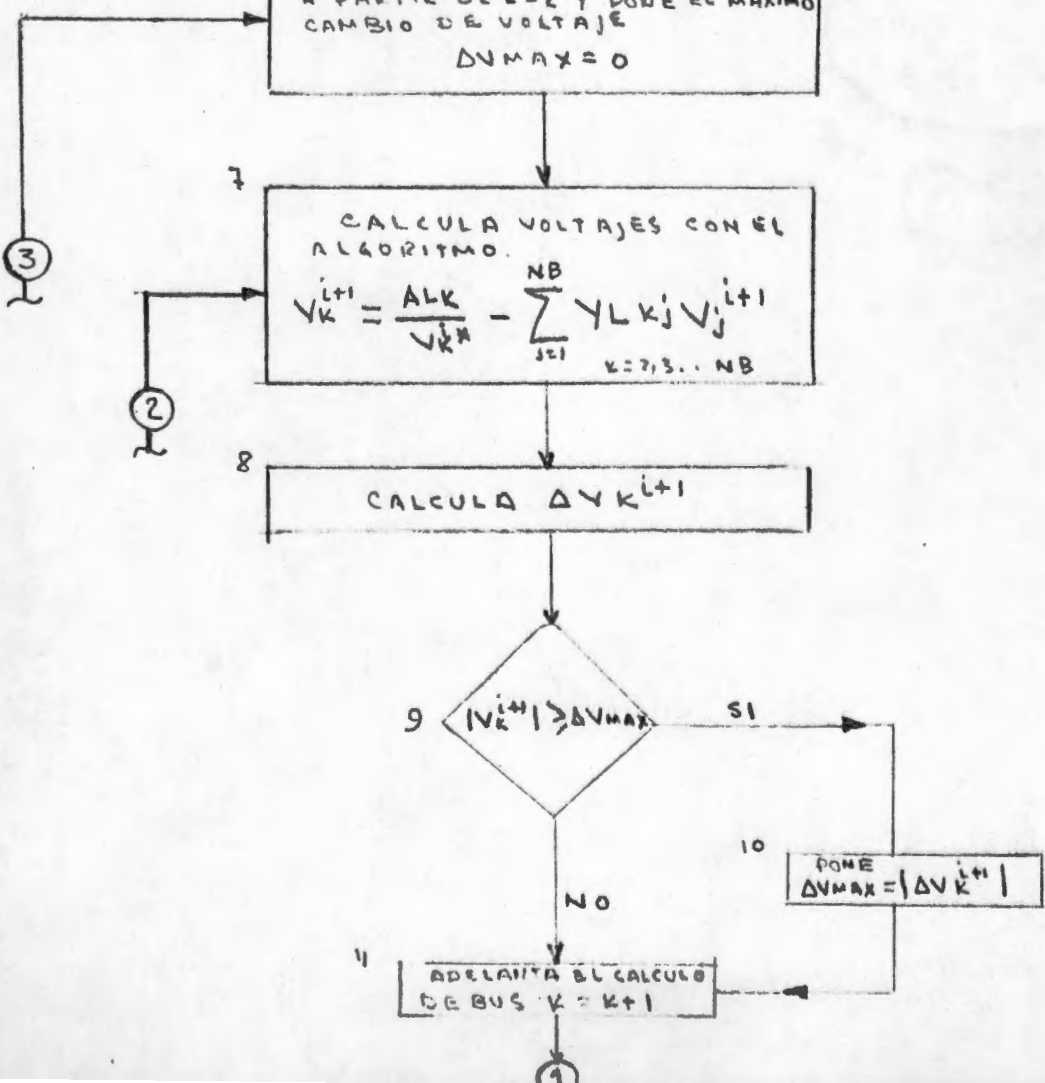
NO

11  
 ADELANTA EL CALCULO DE BUS  $k = k+1$

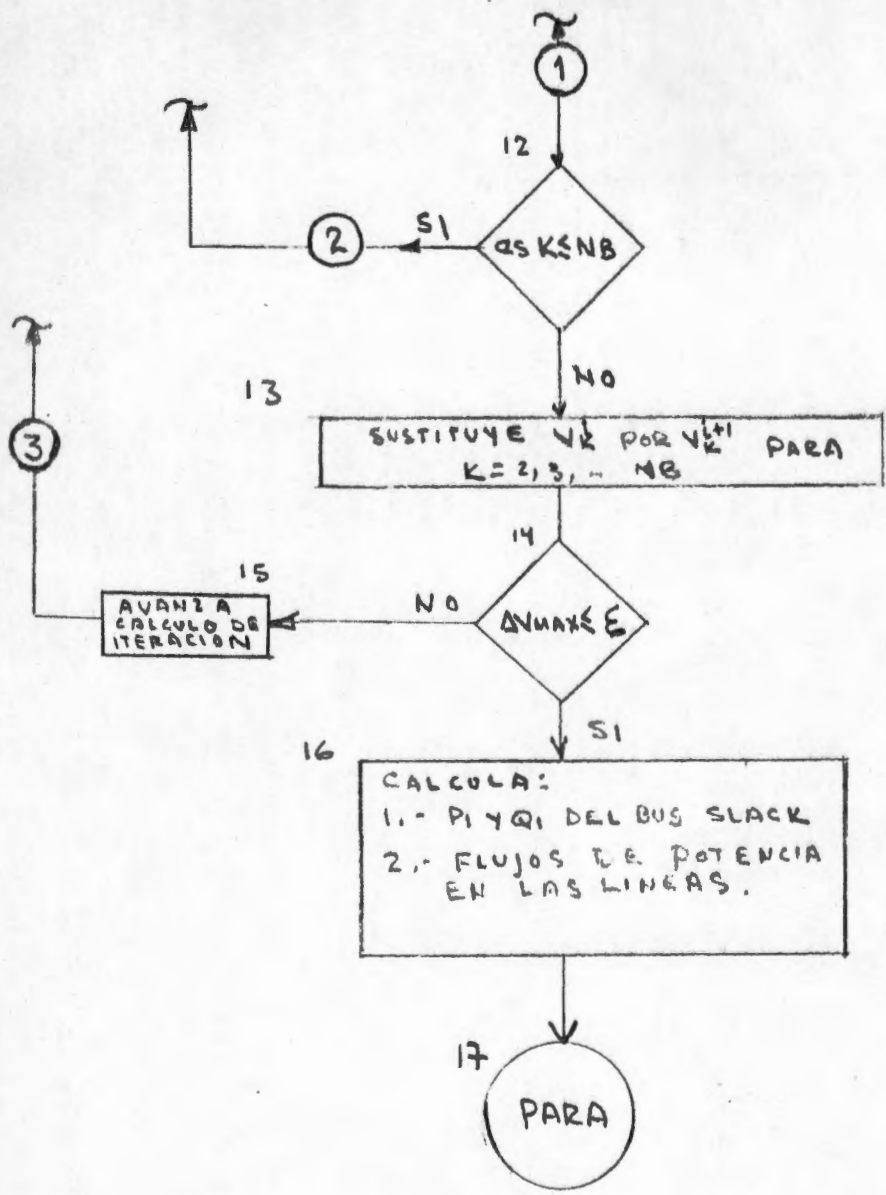
3

2

1







### 2.6 Aplicación del método para la Red en estudio.

El método anterior se aplicó a la red en estudio para obtener como se dijo anteriormente las condiciones iniciales del sistema.

El sistema anterior se tomó de la referencia ( 2 ) y se obtuvo lo siguiente:

En la siguiente figura se representa el sistema que consta de cuatro máquinas y 6 nodos y 7 líneas.

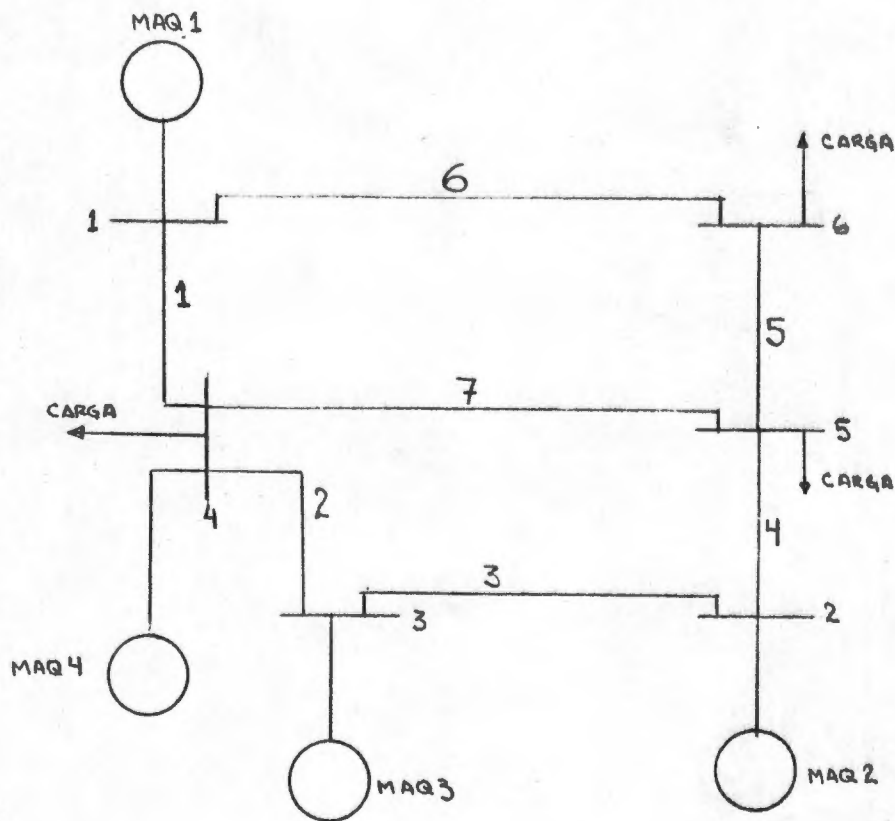


Fig 2.4 DIAGRAMA UNIFILAR DE LA RED EN ESTUDIO

En la tabla I y II se dan los datos correspondientes a las impedancias de líneas en P, U, y admitancias a tierra en P, U, y las Potencias y voltajes iniciales respectivamente.

TABLA I.- Impedancias y admitancias a tierra de las líneas.

Línea	SB	EB	SERZ P.U.	SHY P.U.
1	1	4	.05 +j0.20	0.0+j0.0
2	4	3	.10 +j0.50	0.0+j0.0
3	3	2	.20 +j0.80	0.0+j0.0
4	2	5	.10 +j0.30	0.0+j0.0
5	5	6	.20 +j0.40	0.0+j0.0
6	6	1	.10 +j0.15	0.0+j0.0
7	4	5	.20 +j0.50	0.0+j0.0

TABLA II.- Potencia reactiva y potencia activa de generación y Cargas

BUS	PG	QG	P	Q
1	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.20	0.10	0.0	0.0
3	0.30	0.20	0.0	0.0
4	0.10	0.05	0.20	0.10
5	0.0	0.0	0.40	0.15
6	0.0	0.0	0.30	0.10

A una base de 100 KVA

Los resultados obtenidos del estudio de flujos por Gauss Seidel fueron:

TABLA III.- Condiciones de Flujos de Carga.

BUS	Magnitud	Angulo de fase en grados	PG	QG	PL	QL
1	1.0000	0.00000	0.332	.0905	0.0	0.0
2	1.0253	1.41290	.200	.100	0.0	0.0
3	1.0836	4.61574	.300	.200	0.0	0.0
4	1.0023	-0.12469	.100	.050	0.20	0.10
5	0.9557	-2.80219	.000	.000	0.40	0.15
6	0.9527	-2.30427	.000	.000	0.30	0.10

```
COMMON LINEA(20), SC(20), EL(20), SERZ(20), SHY(20), YL(20,20)
COMMON AL(20), V(20), VN(20), F(20), Q(20), Y(20,20)
LEE Y ESCRIBE NUMERO DE BUSES, NUMERO DE LINEAS, BUS SLACK
Y FACTOR DE FUERZA
LEAD(5,10) NL, NL, ML, ALFA
100 FORMAT(3I5, F5.2)
WRITE(6,1000) NL, ML, ME, ALFA
1000 FORMAT(5X, 'NL=' ,I5, 1X, 'ML=' ,I5, 1X, 'ME=' ,I5, 1X, 'ALFA=' ,F5.2)
LEE LUMENOS DE LINEA, BUS INICIAL, BUS FINAL, IMPEDANCIA SERIE EN PU.
ADMITANCIA A TIERRA
DO 25 I=1, NL
25 READ(5,101) LINEA(I), SL(I), EL(I), SERZ(I), SHY(I)
101 FORMAT(3I5, 4F10.4)
LEE DATOS ESPECIFICADOS EN BUSES, POTENCIA REAL, POTENCIA REACTIVA
VOLTAJES
DO 26 I=1, 5
26 READ(5,102) P(I), Q(I), V(I)
102 FORMAT(2F12.4, 2F10.5)
FORMACION DE YEJS
DO 27 I=1, NB
27 Y(I, J)=CMTLX(0.0, 0.0)
DO 28 J=1, NL
SERV(I)=1.0/SERZ(I)
```

```
L=SL(I)
I=EL(I)
Y(L, L)=Y(L, L)+SERV(I)+SHY(I)
Y(L, M)=Y(L, M)+SERV(M)+SHY(M)
Y(L, N)=Y(L, N)-SERV(N)
Y(M, L)=Y(M, L)-SERV(I)
Escriba una de los datos y matriz YBUS
28 WRITE(6,1001) LINEA(I), SL(I), EL(I), SERZ(I), SERV(I), SHY(I)
1001 FORMAT(6X, 3I5, 5X, 2F10.5, 5X, 2F10.5, 5X, 2F10.3)
WRITE(6,1002)
1002 FORMAT(1/77/40X, 'MATRIZ YBUS'//)
DO 29 I=1, NB
29 WRITE(6,1003) (Y(L, J), J=1, NB)
1003 FORMAT(2X, 6(F7.3, 1X, F7.3, 1X))
K=K+1
SUPONE VOLTAJES INICIALES Y CALCULA LAS CONSTANTES YL Y AL
DO 30 J=2, NB
J(1)=CMTLX(1.0, 0.0)
ZF(1, 0, NS) AL(1)=CONPLX(P(1), -Q(1))/Y(1, 1)
DO 30 J=1, NB
IF(1. NE. J) YL(I, J)=Y(I, J)/Y(1, 1)
30 CONTINUE
PROCESO ITERATIVO PARA CALCULAR LOS VOLTAJES POR GAUSS SEIDEL
K=0
DO 31 I=1, NB
31 DVMAX=0.0
DO 32 J=2, NB
SUM=CONPLX(0.0, 0.0)
VJ=V(I)
DO 32 J=1, NB
IF(1. NE. J) SUM=SUM+YL(I, J)*V(J)
VJ(L)=AL(1)/CONJG(V(1))-SUM
DX=VJ(1)-VJ
VJ(L)=VJ+ALFA*DX
DETERMINA LA DIFERENCIA DE VOLTAJE MAXIMO
DELV=ABS(VJ(1)-VJ)
IF(DELV.GE.DVMAX) DVMAX=DELV
33 V(1)=VJ(1)
K=K+1
COMPARA LA MAXIMA DIFERENCIA DE VOLTAJE CONTRA EL CRITERIO
DE CONVERGENCIA
IF(DVMAX.LT.1.E-34) GOTO 34
ESTE DE ITERACIONES COMO UNA PROTECCION CONTRA DIVERGENCIA
IF(LT.20) GOTO 31
WRITE(6,1004) K
1004 FORMAT(1/77/6X, 'NO CONVERGE EN', I4)
GOTO 30
CONVERGENCIA DETERMINA CALCULA LA POTENCIA DEL BUS SLACK
34 SUM=CONPLX(0.0, 0.0)
DO 35 I=1, NB
```

```
35 SUM=SUM+Y(1, I)*V(I)
P(1)=REAL(SUM*CONJG(V(1)))
```

```

C  ESCRIBE DATOS RESULTANTES EN TODOS LOS USOS
  WRITE(6,1005)N
1005  FORMAT(///6X,'LA SOLUCION POR GAUSS SE ADEL CONVERGIO EN',I4/)
  WRITE(6,1006)
1006  FORMAT(//7X,'LOS',5X,'VOLTAJE',9X,'MAGNITUD',3X,'DELTA(GRAD)',6X,
1    'POT.REAL',4X,'POT.REACTIVA'//)
  DO 36 I=1,N
  DELTA=ATAN2(1,MAG(V(I)),REAL(V(I)))*57.2957
  MAG=CAES(V(I))
 36  WRITE(6,1007)I,V(I),MAG,DELTA,P(I),Q(I)
1007  FORMAT(4X,I5,2X,2F6.4,4X,F7.4,4X,F5.5,6X,F6.4,6X,F6.4/)
C  CALCULO Y ESCRITURA DE LOS FLUJOS DE POTENCIA
  WRITE(6,1008)
1008  FORMAT(//18X,'FLUJOS DE POTENCIA'//)
  WRITE(6,1009)
1009  FORMAT(6X,'LINEA',2X,'SB',3X,'EB',6X,'POT REAL',5X,'POT REACT'//)
  DO 37 L=1,NL
  L=SB(L)
  M=EB(L)
  S=CONJG(V(L))*(V(L)-V(M))+SERV(I)+V(L)*(SHY(I))
  R=CONJG(V(M))*(V(M)-V(L))+SERV(I)+V(M)*(SHY(I))
 37  WRITE(6,1010)LINEA(1),L,M,S
1010  FORMAT(6X,3I5,5X,F6.4,6X,F6.4)
 38  STOP
  END

```



NE= 5 NL= 7 NE= 1 ALFA= 3.49  
 1 4 7 5 6 5  
 1 2 3 4 5 6 7  
 1 2 3 4 5 6 7  
 1 2 3 4 5 6 7  
 1 2 3 4 5 6 7  
 1 2 3 4 5 6 7  
 1 2 3 4 5 6 7  
 1 2 3 4 5 6 7

1.17057  
 .30462  
 .25412  
 1.00000  
 1.00000  
 3.07622  
 .68966  
 -4.70588  
 -1.92508  
 -1.18047  
 -3.00000  
 -2.00000  
 -4.00000  
 -1.72214  
 0.000  
 0.000  
 0.000  
 0.000  
 0.000  
 0.000  
 0.000

MATRIZ Y3US

4.253	-9.321	0.000	3.000	0.000	0.000	-1.176	4.706	0.000	0.000	-3.077	4.615
0.010	0.000	1.254	-4.176	-.254	1.176	0.000	0.000	-1.000	3.000	0.000	0.000
0.000	0.000	-.254	1.176	.679	-3.100	-.365	1.923	0.000	0.000	0.000	0.000
-1.176	4.706	0.000	0.000	-.365	1.923	2.251	-6.353	-.690	1.724	0.000	0.000
0.000	0.000	-1.000	3.000	0.000	0.000	-.090	1.724	2.690	-5.724	-1.000	2.000
-3.077	4.615	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-1.000	2.000	4.077	-6.615

LA SOLUCION POR GAUSS SECCION CONVERSION EN 12

LJS	VOLTAJE	MAGNETICO	DELTA (GRAD)	FGT. NEAL	POT. REACTIVA
1	1.0000	0.0000	0.0000	.3322	.0905
2	1.0250	.0253	1.41290	.2000	.1000
3	1.0001	.0072	4.61574	.3000	.2000
4	1.0023	-.0022	-.12463	-.1000	-.0500
5	.9546	-.0467	-2.60213	-.4000	-.1500
5	.9519	-.0383	-2.30427	-.3000	-.1000

FLUJOS DE POTENCIA

LINIA	SE	EG	FGT. REA-	POT. REACT
1	4	5	0.075	.0135
1	3	4	-0.075	-.0135
2	3	5	-2.374	-.4119
2	4	5	0.941	.1511
3	2	4	-0.941	-.1511
3	5	6	0.350	.0550
4	2	3	2.374	.4119
4	5	6	-0.100	-.0135
5	2	3	-0.941	-.1511
5	4	6	0.350	.0550
5	6	7	0.075	.0135
5	7	8	0.100	.0135

## CAPITULO III

## EL ESTUDIO DE ESTABILIDAD A SISTEMAS MULTIMAQUINAS POR LOS METODOS DE RED SIMPLIFICADA Y NODOS RETENIDOS.

En el capítulo I se han mencionado algunos métodos o los más importantes para estudios de estabilidad, pero sin embargo en éste trabajo únicamente se presentan dos de los más importantes en la actualidad, y que son: El estudio de estabilidad transitoria en sistemas multimaquinas con reducción de la red a las barras internas de las máquinas, y el estudio de estabilidad transitoria en sistemas multimáquinas por el método de Barras retenidas.

En primer lugar daremos una explicación de ambos métodos para después aplicarlos a la red en estudio, indicando los resultados obtenidos, con esta se hará un análisis de los resultados obtenidos en el capítulo IV.

Las características de estabilidad de un sistema de potencia durante disturbios transitorios es analizado de la naturaleza de estabilidad a partir de su modelo matemático o sea un conjunto de ecuaciones diferenciales. Estas ecuaciones, que describen la dinámica del sistema de potencias, son no lineales con coeficientes constantes bajo la suposición de voltaje constante detrás de la reactancia transitoria y potencia mecánica constante de entrada a las máquinas.

Los métodos numéricos existentes para la evaluación de estabilidad de un sistema de potencia requieren de la solución explícita de las ecuaciones diferenciales durante y después del cambio en el sistema

Durante transitorios en un sistema de potencia multimáquinas éste pasa a través de los siguientes estados.

- 1.- El sistema antes del disturbio o la falla: Sistema de "refalla.
- 2.- El sistema durante el disturbio o falla: Sistema de falla.
- 3.- El sistema después de liberar la falla: Sistema de post falla.

En ambos métodos de estudio la forma del conjunto de ecuaciones diferenciales, describiendo el sistema durante los tres estados descritos ; serán las mismas y que se darán mas adelante.

Los factores que influyen en el comportamiento transitorio de las máquinas sincronas en un sistema complejo son tantos y variados que un análisis matemático riguroso de estabilidad transitoria del sistema de potencia es difícil, De aquí que es practica común despreciar aquellos factores de importancia secundaria usando las siguientes suposiciones:

- 1.- El voltaje de la máquina síncrona durante el estudio (falla) se supone constante en magnitud, actuando a través de la reactancia transitoria, entonces la respuesta de la excitatriz se desprecia.
- 2.- El par de entrada en la flecha del primo motor es sostenido constante durante todo el período transitorio de interés, el cual supone que la respuesta del Gobernador es despreciada.
- 3.- Los cambios en la velocidad del sistema sobre el período transitorio son despreciables . De esta manera la potencia de la máquina puede formarse con o directamente proporcional al Par.
- 4.- La Saliencia transitoria es despreciada.

$$X' = X'_d = X'_q$$

- 5.- El amortiguamiento ó par asincrono es despreciado
- 6.- Se aplica una falla trifásica por ser el tipo de falla mas severo.

Las ecuaciones diferenciales de movimiento para el sistema de varias máquinas que en nuestro caso particular se tomó el sistema de la referencia ( 8 ) son de la forma:

$$M_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = P_{ai} \quad i = 1, 2, 3, 4$$



Donde  $M_i$  \_\_\_\_\_ constante de inercia de la  $i$ -ésima máquina

$\delta_i$  \_\_\_\_\_ Posición angular con respecto a un eje que gira a la velocidad sincrónica

$P_{ai}$  es la potencia de aceleración de la  $i$ -ésima máquina.

La ecuación diferencial de segundo orden para su solución es escrita como dos ecuaciones de primer orden como sigue:

$$M_i \frac{dw_i}{dt} = P_{ai} \quad i = 1, 2, 3, 4$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = w_i \quad i = 1, 2, 3, 4$$

Estas ecuaciones se resolverán en ambos métodos de estudio - por el método de Runge-Kutta de 4o. orden. que más adelante se dará - una descripción del mismo.

Nuestro estudio lo iniciaremos con estabilidad transitoria en sistemas multimáquinas con reducción de la red a las barras internas - y después se analizará el segundo caso de barras retenidas.

### 31- ESTABILIDAD TRANSITORIA EN SISTEMAS MULTIMAQUINAS CON REDUCCION DE LA RED A LAS BARRAS INTERNAS DE LAS MAQUINAS.

Este método consiste básicamente en dejar conectadas las máquinas de un sistema directamente entre sí. Por éste método la potencia eléctrica transmitida depende de las admitancias conectadas entre máquinas y de sustenciones detrás de la reactancia transitoria.

En un sistema multimáquinas se plantean tantas ecuaciones de oscilación como máquinas se tengan, y cada ecuación depende de las variables del resto de las máquinas, por ejemplo para el sistema de cuatro máquinas, las ecuaciones son función de los ángulos internos y de su derivada.

$$M_1 \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} = F(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \frac{d\delta_1}{dt}, \frac{d\delta_2}{dt}, \frac{d\delta_3}{dt}, \frac{d\delta_4}{dt})$$

$$M_2 \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} = F(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \frac{d\delta_1}{dt}, \frac{d\delta_2}{dt}, \frac{d\delta_3}{dt}, \frac{d\delta_4}{dt})$$

$$M_3 \frac{d^2 \delta_3}{dt^2} = F(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \frac{d\delta_1}{dt}, \frac{d\delta_2}{dt}, \frac{d\delta_3}{dt}, \frac{d\delta_4}{dt})$$

$$M_4 \frac{d^2 \delta_4}{dt^2} = F(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \frac{d\delta_1}{dt}, \frac{d\delta_2}{dt}, \frac{d\delta_3}{dt}, \frac{d\delta_4}{dt})$$

Cuando varias máquinas se conectan para formar un sistema, la potencia de aceleración de cada máquina es la diferencia entre sus entradas mecánicas y sus salidas totales, a todas las cargas y a otras máquinas.

Se mencionó anteriormente que la potencia mecánica es constante y lo que varía es la potencia eléctrica, ya que depende de la topología de la red y los ángulos internos.

El planteamiento de la ecuación para la potencia eléctrica de una máquina se puede hacer como sigue:

La siguiente figura nos muestra las admitancias de punto de alimentación y de transferencia para una máquina conectada con otras tres y además una carga en su bus representada como una admitancia a tierra.

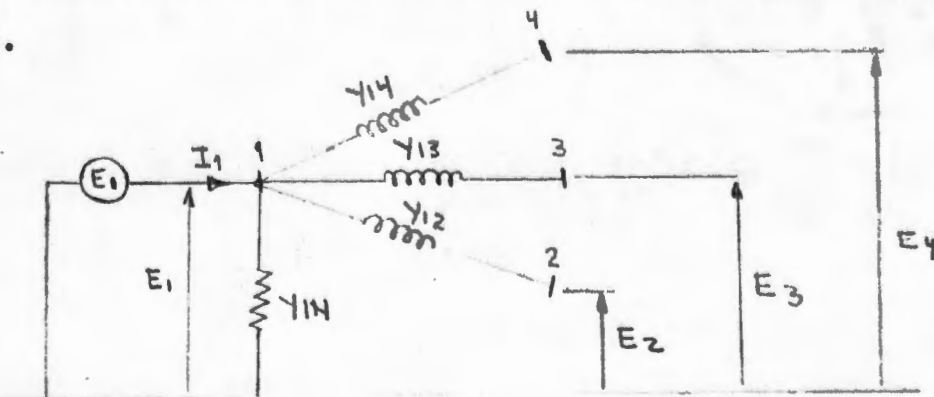


FIG. 3.1

$Y_{12}$ ,  $Y_{13}$ ,  $Y_{14}$  Admitancias que conectan a la máquina 1 con las 2,3,y 4

$Y_{1N}$  \_\_\_\_\_ Carga.

La potencia de salida de la máquina se obtiene como:

$$I_1 = E_1 Y_{1n} + (E_1 - E_2)Y_{12} + (E_1 - E_3) Y_{13} + (E_1 - E_4)Y_{14} \quad 3.3$$

$$I_1 = E_1 (Y_{12} + Y_{13} + Y_{14} + Y_{IN}) - E_2 Y_{12} - E_3 Y_{13} - E_4 Y_{14} \quad 3.4$$

Si hacemos

$$Y_{11} = Y_{12} + Y_{13} + Y_{14} + Y_{1N} \quad 3.5$$

$$- \sum_{j=2}^4 E_j Y_{1j} = -E_2 Y_{12} - E_3 Y_{13} - E_4 Y_{14} \quad 3.6$$

Tenemos.

$$I_1 = E_1 Y_{11} - \sum_{\substack{j=2 \\ j \neq i}}^4 E_j Y_{1j} \quad 3.7$$

El vector potencia  $S_K$  suministrada a la red por cualquier = máquina puede ser encontrado multiplicando el conjugado del vector voltaje por el vector corriente.

$$S_K = E_k^* I_k = P_k - jQ_k \quad 3.8$$

Así tenemos que la potencia eléctrica activa entregada por la máquina 1 es.

$$P_{e1} = \text{Re} \left\{ E_1^* I_1 \right\} \quad 3.9$$

$$P_{e1} = \text{Re} \left\{ E_1^* Y_{11} - E_1^* \sum_{j=2}^4 E_j Y_{1j} \right\} \quad 3.10$$

Para los calculos de estabilidad es preferible que se tengan ecuaciones escalares que contengan los angulos de desplazamiento de las máquinas  $\delta$  Entonces.

$$E_1 = |E_1| \underline{\delta}_1, E_2 = |E_2| \underline{\delta}_2 \dots \dots \dots E_n = |E_n| \underline{\delta}_n \quad 3.11$$

Sus conjugados.

$$E_1^* = |E_1| \underline{\delta}_1, E_2^* = |E_2| \underline{\delta}_2 \dots \dots \dots E_n^* = |E_n| \underline{\delta}_n \quad 3.12$$

También se puede poner:

$$Y_{11} = Y_{11} \underline{\theta}_1, Y_{12} = Y_{12} \underline{\theta}_2, Y_{22} = Y_{22} \underline{\theta}_2 \dots \dots \dots \quad 3.13$$

Sustituyendo tenemos:

$$P_{e1} = E_1^2 Y_{11} \underline{\theta}_1 - E_1 \underline{\delta}_1 (E_2 \underline{\delta}_2 Y_{12} \underline{\theta}_2 + E_3 \underline{\delta}_3 Y_{13} \underline{\theta}_3 + E_4 \underline{\delta}_4 Y_{14} \underline{\theta}_4) \quad 3.$$

$$P_{e1} = E_1^2 Y_{11} \underline{\theta}_1 - (E_1 E_2 Y_{12} \underline{\theta}_2 + E_1 E_3 Y_{13} \underline{\theta}_3 + E_1 E_4 Y_{14} \underline{\theta}_4) \quad 3.15$$

$$P_{e1} = E_1^2 Y_{11} \cos \theta_1 - \sum_{j=1}^n E_1 E_j Y_{1j} \cos(\theta_{1j} - \delta_1 + \delta_j) \quad 3.16$$

Para cada máquina se tendrá una ecuación semejante, y las ecuaciones de oscilación se podran expresar en forma general como:

$$M_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = P_{mi} - P_{ei} \quad 3.17$$

$$i = 1, 2, 3, 4.$$

$$M_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = P_{mi} - \sum_{j=1}^n E_i E_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad 3.18$$

donde

$$Y_{ii} = Y_{ii} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$Y_{ij} = - Y_{ji}$$

El conjunto de ecuaciones por resolver en un sistema de cuatro máquinas sería:

$$M_1 \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} = P_{m1} - \left[ E_1^2 \gamma_{11} \cos(\theta_{11} - \delta_1 + \delta_1) + E_1 E_2 \gamma_{12} \cos(\theta_{12} - \delta_1 + \delta_2) + E_1 E_3 \gamma_{13} \cos(\theta_{13} - \delta_1 + \delta_3) + E_1 E_4 \gamma_{14} \cos(\theta_{14} - \delta_1 + \delta_4) \right] \quad 3.19$$

$$M_2 \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} = P_{m2} - \left[ E_2 E_1 \gamma_{21} \cos(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + E_2^2 \gamma_{22} \cos(\theta_{22} - \delta_2 + \delta_2) + E_2 E_3 \gamma_{23} \cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) + E_2 E_4 \gamma_{24} \cos(\theta_{24} - \delta_2 + \delta_4) \right] \quad 3.20$$

$$M_3 \frac{d^2 \delta_3}{dt^2} = P_{m3} - \left[ E_3 E_1 \gamma_{31} \cos(\theta_{31} - \delta_3 + \delta_1) + E_3 E_2 \gamma_{32} \cos(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) + E_3^2 \gamma_{33} \cos(\theta_{33} - \delta_3 + \delta_3) + E_3 E_4 \gamma_{34} \cos(\theta_{34} - \delta_3 + \delta_4) \right] \quad 3.21$$

$$M_4 \frac{d^2 \delta_4}{dt^2} = P_{m4} - \left[ E_4 E_1 \gamma_{41} \cos(\theta_{41} - \delta_4 + \delta_1) + E_4 E_2 \gamma_{42} \cos(\theta_{42} - \delta_4 + \delta_2) + E_4 E_3 \gamma_{43} \cos(\theta_{43} - \delta_4 + \delta_3) + E_4^2 \gamma_{44} \cos(\theta_{44} - \delta_4 + \delta_4) \right] \quad 3.22$$

Los ángulos iniciales  $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$  así como las tensiones  $E_1, E_2, E_3, E_4$  se conocen de un estudio de flujos de carga antes de falla y  $\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{14}$  etc. se conocen de los valores de las admitancias y si se desprecian las resistencias su valor es  $(-90^\circ)$

Es decir antes del disturbio para poder resolver las ecuaciones anteriores se debe haber corrido un estudio de flujos (capítulo anterior) para determinar la potencia eléctrica entregada por cada máquina a la red en las terminales, para así determinar las posiciones angulares iniciales de sus rotores; para esto se calcula la corriente y caída de tensión por reactancia, aquí se debe tener en cuenta la representación de la máquina. En este estudio se ha considerado el modelo mas simple es -

decir una fuente de voltaje detras de la reactancia transitoria.

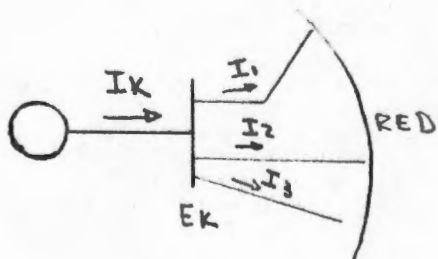


Fig. 3.2

$$S_k = E_k^* I_k = P_k - jQ_k$$

De datos del programa de flujos se tienen los datos de potencias y voltajes en cada nodo por lo que:

$$I_k = \frac{P_k - jQ_k}{E_k^*} \quad 3.23$$

El modelo matemático para la máquina será:

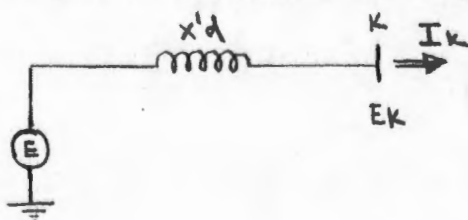


Fig. 3.3

Del diagrama vectorial se tiene:

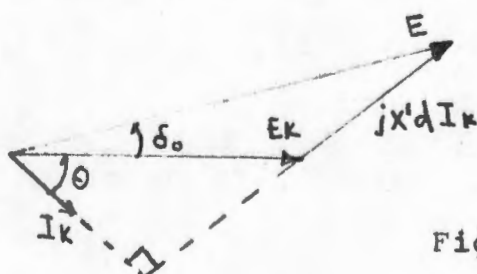


Fig. 3.4

$$E = E_k + jX_d^1 I_k \quad 3.24$$

$$E = |E| \angle \delta_0 \quad 3.25$$

Con lo anterior se determina el estado del sistema antes del disturbio, lo que se conoce como  $t^0(-)$ , en  $t^0(+)$  cambian las condiciones y es necesario determinar la potencia eléctrica, para esto se realiza otro estudio de flujos de carga, para esto es necesario-

considerar la influencia de la red.

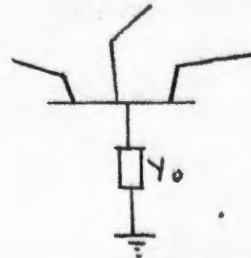
### 3.2 REPRESENTACION DE CARGAS ESTATICAS.

Al efectuar estudios de estabilidad transitoria es aceptado practicamente representar las cargas de tres formas:

- 1.- Como impedancia constantes ó mas bien admitancia constante a tierra.
- 2.- Como una corriente constante inyectada al bus.
- 3.- Como Potencia ( P y Q ) constante.

En este estudio se consideró la representación de las cargas como admitancia constante a tierra.

$$Y_0 = \frac{P - jQ}{E^2}$$



3.26

En la ecuación general de oscilación para un sistema de n - maquinas.

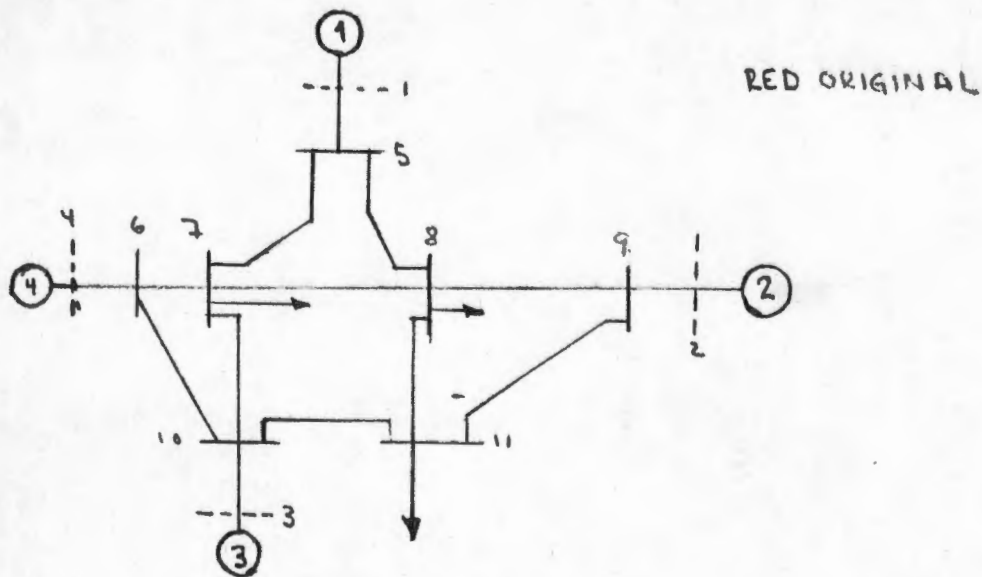
$$M_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = P_{mi} - \sum_{j=1}^n E_i E_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad 3.27$$

$i = 1, 2, \dots, n$

Para calcular el segundo miembro de esta ecuación, conocido como potencia eléctrica entregada a la red.

$$P_{ei} = \sum_{j=1}^n E_i E_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad 3.28$$

Es necesario conocer los valores de  $Y_{ij}$  admitancia de punto de alimentación ( $i=j$ ) y de transferencia ( $i \neq j$ ) entre máquinas del sistema. Esto conduce a una reducción de la red; o sea eliminar nodos que no conecten directamente a las máquinas entre si, es decir por este método la red se simplifica de tal forma que las máquinas quedan conectadas entre si directamente.



RED REDUCIDA

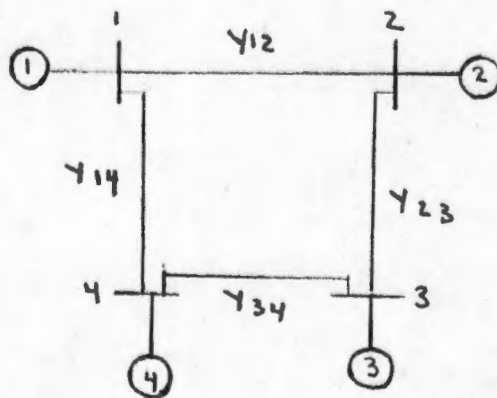


FIG. 3.5

El desarrollo de este método presenta dos alternativas. Una es la reducción de la red por combinación serie paralelo y reducciones sucesivas por transformaciones estrella- $\Delta$  y  $\Delta$  - estrella.

La otra alternativa es la reducción por medio de representaciones matriciales y haciendo uso del álgebra de matrices. Esta última es la que se empleará por ser la más usual y que en la actualidad no tiene dificultad relativamente con el empleo de las computadoras digitales. Este último método que se discute es semejante al que se presenta en la referencia (9).



Considerando un sistema como el que se muestra a continuación:

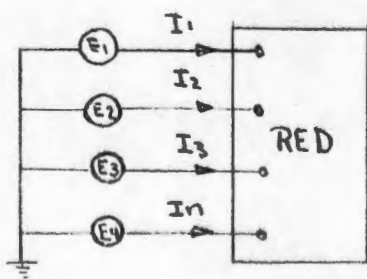


Fig. 3.6

$$[I] = [Y][E] \quad 3.29$$

I - Vector de corrientes impresas en la red.

Y - Matriz de admitancias de bus.

E - vector de voltajes de bus.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \dots Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \dots Y_{2n} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \dots Y_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & Y_{n3} \dots Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} \quad 3.30$$

Como lo que interesa es la reducción de la red, con las expresiones anteriores la matriz de corrientes se obtiene del producto de la matriz de admitancias en base de nodos y la matriz de los voltajes detras de las reactancias transitorias.

El procedimiento que se emplea se indica a continuación.

- 1.- Escribir la matriz de admitancia en base de modos.
- 2.- Se deben escribir en la matriz primero los nodos de las fuentes que proporcionan corriente al sistema (generadores).
- 3.- Se calcula la matriz de admitancias equivalentes.

La matriz de admitancias equivalentes se obtiene como sigue:

A la matriz de corrientes  $[I] = [Y][E]$  se le hace la partición  $G \times G$  donde  $G$  es el número de generadores.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ \hline I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ Y_{31} & Y_{32} & \dots & Y_{3n} \\ Y_{41} & Y_{42} & \dots & Y_{4n} \\ \hline Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ \hline E_n \end{bmatrix} \quad 3.31$$

Al hacer la partición se obtienen las sub matrices

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad 3.32$$

Haciendo operaciones.

$$I_1 = Y_{11} E_1 + Y_{12} E_2 \quad 3.33$$

$$0 = Y_{21} E_1 + Y_{22} E_2 \quad 3.34$$

Despejando de 3.33  $E_2$

$$E_2 = -Y_{22}^{-1} Y_{21} E_1$$

Y sust. en 3.34

$$I_1 = [Y_{11} - Y_{12} Y_{22}^{-1} Y_{21}] E_1 \quad 3.35$$

Donde la matriz de admitancias equivalentes es  $y$ , sus admitancias son las que conectan directamente a las fuentes.

$$Y = Y_{11} - Y_{12} Y_{22}^{-1} Y_{21} \quad 3.36$$

Esto se puede expresar en terminos de sus elementos. Con el fin de que para sistemas muy grandes la inversión de matrices no ocupe mucha memoria. Para esto unicamente se utiliza el algoritmo de reducción y que es el usado en este trabajo.

$$Y_{ij} \text{ nueva} = Y_{ij} \text{ vieja} - \frac{Y_{iQ} Y_{Qj}}{Y_{QQ}} \quad 3.37$$

Donde  $Y_{ij}$ ,  $Y_{iq}$ ,  $Y_{jl}$ ,  $Y_{ll}$  son elementos de  $Y_{Bus}$  y  $l$  es el nodo por eliminar y su única condición es que  $Y_{ll} \neq 0$ .

El procedimiento consiste en formar  $Y_{Bus}$  indicando primero los nodos que serán retenidos y después los nodos que se van a eliminar.

Por lo general se emplea la matriz de admitancias equivalentes para la solución de la ecuación de oscilación durante y después de la falla.

Durante la falla, la matriz de admitancias del sistema debe contener todos los elementos de la red, incluyendo las cargas en las barras que se representan como admitancias a tierra, y las reactancias transitorias de las máquinas, así como los nodos ficticios detrás de estas reactancias. Después de la falla la matriz  $Y_{bus}$  se modifica ya que la falla se libera desconectando una línea o líneas dependiendo de como o donde se encuentra la falla.

Ya vimos anteriormente que la ecuación de oscilación para cada máquina tiene la forma:

$$Si \quad M = \frac{H}{\pi f}$$

$$\frac{H_i}{\pi f} \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = P_{mi} - (E_i^2 Y_{ij} \cos \theta_{ij} - \sum E_i E_j \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j)) \quad (A)$$

Debe observarse que las cantidades que varían con el tiempo son los voltajes en los buses y las posiciones angulares de los rotores de cada máquina. La solución de estas ecuaciones da como resultado a

$\delta$  como función del tiempo  $\delta = f(t)$

El problema de estabilidad transitoria consiste en resolver tantas ecuaciones diferenciales de la forma (A) como máquinas tenga el sistema por esto no es posible emplear métodos directos para su solución (coeficientes indeterminados, transf. de Laplace etc). Debido a que interviene la variación de  $P_i$  y a la cantidad de trabajo que representan por lo que se emplean métodos de integración numérica. En este trabajo se utilizó el método de Runge Kutta de 4o orden que más adelante se explicará en que consiste.

Resumiendo en si en que consiste el estudio de estabilidad transitoria en un sistema multimáquinas con reducción de la red digamos que se divide en 3 etapas.

- 1.- Prefalla
- 2.- falla
3. Postfalla

1.- En la condición de prefalla es como hemos dicho hacer un estudio de flujos de carga para determinar cond. iniciales o sea potencias activas y reactivas, las corrientes a partir de los voltajes de buses externos, las tensiones y angulos internos de las máquinas en esta etapa Ybus está formado solo por las admitancias de la red es decir para líneas.

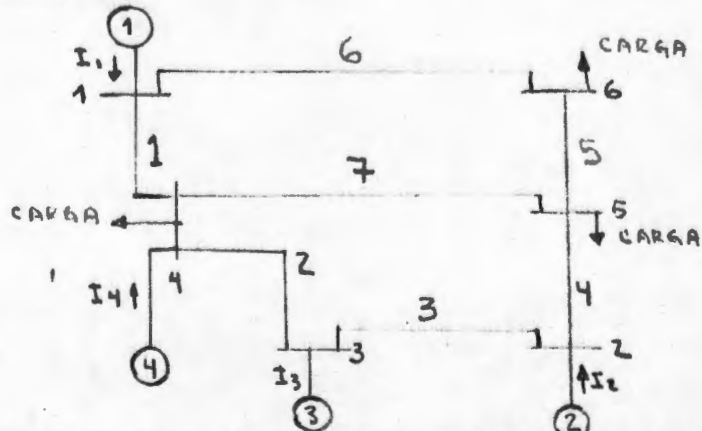
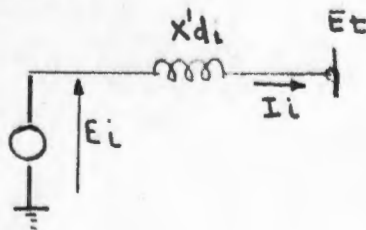


Fig. 3.7

O sea el diagrama que se tiene en el estudio de flujos en el Cap. II.

Así con las corrientes calculadas se calculan, los voltajes y angulos internos



$$E_i = E_t + jX'd_i I_i = |E_i| \angle \delta_i$$

3.38

2.- En el inicio de la falla se debe correr un nuevo estudio de flujos de carga, debido a que la red se modifica, es decir en este instante se modifica YBus. Ya que se presenta un bus adicional tierra al que se conectan todas las cargas, también aparecen los buses internos o sea los buses detras de las reactancias transitorias y el bus fallado se pone a tierra es decir  $V_{\text{fallado}} = 0$ , es decir se simula la falla con un corto circuito, muy cerca al bus, en éste caso fue en el bus 3 o sea

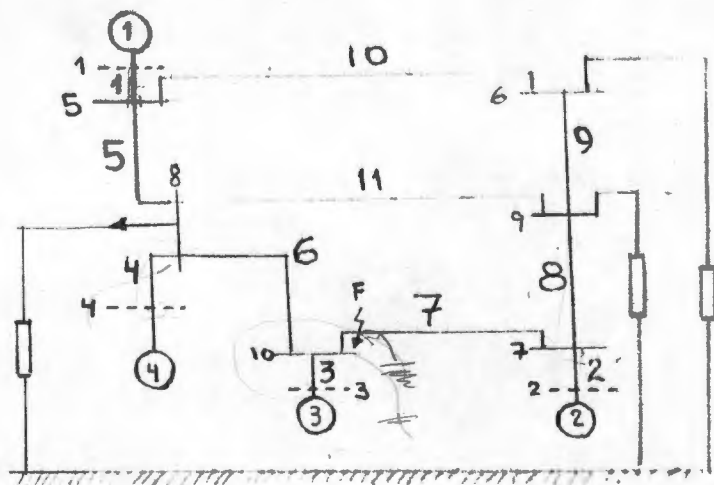


Fig 3.9,

Es decir tenemos 6 nodos reales más 4 ficticios de las máquinas y uno de tierra.

- 3.- Después de la falla o sea después de liberarla la red también se modifica es decir  $Y_{Bus}$  cambia ya que la simulación de liberar la falla se hace desconectando la línea fallada o sea su pongamos que al liberar la falla del bus 3 en el sistema se desconecta la línea entre los nodos 10 y 7, esto se refleja en la matriz  $Y_{Bus}$  como la eliminación del elemento  $Y_{107}$  y modifica los elementos  $Y_{1010}$  y  $Y_{77}$ .

Como la falla es liberada en períodos cortos 0,1 Seg. digamos, el sistema de ecuaciones para las máquinas, se integra hasta el período total del estudio ( en el caso que se analiza o sea estabilidad transitoria 1Seg

Para cada máquina se tiene una ecuación de oscilación

$$\frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = \frac{\pi f}{H_i} (P_{mi} - P_{ei}) \quad 3.39$$

donde

$$P_{ei} = \sum_{j=1}^n E_i E_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad 3.40$$

$i = 1, 2, 3, 4$

Para así integrar un sistema de ecuaciones como el anterior.

La solución de un sistema de ecuaciones como éste por lo general como ya se menciono, se emplea un método de integración numérica, el cual también ya se mencionó se trabajó con el método-

de Runge Kutta de 4o. orden.

### 3.3 METODO DE RUNGE KUTTA PARA LA SOLUCION DE LAS ECUACIONES DE OSCILACION.

Este método está basado en la reducción de una ó varias -- ecuaciones de 2o orden a un sistema de ecuaciones de 1o. orden, es decir el problema a resolver en forma general tiene la forma si -- siguiente:

$$\frac{dy_1}{dt} = f(t_1, y_1, y_2, \dots, y_n) \quad 3.41$$

$$\frac{dy_2}{dt} = f(t_1, y_1, y_2, \dots, y_n) \quad 3.42$$

$$\frac{dy_n}{dt} = f(t_1, y_1, y_2, \dots, y_n) \quad 3.43$$

La ecuación anterior se puede poner en forma sintetica como:

$$\frac{dY}{dt} = f(t, Y_1, Y_2 \dots Y_n) \quad 3.44$$

Se supone que se conoce las condiciones iniciales para la -- variable es decir:

$$Y(t_0) = Y_0$$

El método de Runge Kutta con aproximación de cuarto orden trata de encontrar la curva que de a Y como función del tiempo mediante la relación:

$$Y_1 = Y_0 + \frac{1}{6} (K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \quad 3.45$$

Donde:

$$K_1 = f(t_0, Y_0)h$$

$$K_2 = f(t_0 + \frac{h}{2}, Y_0 + \frac{K_1}{2})h$$

$$K_3 = f(t_0 + \frac{h}{2}, Y_0 + \frac{K_2}{2})h$$

$$K_4 = f(t_0 + h, Y_0 + K_3)h \quad 3.46$$

Donde h es el incremento de integración en el tiempo ( 0.01, 0.02, 0.04 etc.)

Es importante notar que existe un juego de constantes  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$  para cada ecuación y que los argumentos de  $f$  entran las funciones  $y$ . Por otra parte notese que es necesario calcular todas  $K_1$ , antes de calcular  $K_2$  y todas las  $K_2$  antes de  $K_3$  etc.

La notación general para un sistema de  $n$  ecuaciones de la forma:

$$\frac{dy_i}{dt} = f(t, y_1, y_2, y_3, \dots, y_n) \quad 3.46$$

$$i = 1, \dots, n$$

$n$  = número de ecuaciones

la solución:

$$y_{ii} = y_{0i} + \frac{1}{6} (K_{1i} + 2K_{2i} + 2K_{3i} + K_{4i})$$

las constantes:

3.47

$$K_{1i} = f(t_0, y_{0i})h$$

$$K_{2i} = f\left(t_0 + \frac{h}{2}, y_{0i} + \frac{K_{1i}}{2}\right)h$$

$$K_{3i} = f\left(t_0 + \frac{h}{2}, y_{0i} + \frac{K_{2i}}{2}\right)h$$

$$K_{4i} = f(t_0 + h, y_0 + K_{3i})h$$

3.48

En nuestro caso para la ecuación de oscilación.

$$\frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = \frac{\pi f}{H_i} (P_{mi} - P_{ei}) \quad 3.49$$

Siguiendo el método de Runge Kutta con aproximación de 4o. orden la ecuación anterior se descompone en dos ecuaciones de 1er orden, es decir las ecuaciones por resolver por generadores:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = w_i(t) - w_{0i} \quad 3.50$$

$$\frac{dw_i}{dt} = \frac{\pi f}{H_i} (P_{mi} - P_{ei}) \quad 3.51$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

La solución para cada ecuaciones por Runge Kutta con aproximación de 4o orden será :

$$\delta_{i1} = \delta_{0i} + \frac{1}{6} (K_{i1} + 2K_{21} + 2K_{31} + K_{41}) \quad 3.52$$

$$\omega_{i1} = \omega_{0i} + \frac{1}{6} (K'_{i1} + 2K'_{21} + 2K'_{31} + K'_{41}) \quad 3.53$$

Las constantes  $K_1$  ,  $K_2$  ,  $K_3$  y  $K_4$  suponiendo para un sistema de dos máquinas para poder comprenderlo mas facilmente son:

$$K_{11} = (\omega_1(t) - 2\pi f) h$$

$$K_{12} = (\omega_2(t) - 2\pi f) h$$

$$K_{13} = \frac{\pi f}{H_1} (P_{M1} - P_{e1}) h$$

3.54

$$K_{14} = \frac{\pi f}{H_2} (P_{M2} - P_{e2}) h$$

$P_{e1}$  y  $P_{e2}$  Potencias de Prefalla.

Los primeros indices de las constantes  $K$  indican el número de constante.

Los 2<sup>os</sup> indices de las constantes  $K$  indican el número de ecuaciones, como en este caso se tienen 4 máquinas en total se tendrán 4 ecuaciones dos para  $\delta$  y dos para  $\omega$  asi que los indices 1 y 2 son para las deltas de la máquina 1 y 2, similarmente los 3 y 4 son para las  $\omega$  de las máquinas 1 y 2 respectivamente.

Para las  $K_2$  se corre otro flujo de cargas para determinar  $P_{e1}'$  y  $P_{e2}'$ , con los angulos iniciales obtenidos en el intervalo  $t_0+h$  para las  $K_1$  o sea

$$\delta_1 = \delta_1^0 + \frac{K_{11}}{2}$$

3.55

$$\delta_2 = \delta_2^0 + \frac{K_{12}}{2}$$

Asi tenemos.

$$K_{21} = [\omega_1(t) + \frac{K_{13}}{2} - 2\pi f] h = (K_{11} + \frac{K_{13}}{2}) h$$

$$K_{22} = [\omega_2(t) + \frac{K_{14}}{2} - 2\pi f] h = (K_{12} + \frac{K_{14}}{2}) h$$

$$K_{23} = \frac{\pi f}{H_1} [P_{M1} - P_{e1}'] h$$

3.56

$$K_{24} = \frac{\pi f}{H_2} [P_{M2} - P_{e2}'] h$$



Similarmente se repite lo anterior para calcular las  $K_3$ , o sea se corre otro flujo de carga para determinar  $P_{e1}''$  y  $P_{e2}''$  con los ángulos ahora obtenidos con las  $K_2$  o sea son ahora los ángulos iniciales  $\delta^0$

$$\delta_1 = \delta_1^0 + \frac{K_{21}}{2} \quad 3.57$$

$$\delta_2 = \delta_2^0 + \frac{K_{22}}{2}$$

Así tenemos:

$$K_{31} = [w_1(t) + \frac{K_{23}}{2} - 2\pi f] h$$

$$K_{32} = [w_2(t) + \frac{K_{24}}{2} - 2\pi f] h$$

3.58

$$K_{33} = \frac{\pi f}{H_1} (PM_1 - P_{e1}'') h$$

$$K_{34} = \frac{\pi f}{H_2} (PM_2 - P_{e2}'') h$$

Por último se calculan las constantes  $K_4$  de la misma forma, o sea que ahora se corre otro estudio de flujos, ahora como ángulos iniciales, los ángulos calculados con las  $K_3$  obteniendo  $P_{e1}'''$ ,  $P_{e2}'''$ .

$$\delta_1 = \delta_1^0 + K_{31} \quad 3.59$$

$$\delta_2 = \delta_2^0 + K_{32}$$

Así tenemos:

$$K_{41} = [(w_1(t) + K_{33}) - 2\pi f] h$$

$$K_{42} = [(w_2(t) + K_{34}) - 2\pi f] h$$

3.60

$$K_{43} = \frac{\pi f}{H_1} (PM_1 - P_{e1}''') h$$

$$K_{44} = \frac{\pi f}{H_2} (PM_2 - P_{e2}''') h$$

Los valores de  $\delta$  y  $w$  en la primera iteración son:

$$\delta_{ii} = \delta_i(t_0) + \frac{1}{6} (K_{i1} + 2K_{i2} + 2K_{i3} + K_{i4}) \quad 3.61$$

$$w_{ii} = w_i(t_0) + \frac{1}{6} (K_{i1} + 2K_{21} + 2K_{31} + K_{41}) \quad 3.62$$

Se repite todo lo anterior para el siguiente intervalo y así sucesivamente hasta el tiempo de liberación, suponiendo 0.1 Seg. y después se modifica YBus para el período de postfalla y se repite de nuevo todo hasta el tiempo de estudio o sea 1 Seg.

A continuación se dará un resumen de pasos para el estudio de estabilidad transitoria en un sistema multimáquinas por el método de reducción de la red.

### 3.4 Resumen de pasos para el estudio de estabilidad transitoria, por el método de reducción de la red.

- 1.- Los parámetros de las máquinas en estudio son leídos y almacenados usando los resultados de flujos de carga previos.
- 2.- Los parámetros de las líneas (impedancia) son leídos y la matriz de admitancia de Bus es formada. YBus se formó por inspección usando:

$$Y_{ii} \text{ nueva} = Y_{ii} \text{ vieja} + Y_{ij}$$

$$Y_{jj} \text{ nueva} = Y_{jj} \text{ vieja} + Y_{ij}$$

$$Y_{ij} \text{ nueva} = Y_{ji} \text{ nueva} = Y_{ij} \text{ vieja} - Y_{ij}$$

$Y_{ii}$ ,  $Y_{jj}$ ,  $Y_{ij}$  son los elementos de YBus  $Y_{ij}$  es la admitancia de la línea.

- 3.- Con las potencias netas en los buses se calculan los voltajes internos de las máquinas así como su posición angular.

$$E = E_t + j X'd I$$

$$I = \frac{P_i - j Q_i}{E_t^*}$$

$E_t$  — VOLTAJE DEL BUS TERMINAL

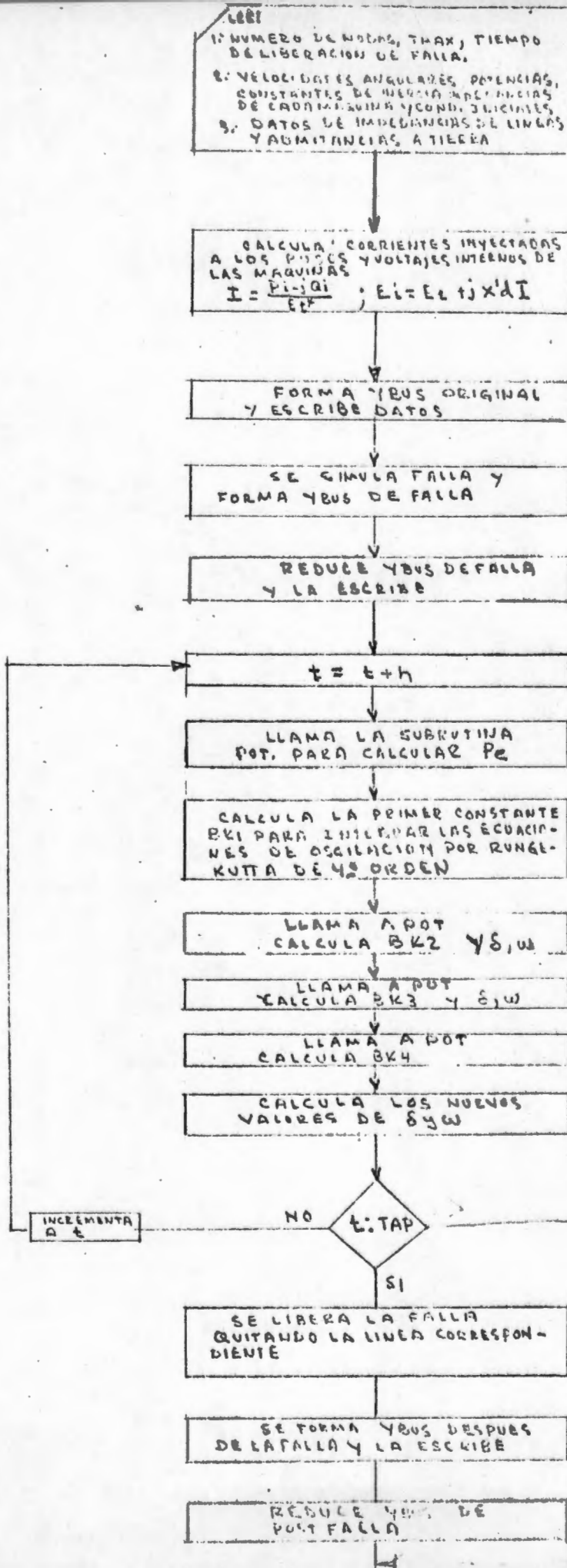
- 4.- Se simula la falla modificando YBus al agregar las admitancias a tierra que representan las cargas y se crean los nodos internos de cada máquina y se reduce YBus por el algoritmo de reducción.

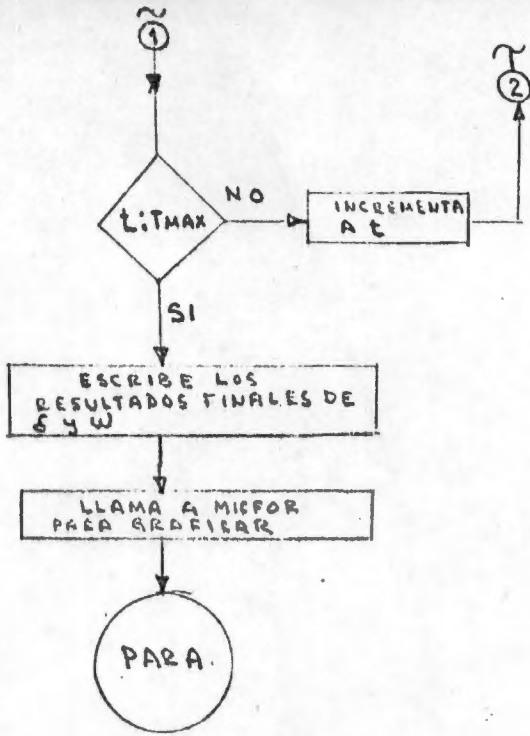
$$Y_{ij} \text{ nueva} = Y_{ij} \text{ vieja} - Y_{i\lambda} Y_{j\lambda} / Y_{\lambda\lambda}$$

$\lambda$  es el Bus por eliminar.

- 5.- Se calculan las nuevas potencias eléctricas en los generadores.
- 6.- Se integra la ecuación de oscilación por el método de Runge Kutta de 4o. orden, hasta el tiempo de liberar la falla.
- 7.- Se libera la falla, desconectando la línea fallada y se modifica YBus y se reduce por el algoritmo de reducción.
- 8.- Se corre un flujo de carga para volver a integrar la ecuación de oscilación (en estado de post falla) por Runge Kutta hasta el tiempo máximo de estudio que para estabilidad transitoria es 1 Seg.

El diagrama de bloques para el estudio de estabilidad transitoria por éste método de reducción de la red se da a continuación en la fig:





SUBROUTINA POT

UNICAMENTE CALCULA  
POTENCIAS ACTIVAS  
Y REACTIVAS

RETURN

### 3.5 ESTUDIO DE ESTABILIDAD TRANSITORIA EN SISTEMAS MULTIMAQUINAS POR EL METODO DE BARRAS RETENIDAS.

Este método es uno de los más comunes, ya que no se reduce la red como en el caso anterior, así podemos tener una información más completa de la red durante el transitorio es decir podemos obtener voltajes en todos los buses, flujos de potencia, posición del rotor de las máquinas, además si se quiere la carga puede tener una representación más sofisticada. El inconveniente que se tiene para este estudio relativamente, es un consumo de más tiempo de cómputo.

El problema de estabilidad transitoria por este método se divide en dos partes.

- a).- Un estudio de flujos que permite obtener las condiciones iniciales del sistema y además información necesaria de  $P$ ,  $\delta$ ,  $V$ , para cada tiempo  $t$  durante y después del disturbio.
- b).- Solución de un sistema de ecuaciones diferenciales cuyo número es igual al número de máquinas del sistema y que normalmente se hace por métodos numéricos que permiten su programación en una forma relativamente fácil y su solución requiere poco tiempo.

El método utilizado en este trabajo fue el igual que en el método anterior, el método de Runge Kutta de 4o orden.

El estudio de estabilidad por este método parte de un diagrama unifilar del sistema en que se indiquen todos los datos necesarios, como impedancias de líneas, cargas, tensiones, etc. a pesar de ser un método en cierto modo preciso, en este estudio se han hecho las simplificaciones similares a las del primer método, o sea:

- 1.- Voltaje constante detrás de las reactancias transitorias de las máquinas ( se desprecia saliencia )
- 2.- Potencia mecánica constante.
- 3.- Se desprende el amortiguamiento.
- 4.- La representación de la carga se hace como admitancia constante a tierra, como potencia constante, ó como corriente constante.
- 5.- No se considera acción del regulador y excitatriz.

Para comprender este método de estudio a continuación se darán los pasos a seguir para resolver la ecuación de oscilación.

$$\frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = \frac{\pi f}{H_i} (P_{mi} - P_{ei}) \quad 3.63$$

1.- En primer lugar se debe tener el diagrama unifilar del sistema por estudiar, en donde se indiquen todos los datos de interés como ya se dijo impedancias de líneas, datos de máquinas y datos del estudio de flujos.

En nuestro estudio el Sistema por estudiar es el siguiente:

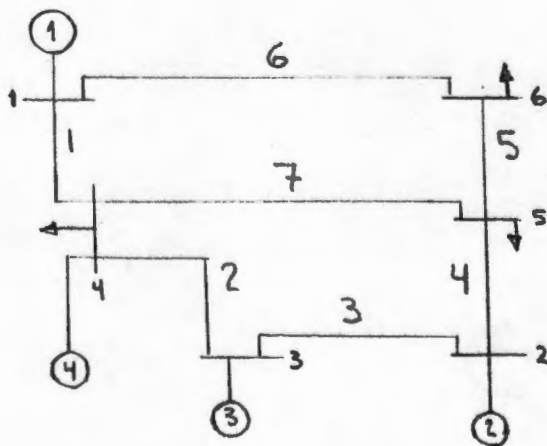


Fig. 3.10

2.- Se forma el sistema inicial y se hace un estudio de flujos de carga para determinar las condiciones iniciales en los buses terminales.

3.- Se efectúa el estudio de flujos para determinar las corrientes inyectadas a los buses y así poder determinar los voltajes detrás de las reactancias transitorias y sus posiciones angulares de los rotores iniciales

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{E_t^*} \quad 3.64$$

$$E_i = E_t + jX'd_i I_i = |E_i| \angle \delta_i \quad 3.65$$

4.- Se simula la falla, que en éste caso es una falla trifásica, por lo que únicamente se utiliza la red de secuencia positiva. La falla es simulada poniendo el voltaje de bus fallado igual a cero. para esto se tiene que modificar la  $Y_{Bus}$ , ya que se incluye los buses internos, como el bus tierra, así como la representación de las cargas como admitancias a tierra. En este caso la red queda como:

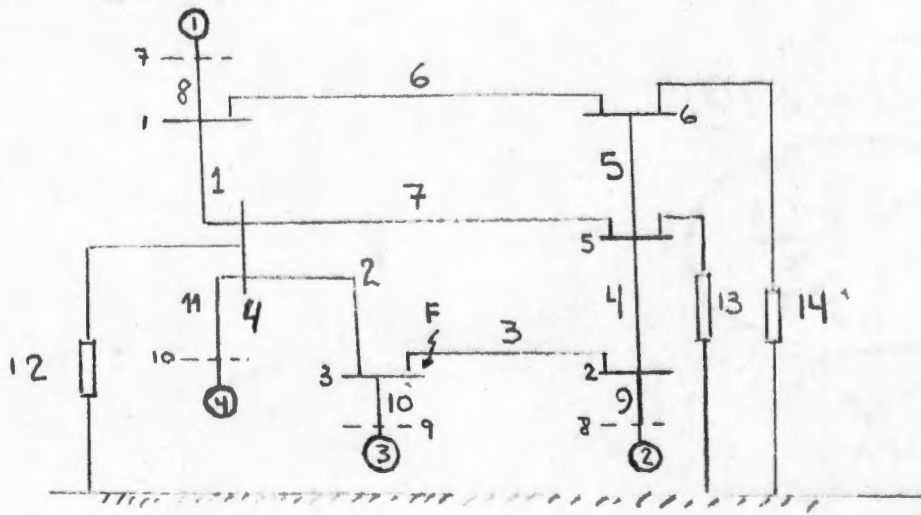


Fig. 3.11

Y se forma  $Y_{Bus}$  de falla así se corre otro estudio de flujos para obtener las potencias de aceleración. Este estudio comprende el estudio de flujos por Gauss Seidel con la modificación correspondiente debido a la representación de la carga, así tenemos que si las cargas se representan como:

Usando la matriz de admitancia con tierra como referencia la ecuación de voltajes para el bus  $k$  es:

$$V_k = \frac{(P_k - jQ_k) L_k}{E_k^*} - \sum_{\substack{j=1 \\ k \neq j}}^n Y_{Lkj} V_j \quad 3.66$$



El término  $\frac{P_k - jQ_k}{E_k^*}$  representa la corriente de carga en el Bus K.

Este término cambia si

a).- La carga se representa como una corriente constante inyectada al Bus en este caso la ecuación sería.

$$E_k = I_k L_k - \sum_{\substack{j=1 \\ k \neq j}}^n Y_{Lkj} V_j \quad 3.67$$

b).- La carga es representada como potencia constante, para este caso  $(P_k - jQ_k) L_k$  permanece constante pero el voltaje del bus  $E_k$  cambiará en cada iteración.

$$E_k = \frac{(P_k - jQ_k) L_k}{E_k^*} - \sum_{\substack{j=1 \\ k \neq j}}^n Y_{Lkj} V_j \quad 3.68$$

c).- La carga es representada por una admitancia constante a tierra, en este caso la corriente impresa en el bus es cero y el termino:

$$\frac{(P_k - jQ_k) L_k}{E_k^*} = 0 \quad 3.69$$

$$E_k = - \sum_{\substack{j=1 \\ k \neq j}}^n Y_{Lkj} V_j \quad 3.70$$

5.- Se resuelven las ecuaciones diferenciales

$$\frac{ds_i}{dt} = \omega_i(t) - \omega_d(t)$$

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{\pi f}{H_i} (P_{mi} - P_{ei})$$

Por el método de Runge Kutta para así obtener los nuevos ángulos del rotor hasta el tiempo de liberación de la falla.

6.- Se libera la falla y se vuelve a modificar la red VBus, debido a que para liberar se quita la línea donde se simuló la falla muy cerca de bus.

Y se vuelve a correr un estudio de flujos para seguir integrando las ecuaciones de oscilación hasta el tiempo máximo de estudio Tmax.

El diagrama de flujos para el estudio efectuado se da a continuación.

LECTURA DE DATOS PARA LA RED  
IMPEDANCIAS, POTENCIAS, CARGAS,  
Nº DE NODOS, Nº DE LINEAS,  
ADMITANCIAS A TIERRA, TMAX,

LECTURA DEL NODO DE FALLA  
Y LINEA O LINEAS POR ELIMINAR  
PARA DESCONECTAR LA FALLA

CALCULO DE LAS POTENCIAS  
NETAS PARA CADA BUS Y SE  
FORMA YBUS POR INSPECCION ANTES  
DE FALLA

SE CORRE UN ESTUDIO DE  
FLUJOS DE CARGA DE PREFALLA  
AQUI SE PUEDE CONSIDERAR LA  
REPRESENTACION DE CARGAS COMO  
POTENCIA O CORRIENTE CONSTANTE

SE CALCULAN LOS VOLTAJES  
INTERNOS PARA CADA MAQUINA  
Y SU POSICION ANGULAR  
 $I = \frac{P - jQ}{E}$

$$E_i = E_t + jX'_d I$$

SE PRODUCE LA FALLA  
MODIFICANDO A YBUS AL AGREGAR  
LAS CARGAS COMO ADMITANCIAS  
CONSTANTES  $Y = \frac{P - jQ}{E_t} = G - jB$   
Y SE CREAN LOS NODOS INTERNOS  
PARA CADA MAQUINA.

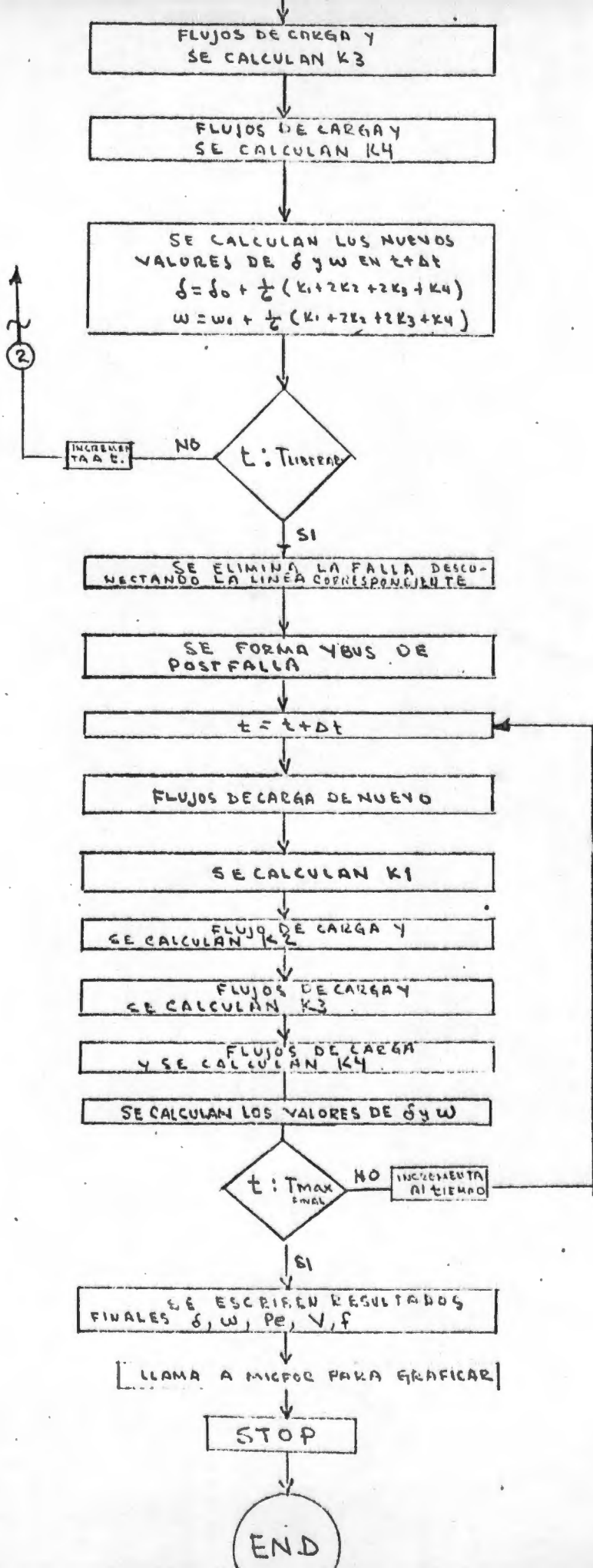
SE CALCULA LAS NUEVAS  
POTENCIAS ELECTRICAS DE GENERADORES

$$E = E + h$$

SE CALCULAN LAS K1

FLUJOS DE CARGA Y  
SE CALCULAN K2





FLUJOS DE CARGA Y SE CALCULAN K3

FLUJOS DE CARGA Y SE CALCULAN K4

SE CALCULAN LOS NUEVOS VALORES DE  $\delta$  y  $w$  EN  $t+dt$   
 $\delta = \delta_0 + \frac{1}{2} (K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4)$   
 $w = w_0 + \frac{1}{2} (K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4)$

t : Tlimite

SE ELIMINA LA FALLA DESCONECTANDO LA LINEA CORRESPONDIENTE

SE FORMA YBUS DE POSTFALLA

t = t + dt

FLUJOS DE CARGA DE NUEVO

SE CALCULAN K1

FLUJO DE CARGA Y SE CALCULAN K2

FLUJOS DE CARGA Y SE CALCULAN K3

FLUJOS DE CARGA Y SE CALCULAN K4

SE CALCULAN LOS VALORES DE  $\delta$  y  $w$

t : Tmax final

SE ESCRIBEN RESULTADOS FINALES  $\delta, w, P_e, V, f$

LLAMA A MICRO PARA GRAFICAR

STOP

END

## CAPITULO IV

## ANALISIS DE RESULTADOS EN EL MODELO EMPLEADO.

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos para los dos métodos de análisis respecto a estudios de estabilidad transitoria. La lógica de los programas utilizados se dieron en el capítulo anterior por medio de diagramas de bloque y los listados de computadora se darán a continuación. Con estos programas se hicieron varios estudios en cuanto a tiempos de liberación con el fin de tener una idea de cuando el sistema se puede hacer inestable y así saber en que orden está el tiempo crítico de liberación de la falla; para el método de nodos retenidos en particular también se hacen diferentes representaciones de carga, los mas usuales para este tipo de estudios, con el fin de ver cuanto o como varía este tiempo crítico de liberación, se debe hacer notar que en estos estudios no se representaron cargas dinámicas ya que esto implica un estudio particular al respecto, y que es el estudio de cargas dinámicas y su efecto en estabilidad dinámica [8] .

En los dos métodos de análisis se utilizaron como datos iniciales, los obtenidos en el capítulo II, y se verá que los datos referentes a las admitancias de líneas y máquinas se da en orden diferente, pero esto se puede comprender del capítulo anterior, que es mas conveniente dar para el primer método como líneas de 1 a 4 las admitancias de las máquinas ya que esto conviene para el algoritmo de reducción, en cambio para el método de nodos retenidos estos datos se dan en función de como ordenar los datos de cargas y así poderlas representar de las tres formas mencionadas.

En primer lugar daremos los resultados obtenidos para el método de reducción de la red a los nodos internos y por último los resultados correspondientes al segundo método o sea el de nodos retenidos.

4.1. Resultados obtenidos del estudio de estabilidad transitoria por el método de reducción de la red.

Los datos utilizados para éste estudio son:

LINEA	SEZ	SH V
1	0.00 j0.125	0.0 j0.0
2	0.00 j0.100	0.0 j0.0
3	0.00 j0.125	0.0 j0.0
4	0.00 j0.250	0.0 j0.0
5	0.05 j0.200	0.0 j0.0
6	0.10 j0.500	0.0 j0.0
7	0.20 j0.800	0.0 j0.0
8	0.10 j0.300	0.0 j0.0
9	0.20 j0.400	0.0 j0.0
10	0.10 j0.150	0.0 j0.0
11	0.20 j0.500	0.0 j0.0

DATOS DE GENERADORES

MAQUINA	Pot. NOMINAL	X d	H
1	1.00	0.125	4.5
2	0.30	0.100	4.0
3	0.40	0.125	4.5
4	0.15	0.100	4.0

DATOS INICIALES (Flujos de carga)

MAQUINA	PG	QG	V	δ	CARGAS	PL	QL
1	0.332	0.091	1.00	0	BUS 6	0.30	0.10
2	0.200	0.100	1.025	1.41	BUS 9	0.40	0.15
3	0.300	0.200	1.084	4.62	BUS 8	0.20	0.10
4	0.100	0.050	1.002	-0.12			

El orden de líneas y buses estan en base a la figura 3.9

```

COMMON Y(10,10),YF(10,10),YFR(10,10),SEZ(20),SERY(20),SHY(20),
TET(10,10),YFN(10,10),TETP(10,10),
TLINE(20),SB(20),EB(20),PT,PT2,SHY1(20),AMAGY(10,10),
COF(4),COL(4),EI(4),SERZ(4),CO(4),AMAGE(4),PL(4),QL(4),
BK1(4),BK2(4),BK3(4),BK4(4),PK1P(4),PK2P(4),BK3P(4),BK4P(4),
G(4),XH(4),PH(4),AM(4),D(4),PA(4)
    
```

```

COMMON/ONE/
PB(4),PC(4),W(4),PD(4),FS(4),AMAGCO(4),DELTA(4),
PE(4),E(4),PG(4),QG(4),WS(4),FREQ(4),DELT(4),
PHF(4),DWS(4),X1(4),X2(4),T1(4),T2(4),DPN(4),PC1(4),
Q(4),QE(4),DELT1(4),
VR(4),VI(4),V(4),
PAI,
T, AH,
VGR(4),VGL(4),VF(4),AMAGVF(4),
DELTA1(53),DELTA2(53),DELTA3(53),DELTA4(53),TIME(53)
    
```

C  
C  
C  
C  
C  
C  
C  
C  
C

N=NUMERO DE NUDOS  
 THAX=TIEMPO MAXIMO DE ESTUDIO  
 AH=INCREMENTO DE TIEMPO  
 F=FRECUENCIA EN HERTZ  
 TAP=TIEMPO DE OPERACION DEL INTERRUPTOR  
 NB=NUMERO TOTAL DE BUSES PARA LA RED COMPLETA  
 NBR=NUMERO DE BUSES SIN EL BUS FALLADO=NB-BUS DE FALLA  
 NNE=NUMERO DE BUSES A ELIMINAR  
 NE=NUMERO DE LINEAS DE TRANSMISION  
 SERY=ADMITANCIA PRIMITIVA (1.0/IMPEDANCIA PRIMITIVA)

C  
C

SHY=SUSCEPTANCIA  
 SHY1=CARGA REPRESENTADA COMO ADMITANCIA A TIERRA  
 PH(I)=POTENCIA MECANICA DE LAS MAQUINAS

```

200 READ(5,200)N,THAX,F,AH,TAP
    FORMAT(I2,4F10.5)
101 READ(5,101)P91,PAI
    FORMAT(2F10.5)
    READ(5,103)(W(I),I=1,N)
    READ(5,103)(G(I),I=1,N)
    READ(5,103)(XH(I),I=1,N)
    READ(5,103)(PH(I),I=1,N)
103 FORMAT(4F10.3)
    WRITE(6,1010)
1010 FORMAT(50X,' INFORMACION REQUERIDA')
    DO 69 I=1,N
1040 READ(5,1040) SERZ(I),PL(I),QL(I),V(I),DELTA(I)
    FORMAT(6F10.5)
    WRITE(6,1041) SERZ(I),PL(I),QL(I),V(I),DELTA(I)
1041 FORMAT(5X,6F10.5)
69 CONTINUE
    READ(5,1100)NB,NE,NNE
1100 FORMAT(3I5)
    DO 71 I=1,NC
71 READ(5,1101)TLINE(I),SB(I),EB(I),SEZ(I),SHY(I),SHY1(I)
1101 FORMAT(3I5,6F10.4)
    WRITE(6,1080)
1080 FORMAT(/25X,' OMEGA INICIAL')
    WRITE(6,1001)(W(I),I=1,N)
    WRITE(6,1090)
1090 FORMAT(/20X,' POTENCIA MEC Y CONSTANTE DE INERCIA')
    WRITE(6,1001)(PH(I),I=1,N)
    WRITE(6,1001)(XH(I),I=1,N)
    DO 300 I=1,N
    VR(I)=V(I)*COS(DELTA(I)*PAI/180.0)
    VI(I)=V(I)*SIN(DELTA(I)*PAI/180.0)
    EI(I)=CMPLX(VR(I),VI(I))
    CO(I)=CMPLX(PL(I),-QL(I))/CONJG(EI(I))
    AMAGCO(I)=CABS(CO(I))
    E(I)=EI(I)+(SERZ(I))*CO(I)
    AMAGE(I)=CABS(E(I))
    DELT(I)=ATAN2(AMAG(E(I)),REAL(E(I)))*57.2957
300 CONTINUE
    WRITE(6,1050)
1050 FORMAT(/25X,' CONDICIONES INICIALES DE VOLT')
    WRITE(6,1002)(E(I),I=1,N)
    WRITE(6,1001)(AMAGE(I),I=1,N)
    WRITE(6,1060)
1060 FORMAT(/30X,' FLUJO DE CORRIENTE')
    WRITE(6,1002)(CO(I),I=1,N)
    WRITE(6,1001)(AMAGCO(I),I=1,N)
1001 FORMAT(15X,F10.5,5X,F10.5,5X,F10.5,5X,F10.5)
1002 FORMAT(15X,F10.5,3X,F10.5,3X,F10.5,3X,F10.5,3X,F10.5,3X,F10.5,3X,F10.5,3X,F10.5,3X,F10.5,3X,F10.5,3X,F10.5,3X,F10.5,3X)
    
```

7

- DUPLICATE ARGUMENT IN STANDARD FUNCTION  
- IS CONSTANT ARGUMENTS FOR - CMLPX CORRECT

74

```
76 CONTINUE
DO 2500 I=5,NB
SERY(I)=1.0/SEZ(I)
MATRIZ DE ADMITANCIA DE BUS
L=SB(I)
M=EB(I)
Y(L,L)=Y(L,L)+SERY(I)+SHY(I)
Y(M,M)=Y(M,M)+SEPY(I)+SHY(I)
Y(L,M)=Y(L,M)-SERY(I)
Y(M,L)=Y(M,L)-SERY(I)
C ESCRITURA DE DATOS DE ENTRADA Y MATRIZ YBUS
WRITE(6,1102) TLINE(I),SB(I),EB(I),SEZ(I),SERY(I),SHY(I)-
2500 CONTINUE
1102 FORMAT(6X,3I5,5X,2F10.5,5X,2F10.5,5X,2F10.3)
WRITE(6,1103)
1103 FORMAT(/38X,'MATRIZ YBUS ORIGINAL'/)
DO 2555 I=5,NB
WRITE(6,1104) (Y(I,J),J=5,NB)
2555 CONTINUE
1104 FORMAT(2X,6(F8.3,1X,F8.3,1X)/)
C MATRIZ YBUS DE FALLA
DO 77 I=1,NB
DO 78 J=1,NB
78 YF(I,J)=CMLPX(0.0,0.0)
- DUPLICATE ARGUMENT IN STANDARD FUNCTION
- IS CONSTANT ARGUMENTS FOR - CMLPX CORRECT
77 CONTINUE
```

```
DO 2501 I=1,NE
SERY(I)=1.0/SEZ(I)
L=SB(I)
M=EB(I)
YF(L,L)=YF(L,L)+SERY(I)+SHY(I)
YF(M,M)=YF(M,M)+SERY(I)+SHY(I)+SHY1(I)
YF(L,M)=YF(L,M)-SERY(I)
YF(M,L)=YF(M,L)-SERY(I)
C ESCRITURA DE LA MATRIZ DE FALLA Y DATOS DE ENTRADA
WRITE(6,1109) TLINE(I),SB(I),EB(I),SEZ(I),SERY(I),SHY(I),SHY1(I)
2501 CONTINUE
1109 FORMAT(6X,3I5,2F10.5,5X,2F10.5,5X,2F10.3,5X,2F10.3)
WRITE(6,1106)
1106 FORMAT(/53X,'MATRIZ YBUS DE FALLA'/)
NBR=NB-1
DO 2556 I=1,NBR
WRITE(6,1107) (YF(I,J),J=1,NBR)
2556 CONTINUE
1107 FORMAT(2X,18F7.2/)
WRITE(6,704)
704 FORMAT(/30X,'YBUS DE FALLA REDUCIDA'/)
DO 701 K=1,NNE
NL=NBR-K
N1=NL+1
DO 701 I=1,NL
DO 701 J=1,NL
PT=YF(I,N1)+YF(N1,J)/YF(N1,N1)
YF(I,J)=YF(I,J)-PT
AMAGY(I,J)=CABS(YF(I,J))
701 CONTINUE
LL=NBR-NNE
DO 705 I=1,LL
WRITE(6,906) (YF(I,J),J=1,LL)
705 CONTINUE
DO 805 I=1,LL
WRITE(6,906) (AMAGY(I,J),J=1,LL)
805 CONTINUE
DO 309 K=1,LL
DO 309 I=1,LL
IF(ATMAG(YF(I,K)).EQ.0.0.AND.REAL(YF(I,K)).EQ.0.0)GOTO 2000
TETR(I,K)=ATAN2(AIMAG(YF(I,K)),REAL(YF(I,K)))*57.2957
GOTO 709
2000 IF+R(I,K)=0.0
309 CONTINUE
DO 905 I=1,LL
WRITE(6,906) (TETR(I,J),J=1,LL)
905 FORMAT(2X,8F10.5/)
906 FORMAT(/2X,4F10.5/)
WRITE(6,1044)
1044 FORMAT(/5X,'ANGULOS INTERNOS DE PREFALLA'/)
IP=9
II=1
```



```

L2=0
DO 1 I=1,N
D(I)=DELTA(I)
DELTA1(I)=DELTA(I)
WRITE(6,1043)DELTA1(I)
1043 FORMAT(8X,4F10.5)
IF(KR-N)2,2,1
2 AM(I)=(G(I)*XH(I))/(F*180.0)
KR=KR+1
1 CONTINUE
41 IP=IP+1
DELTA1(IP)=DELTA(1)
DELTA2(IP)=DELTA(2)
DELTA3(IP)=DELTA(3)
DELTA4(IP)=DELTA(4)
TIME(IP)=T
L2=L2+1
IF(L2-1)3,3,4
3 DO 5 I=1,1
CALL POT(N,I)
PA(I)=PE(I)
QE(I)=Q(I)
BK1(I)=(PM(I)-PE(I))/AM(I)*AH
DELTA(I)=D(I)+W(I)*AH/2.0
J=3
VGR(I)=AMAGE(I)*COS(DELTA(I)*PAI/180.0)
VGI(I)=AMAGE(I)*SIN(DELTA(I)*PAI/180.0)
VF(I)=CMPLX(VGR(I),VGI(I))

```

```

AMAGVF(I)=CABS(VF(I))
5 CONTINUE
GOTO 8
4 DO 6 I=1,N
PD(I)=PE(I)
BK1(I)=(PM(I)-PE(I))/AM(I)*AH
6 BK1P(I)=PD(I)-PA(I)
8 IF(L2-1)9,9,10
9 DO 11 I=1,N
CALL POT(N,I)
QE(I)=Q(I)
11 BK2(I)=(PM(I)-PE(I))/AM(I)*AH
GOTO 13
10 DO 12 I=1,N
PB(I)=PD(I)+BK1P(I)/2.0
BK2(I)=(PM(I)-PB(I))/AM(I)*AH
12 BK2P(I)=(PB(I)-PD(I))*2.0
GOTO 15
13 DO 14 I=1,N
DELTA(I)=D(I)+(W(I)+BK1(I)/2.0)*AH/2.0
J=3
VGR(I)=AMAGE(I)*COS(DELTA(I)*PAI/180.0)
VGI(I)=AMAGE(I)*SIN(DELTA(I)*PAI/180.0)
VF(I)=CMPLX(VGR(I),VGI(I))
AMAGVF(I)=CABS(VF(I))
14 CONTINUE
DO 16 I=1,N
CALL POT(N,I)
QE(I)=Q(I)
16 BK3(I)=(PM(I)-PE(I))/AM(I)*AH
GOTO 18
15 DO 17 I=1,N
PC(I)=PD(I)+BK2P(I)/2.0
BK3(I)=(PM(I)-PC(I))/AM(I)*AH
17 BK3P(I)=2.0*(PC(I)-PD(I))
GOTO 20
18 DO 19 I=1,N
DELTA(I)=D(I)+(W(I)+BK2(I)/2.0)*AH
J=3
VGR(I)=AMAGE(I)*COS(DELTA(I)*PAI/180.0)
VGI(I)=AMAGE(I)*SIN(DELTA(I)*PAI/180.0)
VF(I)=CMPLX(VGR(I),VGI(I))
AMAGVF(I)=CABS(VF(I))
19 CONTINUE
DO 21 I=1,N
CALL POT(N,I)
QE(I)=Q(I)
21 BK4(I)=(PM(I)-PE(I))/AM(I)*AH
GOTO 22
20 DO 23 I=1,N
PE(I)=PD(I)+BK3P(I)
BK4(I)=(PM(I)-PE(I))/AM(I)*AH

```

```

J=3
VGR(I)=AMAGE(I)*COS(DELT(I)*PAI/180.0)
VGI(I)=AMAGE(I)*SIN(DELT(I)*PAI/180.0)
VF(I)=CMPLX(VGR(I),VGI(I))
AMAGVF(I)=CABS(VF(I))
IF(L2-1)24,24,25
25 PE(I)=PD(I)+(BK1P(I)+2.*EK2P(I)+2.*BK3P(I)+BK4P(I))/6.0
QE(I)=Q(I)
24 CONTINUE
DO 26 I=1,N
IF(L2-1)45,45,46
46 PA(I)=PD(I)
45 CALL POT(N,I)
QE(I)=Q(I)
26 PD(I)=PE(I)
T=T+AH
DO 27 I=1,N
IF(M-1)28,29,29
28 WRITE(6,30)
30 FORMAT(5X,'TIME',13X,'DELTA',13X,'MAQUINA',10X,'FELEC',12X,'QELEC'
1,14X,'FREQ'//)
M=1
29 WRITE(6,31)T,DELT(I),I,PE(I),QE(I),FREQ(I),AMAGVF(J)
31 FORMAT(5X,F5.3,10X,F10.4,10X,I2,10X,F10.4,10X,F10.4,10X,F10.4,5X,F
110.4)

```

```

L2=0
27 CONTINUE
IF(MN-1)32,33,33
32 IF(KS-1)34,35,35
34 IF(T-TAP+AH/2.)33,36,36
36 IF(J1-1)37,38,38
37 AH=AH/2.
35 KS=KS+1
IF(KS-2)33,38,39
C MATRIZ DESPUES DE LA FALLA
38 DO 302 I=1,NB
DO 302 J=1,NB
- DUPLICATE ARGUMENT IN STANDARD FUNCTION
- IS COISANT ARGUMENTS FOR - CMPLX CORRECT
302 YF(I,J)=CMPLX(0.0,0.0)
301 CONTINUE
DO 303 I=1,NE
SERV(I)=1.0/SEZ(I)
L=SB(I)
M=CB(I)
IF(I.EQ.7)GOTO 303
YF(L,L)=YF(L,L)+SERV(I)+SHY(I)
YF(M,M)=YF(M,M)+SERV(I)+SHY(I)+SHY1(I)
YF(L,M)=YF(L,M)-SERV(I)
YF(M,L)=YF(M,L)-SERV(I)
C 303 CONTINUE
ESCRITURA DE LA MATRIZ YBUS DESPUES DE LA FALLA
WRITE(6,305)
305 FORMAT(750X,'MATRIZ YBUS DESPUES DE FALL'//)
DO 306 I=1,NB
306 WRITE(6,1108)(YF(I,J),J=1,NB)
1108 FORMAT(12X,20F6.1//)
WRITE(6,307)
307 FORMAT(725X,'YBUS DESPUES DE FALLA REDUCTDA'//)
NNE1=NNE+1
DO 801 K=1,NNE1
NL1=NE-K
N2=NL1+1
DO 801 I=1,NL1
DO 801 J=1,NL1
PT1=YF(I,N2)*YF(N2,J)/YF(N2,N2)
YF(I,J)=YF(I,J)-PT1
AMAGY(I,J)=CABS(YF(I,J))
801 CONTINUE
LL1=NE-NNE1
DO 707 I=1,LL1
707 WRITE(6,913)(YF(I,J),J=1,LL1)
DO 409 K=1,LL1
DO 409 I=1,LL1
IF(AIMAG(YF(I,K)).EQ.0.0.AND.REAL(YF(I,K)).EQ.0.0)GOTO 2001
TETR(I,K)=ATAN2(AIMAG(YF(I,K)),REAL(YF(I,K)))*57.2957
GOTO 409
2001 TETR(I,K)=0.0
409 CONTINUE
DO 211 I=1,LL1

```

NO 4.2 I=1,LL1  
WRITE(6,906)(TETR(I,J),J=1,LL1)  
912 CONTINUE

77

L2=0  
IF(J1-1)33,40,40  
40 MN=1  
GOTO 33  
39 AH=2.\*AH  
MN=1  
33 CONTINUE  
IF(T-TMAX)+1,42,42  
42 CONTINUE  
CALL START  
CALL PLOT(3.0,3.0,-3)  
CALL SYMBOL(2.0,19.0,0.14,5HCLAVE,0.0,5)  
CALL SYMBOL(1.6,18.6,0.14,1,0.0,-1)  
CALL SYMBOL(1.8,18.6,0.14,9HMAQUINA 1,0.0,9)  
CALL SYMBOL(1.6,18.2,0.14,2,0.0,-1)  
CALL SYMBOL(1.8,18.2,0.14,9HMAQUINA 2,0.0,9)  
CALL SYMBOL(1.6,17.8,0.14,3,0.0,-1)  
CALL SYMBOL(1.8,17.8,0.14,9HMAQUINA 3,0.0,9)  
CALL SYMBOL(1.6,17.4,0.14,4,0.0,-1)  
CALL SYMBOL(1.8,17.4,0.14,9HMAQUINA 4,0.0,9)  
DELTA1(52)=-270.0  
DELTA2(52)=-270.0  
DELTA3(52)=-270.0  
DELTA4(52)=-270.0  
DELTA1(53)=+30.0  
DELTA2(53)=+30.0

DELTA3(53)=+30.0  
DELTA4(53)=+30.0  
TIME(52)=0.0  
TIME(53)=0.10  
CALL AXIS(0.0,0.0,15HANGULO DE CARGA,+15,21.0,+90.0,DELTA1(52),DELTA1(53))  
CALL AXIS(0.0,9.0,6HTIEMPO,-6,10.0,0.0,TIME(52),TIME(53))  
CALL LINE(TIME,DELTA1,51,1,+1,0)  
CALL LINE(TIME,DELTA2,51,1,+1,1)  
CALL LINE(TIME,DELTA3,51,1,+1,2)  
CALL LINE(TIME,DELTA4,51,1,+1,3)  
CALL ENPLDT(15)  
STOP  
END

SUBROUTINE PUT(N,1)

COMPLEX Y,YF,YR,SEZ,SERY,SHY,PT,YFN,PT1,YFR,SHY1

78

COMPLEX SERZ,COF,COL,CO,EI,E

COMPLEX VF

INTEGER SB,EB,TLINF

9 COMMON Y(10,10),YF(10,10),YFR(10,10),SEZ(20),SERY(20),SHY(20),  
9 TET(10,10),YFN(10,10),TETR(10,10),  
9 TLINE(20),SB(20),EB(20),PT,PT2,SHY1(20),AMAGY(10,10),  
9 COF(4),COL(4),FI(4),SEPZ(4),CO(4),AMAGE(4),PL(4),OL(4),  
9 BK1(4),BK2(4),BK3(4),BK4(4),BK1P(4),BK2P(4),BK3P(4),BK4P(4)  
9 ,G(4),XH(4),PM(4),AM(4),D(4),PA(4)

COMMON/ONE/  
8 PL(4),PC(4),W(4),PD(4),FS(4),AMAGCO(4),DELTA(4),  
7 PE(4),E(4),PG(4),QS(4),WS(4),FREQ(4),DELT(4),  
6 PMF(4),DWS(4),X1(4),X2(4),T1(4),T2(4),DPN(4),FC1(4),  
5 Q(4),QE(4),DELT1(4),  
4 VR(4),VI(4),V(4),  
3 PAI,  
2 T, AH,  
1 VGR(4),VGI(4),VF(4),AMAGVF(4),  
1 DELTA1(53),DELTA2(53),DELTA3(53),DELTA4(53),TIME(53)

PE(I)=0.0

Q(I)=0.0

DO 10 K=1,N

1 PE(I)=PE(1)+AMAGE(I)\*AMAGE(K)\*AMAGY(I,K)\*COS((TETR(I,K)-DELT(I)+DE  
1 LT(K))\*PAI/180.0)

1 Q(I)=Q(1)+AMAGE(I)\*AMAGE(K)\*AMAGY(I,K)\*SIN((TETR(I,K)-DELT(I)+DELT  
1 (K))\*PAI/180.0)

10 CONTINUE

RETURN

END



YBUS DE FALLA REFOUCIDA

.53007	-2.54376	-1.10670	.56686	0	0	.02695	1.19594
-.10678	.56686	.56695	-2.12194	0	0	-.03438	.34024
0	0	0	0	0	-1.00000	0	0
.02695	1.19594	-.03438	.34124	0	0	.23193	-2.44463
2.60329	.57683	0	1.19624				
.57683	2.19638	0	.34197				
0	0	0	0	0	0	0	0
1.19624	.34197	0	2.45561				

-78.25145	100.66707	0	89.70886
100.66707	-75.04070	0	95.76925
0	0	-89.99988	0
89.70886	95.76925	0	-84.59016

ANGULOS INTERIORS DE PREFALLA

2.54971  
2.49028  
0.40981  
1.20885

TIME	DELTA	MAQUINA	PELCS	QELEC	FREI	1076
.020	2.2777	1	4905	-1.7936	53.9900	1.1076
.020	0.9039	2	4632	-1.3216	53.0311	1.1076
.020	0.7088	3	0700	-1.8143	53.6504	1.1076
.020	2.0514	4	1949	-1.7384	53.5504	1.1076
.040	0.5117	1	1205	-1.3243	53.7350	1.1076
.040	7.6490	2	4000	-1.8143	53.2000	1.1076
.040	1.1191	3	1733	-1.7714	53.5019	1.1076
.060	1.9437	4	5604	-1.3243	53.4129	1.1076
.060	-1.9750	1	4240	-1.8143	53.5000	1.1076
.060	3.6404	2	0080	-1.9932	53.8139	1.1076
.060	-1.7205	3	1228	-1.7473	53.0707	1.1076
.060	1.0030	4	3024	-1.8143	53.7009	1.1076
.080	4.0632	1	0000	-1.9350	53.2955	1.1076
.080	-3.7834	2	1344	-1.7892	53.0273	1.1076
.100	0.0959	3	6935	-1.3476	53.4483	1.1076
.100	-8.6823	4	0000	-1.8143	53.2499	1.1076
.100	15.4068	1	1136	-1.9374	53.1974	1.1076
.100	-6.1100	2				
0	-8.3	0	0	0	0	0
0	0	0	8.0	0	0	0
0	-10.0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	10.0	0	0
0	-9.9	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	4.0	0
0	0	0	4.7	-17.3	-1.2	4.7
0	8.0	0	0	-3.1	4.6	0
0	0	0	0	0	0	0

MATRIZ YBUS DESPUES DE FALLA

.51601 -2.51091 -.13434 .63374 .48649 .38897 .14850 .01636 1.24471 .01636 .38897 .14850 -1.30907 -1.30907 .01636 .64534 -1.24471 -1.24471 .01636 .38897 .14850 .01636 .64534 .64783 1.37112 .15488 .39213 .64560 .49107 .15488 1.32493 .64560 1.24482 1.37112 .15488 .39213 .64560 2.39189 .64783 .39213 .64560 2.39189 -70.38685 101.96781 98.33705 89.24679 101.96781 -70.16019 100.37203 97.20257 98.33705 106.37203 -91.12349 91.11108 89.24679 97.20257 91.11108 -84.55605

Table with multiple columns of numerical data. The right side of the page contains a vertical list of numbers, likely a page index or a list of values.

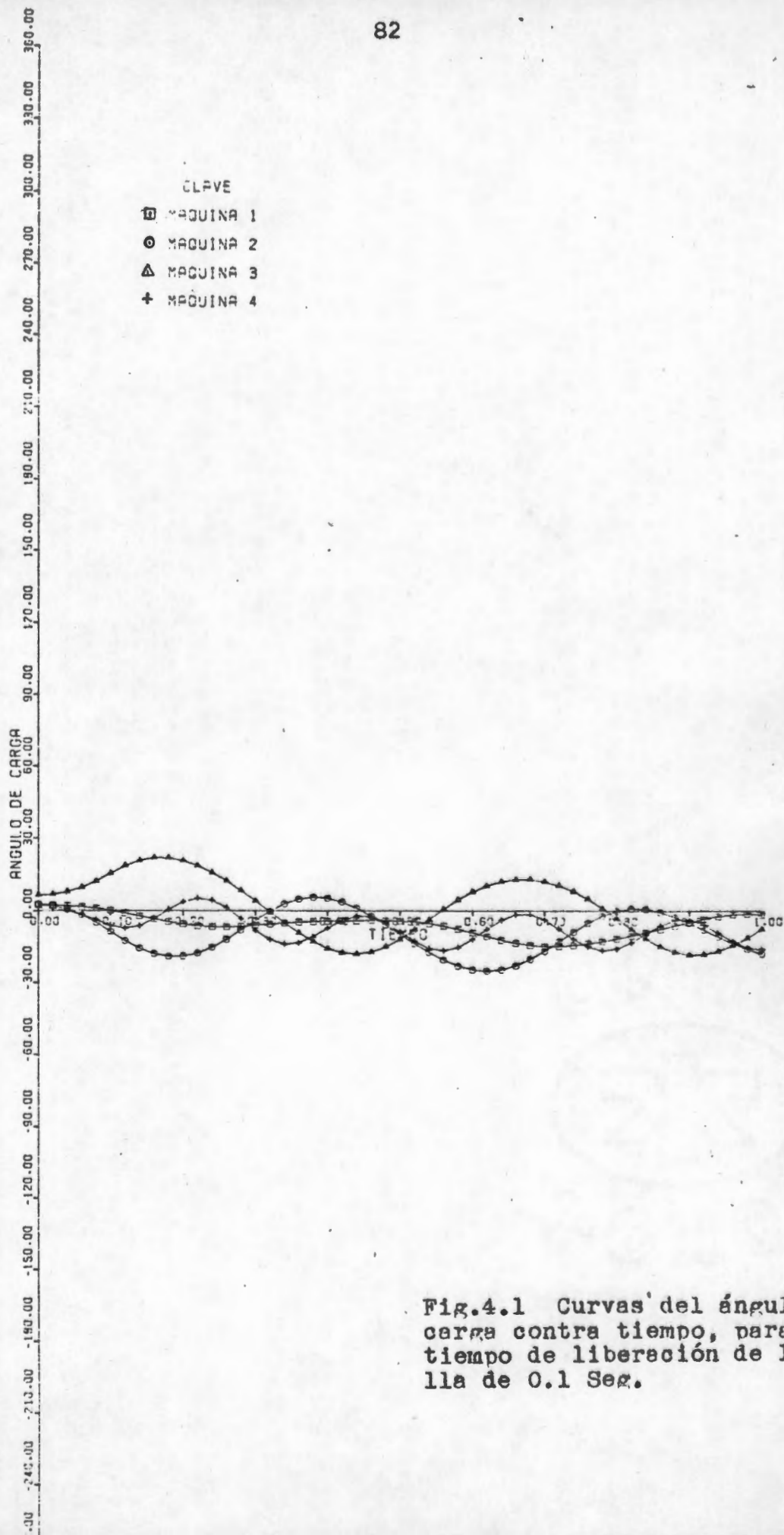


Fig.4.1 Curvas del ángulo de carga contra tiempo, para un tiempo de liberación de la falla de 0.1 Seg.



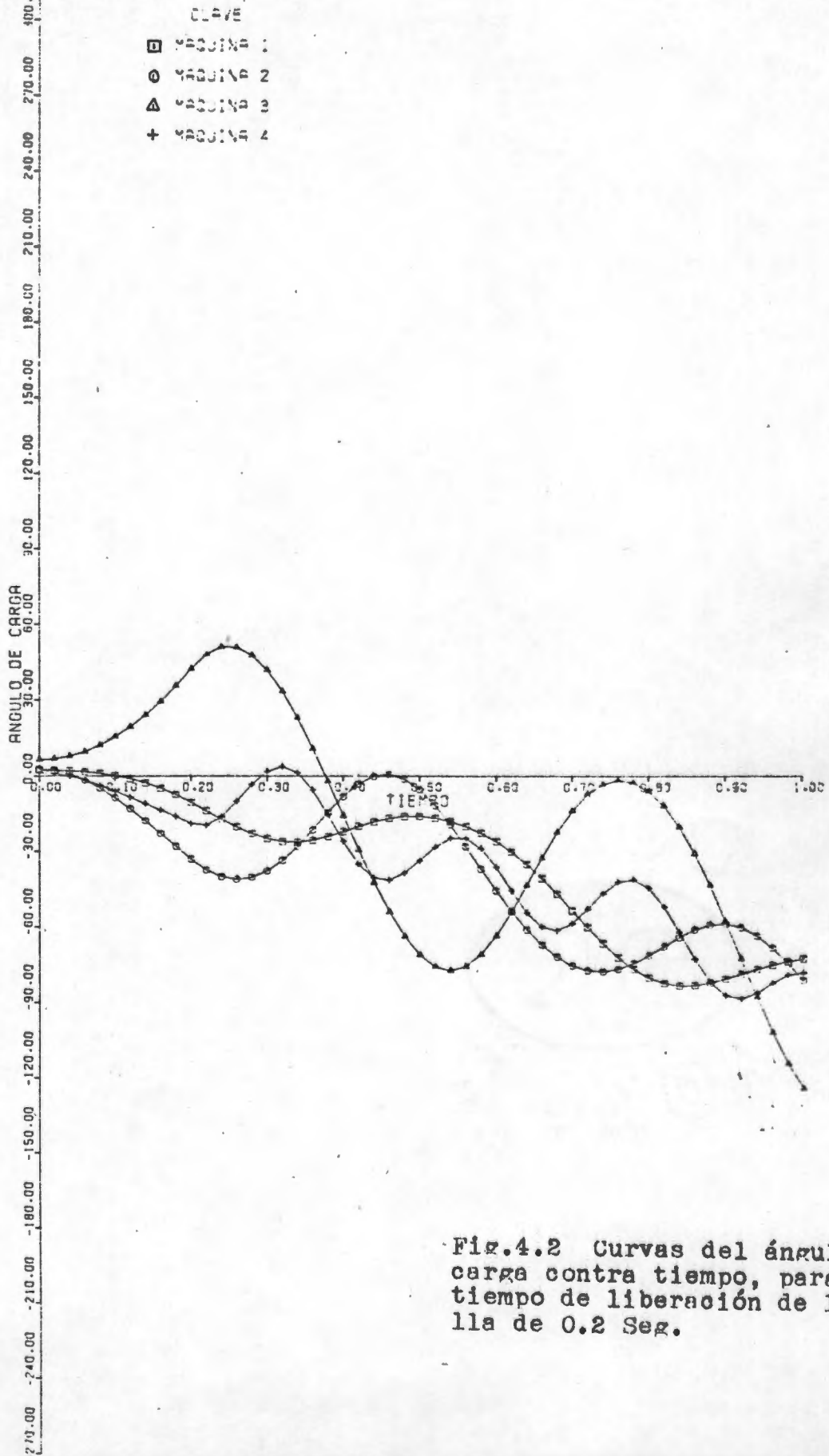


Fig.4.2 Curvas del ángulo de carga contra tiempo, para un tiempo de liberación de la falla de 0.2 Seg.

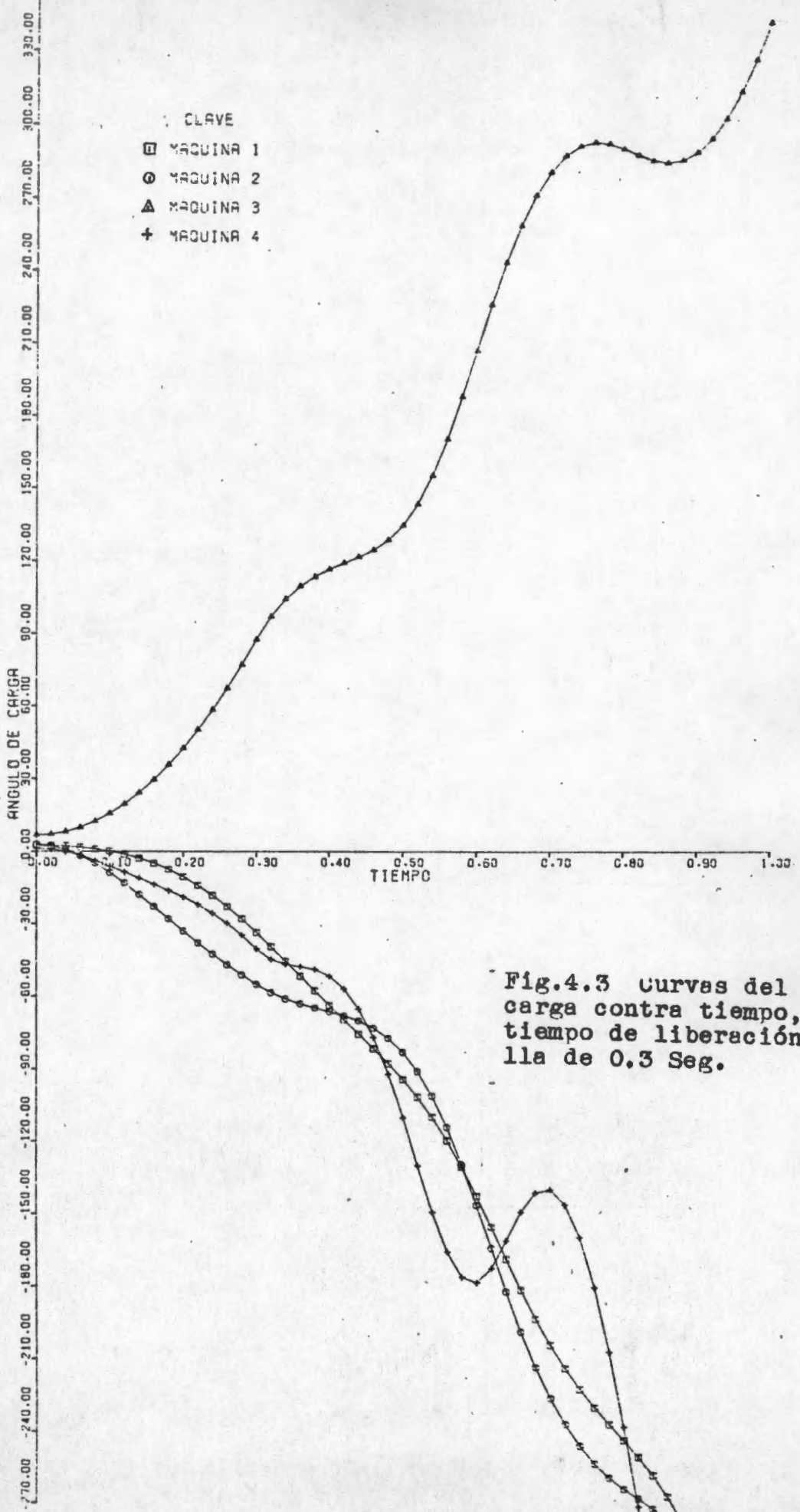


Fig.4.3 Curvas del ángulo de carga contra tiempo, para un tiempo de liberación de la falla de 0.3 Seg.

El análisis de estos resultados se basan en las gráficas de ángulo de carga contra tiempo dadas a continuación, obtenidas directamente por medio de una subrutina de biblioteca MICFOR. Como se podrá observar las oscilaciones del rotor de la máquina aumentan a medida que el tiempo de liberación de la falla es mayor, así tenemos por ejemplo para 0.1 Seg el sistema permanece estable, pero a medida que incrementamos este tiempo las oscilaciones son más rápidas, comparando las gráficas correspondientes a los tiempos 0.2 Seg y 0.3 Seg se ve que el sistema tiende a salir de sincronismo en el tiempo de 0.2 Seg y que para 0.3 Seg el sistema se sale totalmente de sincronismo, ver figuras 4.1 , 4.2 , 4.3 . Esto nos indica que nuestro tiempo crítico de liberación se encuentra entre estos dos tiempos.

A continuación se da el programa de computadora utilizado así como los resultados obtenidos. En éste método como se puede ver, unicamente nos dice en una forma muy aproximada la forma en que oscilan las máquinas, y en que tiempo se deberá liberar la falla.

#### 4.2 Resultados obtenidos del estudio de estabilidad transitoria para el modelo utilizado por el método de nodos retenidos.

Los datos utilizados para este estudio fueron los mismos que para el caso anterior, unicamente que dados en diferente orden por razones ya explicadas anteriormente.

LINEA	SERZ	SH Y
1	0.05 j0.200	0.0 j0.0
2	0.10 j0.500	0.0 j0.0
3	0.20 j0.800	0.0 j0.0
4	0.10 j0.300	0.0 j0.0
5	0.20 j0.400	0.0 j0.0
6	0.10 j0.150	0.0 j0.0
7	0.20 j0.500	0.0 j0.0
8	0.00 j0.125	0.0 j0.0
9	0.00 j0.100	0.0 j0.0
10	0.00 j0.125	0.0 j0.0
11	0.00 j0.250	0.0 j0.0
12	0.00 j0.000	0.0 j0.0
13	0.00 j0.000	0.0 j0.0
14	0.00 j0.000	0.0 j0.0

Los datos de las últimas tres líneas o sean de la línea 12 a la 14 se pueden dar o no, esto dependerá de la representación que se le de a las cargas; así que si se hace la representación de estas como impedancia constante tendremos los datos anteriores, pero en cambio si se quiere las representaciones de las cargas en las otras dos formas o sea como corriente constante ó como potencia constante, estos tres últimos datos se quitan.

## DATOS INICIALES (Flujos de carga)

Bus	PG	QG	PL	QL	V
1	0.332	0.091	0.00	0.00	1.000 j0.000
2	0.200	0.100	0.00	0.00	1.02469 j0.02522
3	0.300	0.200	0.00	0.00	1.08048 j0.08731
4	0.100	0.050	0.20	0.10	1.00200 j0.00210
5	0.000	0.000	0.40	0.15	0.95486 j0.04670
6	0.000	0.000	0.30	0.10	0.95223 j0.03825

El orden de líneas y buses estan en base a la figura 3.11 que representa al modelo en este caso.

Como se podra ver en este estudio la información de la red es mas completa y debido a esto se pueden hacer diferentes representaciones de carga como se mencionó en el capítulo anterior. Al igual que en el caso anterior el análisis se puede efectuar a partir de las gráficas obtenidas. En primer lugar se hicieron estudios con respecto a diferentes tiempos de liberación de la falla, efectuando estos desde 0.1 Seg hasta 0.44 que es donde se presento inestabilidad en el sistema, esto se hizo en primer lugar considerando la representación de las cargas como impedancia constante, esto es relativo a la parte interna del programa de estabilidad donde se utiliza las ecuaciones para los cálculos de flujos de carga, en este primer caso se utilizó la ecuación 3.70. En otra etapa se consideraron las otras dos diferentes representaciones de carga: una como corriente constante y otra como potencia constante, utilizando para esto las ecuaciones 3.67 y 3.68 en cada caso los tiempos de

liberación considerados variaron entre 0.1 a 0.4 Seg. obteniéndose que para los tres casos representados, las curvas de oscilación son muy semejantes aun cuando en el caso de cargas representadas como potencia constante se encontró inestabilidad para un tiempo de 0.4 seg. mientras que en el caso de corriente constante se obtienen resultados muy similares que para el caso de cargas representadas como impedancia constante, ver figuras de 4.4, a 4.17

A continuación se da el programa de computadora utilizado. En dicho programa los cambios tanto para los tiempos de liberación como para diferentes representaciones de carga, se efectúan internamente. Este es el método que se creó es mas exacto ya que la red no sufre simplificaciones en su representación pudiendo obtener resultados mas detallados, en cuanto a voltajes, potencias y frecuencia en diferentes puntos de la red.

```

COMPLEX SERY, SERZ, SHY, DX, VN, V, VI, SUM, YL, CUR
COMPLEX SHYO, SERZO
INTEGER SB, EB, TLINE
COMMON TLINE(20), SB(20), EB(20), SERY(20), V(20), PG(20), QG(20), P(20)
COMMON Q(20), Y(20,20), VN(20), SER7(20), SHY(20), YL(20,20), CUR(20,20)
COMMON PGF(20), WS(20), DS(20), DD1(20), DD2(20), DD3(20), DD4(20)
COMMON DW1(20), DW2(20), DW3(20), DW4(20), F(20), DELT(20), DELTAF(20)
COMMON DDS(20), DWS(20), H(20), NL, TMAX, VM(20), VR(20), M, AMAGV(20), NB
COMMON AM, PAI, PM(20), QM(20), QGF(20), SHYO(20), SERZO(20), AMAGF(20)
COMMON DELTA(20), DSG(20), E(20)
COMMON DELTA1(53), DELTA2(53), DELTA3(53), DELTA4(53), TIME(53)
1000 READ(5,1000)NB,NL,ACC
      FORMAT(2I5,F5.1)
      WRITE(6,1010)NB,NL,ACC
1010  FORMAT(1X,'NB=',I5,1X,'NL=',I5,1X,'ACC=',F5.1)
      READ(5,1160)DT,TMAX,FS,PAI
1160  FORMAT(F5.3,3X,F5.3,3X,F5.2,3X,F10.5)
      WRITE(6,1170)DT,TMAX,FS,PAI
1170  FORMAT(//4X,'DT=',F5.3,3X,'TMAX=',F5.3,3X,'FS=',F5.2,3X,'PAI=',F10
1.5)
      DO 25I=1, NL
25   READ(5,1040)TLINE(I),SB(I),EB(I),SERZ(I),SHY(I)
1040  FORMAT(3I5,4F10.4)
      DO 5I=1,6
1020  READ(5,1020)PG(I),QG(I),P(I),Q(I),E(I),H(I),DELTA(I)
      FORMAT(4F12.4,2X,3F10.5)
      VR(I)=E(I)*COS(DELTA(I)*PAI/180.0)
      VM(I)=E(I)*SIN(DELTA(I)*PAI/180.0)
      V(I)=CMPLX(VR(I),VM(I))
      WRITE(6,1030)I,PG(I),QG(I),P(I),Q(I),V(I),H(I)

1030  FORMAT(1X,'I=',I4,1X,'PG=',F8.4,1X,'QG=',F8.4,1X,'P=',F8.4,1X,'Q='
1,F8.4,1X,'V=',2F10.5,1X,'H=',F10.5)
      J=I+8
      IF(I.GT.3)SEPZ(J)=(CABS(V(I))**2)/CMPLX(P(I),-Q(I))
5     CONTINUE
      AM=0.0
      T=0.0
      M1=0
      M2=0
      M3=0
      M4=0
407  DO 16I=1,NB
      DO 15J=1,NB
15   Y(I,J)=CMPLX(0.0,0.0)
- DUPLICATE ARGUMENT IN STANDARD FUNCTION
- IS CONSTANT ARGUMENTS FOR - CMPLX CORRECT
16   CONTINUE
      DO 250I=1,NL
      SERY(I)=1.0/SERZ(I)
      IF(I.EQ.3.AND.AM.GE.PAI)SEPY(I)=CMPLX(0.0,0.0)
      FORMACION DE LA MATRIZ DE ADMITANCIA DE BUS
- DUPLICATE ARGUMENT IN STANDARD FUNCTION
- IS CONSTANT ARGUMENTS FOR - CMPLX CORRECT
      L=SB(I)
      M=EB(I)
      Y(L,L)=Y(L,L)+SERY(I)+SHY(I)
      Y(M,M)=Y(M,M)+SERY(I)+SHY(I)
      Y(L,M)=Y(L,M)-SERY(I)
      Y(M,L)=Y(M,L)-SERY(I)
C     ESCRITURA DE DATOS Y MATRIZ DE ADMITANCIA DE BUS
C     DURANTE LA FALLA
250  WRITE(6,1050)TLINE(I),SB(I),EB(I),SERZ(I),SERY(I),SHY(I)
1050  FORMAT(6X,3I5,5X,2F10.5,5X,2F10.5,5X,2F10.3)
      WRITE(6,1060)
1060  FORMAT(////4X,'MATRIZ YBUS'//)
      DO 35I=1,NB
35   WRITE(6,1070)(Y(I,J),J=1,NB)
1070  FORMAT(2X,11(F5.1,1X,F5.1,1X)//)
      IF(AM.GE.PAI)M=6
      DO 55I=1,NB
      DO 45J=1,NB
      IF(I.NE.J)YL(I,J)=Y(I,J)/Y(I,I)
45   CONTINUE
55   CONTINUE
      IF(AM.GE.PAI)GOTO4501
C     CALCULO DE LOS VOLTAJES INTERNOS DE LAS MAQUINAS
      WRITE(6,4500)
4500  FORMAT(12X,'VOLTAJES INTERNOS'//)
4501  DO 300I=7,10
      K=1-6
      I=I+1

```

```

IF (AM.GE.PAI)GOTO600
M=2
600 DO 65I=1,NB
IF (I.EQ.11)V(I)=CMPLX(0.0,0.0)
DUPLICATE ARGUMENT IN STANDARD FUNCTION
IS CONSTANT ARGUMENTS FOR - CMPLX CORRECT
IF (I.EQ.3.AND.REAL(V(I)).LE.1.0E-04)GOTO62
IF (I.LT.11)DELTA(I)=ATAN2(AIMAG(V(I)),REAL(V(I)))*57.2957
62 IF (I.EQ.11)DELTA(I)=0.0
65 AMAGV(I)=CABS(V(I))
PROCESO ITERATIVO PARA CALCULAR LOS VOLTAJES DE BUS
/ ECUACIONES DEL COMPORTAMIENTO DE LA RED CUANDO SE
PRODUCE LA FALLA, UTILIZANDO GAUSS SEIDEL
N=0
IF (M.GT.6)GOTO75
DO 2K=1,6
IF (M.EQ.2)V(K)=CMPLX(1.0,0.0)
IS CONSTANT ARGUMENTS FOR - CMPLX CORRECT
IF (K.EQ.3)V(K)=CMPLX(0.0,0.0)
DUPLICATE ARGUMENT IN STANDARD FUNCTION
IS CONSTANT ARGUMENTS FOR - CMPLX CORRECT
IF (M.EQ.6.AND.AM.GE.PAI)V(3)=CMPLX(1.0,0.0)
IS CONSTANT ARGUMENTS FOR - CMPLX CORRECT
2 CONTINUE
75 DVMAX=0.0
DO 85I=1,NB
SUM=CMPLX(0.0,0.0)
DUPLICATE ARGUMENT IN STANDARD FUNCTION
IS CONSTANT ARGUMENTS FOR - CMPLX CORRECT

```

```

VI=V(I)
IF (I.EQ.3.AND.AM.GE.PAI)GOTO92
IF (I.EQ.3)GOTO3
IF (I.EQ.7)GOTO3
IF (I.EQ.8)GOTO3
IF (I.EQ.9)GOTO3
IF (I.EQ.10)GOTO3
IF (I.EQ.11)GOTO3
92 DO 95J=1,NB
95 IF (I.NE.J)SUM=- (YL(I,J)*V(J))+SUM
VN(I)=SUM
GOTO7
3 VN(I)=V(I)
7 DX=VN(I)-V(I)
VN(I)=VI+ACC*DX
DEL V=CABS(VN(I)-VI)
IF (DEL V.GT.DVMAX)DVMAX=DEL V
85 V(I)=VN(I)
N=N+1
IF (DVMAX.LE.1.0E-04)GOTO100
IF (N.LT.200)GOTO75
WRITE(6,1127)N
1120 FORMAT(///76X,"NO CONVERGE EN",I4)
GOTO 120
100 CONTINUE
CALCULO DE LAS POTENCIAS DE LAS MAQUINAS
I=1
PH(7)=PG(I)
I=2
PH(8)=PG(I)
I=3
PH(9)=PG(I)
I=4
PH(10)=PG(I)
DO 201I=7,10
IF (I.EQ.7)J=1
IF (I.EQ.8)J=2
IF (I.EQ.9)J=3
IF (I.EQ.10)J=4
CUR(I,J)=(V(I)-V(J))*(-Y(I,J))
PGF(I)=REAL(CUR(I,J)*CONJG(V(I)))
QGF(I)=-AIMAG(CUR(I,J)*CONJG(V(I)))
201 CONTINUE
CALCULO DE LOS CAMBIOS EN LOS ANGULOS INTERNOS
DE LAS MAQUINAS POR RUNGE-KUTTA
K=M-1
IF (M.EQ.M1)GOTO700
IF (M.EQ.M2)GOTO800
IF (M.EQ.M3)GOTO900
IF (M.EQ.M4)GOTO910
IF (M.GT.2)GOTO920
WRITE(6,4502)

```



```

IF (I.EQ.3) J=7
IF (I.EQ.4) J=10
WS(I)=2.0*PAI*FS
DS(I)=ATAN2(ATMAG(V(J)),REAL(V(J)))
DSG(I)=DS(I)*57.2957
WRITE(6,4503)DSG(I)
4503 FORMAT(15X,F10.4)
200 CONTINUE
IP=0
II=0.0
920 IP=IP+1
DELTA1(IP)=DSG(1)
DELTA2(IP)=DSG(2)
DELTA3(IP)=DSG(3)
DELTA4(IP)=DSG(4)
TIME(IP)=TI
DO 70I=1,4
IF (I.EQ.1) J=7
IF (I.EQ.2) J=8
IF (I.EQ.3) J=9
IF (I.EQ.4) J=10
DD1(I)=(WS(I)-(2.0*PAI*FS))*DT
PGF(I)=PGF(J)
DH1(I)=((PAI*FS)*(PH(J)-PGF(I))*DT)/H(I)
DELT(I)=DS(I)+(DD1(I)/2.0)
VR(J)=CABS(V(J))*COS(DELT(I))
VM(J)=CABS(V(J))*SIN(DELT(I))
V(J)=CMPLX(VR(J),VM(J))
70 CONTINUE

M4=0
M1=M
GOTO600
730 DO 73I=1,4
IF (I.EQ.1) J=7
IF (I.EQ.2) J=8
IF (I.EQ.3) J=9
IF (I.EQ.4) J=10
DD2(I)=(WS(I)+(DW1(I)/2.0)-(2.0*PAI*FS))*DT
PGF(I)=PGF(J)
DW2(I)=((PAI*FS)*(PH(J)-PGF(I))*DT)/H(I)
DELT(I)=DS(I)+(DD2(I)/2.0)
VR(J)=CABS(V(J))*COS(DELT(I))
VM(J)=CABS(V(J))*SIN(DELT(I))
V(J)=CMPLX(VR(J),VM(J))
73 CONTINUE
M1=0
M2=M
GOTO600
800 DO 77I=1,4
IF (I.EQ.1) J=7
IF (I.EQ.2) J=8
IF (I.EQ.3) J=9
IF (I.EQ.4) J=10
DD3(I)=(WS(I)+(DW2(I)/2.0)-(2.0*PAI*FS))*DT
PGF(I)=PGF(J)
DW3(I)=((PAI*FS)*(PH(J)-PGF(I))*DT)/H(I)
DELT(I)=DS(I)+(DD3(I)/2.0)
VR(J)=CABS(V(J))*COS(DELT(I))
VM(J)=CABS(V(J))*SIN(DELT(I))
V(J)=CMPLX(VR(J),VM(J))
77 CONTINUE
M2=0
M3=M
GOTO600
900 DO 80I=1,4
IF (I.EQ.1) J=7
IF (I.EQ.2) J=8
IF (I.EQ.3) J=9
IF (I.EQ.4) J=10
DD4(I)=(WS(I)+(DW3(I))-(2.0*PAI*FS))*DT
PGF(I)=PGF(J)
DW4(I)=((PAI*FS)*(PH(J)-PGF(I))*DT)/H(I)
DDS(I)=(DD1(I)+(2.0*DD2(I))+(2.0*DD3(I))+DD4(I))/6.0
DS(I)=DS(I)+DDS(I)
DSG(I)=DS(I)*57.2957
DWS(I)=(DW1(I)+(2.0*DW2(I))+(2.0*DW3(I))+DW4(I))/6.0
WS(I)=WS(I)+DWS(I)
F(I)=WS(I)/(2.0*PAI)
VR(J)=CABS(V(J))*COS(DS(I))
VM(J)=CABS(V(J))*SIN(DS(I))
V(J)=CMPLX(VR(J),VM(J))

```

```

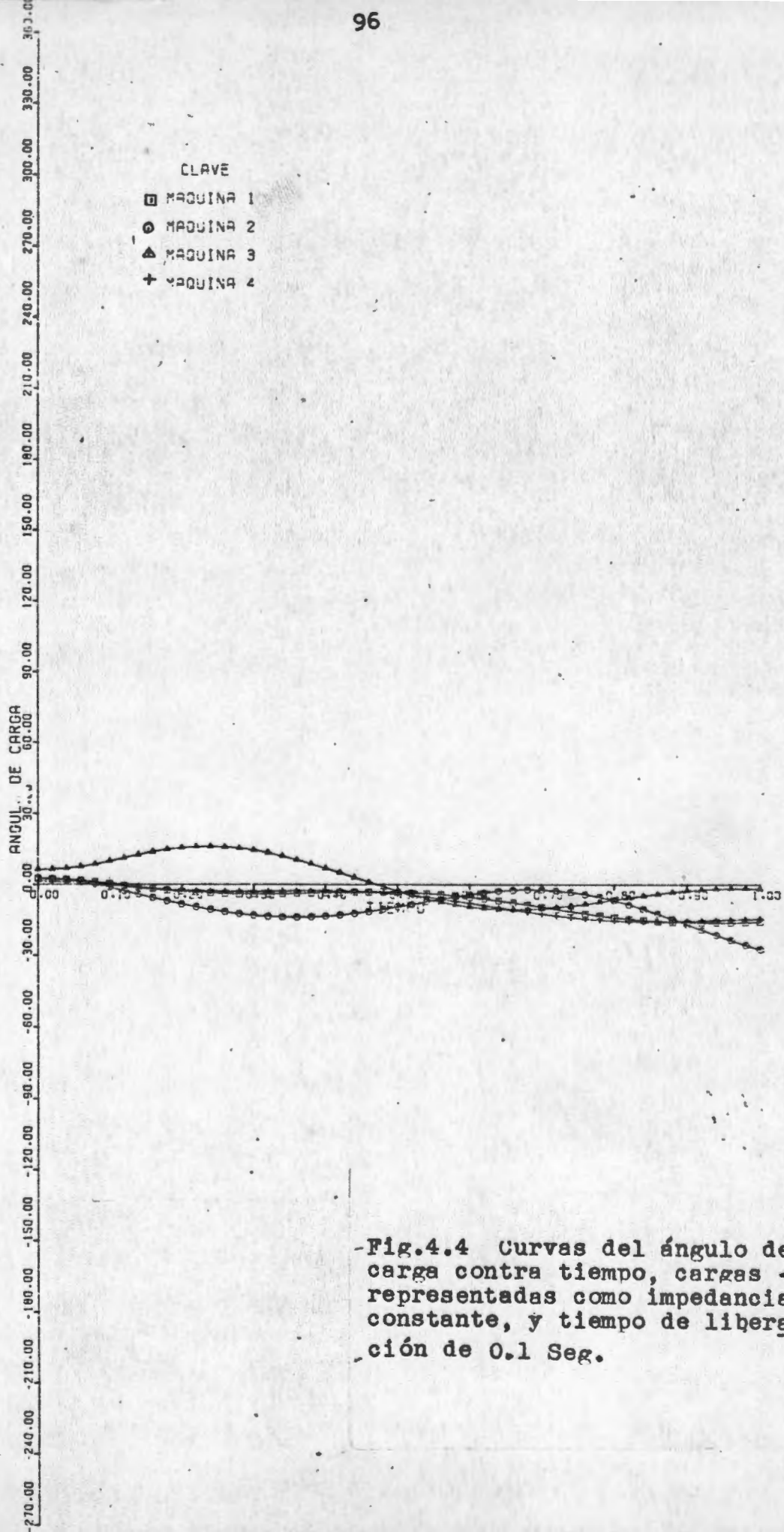
AK=K
T=DT*AK
IF (T.GT.THAX)GOTO120
M3=0
M4=M
IF (T.GT.0.08)AM=PAI
IF (T.GT.0.10)GOTO600
IF (T.GT.0.08)GOTO407
GOTO600
910 DO 308 J=7,10
IF (J.EQ.7)L=1
IF (J.EQ.8)L=2
IF (J.EQ.9)L=3
IF (J.EQ.10)L=4
308 WRITE (6,1210)M,T,J,V(J),F(L),DS(L),PGF(J),QGF(J),DSG(L)
1210 FORMAT(2X,'M=',I3,1X,'T=',F6.3,1X,'J=',I3,1X,'V=',2F10.5,1X,'F=',F
18.5,1X,'DS=',F7.3,1X,'PGF=',F9.5,1X,'QGF=',F8.5,1X,'DSG=',F9.3/
DO 110 I=1,11
IF (I.EQ.3)AND(T.GT.0.08)GOTO930
IF (I.EQ.3)GOTO500
IF (I.EQ.11)GOTO500
930 DELTAF(I)=ATAN2(AIMAG(V(I)),REAL(V(I)))*57.2957
GOTO50
500 DELTAF(I)=0.0
50 AMAGF(I)=CABS(V(I))
J=1
IF (I.EQ.7)DINT7=DELTAF(I)-DELTAF(J)
J=2
IF (I.EQ.8)DINT8=DELTAF(I)-DELTAF(J)
J=3
IF (I.EQ.9)DINT9=DELTAF(I)-DELTAF(J)
J=4
IF (I.EQ.10)DINT10=DELTAF(I)-DELTAF(J)
110 CONTINUE
DO 1139 I=1,6
1139 WRITE (6,1140)I,V(I),AMAGF(I),DELTAF(I),DINT7,DINT8,DINT9,DINT10
1140 FORMAT(1X,'BUS=',I3,2X,'V=',2F8.5,2X,'MAGNITUD=',F8.5,'ANGULO EN
1GRADOS=',F8.3,'DINT7=',F8.5,'DINT8=',F8.5,'DINT9=',F8.5,'DINT10=',
2F8.5/)
TI=TI+DT
M=M+1
GOTO600
120 CONTINUE
CALL START
CALL PLOT(3.0,3.0,-3)
CALL SYMBOL(2.0,19.0,0.14,5HCLAVE,0.0,5)
CALL SYMBOL(1.6,18.6,0.14,1,0.0,-1)
CALL SYMBOL(1.8,18.6,0.14,9HMAQUINA 1,0.0,9)
CALL SYMBOL(1.6,18.2,0.14,2,0.0,-1)
CALL SYMBOL(1.8,18.2,0.14,9HMAQUINA 2,0.0,9)
CALL SYMBOL(1.6,17.8,0.14,3,0.0,-1)
CALL SYMBOL(1.8,17.8,0.14,9HMAQUINA 3,0.0,9)
CALL SYMBOL(1.6,17.4,0.14,4,0.0,-1)
CALL SYMBOL(1.8,17.4,0.14,9HMAQUINA 4,0.0,9)
DELTA1(52)=-270.0
DELTA2(52)=-270.0
DELTA3(52)=-270.0
DELTA4(52)=-270.0
DELTA1(53)=+30.0
DELTA2(53)=+30.0
DELTA3(53)=+30.0
DELTA4(53)=+30.0
TIME(52)=0.0
TIME(53)=0.10
CALL AXIS(0.0,0.0,15HANGULO DE CARGA,+15,21.0,+90.0,DELTA1(52),DEL
1TA1(53))
CALL AXIS(0.0,9.0,6HTIEMPO,-6,10.0,0.0,TIME(52),TIME(53))
CALL LINE(TIME,DELTA1,51,1,+1,0)
CALL LINE(TIME,DELTA2,51,1,+1,1)
CALL LINE(TIME,DELTA3,51,1,+1,2)
CALL LINE(TIME,DELTA4,51,1,+1,3)
CALL ENPLOT(15)
STOP
END

```

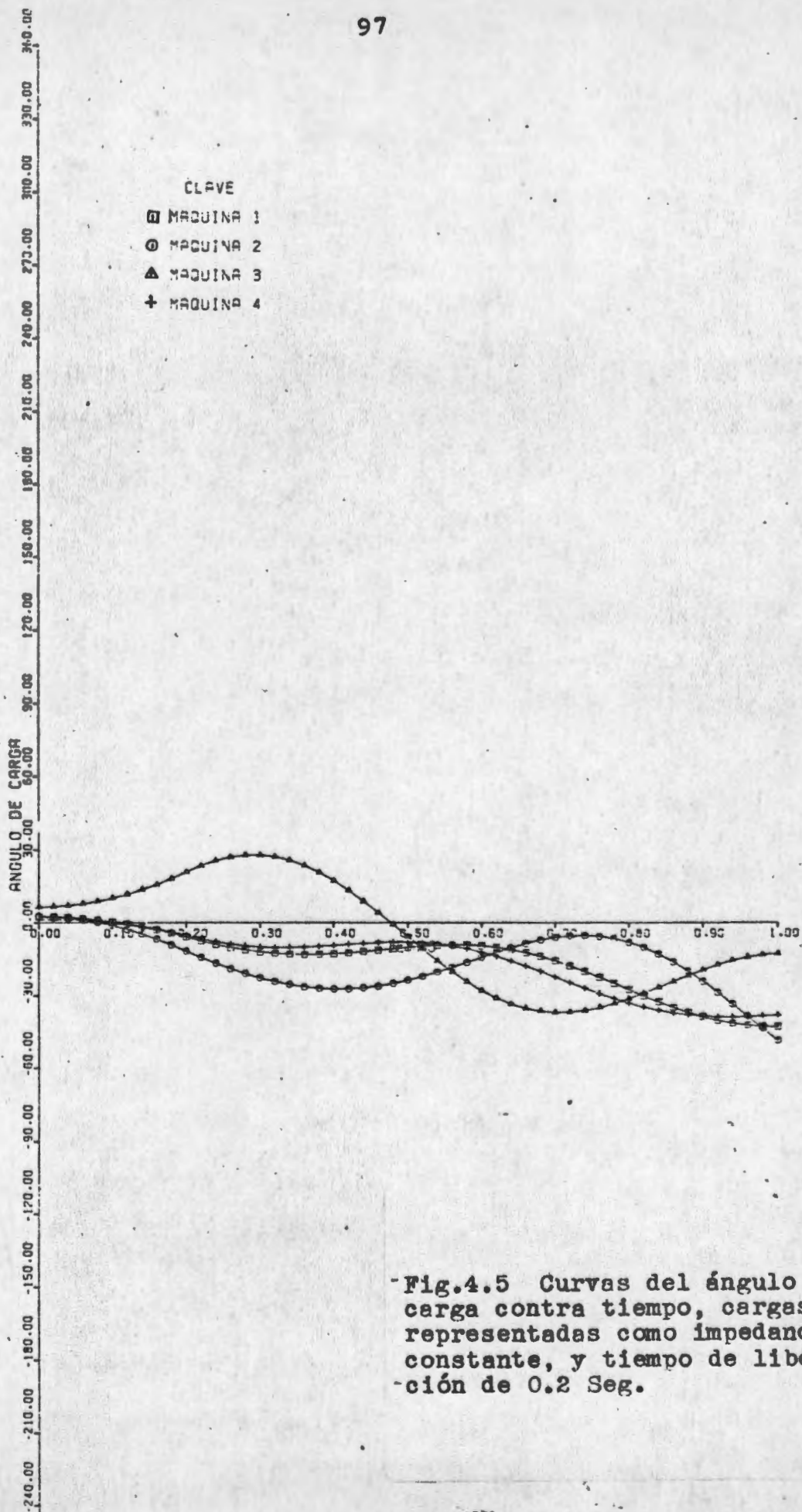


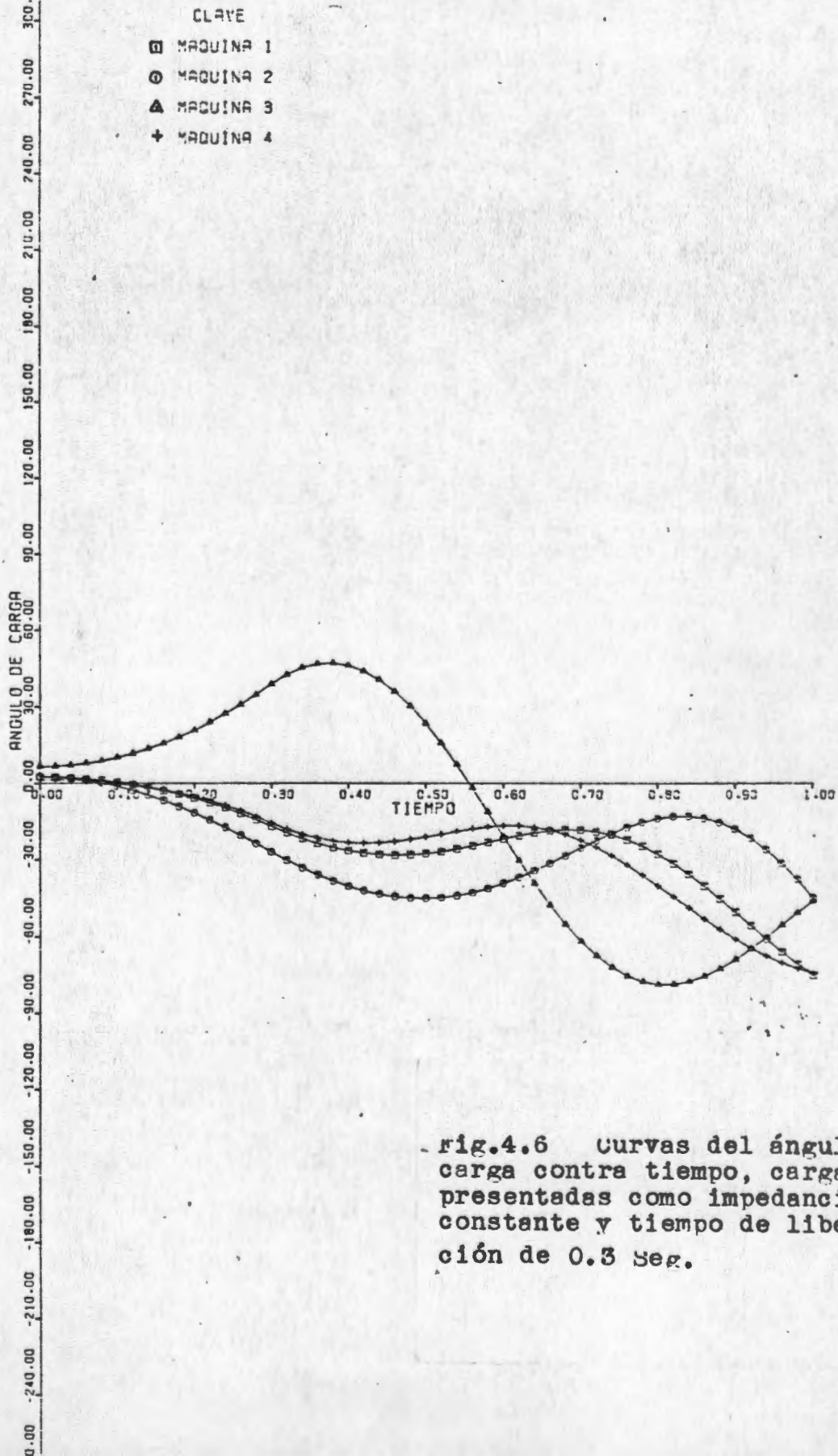
M= 2 T= .020 J= 7 V= 1.01143 .04007 F=59.97749 DS= .040 PGF= .53103 OGF= .80211 DSG= 2.269  
 M= 2 T= .020 J= 8 V= 1.03408 .04221 F=59.95759 DS= .041 PGF= .48171 OGF= 1.33097 DSG= 2.338  
 M= 2 T= .020 J= 9 V= 1.10037 .12642 F=60.04000 DS= .114 PGF= 0 OGF= 9.81428 DSG= 6.554  
 M= 2 T= .020 J= 10 V= 1.01455 .62179 F=59.98377 DS= .021 PGF= .20898 OGF= .93670 DSG= 1.230  
 BUS= 1 V= .91491 -.02568 MAGNITUD= .91527 ANGULO EN GRADOS= -1.60800 INT7= 3.87619 INT8= 2.93984 INT9= 6.55381 INT10= 3.75700  
 BUS= 2 V= .90748 -.00954 MAGNITUD= .90753 ANGULO EN GRADOS= -.63200 INT7= 3.87619 INT8= 2.93984 INT9= 6.55381 INT10= 3.75700  
 BUS= 3 V= 0 MAGNITUD= 0 ANGULO EN GRADOS= 0 INT7= 3.87619 INT8= 2.93984 INT9= 6.55381 INT10= 3.75700  
 BUS= 4 V= .78494 -.03454 MAGNITUD= .78571 ANGULO EN GRADOS= -2.52700 INT7= 3.87619 INT8= 2.93984 INT9= 6.55381 INT10= 3.75700  
 BUS= 5 V= .02250 -.06849 MAGNITUD= .02535 ANGULO EN GRADOS= -4.76000 INT7= 3.87619 INT8= 2.93984 INT9= 6.55381 INT10= 3.75700  
 BUS= 6 V= .35623 -.05822 MAGNITUD= .85821 ANGULO EN GRADOS= -3.89000 INT7= 3.87619 INT8= 2.93984 INT9= 6.55381 INT10= 3.75700  
 M= 3 T= .040 J= 7 V= 1.01159 .63577 F=59.95493 DS= .035 PGF= .50179 OGF= .80143 DSG= 2.025  
 M= 3 T= .040 J= 8 V= 1.03438 .03397 F=59.91556 DS= .033 PGF= .47771 OGF= 1.33191 DSG= 1.881  
  
 M= 3 T= .040 J= 9 V= 1.09938 .13471 F=60.08000 DS= .122 PGF= 0 OGF= 9.81428 DSG= 6.986  
 M= 3 T= .040 J= 10 V= 1.01461 .01867 F=59.96726 DS= .018 PGF= .21210 OGF= .93659 DSG= 1.054  
 BUS= 1 V= .91498 -.02965 MAGNITUD= .91536 ANGULO EN GRADOS= -1.85600 INT7= 3.88164 INT8= 2.91572 INT9= 6.98581 INT10= 3.81289  
 BUS= 2 V= .91727 -.01639 MAGNITUD= .91742 ANGULO EN GRADOS= -1.03500 INT7= 3.88164 INT8= 2.91572 INT9= 6.98581 INT10= 3.81289  
 BUS= 3 V= 0 MAGNITUD= 0 ANGULO EN GRADOS= 0 INT7= 3.88164 INT8= 2.91572 INT9= 6.98581 INT10= 3.81289  
 BUS= 4 V= .79487 -.03782 MAGNITUD= .79579 ANGULO EN GRADOS= -2.75900 INT7= 3.88164 INT8= 2.91572 INT9= 6.98581 INT10= 3.81289  
 BUS= 5 V= .82202 -.07335 MAGNITUD= .82529 ANGULO EN GRADOS= -5.10000 INT7= 3.88164 INT8= 2.91572 INT9= 6.98581 INT10= 3.81289  
 BUS= 6 V= .85995 -.06228 MAGNITUD= .85822 ANGULO EN GRADOS= -4.16200 INT7= 3.88164 INT8= 2.91572 INT9= 6.98581 INT10= 3.81289  
 M= 4 T= .060 J= 7 V= 1.01182 .02860 F=59.93224 DS= .028 PGF= .50311 OGF= .80072 DSG= 1.619  
 M= 4 T= .060 J= 8 V= 1.03474 .02030 F=59.87427 DS= .020 PGF= .47120 OGF= 1.33207 DSG= 1.124  
 M= 4 T= .060 J= 9 V= 1.09760 .14852 F=60.12000 DS= .134 PGF= 0 OGF= 9.81428 DSG= 7.706  
 M= 4 T= .060 J= 10 V= 1.01469 .01341 F=59.95015 DS= .013 PGF= .21729 OGF= .93632 DSG= .757  
 BUS= 1 V= .91474 -.03630 MAGNITUD= .91546 ANGULO EN GRADOS= -2.27200 INT7= 3.89149 INT8= 2.87637 INT9= 7.70581 INT10= 3.90556  
 BUS= 2 V= .90687 -.02775 MAGNITUD= .90730 ANGULO EN GRADOS= -1.75300 INT7= 3.89149 INT8= 2.87637 INT9= 7.70581 INT10= 3.90556  
 BUS= 3 V= 0 MAGNITUD= 0 ANGULO EN GRADOS= 0 INT7= 3.89149 INT8= 2.87637 INT9= 7.70581 INT10= 3.90556  
 BUS= 4 V= .78475 -.04316 MAGNITUD= .78594 ANGULO EN GRADOS= -3.11480 INT7= 3.89149 INT8= 2.87637 INT9= 7.70581 INT10= 3.90556  
 BUS= 5 V= .82118 -.09139 MAGNITUD= .82521 ANGULO EN GRADOS= -5.66000 INT7= 3.89149 INT8= 2.87637 INT9= 7.70581 INT10= 3.90556  
 BUS= 6 V= .85541 -.06905 MAGNITUD= .85819 ANGULO EN GRADOS= -4.61500 INT7= 3.89149 INT8= 2.87637 INT9= 7.70581 INT10= 3.90556  
 M= 5 T= .080 J= 7 V= 1.01206 .01853 F=59.90936 DS= .018 PGF= .50492 OGF= .79971 DSG= 1.049  
 M= 5 T= .080 J= 8 V= 1.03494 .00133 F=59.83408 DS= .001 PGF= .46271 OGF= 1.33399 DSG= .073  
 M= 5 T= .080 J= 9 V= 1.09482 .10780 F=60.16000 DS= .152 PGF= 0 OGF= 9.81428 DSG= 8.714  
 M= 5 T= .080 J= 10 V= 1.01476 .00591 F=59.93214 DS= .006 PGF= .22434 OGF= .93595 DSG= .334  
 BUS= 1 V= .91446 -.04450 MAGNITUD= .91560 ANGULO EN GRADOS= -2.85500 INT7= 3.90410 INT8= 2.82495 INT9= 8.71381 INT10= 4.03138  
 BUS= 2 V= .90610 -.04355 MAGNITUD= .90715 ANGULO EN GRADOS= -2.75200 INT7= 3.90410 INT8= 2.82495 INT9= 8.71381 INT10= 4.03138  
 BUS= 3 V= 0 MAGNITUD= 0 ANGULO EN GRADOS= 0 INT7= 3.90410 INT8= 2.82495 INT9= 8.71381 INT10= 4.03138

M= 46 T= .940 J= 7 V= .97197 -.26262 F=60.00633 DS= -.283 PGF= .29260 QGF= .12446 DSG= -16.213  
M= 46 T= .940 J= 8 V= .96318 -.37867 F=59.69250 DS= -.375 PGF= .11629 QGF= .19993 DSG= -21.462  
M= 46 T= .940 J= 9 V= 1.10702 -.03594 F=60.03401 DS= -.032 PGF= .47492 QGF= .17367 DSG= -1.859  
M= 46 T= .940 J= 10 V= .97966 -.26465 F=60.03113 DS= -.264 PGF= .09701 QGF= .06480 DSG= -15.117  
BUS= 1 V= .94850 -.00828 MAGNITUD= .99734ANGULO EN GRADOS= -19.0050INT7= 1.792330INT8= .633840INT9= 2.820250INT10= 1.37074  
BUS= 2 V= .94109 -.38205 MAGNITUD= 1.01568ANGULO EN GRADOS= -22.0960INT7= 1.792330INT8= .633840INT9= 2.820250INT10= 1.37074  
BUS= 3 V= 1.09569 -.08897 MAGNITUD= 1.08932ANGULO EN GRADOS= -4.6800INT7= 1.792330INT8= .633840INT9= 2.820250INT10= 1.37074  
BUS= 4 V= .95602 -.26356 MAGNITUD= .99910ANGULO EN GRADOS= -16.4880INT7= 1.792330INT8= .633840INT9= 2.820250INT10= 1.37074  
BUS= 5 V= .87141 -.37010 MAGNITUD= .94675ANGULO EN GRADOS= -23.0110INT7= 1.792330INT8= .633840INT9= 2.820250INT10= 1.37074  
BUS= 6 V= .83471 -.33786 MAGNITUD= .94703ANGULO EN GRADOS= -20.9010INT7= 1.792330INT8= .633840INT9= 2.820250INT10= 1.37074  
M= 49 T= .960 J= 7 V= .97237 -.28125 F=60.01572 DS= -.282 PGF= .27496 QGF= .12243 DSG= -16.132  
M= 49 T= .960 J= 8 V= .94822 -.41470 F=59.70806 DS= -.412 PGF= .06902 QGF= .21650 DSG= -23.622  
M= 49 T= .960 J= 9 V= 1.10712 -.03286 F=60.01023 DS= -.030 PGF= .49203 QGF= .17419 DSG= -1.700  
M= 49 T= .960 J= 10 V= .98068 -.26085 F=60.03026 DS= -.260 PGF= .11795 QGF= .06492 DSG= -14.895  
BUS= 1 V= .94841 -.30967 MAGNITUD= .99769ANGULO EN GRADOS= -18.0830INT7= 1.950380INT8= .376840INT9= 2.862530INT10= 1.66641  
BUS= 2 V= .92638 -.41243 MAGNITUD= 1.01404ANGULO EN GRADOS= -23.9990INT7= 1.950380INT8= .376840INT9= 2.862530INT10= 1.66641  
BUS= 3 V= 1.08585 -.08665 MAGNITUD= 1.08930ANGULO EN GRADOS= -4.5620INT7= 1.950380INT8= .376840INT9= 2.862530INT10= 1.66641  
BUS= 4 V= .95776 -.26482 MAGNITUD= .99921ANGULO EN GRADOS= -16.5620INT7= 1.950380INT8= .376840INT9= 2.862530INT10= 1.66641  
BUS= 5 V= .86312 -.38374 MAGNITUD= .94458ANGULO EN GRADOS= -23.9700INT7= 1.950380INT8= .376840INT9= 2.862530INT10= 1.66641  
BUS= 6 V= .83192 -.34233 MAGNITUD= .94603ANGULO EN GRADOS= -21.2140INT7= 1.950380INT8= .376840INT9= 2.862530INT10= 1.66641  
M= 50 T= .980 J= 7 V= .97304 -.27893 F=60.02195 DS= -.279 PGF= .30004 QGF= .12049 DSG= -15.996  
M= 50 T= .980 J= 8 V= .93299 -.44792 F=59.73049 DS= -.448 PGF= .02541 QGF= .23380 DSG= -25.645  
M= 50 T= .980 J= 9 V= 1.10711 -.03313 F=60.038578 DS= -.030 PGF= .48412 QGF= .17426 DSG= -1.714  
M= 50 T= .980 J= 10 V= .98161 -.25735 F=60.02629 DS= -.256 PGF= .13804 QGF= .06513 DSG= -14.691  
BUS= 1 V= .94852 -.31045 MAGNITUD= .99804ANGULO EN GRADOS= -18.1230INT7= 2.127600INT8= .138930INT9= 2.874950INT10= 1.95025  
BUS= 2 V= .91156 -.44035 MAGNITUD= 1.01235ANGULO EN GRADOS= -25.7840INT7= 2.127600INT8= .138930INT9= 2.874950INT10= 1.95025  
BUS= 3 V= 1.03582 -.08716 MAGNITUD= 1.08931ANGULO EN GRADOS= -4.5890INT7= 2.127600INT8= .138930INT9= 2.874950INT10= 1.95025  
BUS= 4 V= .95746 -.28618 MAGNITUD= .99931ANGULO EN GRADOS= -16.5410INT7= 2.127600INT8= .138930INT9= 2.874950INT10= 1.95025  
BUS= 5 V= .05492 -.38620 MAGNITUD= .94227ANGULO EN GRADOS= -24.0640INT7= 2.127600INT8= .138930INT9= 2.874950INT10= 1.95025  
BUS= 6 V= .67935 -.34602 MAGNITUD= .94498ANGULO EN GRADOS= -21.4800INT7= 2.127600INT8= .138930INT9= 2.874950INT10= 1.95025  
M= 51 T= 1.000 J= 7 V= .97345 -.27606 F=60.02472 DS= -.276 PGF= .32692 QGF= .11885 DSG= -15.827  
M= 51 T= 1.000 J= 8 V= .91814 -.47763 F=59.75922 DS= -.440 PGF= .01389 QGF= .25061 DSG= -27.484  
M= 51 T= 1.000 J= 9 V= 1.10699 -.03681 F=59.96134 DS= -.033 PGF= .48128 QGF= .17377 DSG= -1.905  
M= 51 T= 1.000 J= 10 V= .98235 -.25452 F=60.01941 DS= -.254 PGF= .15660 QGF= .06532 DSG= -14.525  
BUS= 1 V= .94872 -.31090 MAGNITUD= .99837ANGULO EN GRADOS= -18.1440INT7= 2.317520INT8= -.076060INT9= 2.858010INT10= 2.21225  
BUS= 2 V= .93727 -.46526 MAGNITUD= 1.01073ANGULO EN GRADOS= -27.4080INT7= 2.317520INT8= -.076060INT9= 2.858010INT10= 2.21225  
BUS= 3 V= 1.09559 -.09045 MAGNITUD= 1.08935ANGULO EN GRADOS= -4.7630INT7= 2.317520INT8= -.076060INT9= 2.858010INT10= 2.21225  
BUS= 4 V= .95709 -.28783 MAGNITUD= .99944ANGULO EN GRADOS= -16.7380INT7= 2.317520INT8= -.076060INT9= 2.858010INT10= 2.21225  
BUS= 5 V= .84712 -.40727 MAGNITUD= .93994ANGULO EN GRADOS= -25.6770INT7= 2.317520INT8= -.076060INT9= 2.858010INT10= 2.21225



-Fig.4.4 Curvas del ángulo de carga contra tiempo, cargas representadas como impedancia constante, y tiempo de liberación de 0.1 Seg.







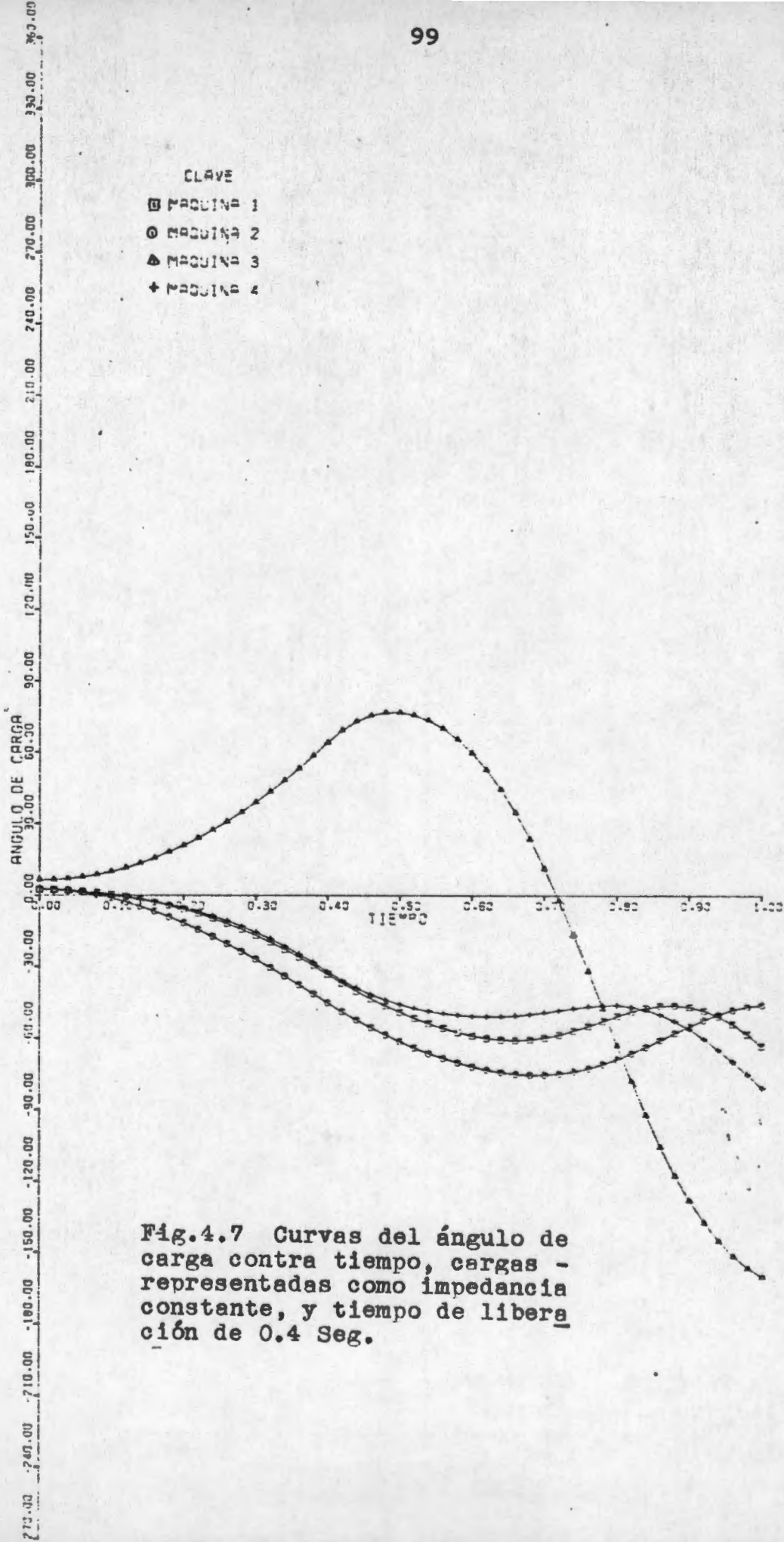


Fig.4.7 Curvas del ángulo de carga contra tiempo, cargas representadas como impedancia constante, y tiempo de liberación de 0.4 Seg.

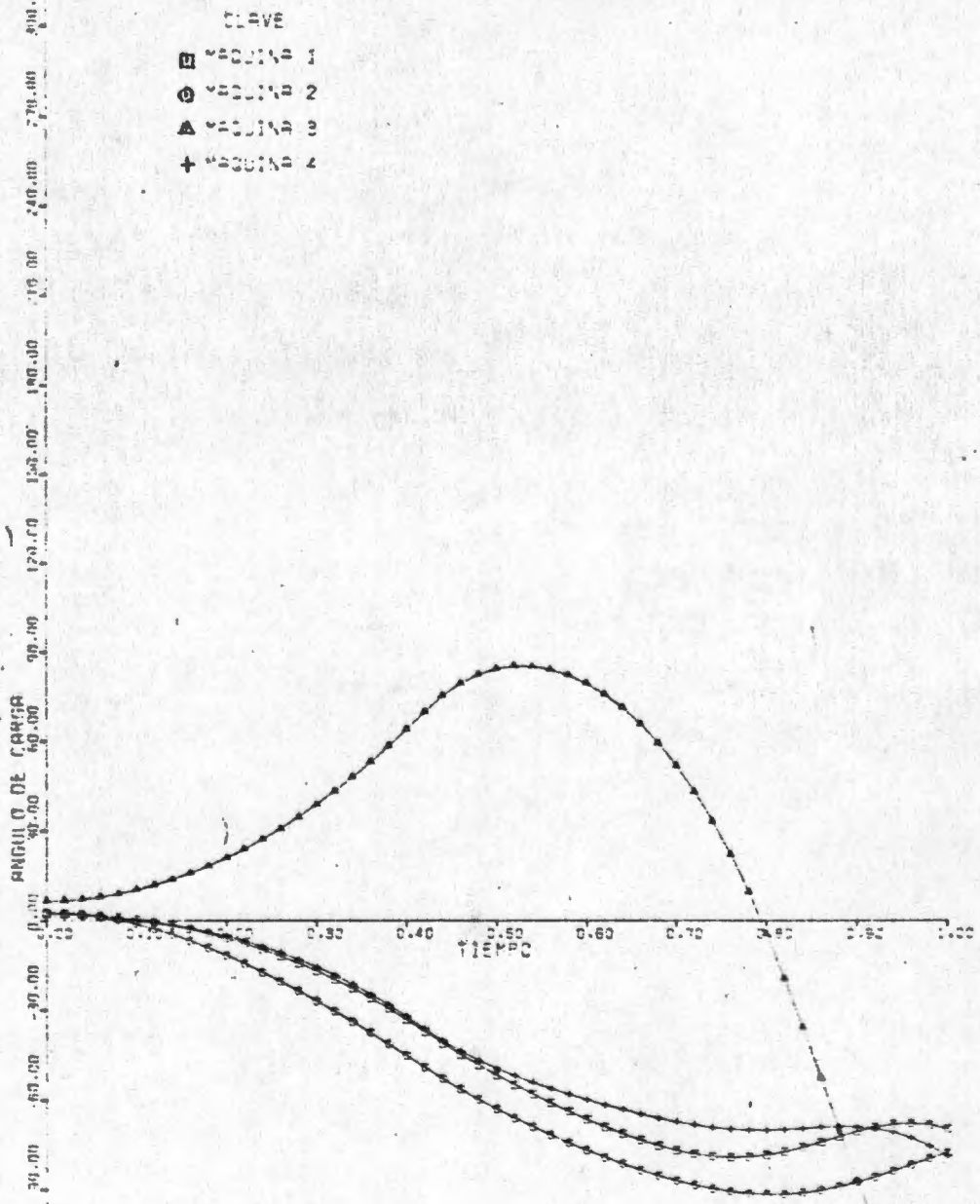


Fig.4.8 Curvas del ángulo de carga contra tiempo, cargas - representadas como impedancia constante, y tiempo de liberación de 0.42 Seg.

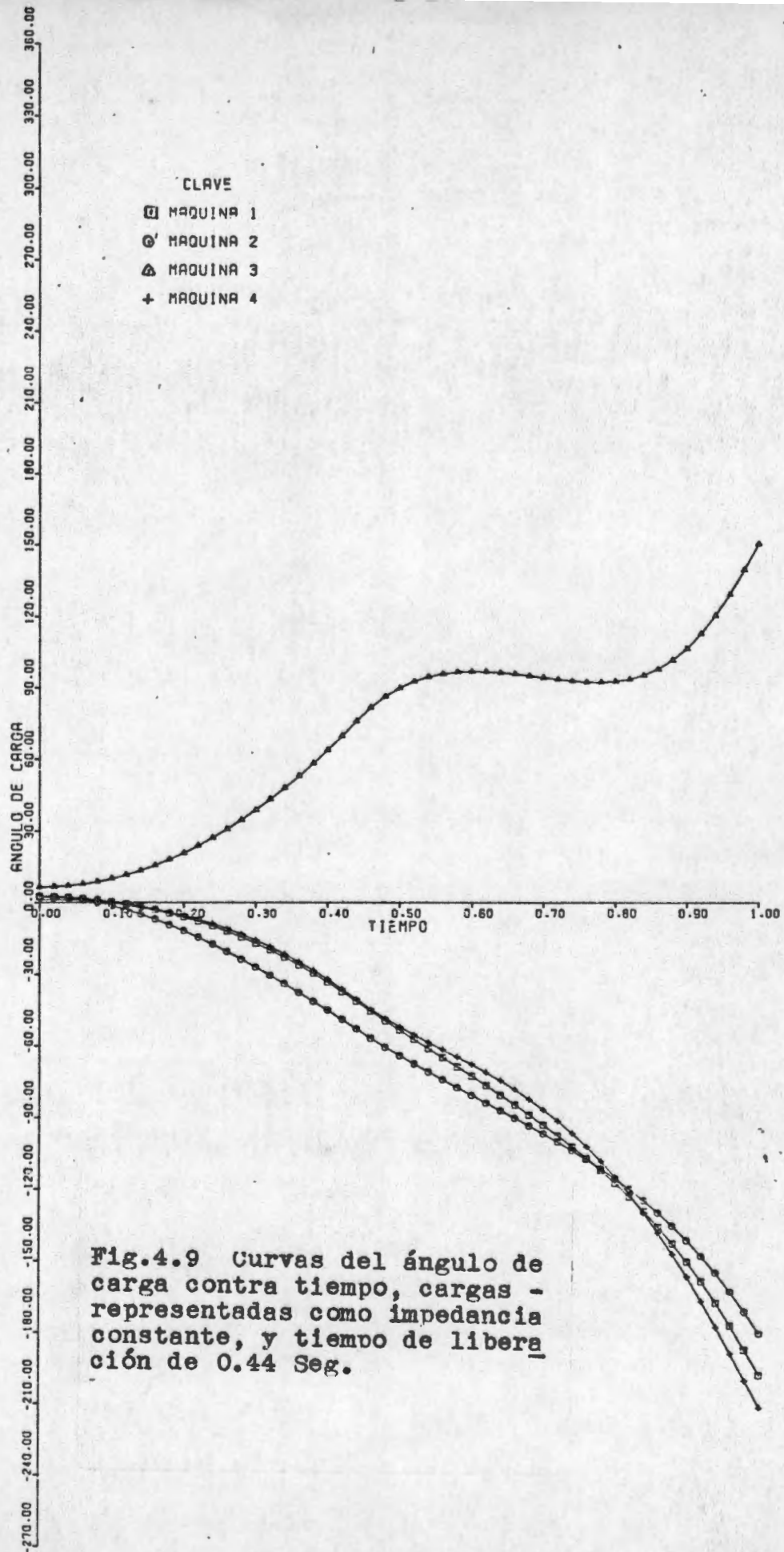


Fig.4.9 Curvas del ángulo de carga contra tiempo, cargas representadas como impedancia constante, y tiempo de liberación de 0.44 Seg.

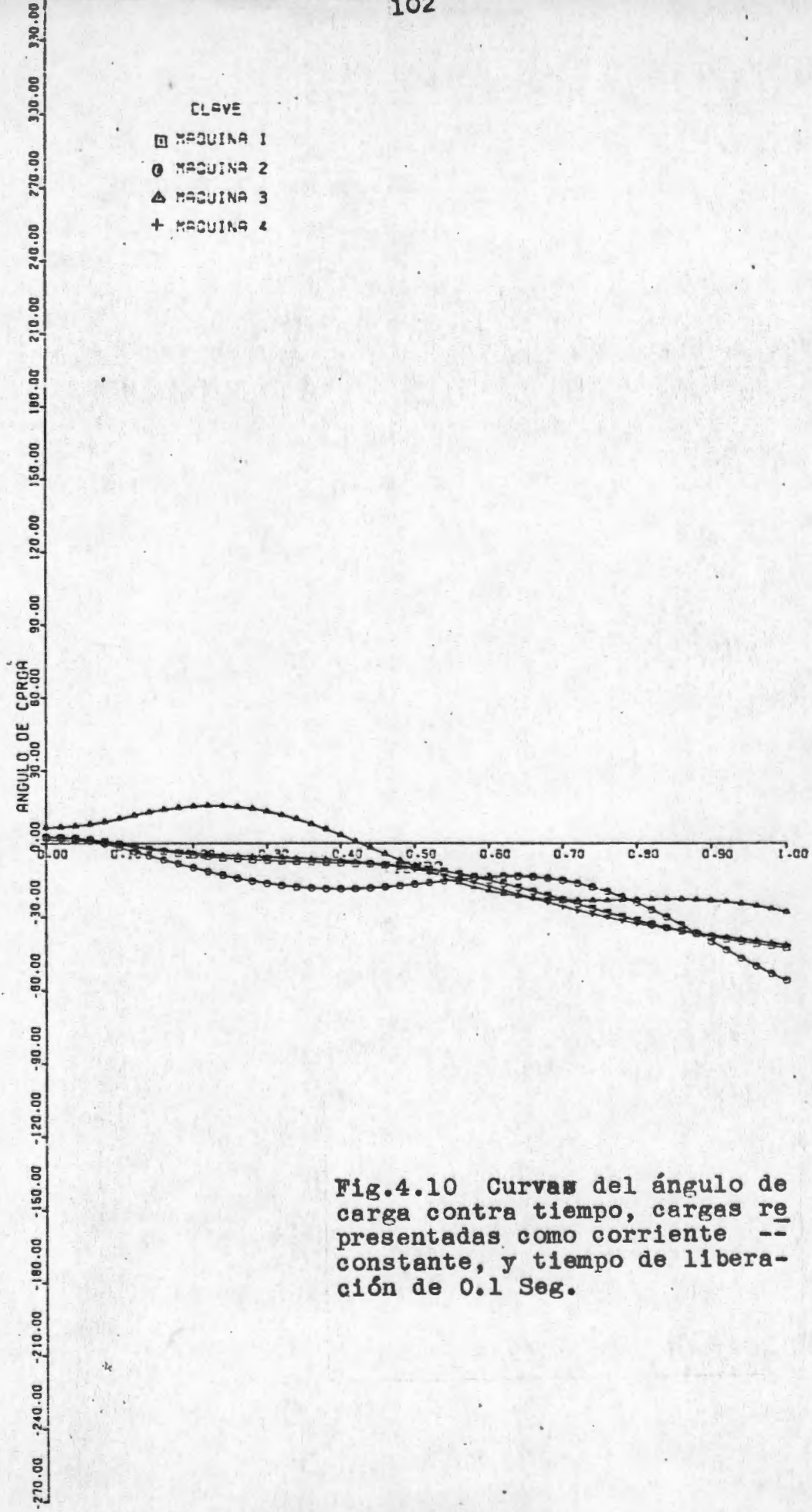
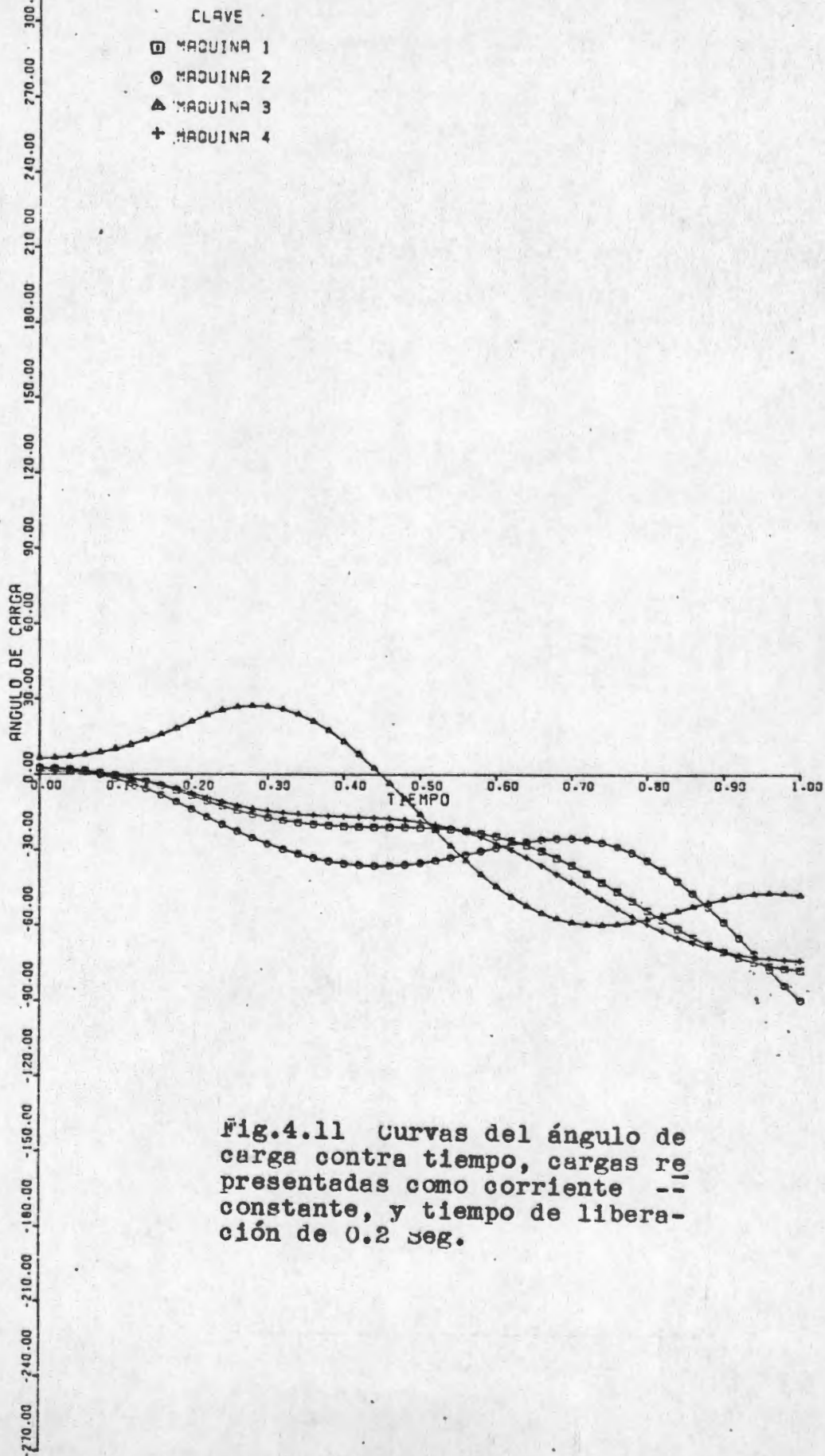
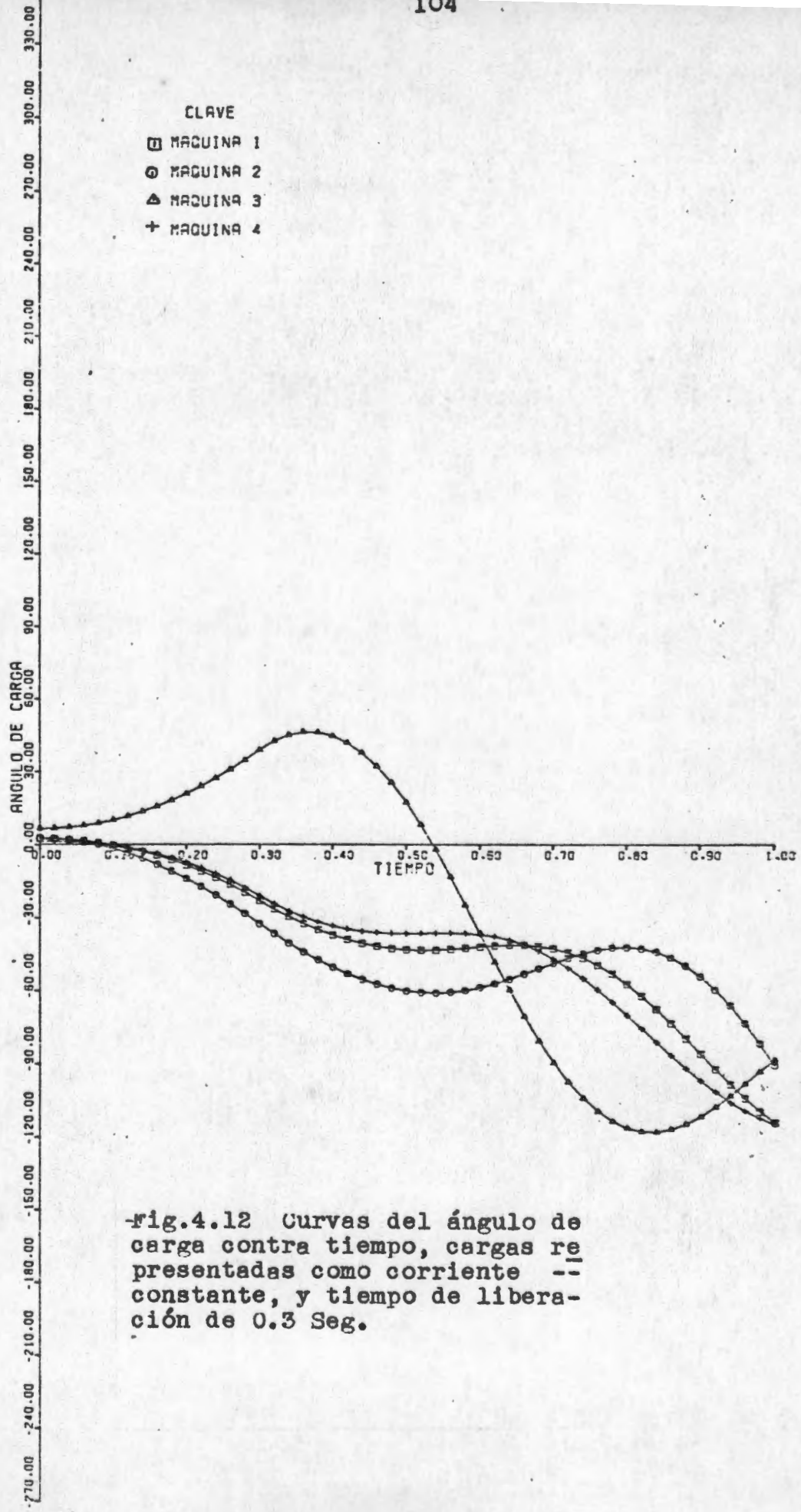
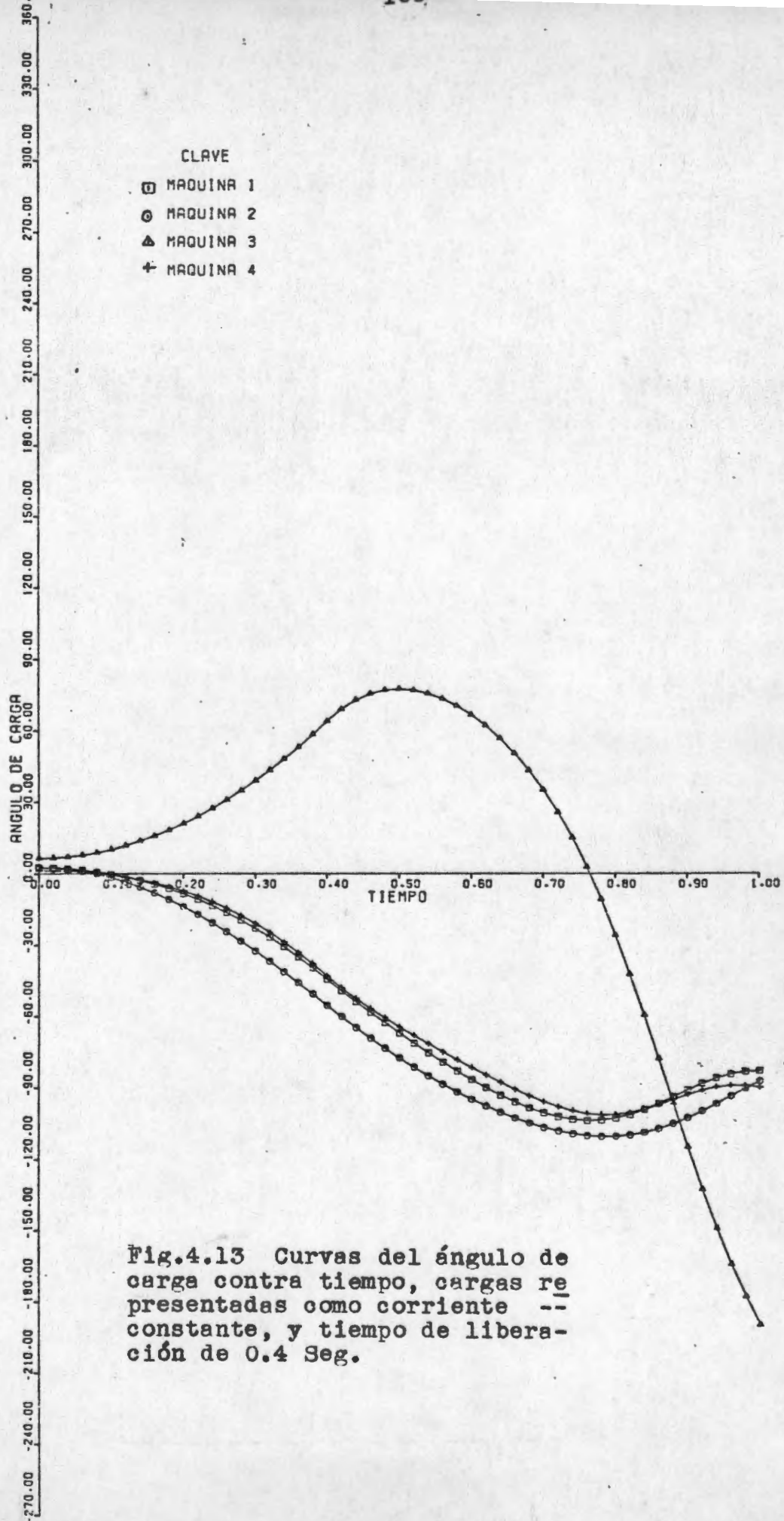


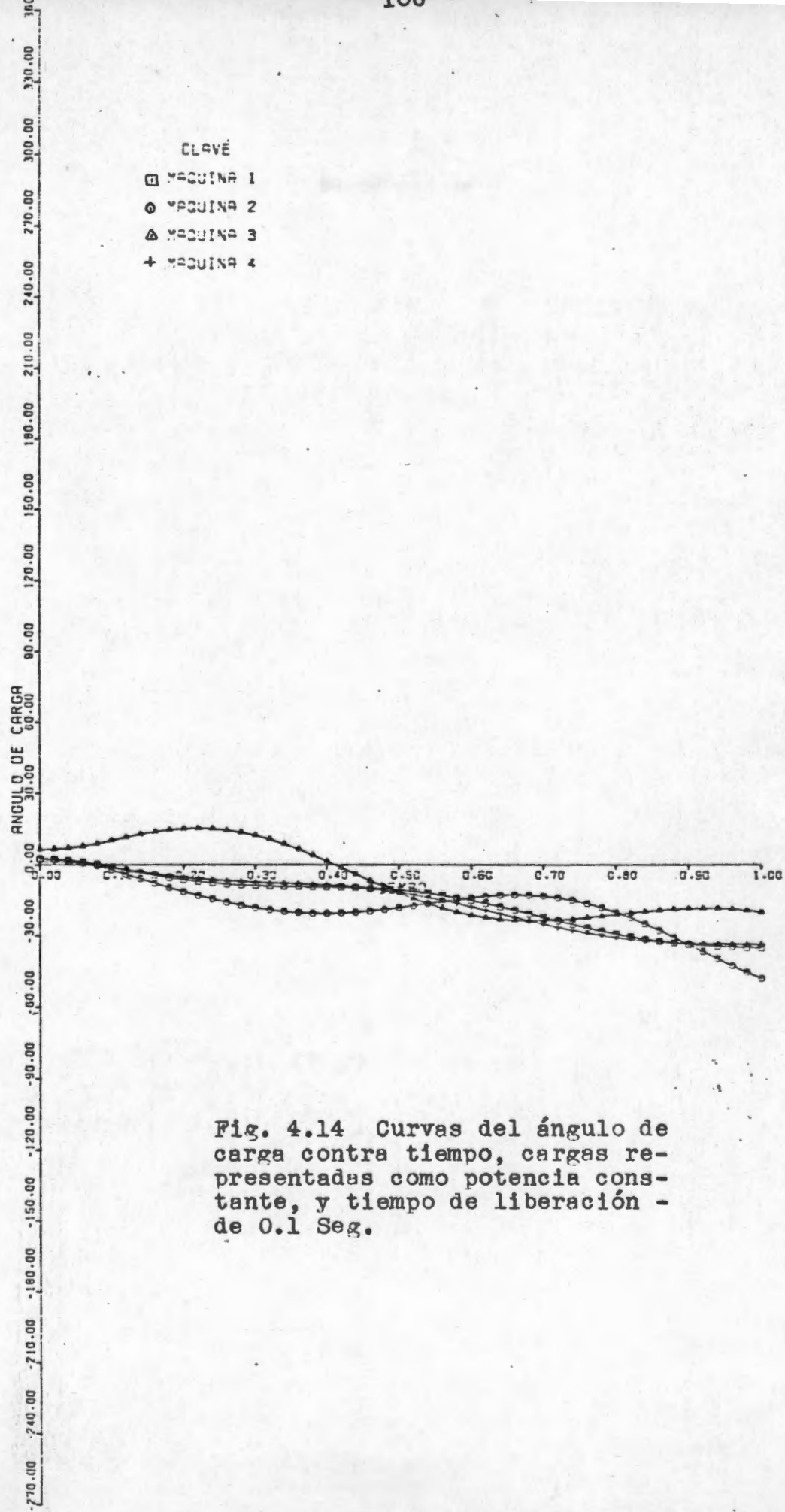
Fig.4.10 Curvas del ángulo de carga contra tiempo, cargas re presentadas como corriente -- constante, y tiempo de liberación de 0.1 Seg.





-fig.4.12 Curvas del ángulo de carga contra tiempo, cargas representadas como corriente constante, y tiempo de liberación de 0.3 Seg.





CLAVE

- MAGUINA 1
- MAGUINA 2
- △ MAGUINA 3
- + MAGUINA 4

Fig. 4.14 Curvas del ángulo de carga contra tiempo, cargas representadas como potencia constante, y tiempo de liberación de 0.1 Seg.



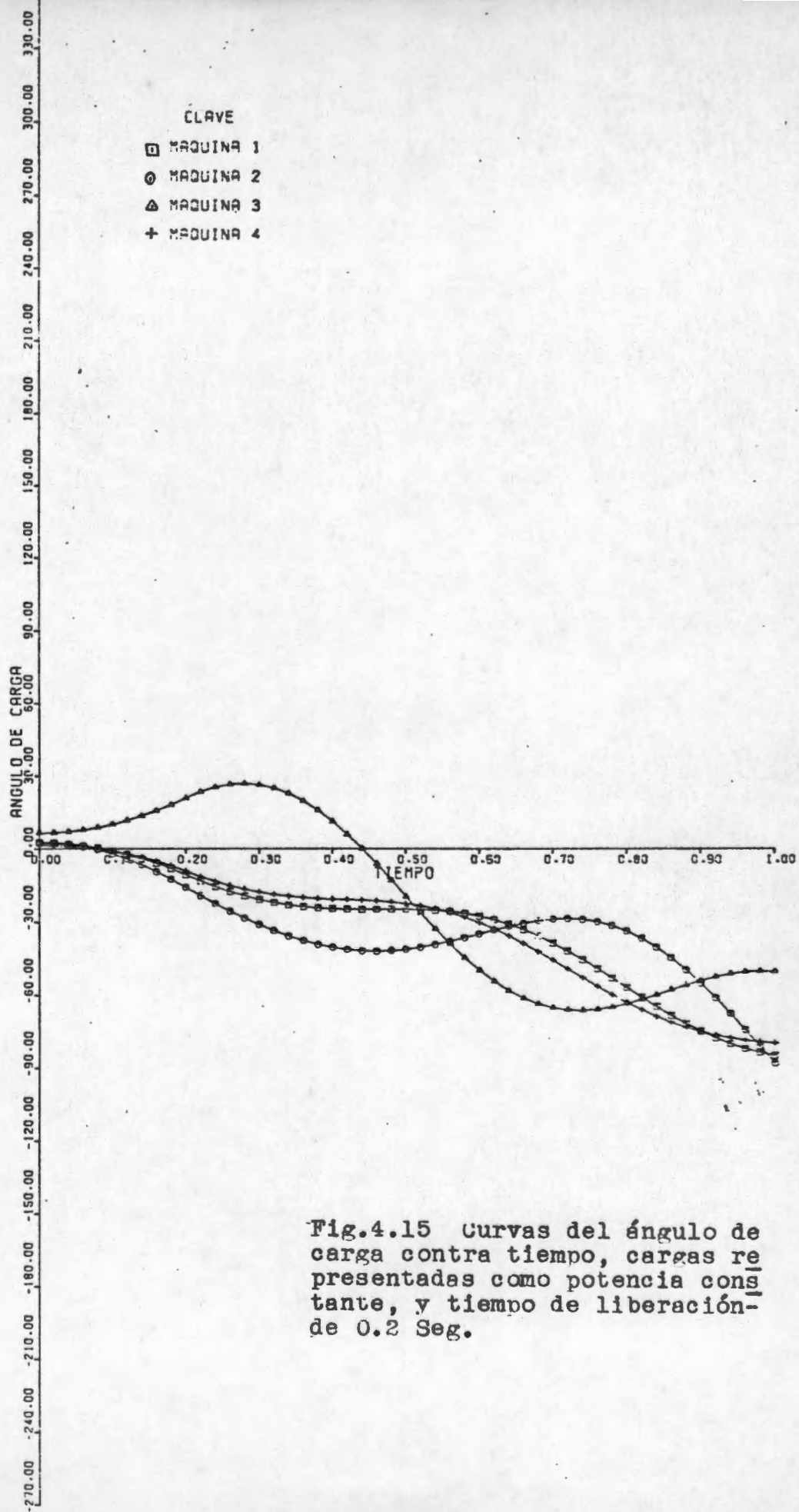


Fig.4.15 Curvas del ángulo de carga contra tiempo, cargas representadas como potencia constante, y tiempo de liberación de 0.2 Seg.

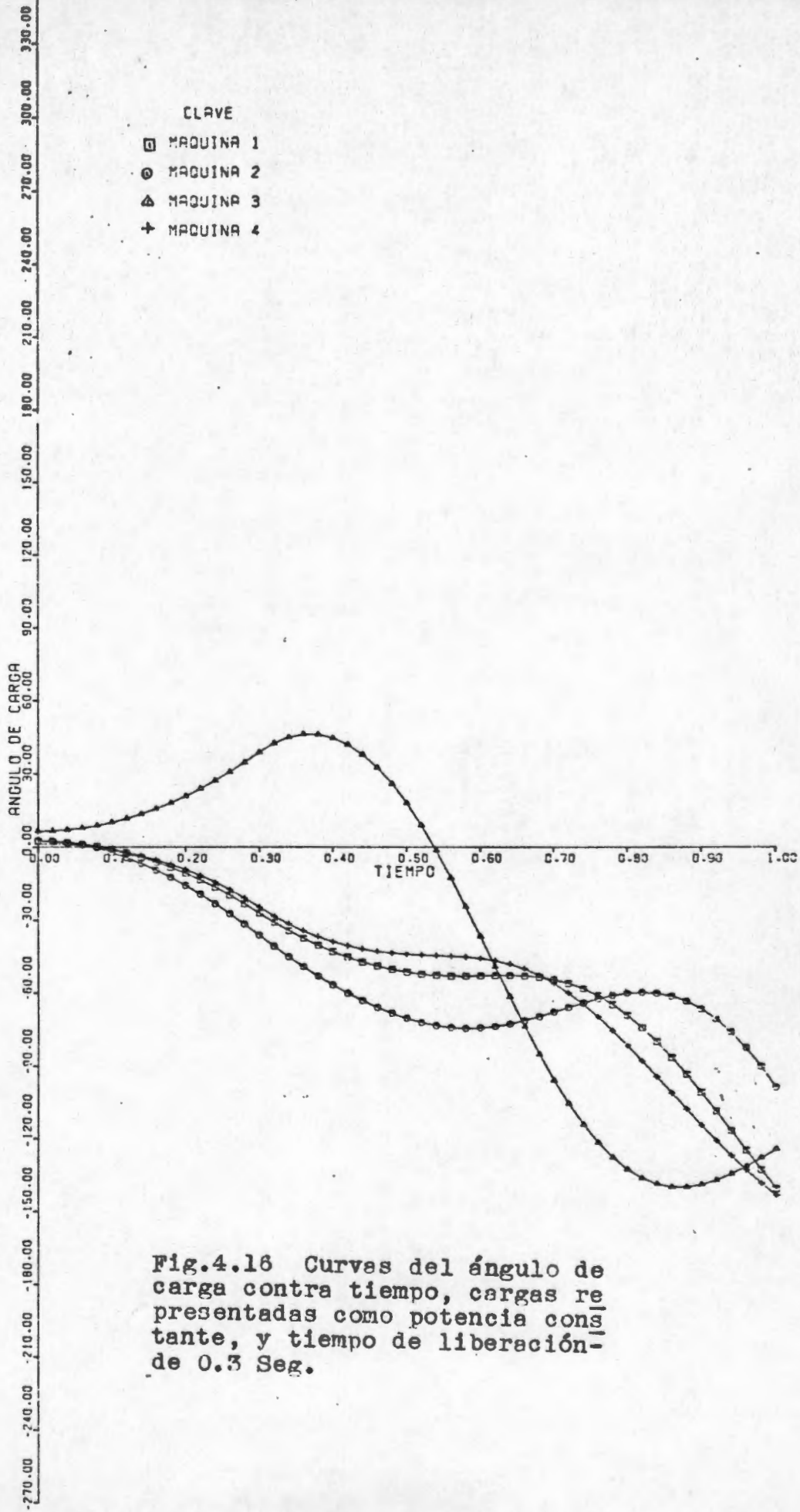
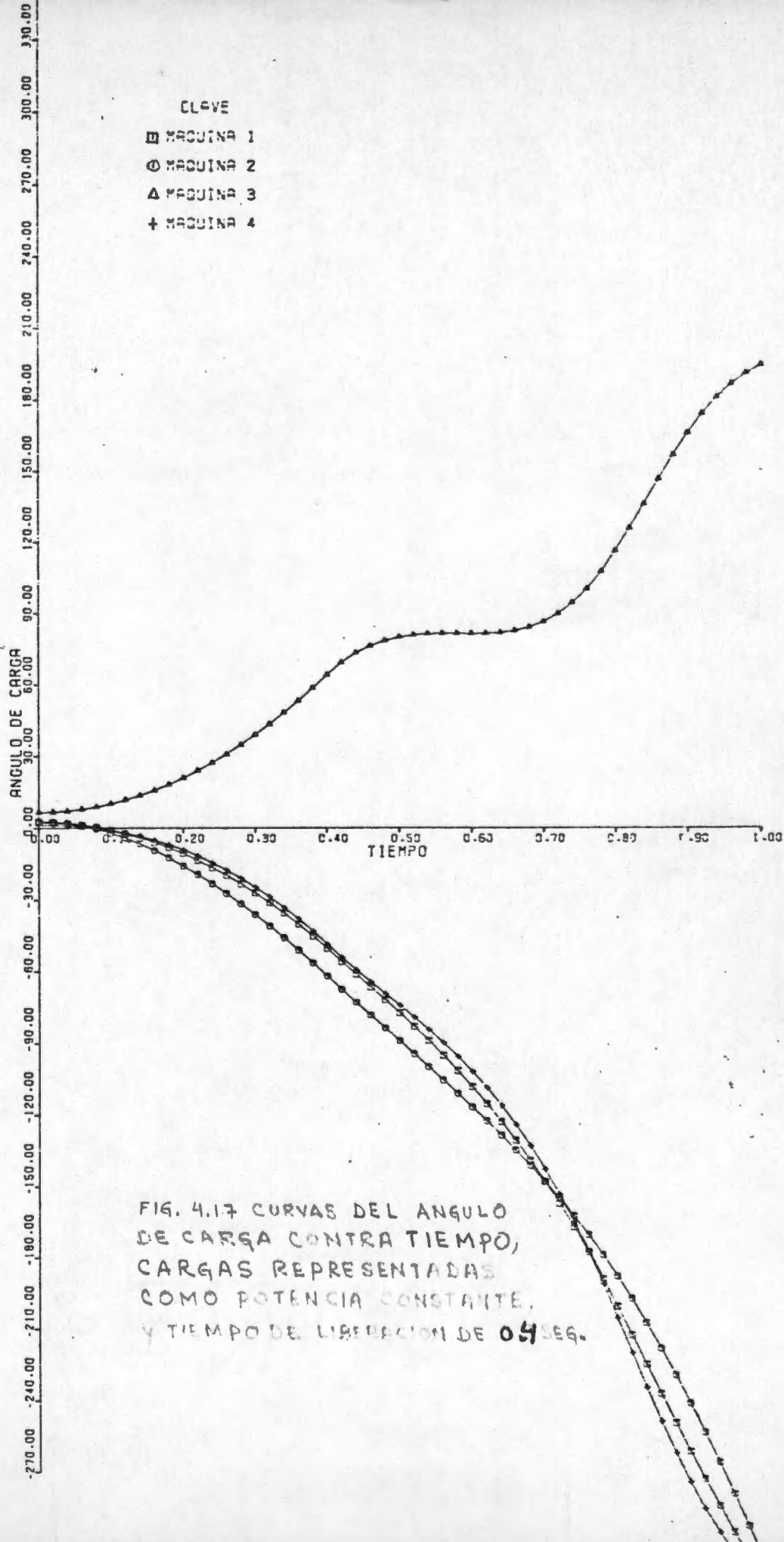


Fig.4.16 Curvas del ángulo de carga contra tiempo, cargas re presentadas como potencia cons tante, y tiempo de liberación de 0.3 Seg.



## CAPITULO V

## ESTUDIO DE ESTABILIDAD DINAMICA EN SISTEMAS MULTIMAQUINAS.

Para efectuar un estudio de estado dinámico se deberán considerar modelos más exactos de máquinas síncronas, así como reguladores de voltaje y velocidad ya que dentro de un estudio de éstos (1-300 seg.)- se deberá considerar su efecto.

Este estudio se debe realizar, considerando los mismos pasos que en los estudios dados anteriormente en estabilidad transitoria con nodos retenidos, con los cambios correspondientes en lo que se refiere a un aumento de ecuaciones por integrar dependiendo de que tan aproximados se den los modelos matemáticos de cada elemento mencionado, así como el de las cargas, ya que si consideran cargas dinámicas, tales como motores de inducción, se tendrán ciertas variaciones en cuanto a las curvas de oscilación, ver referencia [8].

De éste modo daremos en éste capítulo una serie de modelos matemáticos de dichos elementos, no obstante quedando asentado que en éste análisis no se consideró el efecto de las cargas dinámicas o sea motores de inducción, ya que esto como se mencionó anteriormente en el capítulo cuarto requiere un estudio particular al respecto.

También por otra parte no se consideró en éste análisis, diferentes modelos de cargas, como en el caso de estabilidad transitoria, ya que aquí sería mejor ver el comportamiento de las cargas cuando su representación es función del voltaje o de la frecuencia, esto se deja para futuras investigaciones dentro de éste campo.

En vista de que el problema de estabilidad en un sistema de potencia es determinar si las máquinas síncronas del sistema permanecen o no en sincronismo, las características de las máquinas síncronas juegan ob-

amente un papel muy importante en el problema, sin olvidar que también tienen importancia los efectos del regulador de voltaje, el regulador de velocidad, y los modelos de las cargas.

### 5.1 Método de análisis para la máquina síncrona.

Para un estudio de estabilidad tanto en estado permanente como en  $\pm$  transitorio se requiere de un modelo matemático que nos represente el comportamiento de las máquinas síncronas el cual se puede incluir en cada estudio en particular. Se tiene una gran cantidad de estudios al respecto, por lo cual en éste capítulo trataremos de entender en forma general, y además daremos una idea general en lo que se refiere a los modelos de las máquinas síncronas para estudios de estabilidad.

Será provechoso considerar primero, el comportamiento físico de la máquina síncrona antes de presentar sus modelos matemáticos.

Cuando la máquina es operada en estado permanente, es posible exponer algunas de sus más importantes características. Si la máquina es operada como generador, el rotor será movido por un primotor.

La armadura: o estator está arreglado en ranuras en tres fases simétricas. La intensidad de campo magnético será controlado por medio de la corriente en el rotor, o devanado de campo.

Un generador síncrono puede ser operado solo con una simple carga o en paralelo con otros generadores dentro de una red grande; el último arreglo es el más común. En la fig. 5.1 se da un arreglo típico. Un total de generadores son conectados en paralelo a un sistema, cada uno por medio de un bus de generación. El generador  $G_n$  suministra la potencia compleja  $S_n = P_{Gn} - jQ_{Gn}$  al sistema. Su bus se ajusta a la magnitud de voltaje  $V_n$  y el sistema está a la frecuencia  $f$ .

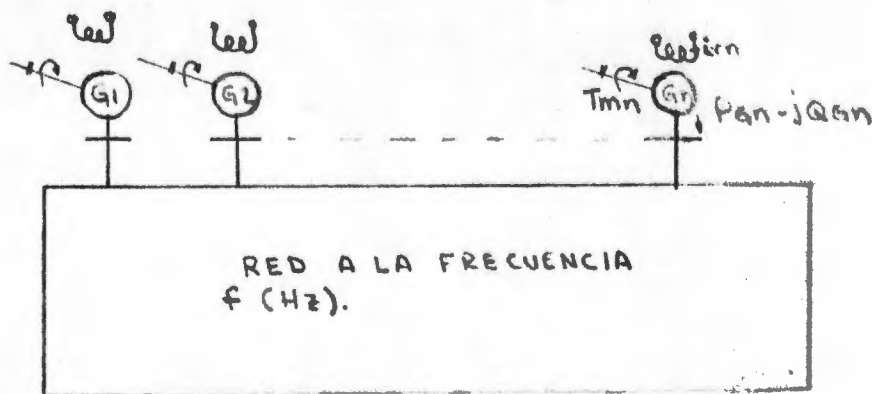


FIG. 5.1

## 5.2 Control de las maquinas sincronas.-

Cada maquina se puede controlar por medio de dos fuerzas de control ó entradas; la corriente al rotor (ó campo)  $i_{rn}$  y el par mecánico  $T_{mn}$ . Cuando cada una ó ambas entradas cambian las cuatro cantidades generalmente cambian  $P_{gn}$ ,  $Q_{gn}$ ,  $|V_n|$  y  $f$ . Utilizando la terminología de control, cada generador se puede representar como una planta teniendo dos entradas de control y cuatro salidas de control como se muestra en la figura 5.2

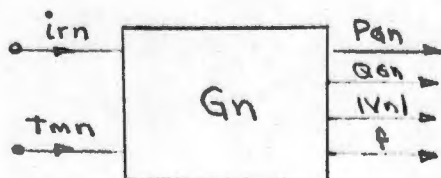


FIG. 5.2

Desde el punto de vista de control sería deseable tener el control no interactuante, es decir, con la manipulación de una entrada desearíamos que una y solamente una salida cambiara.

Esto generalmente es imposible. En primer lugar tenemos cuatro salidas para dos entradas.

Ademas debido al comportamiento físico de la máquina siempre se tendrá un acoplamiento cerrado entre las dos entradas y cuatro salidas.

El grado de acoplamiento depende del tamaño del sistema y su estructura. La red infinita representa un caso extremo del tamaño de la red, otro caso extremo esta representado por un solo generador suministrando energía a una simple carga.

Se ve claro de lo anterior que podemos esperar en el caso mas general una interpretación positivamente complicada entre las salidas y entradas de las máquinas individuales. Nuestros modelos matemáticos deben ser lo suficientemente aproximados para dar una historia completa.

### 5.3 Ecuaciones generales de la máquina.-

Clásicamente, la teoría de la máquina síncrona se presentó en terminos del flujo en el entrehierro, corrientes y ondas de F.e.m. Esta teoría tiene ventaja para explicar realidades físicas dentro de la máquina y sirve excelentemente para explicar en forma limitada sus características de operación en estado permanente. Esta aproximación viene a ser impráctica en el caso para exponer el comportamiento de la máquina en estado transitorio. Para éste propósito se tiene un método de análisis el cual se fundamenta en el concepto de circuitos: la máquina se considera como un conjunto de circuitos acoplados magnéticamente.

#### Resumen de las ecuaciones de una máquina síncrona.-

Antes de proceder con nuestra consideración de modelos de máquinas síncronas para estudios de estabilidad se hará un resumen de ecuaciones de acuerdo con la referencia [5]. Estas parten de las suposiciones correspondientes en cuanto se refiere a la convención de signos, ya que de acuerdo a ésta teoría la convención adoptada corresponde directamente a la operación motor, teniendo en cuenta que para la operación motor introduce cantidades negativas. Esto tiene como ventaja de introducir un mínimo número de signos negativos en las ecuaciones.

La teoría general de las máquinas eléctricas como se menciona es desarrollada para una máquina generalizada teniendo un número de bobinas

con sus ejes localizados en los ejes directo y cuadratura.

La convención adoptada para voltajes y corrientes es la siguiente:

v.- voltaje impreso en la bobina.

i.- corriente medida en la misma dirección que v.

Así por ejemplo la ecuación para un simple circuito con resistencia  $r$  e inductancia  $L$  :

$$v = r i + L \frac{d i}{d t} \quad 5.1$$

Utilizando el operador  $p$  en lugar del operador  $\frac{d}{d t}$

$$v = (r + L p) i \quad 5.2$$

La figura 5.3 muestra el diagrama de una máquina generalizada con una bobina en cada eje para cada elemento.

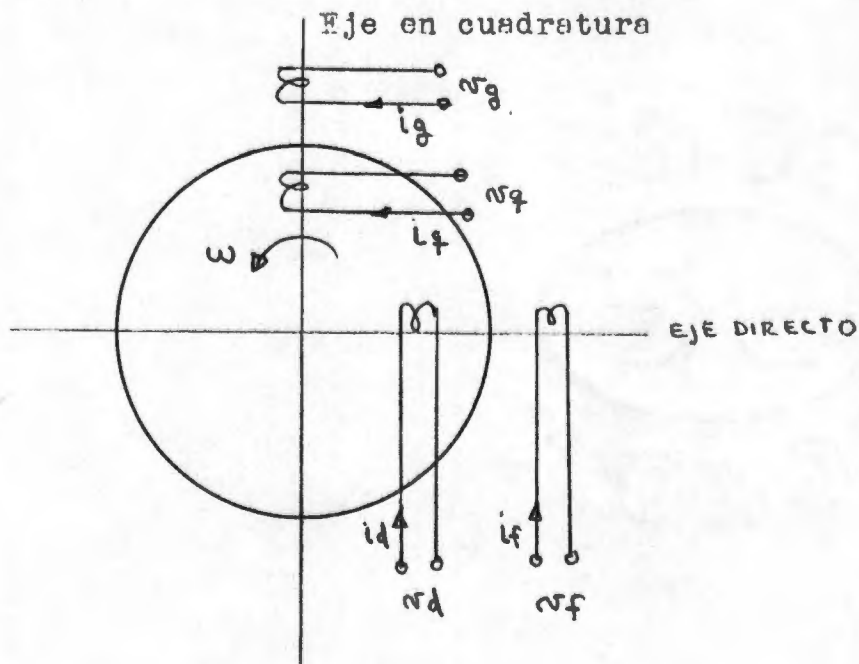


Fig. 5.3

R y G en el miembro estacionario (Estador)

D y Q en el miembro rotatorio. (Rotor)



Cualquier máquina puede representarse por una máquina generalizada equivalente con el número apropiado de bobinas en cada eje fijo.

Las ecuaciones que relacionan los voltajes y corrientes para los cuatro circuitos son:

$$v_d = M_{df} p i_f + (r_d + L_d p) i_d + M_{qf} \omega i_q + M_{g\omega} i_g$$

$$v_q = -M_{fw} i_f - M_{dw} i_d + (r_q + L_q p) i_q + M_{gg} p i_g$$

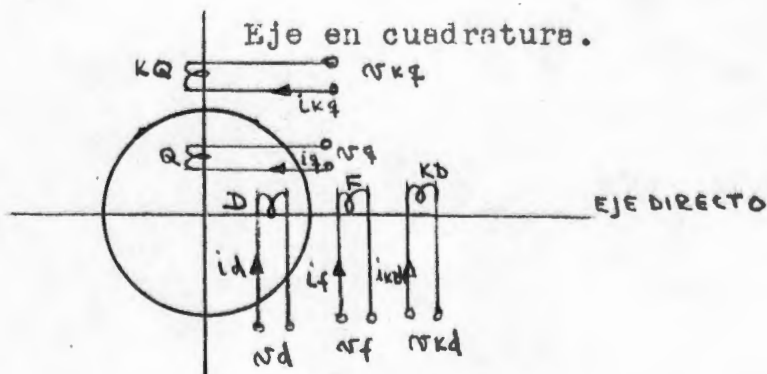
5.3

$$v_f = (r_f + L_f p) i_f + M_{df} p i_d$$

$$v_g = (M_{gg} p i_g) + (r_g + L_g p) i_g$$

En estas ecuaciones algunos terminos contienen al operador  $p$  y representan a los voltajes debidos al cambio de corrientes en las bobinas en los mismos ejes, y son llamados voltajes de transformador. Otros terminos que contienen a  $\omega$  representan los voltajes inducidos por rotación en el flujo producido por la corriente en una bobina en el otro eje y se llaman voltajes de rotación.

De acuerdo con la teoría general, las ecuaciones para representar la máquina sincrónica en dos ejes:



5.4

Fig. DIAGRAMA DE UNA MÁQUINA SINCRONA.

D - Eje directo

q - eje en cuadratura

F - devanado de campo

Kq- devanado de amortiguamiento en eje q

KD- devanado de amortiguamiento en eje "

Se notará que en estas ecuaciones si se incluyen devanados de amortiguamiento para indicar una representación mas completa de la máquina, sin embargo esto no altera nuestro estudio, ya que unicamente se tendrán otras ecuaciones adicionales.

En resumen se tienen las siguientes ecuaciones:

Para voltajes

$$v_d = r i_d + \omega \psi_q + \tau \dot{i}_d$$

$$v_q = r i_q - \omega \psi_d + \tau \dot{i}_q$$

$$v_f = r_f i_f + \tau_f \dot{i}_f$$

$$v_{kd} = r_{kd} i_{kd} + \tau_{kd} \dot{i}_{kd}$$

$$v_{kq} = r_{kq} i_{kq} + \tau_{kq} \dot{i}_{kq}$$

5.4

Para los enlaces de flujo

$$\omega \psi_d = x_{ad} i_d + x_{ad} i_f + x_{ad} i_{kd}$$

$$\omega \psi_q = x_{aq} i_d + x_{aq} i_f + x_{aq} i_{kd}$$

$$\omega \psi_{kd} = x_{kd} i_d + x_{kd} i_f + x_{kd} i_{kd}$$

$$\omega \psi_{kq} = x_{kq} i_q + x_{kq} i_{kq}$$

5.5

$\omega \psi_d, \omega \psi_q, \omega \psi_f, \omega \psi_{kd}, \omega \psi_{kq}$  VOLTAJES

inducidos a la velocidad sincrona  $\omega$ .

$X_{ad}, X_{aq}$  reactancias mutuas entre devanados para eje D y eje Q.

Las ecuaciones del par para la máquina es:

$$T_e = \frac{\omega}{2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad 5.6$$

$$p^2 \delta = \frac{1}{M} (T_M - T_e) \quad 5.7$$

## 5.5 Modelos de máquinas Sincronas para estudios de estabilidad.

Para cualquier simulación de un sistema de potencia grande, el uso de modelos complejos encuentra varios obstáculos. El requerimiento para escribir programas de computadora al acomodar los modelos, el aumento de tiempo de computadora asociado con modelos mas complejos y la necesidad de crear un archivo de datos de los parametros del modelo.

A pesar de estas dificultades el uso del modelo clásico del generador está desapareciendo rápidamente para el análisis de sistemas grandes. El modelo clásico da resultados optimísticos para estudios de falla trifásica.

Para sistemas multimáquinas en estudios de estabilidad transitoria y dinámica se pueden sin embargo tener ciertas representaciones de modelos de máquinas efectuando ciertas suposiciones como las que se indicarán a continuación para máquinas de polos salientes y polos lisos.

#### MAQUINA DE POLOS SALIENTES.

- 1.- Voltaje constante detras de la reactancia transitoria.
- 2.- Se puede considerar la saliencia suponiendo los eslabonamientos de campo constante.
- 3.- Saliencia con variaciones del campo, y acción del regulador de voltaje.

Una máquina de rotor cilíndrico tiene circuitos en el rotor en los dos ejes, consecuentemente se pueden usar las siguientes suposiciones.

- 1.- voltaje constante detras de la reactancia transitoria.
- 2.- Los eslabonamientos de flujo de los circuitos del rotor en ambos ejes se pueden considerar constantes.
- 3.- El efecto de la variación de flujo y acción del regulador de voltaje del circuito del rotor en eje directo puede ser calculado; mientras que el circuito en eje en cuadratura se supone abierto.
- 4.- La variación del flujo en ambos ejes y la acción del regulador de voltaje se pueden considerar.

#### Representación de la máquina de Polos Salientes.

- 1.- En este caso el procedimiento de cálculo supone la teoría aplicada a un generador de polos lisos ó de rotor cilíndrico, ó sea un voltaje detras de cada reactancia transitoria de la máquina sosteniendo -

constantes los eslabonamientos de flujo. Por esto una mayor explicación al respecto se dará en lo que se refiere a la representación del turbogenerador.

2.- Una máquina de polos salientes se puede representar por una reactancia constante.

(la resistencia de armadura se desprecia). Igual a la reactancia sincrónica en eje en cuadratura  $X_q$  en serie con la fuente de potencia cuyo voltaje es  $E_{qd}$  (Figura 5.6). Esta representación tiene la ventaja que la fase de  $E_{qd}$  representa correctamente la posición angular de la estructura del campo. Si la cantidad  $jX_q I$  se suma vectorialmente a  $E_{qd}$  siempre cae en el eje en cuadratura como se muestra en el diagrama vectorial.

La magnitud  $E_{qd}$  no es constante sin embargo, como  $E'_d$  es constante, la relación entre  $E_{qd}$  y  $E_q$  es:

$$E_{qd} = E'_q + (X_q - X'_d) I_d \quad 5.8$$

Puesto que en una máquina de polos salientes no tiene circuito de campo en eje en cuadratura  $I_g = 0$  y  $E_d = 0$  y el voltaje de excitación  $E = j E_q$  siempre cae en el eje en cuadratura tanto en estado permanente como en transitorio. Además como  $X'_q = X_q$   $E'_d = E_d = 0$  el voltaje detrás de la reactancia transitoria  $E' = j E'_q$  también cae en el eje en cuadratura. El diagrama vectorial se muestra en la fig. 5.5

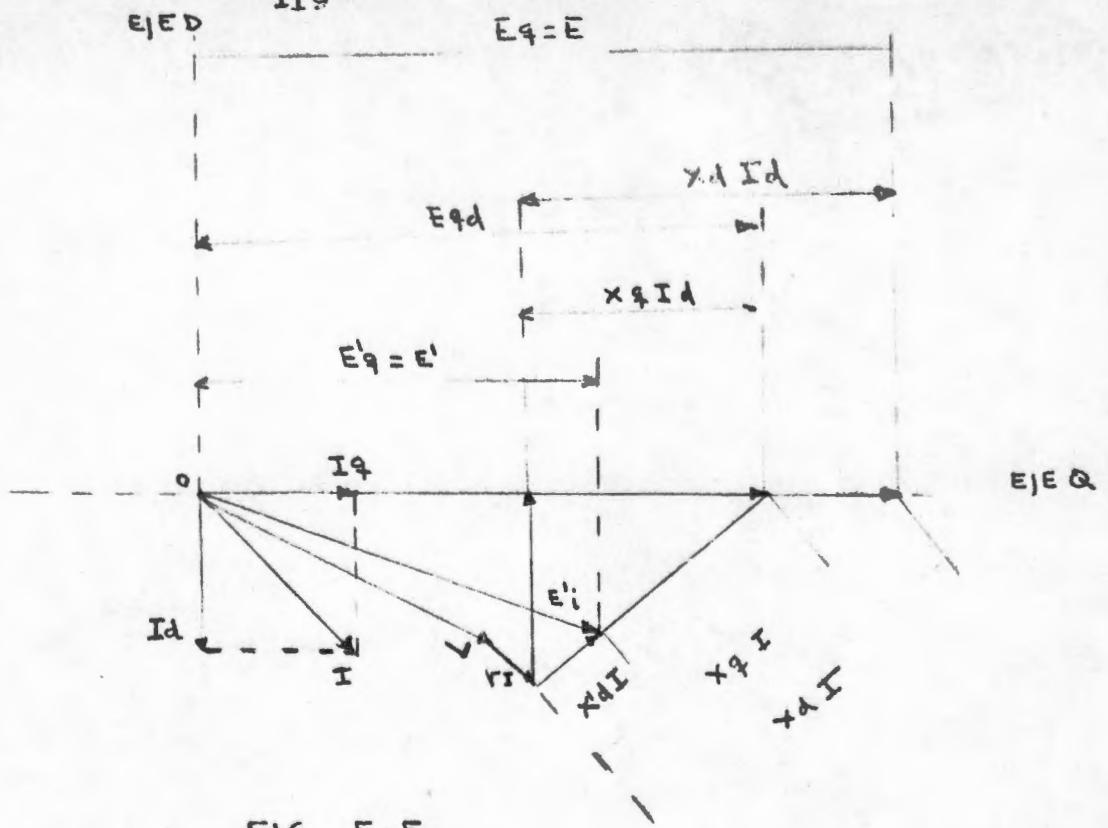


FIG. 5.5

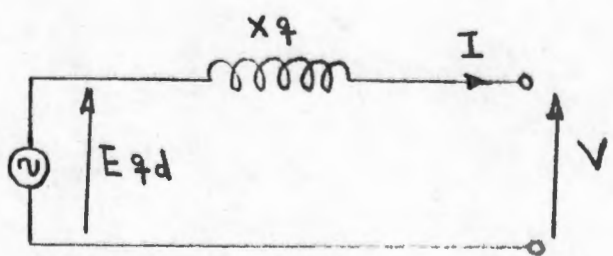


FIG. 5.6

Representación de un generador de polos salientes.

$$E_{qd} = V + j X_q$$

5.9

3.- Si  $E'_q$  varia debido a la acción del regulador de voltaje, el procedimiento es similar al anterior únicamente que los nuevos valores de  $E'_q$  deben ser calculados para cada instante, este método se describe a continuación.

CALCULO DE LOS CAMBIOS DE LOS ENLACIAMIENOS DE FLUJO DEL CAMPO.

Aplicando la Ley de voltaje de Kirchhoff al circuito del -  
campo

$$E'_{ex} = r_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \quad 5.10$$

$E'_{ex}$  - f.e.m. de la armadura de la excitatriz. volts.

$r_f$  - resistencia del devanado de campo ohms

$i_f$  - corriente en el campo amps.

$\psi_f$  - enlacenamientos de flujo del campo en Weber vueltas.

Esta ecuación se puede poner dentro de los términos del circuito de armadura multiplicandola, Por:  $\frac{\omega M_f}{r_f}$

$$\frac{\omega M_f E'_{ex}}{r_f} = \omega M_f i_f + \frac{\omega M_f}{r_f} \frac{d\psi_f}{dt} \quad 5.11$$

de la ecuación  $E_q = \omega M_f i_f$  conocido como voltaje de excitación, - este es directamente proporcional a la corriente de campo y utilizando la definición de constante de tiempo transitoria a circuito abierto.

$$T'_{do} = \frac{L_{ff}}{r_f} \quad 5.12$$

Y también la ecuación.

$$E'_q = \frac{\omega M_f}{L_{ff}} \psi_f \quad 5.13$$

$$\frac{\omega M_f \psi_f}{r_f} = \frac{L_{ff}}{r_f} \frac{\omega M_f \psi_f}{L_{ff}} = T'_{do} E'_q \quad 5.14$$

Una nueva cantidad, el voltaje de la excitatriz referido al - circuito de armadura se define por:

$$\frac{\omega M_f}{r_f} E'_{ex} = E_{ex} \quad 5.15$$

Este es el voltaje de armadura a circuito abierto, el cual podría ser producido por el voltaje de la excitatriz en estado permanente por lo que

$$E_{ex} = E_q + T'_{do} \frac{dE'_q}{dt}$$

$$\text{ó} \quad \frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{do}} [E_{ex} - E_q] \quad 5.16$$

Así la razón de cambio de  $E'_q$  ( el cual es proporcional al eslabonamiento de campo) es expresada en terminos de la constante de tiempo  $T'_{do}$ . En esta ecuación  $E_{ex}$  puede ser constante ó puede variar debido a la acción del regulador de voltaje independientemente de las otras variables de la ecuación. En este caso se supone que  $E_{ex}$  es función de  $t$ .  $E_{qd}$  depende de  $E'_q$  e  $I_d$  así:

$$E_{qd} = E'_q \left( x'_q - x'_d \right) I_d \quad \text{---} \quad 5.17$$

$I_d$  depende de la fase y magnitud de  $E_{qd}$  de cualquier máquina. ( La relación entre  $E_{qd}$  y  $E'_q$  estan dadas por la ec. 58 ).

#### REPRESENTACION DE LA MAQUINA DE ROTOR CILINDRICO

Las suposiciones ya fueron enlistadas pero brevemente se enlistarán como sigue:

##### 1.- $E'_i$ Constante.-

La representación simple de la máquina ha sido aceptable debido a que se conoce que los resultados son buenos, para estudios de períodos muy cortos del orden de 1.Seg. o menos.

Este procedimiento de calculo trata a la máquina como una fuente de voltaje detras de su reactancia transitoria. Los eslabonamientos de flujo se suponen constantes durante el estudio completo.

Dicho modelo elemental tiene la representación siguiente:

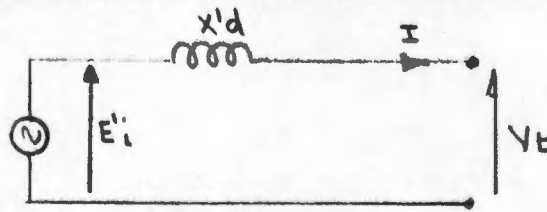


FIG 5.7

$$E_i' = v_t + j X'd I$$

5.18

Un simple diagrama fasorial para las condiciones iniciales. El voltaje se mantiene constante durante todo el estudio, suponiendo  $X_q = X'd$ . Un simple diagrama fasorial para condiciones iniciales antes del disturbio se muestra en la fig. 5.7 como  $X_q = X'd$  el voltaje detras de la reactancia transitoria coincide con el eje en cuadratura

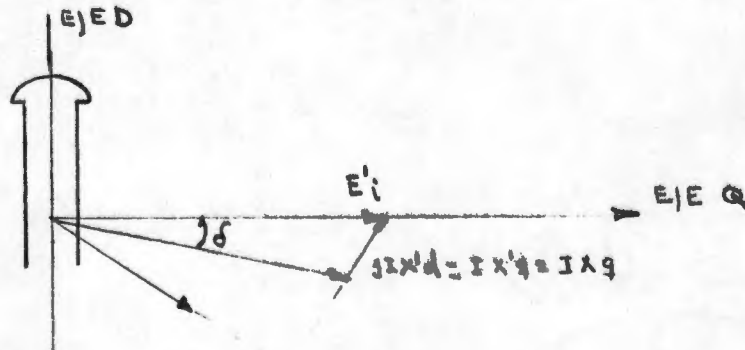


FIG. 5.8

2.- En esta suposición implica eslabonamiento de flujo constante de los circuitos principales del rotor.

En la mayoría de máquinas de rotor cilindrico las reactancias transitorias en los dos ejes son casi iguales.

Si  $X'd = X'q$  entonces  $E' = E_i'$  ver Fig. 5.9y entonces esta suposición es idéntica a la suposición 1.



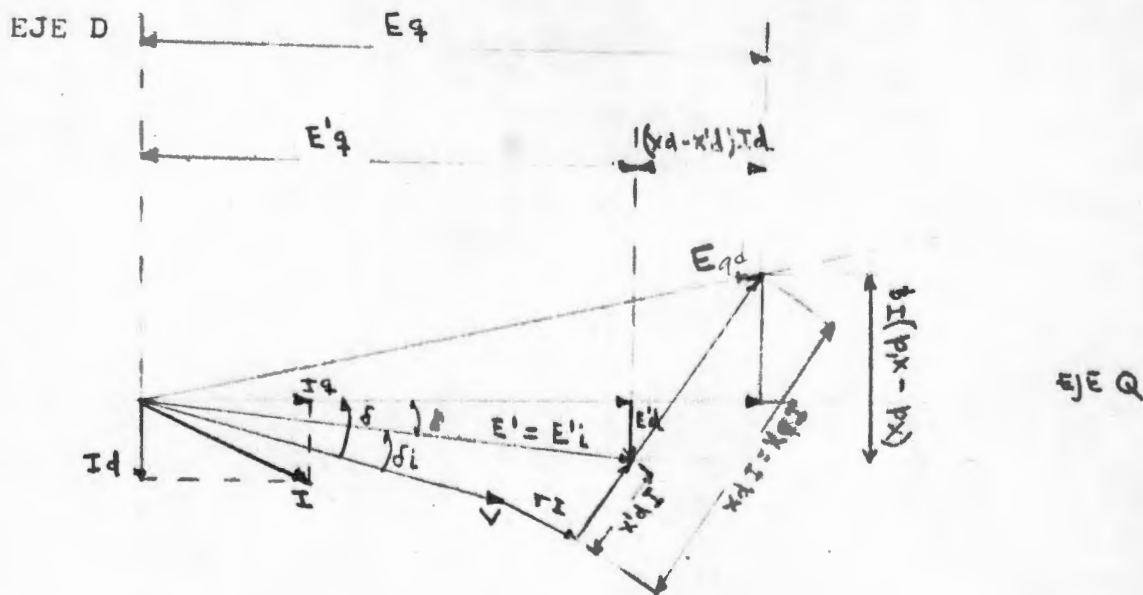


Fig. 5.9 Diagrama vectorial de una máquina de rotor cilíndrico en estado transitorio.

Si  $X'_d$  y  $X'_q$  son diferentes una representación rigurosa de la máquina de rotor cilíndrico es más difícil que la de polos salientes, debido a que el vector  $E_{qd}$  no cae en el eje en cuadratura.

Sin embargo, debido a que ha sido mostrado, que siempre para la máquina de polos salientes el efecto de la saliencia en estabilidad transitoria es despreciable esto es  $X'_q$  se supone igual a  $X'_d$  con pequeño error aparece entonces perfectamente razonable hacer la misma suposición para una máquina de rotor cilíndrico en la cual la diferencia entre  $X'_d$  y  $X'_q$  es más pequeña.

3.- Esta suposición permite el efecto de la acción del regulador de voltaje en el debanado de campo en eje directo, mientras que el circuito en eje en cuadratura se supone ausente.

El procedimiento de cálculo es igual que el descrito e ilustrado para la máquina de polos salientes. Es decir se utiliza.

$$\frac{d E'q}{dt} = \frac{1}{t'do} [E_{ex} - E_q] \quad 5.19$$

4.- Esta suposición da el método mas exacto y el menos simple de calcular; ya que se consideran los cambios en los eslabonamientos de flujo en ambos ejes debido al decremento y acción del regulador de voltaje. El procedimiento se explica a continuación.

#### CALCULO DEL CAMBIO DE LOS ESLABONAMIENTOS DE FLUJO EN UNA MAQUINA DE ROTOR CILINDRICO

Si por cualquier razón, no es bastante aproximado suponer que los eslabonamientos de flujo de los circuitos del rotor principal son constantes, entonces los cambios de estos pueden ser calculados en una manera similar a lo previamente dicho para la máquina de polos salientes.

Lo unico diferente es que un calculo por separado se hace para cada eje. Asi de la ec. 5.16 la razón de cambio de los eslabonamientos de flujo en eje directo:

$$\frac{d E'q}{dt} = \frac{E_{ex} - E_q}{t'do} \quad 5.20$$

La ecuación correspondiente al eje en cuadratura es

$$\frac{d E'd}{dt} = \frac{-E_d}{t'qo} \quad 5.21$$

Donde el voltaje de la excitatriz se ha puesto igual a cero por no haber un eje en cuadratura.

De lo anterior hemos visto que se menciona al regulador de voltaje, unicamente esto se debe a que un estudio completo respecto a dicho elemento requiere mas dedicación, pero debemos mencionar que para estudios de estabilidad dinámica es importante su representación al igual que la excitatriz y reguladores de velocidad. De esto según referencia [6] los modelos de máquinas para estudios de esta bilidad se pueden extender, siendo estos unicamente una variante de los modelos anteriormente mencionados. Además se pueden tener una multiplicidad de dichos modelos si es que se considera la saturación en las máquinas o sea de acuerdo a la referencia [6] se han hecho estudios con los diferentes modelos de máquinas, pero se vió que todos estos estudios requieren de una gran cantidad de tiempo de computadora y se complica el análisis por la gran cantidad de ecuaciones por representar en un programa de computadora, como se menciono anteriormente.

Ya que el regulador de voltaje y excitatriz son importantes, dentro del análisis dinámico se hará una breve descripción de dichos elementos en cuanto se refiere a su modelo matemático de acuerdo con la ref [7]

#### 5.5. REGULADORES DE VOLTAJE.

Hay varios requerimientos para un buen regulador de voltaje los cuales debe cumplir y son:

- 1).- Regulación de voltaje.
- 2).- Una buena respuesta a circuito abierto.
- 3).- Deberá preservar la estabilidad en estado permanente y transitorio.

Este último inciso esta directamente relacionado con las excitatrices ya que el regulador automático de voltaje opera directamente sobre la excitatriz y esta sobre el campo de la máquina donde -

intervienen factores como la saturación y las variaciones eventuales en las constantes de tiempo.

Aquí se presentará como ya se mencionó un breve análisis de estos dispositivos.

#### MODELOS DE EXCITATRICES.

Existen diferentes modelos de excitatrices para la operación de las máquinas sincronas, estas se pueden clasificar en tres grupos:

- a).- Excitatrices rotatorias de corriente directa.
  - b).- Excitatrices rotatorias de corriente alterna, con rectificadores.
  - c).- Excitatrices estáticas ( rectificadores de fase controlada).
- a).- Excitatrices de C.D.

Este tipo es el mas generalizado particularmente en las máquinas sincronas de gran potencia.

Un diagrama esquemático de una excitatriz rotatoria ó del sistema de regulación actuando sobre el gobernador se da a continuación:

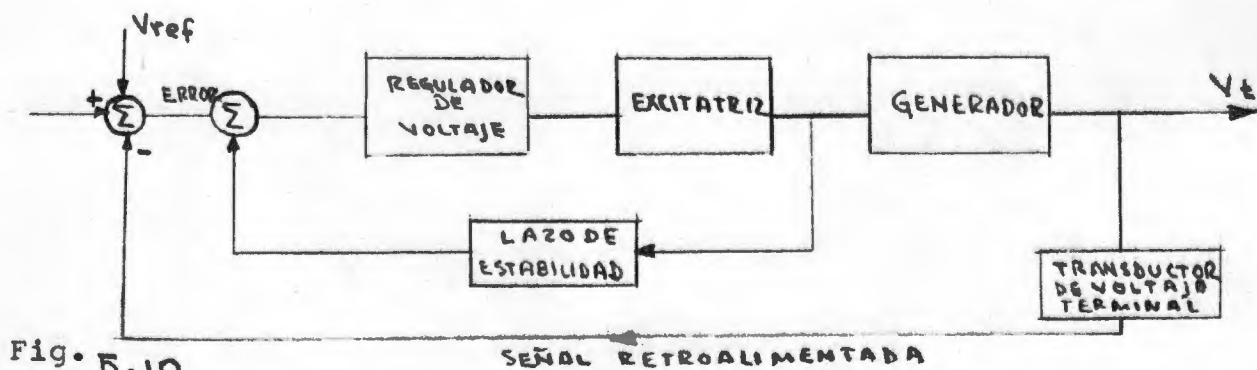


Fig. 5.10

De los diferentes tipos de conexiones para las máquinas de C.D. cada uno tiene un comportamiento apropiado a la aplicación que se le da a la máquina; en el caso de las excitatrices rotatorias se requiere que el voltaje en el devanado de campo no tenga practicamente ningun efecto de otros devanados, ó partes del sistema de regula -

ción. Por esta razón una conexión generalizada en las excitatrices rotatorias de C.D. es de excitación separada.

Un diagrama esquemático para una excitatriz rotatoria de C.D. se muestra en la Fig. 5.11

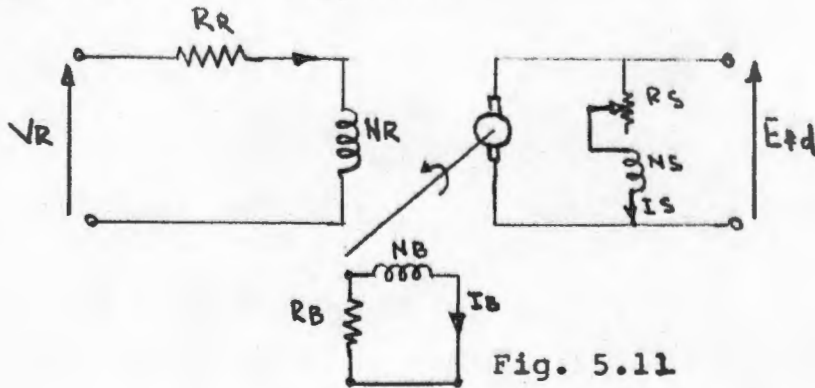


Fig. 5.11

Antes de escribir las ecuaciones para esta máquina es conveniente considerar el efecto de la saturación en la excitatriz. En la fig 5.12 se muestran las curvas de saturación de una excitatriz. Una corresponde a la operación en vacío y la otra considera el efecto de una carga resistiva constante. Los datos de saturación de excitatrices para estudios de estabilidad están basados en la curva de carga, entonces estos modelos matemáticos que usan estos datos toman en consideración para la reacción de armadura, la caída de voltaje, la caída de voltaje en las escobillas, así como la saturación magnética.

La saturación se define como la distancia a la curva de carga, menos las distancias a la línea de entrehierro, dividida por la distancia a la línea del entrehierro y por esto es una función adimensional.

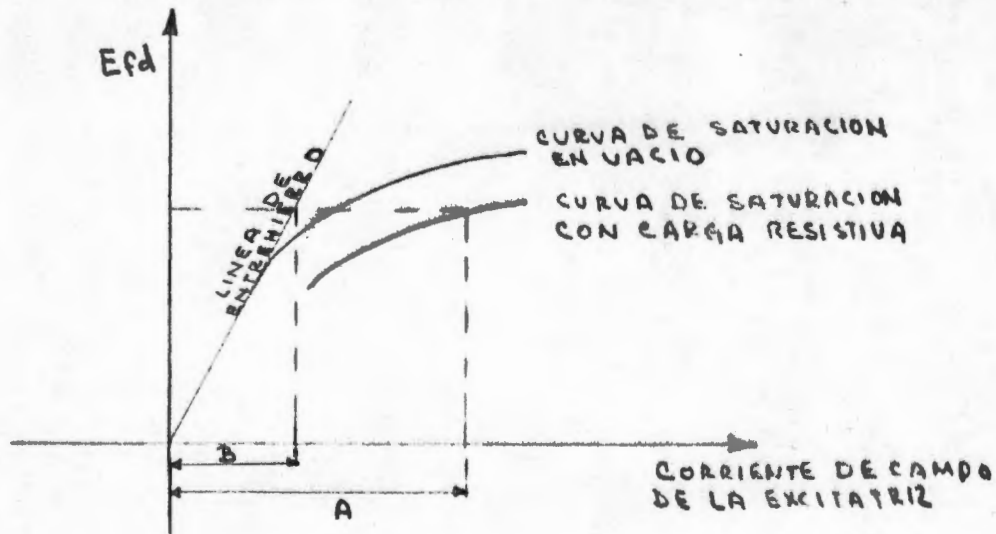


Fig. 5.12

Si SE es la característica de Saturación de la excitatriz.

$$SE = f(E_{fd}) = \frac{A-B}{B} \quad 5.22$$

Los calculos de saturación estan dados por una función analítica cuyos parametros estan seleccionados para representar un modelo específico de excitatriz. Hay varias posibles formas de función, una de ellas, la mas común es:

$$SE = C_1 (E_{fd})^{C_2} \quad 5.23$$

$C_1$  y  $C_2$  - son constantes para un modelo específico  
 $E_{fd}$  - voltaje de la excitatriz.

Ahora las ecuaciones para la excitatriz rotatoria de C.D. son las siguientes:

$$V_R = R I_R + N \frac{d\phi}{dt} \quad 5.24$$

$$E_{fd} = R_s I_s + N_s \frac{d\phi}{dt} \quad 5.25$$

$$0 = R_B I_B + N_B \frac{d\phi}{dt} \quad 5.26$$

Por otro lado  $E_{fd}$  es proporcional al flujo  $\phi$

$$E_{fd} = K\phi \quad \text{5.27}$$

Donde  $\phi$  esta expresado en función de las amper vueltas totales

$$\phi = \frac{N_R I_R + N_B I_B + N_S I_S}{R (1 + SE)} \quad \text{5.28}$$

$\phi$  = flujo total.

$R$  = Reluctancia del circuito magnético

$SE$  = Coeficiente de Saturación.

$K$  - Cte. de proporcionalidad entre el flujo y el voltaje.

Haciendo algunos desarrollos matemáticos finalmente se llega a la siguiente expresión:

$$V_R = (K_E + SE) E_{fd} + T_E p E_{fd} \quad \text{5.29}$$

Las constantes de tiempo  $T_E$  y las constantes  $K_E$  y  $SE$  son del sistema físico real. La ecuación 5.29 se representa por un diagrama de bloque

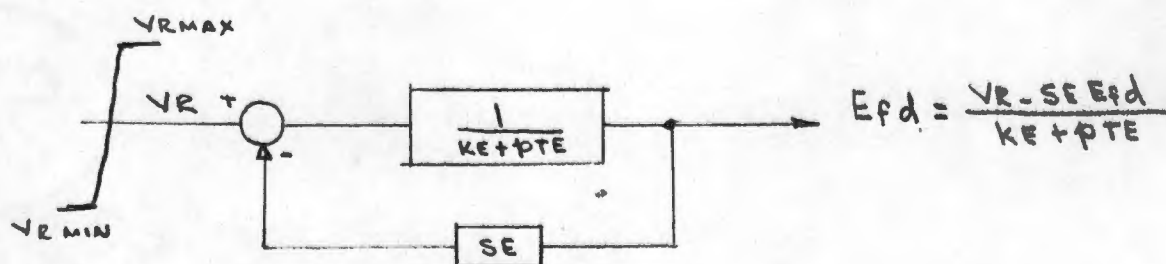


Fig. 5.13

El modelo de excitatriz sin auto excitación puede escribirse directamente de la ec.

$$V_R = (1 + SE) E_{fd} + T_E p E_{fd} \quad \text{5.30}$$

El regulador de voltaje en este caso debería ser mas potente que cuando no se tiene auto excitación

MODELO MATEMATICO PARA EXCITATRICES ROTATORIAS DE C A .

En la siguiente figura 5.14 se muestra un diagrama simplificado de este tipo de excitatrices; las cuales suministran la corriente de campo, a través de diodos, lo cual es muy común.

La representación matemática de estas excitatrices, se puede suponer como la misma para excitatrices de C.D. sin auto excitación - y no se requiere de un análisis muy detallado aquí.

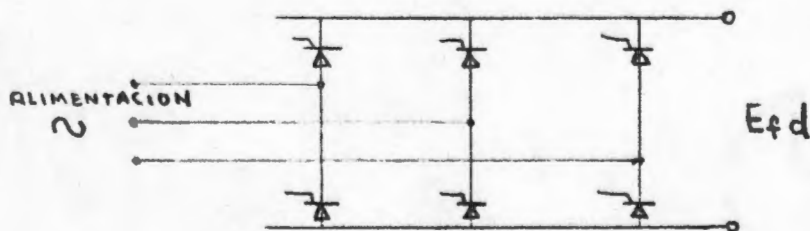


Fig. 5.14

En las figs. 5.15 y 5.16 se muestran los diagramas de bloque para este tipo de excitatrices.

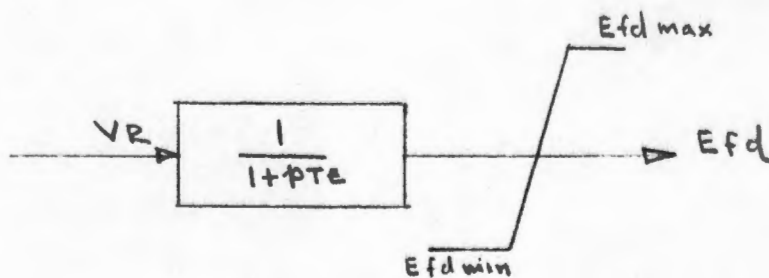


Fig. 5.15 Excitatriz estática alimentada por una fuente de voltaje fija.

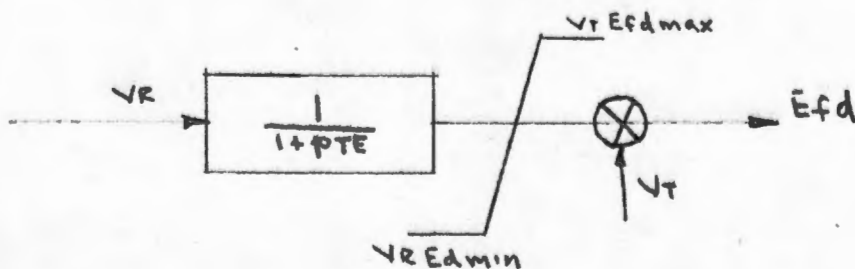


Fig. 5.16 Excitatriz estática accionada por su propio generador.



Hablando en terminos generales desde el punto de vista de estabilidad, una excitatriz de alta respuesta inicial puede tener una alta influencia en la primera oscilación

### REGULADORES DE VOLTAJE.

Como en el caso de las excitatrices los modernos reguladores de voltaje se fabrican con una gran variedad de equipo, incluyendo amplificadores magnéticos, máquinas rotatorias, rectificadores-controlados. Además los reguladores de voltaje deben desempeñar otras funciones relacionadas con el control de la excitación, por ejemplo límites de mínima excitación y limitaciones de máxima relación volt / Hertz. para fines de análisis de estabilidad en los sistemas de potencia, cada uno de estos equipos se representa por un amplificador lineal con una ganancia adecuada o desde el punto de vista de sistema de regulación el regulador de voltaje esta representado en cascada con la excitatriz, de manera que mientras mas simple sea su representación del regulador mas manipulable es el modelo matemático del sistema.

En la Fig. 5.17 se muestra un diagrama de bloque para la representación de un regulador de voltaje elemental:

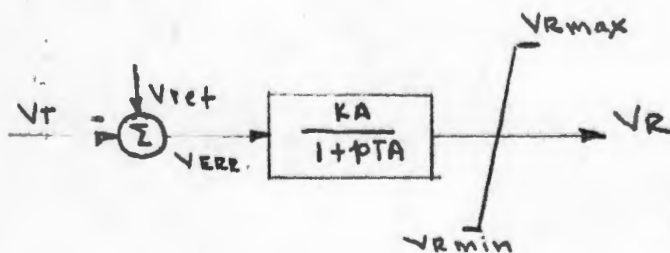


Fig. 5.17 Regulador de acción continua.

$V_{ERR} =$  Voltaje de error.

$V_{ERR} = V_{REF} - V_T$

5.31

$V_{ERR} = \frac{K_A V_R}{1 + pTA}$

5.32

$V_T =$  voltaje terminal  
 $K_A =$  ganancia del regulador  
 $T_A =$  cte. de tiempo del regulador

$V_{RMIN}$  y  $V_{RMAX}$ , son los límites min y max del regulador.

En el caso de estabilidad dinámica en sistemas multimáquinas, el regulador se puede representar por una simple constante  $K_A$ , y para este caso el sistema de excitación sin lazo de estabilización tiene la forma siguiente: según referencia [23].

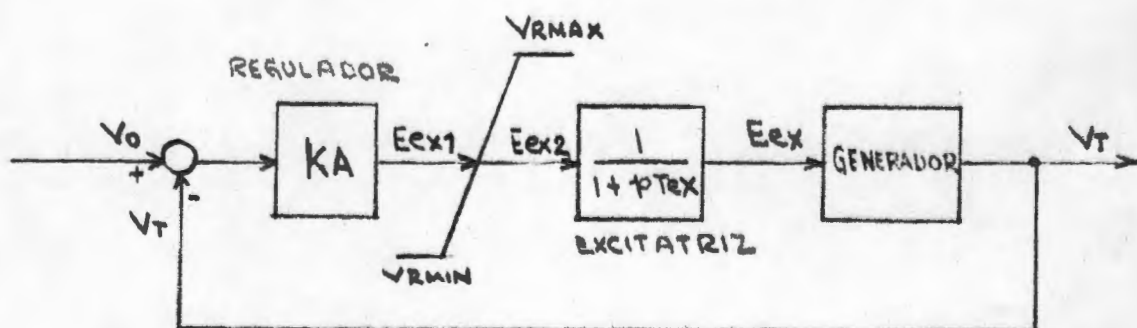


FIG. 5.18 DIAGRAMA DE BLOQUE DEL SISTEMA DE EXCITACION

Este sistema de excitación fue el utilizado en este trabajo, debido a que su representación en lo que se refiere a modelo matemático es mas simple.

Las siguientes ecuaciones son utilizadas para representar dicho sistema:

$$E_{ex1} = E_{ex0} - K_A (V_T - V_0) \quad 5.33$$

donde:

$$E_{eX0} = E_{Io} \quad 5.34$$

$V_0$  = voltaje terminal inicial

$E_{Io}$  = voltaje de excitación inicial

$K_A$  = ganancia del regulador

Las variables intermedias son:

$$E_{eX2} = E_{eX1} \quad \text{cuando} \quad VR_{MIN} < E_{eX1} < VR_{MAX} \quad 5.35$$

$$E_{eX2} = VR_{MAX} \quad \text{cuando} \quad E_{eX1} > VR_{MAX} \quad 5.36$$

$$E_{eX2} = VR_{MIN} \quad \text{cuando} \quad E_{eX1} < VR_{MIN} \quad 5.37$$

Y por último la ecuación que se utilizará para incluir el efecto de la variación de los eslabonamientos de flujo es:

$$\frac{dE_{eX}}{dt} = \frac{1}{T_{ex}} (E_{eX2} - E_{eX}) \quad 5.38$$

## 5.6 Regulador de velocidad.-

El gobernador de velocidad es difícil de simular en los estudios de estabilidad dinámica, en sistemas multimáquinas.

Los efectos del gobernador de velocidad durante un transitorio se pueden tomar en cuenta utilizando una representación simplificada del sistema de control del gobernador. Esta representación incluye una función de transferencia describiendo el sistema de alimentación a la turbina con una constante de tiempo  $T_S$  y una función de transferencia describiendo el sistema de control con una constante de tiempo  $T_C$ . El modelo utilizado fue tomado de

referencias[23] , las ecuaciones relacionando la salida y entrada de la función de transferencia así como el diagrama de bloque de la misma se dan a continuación:

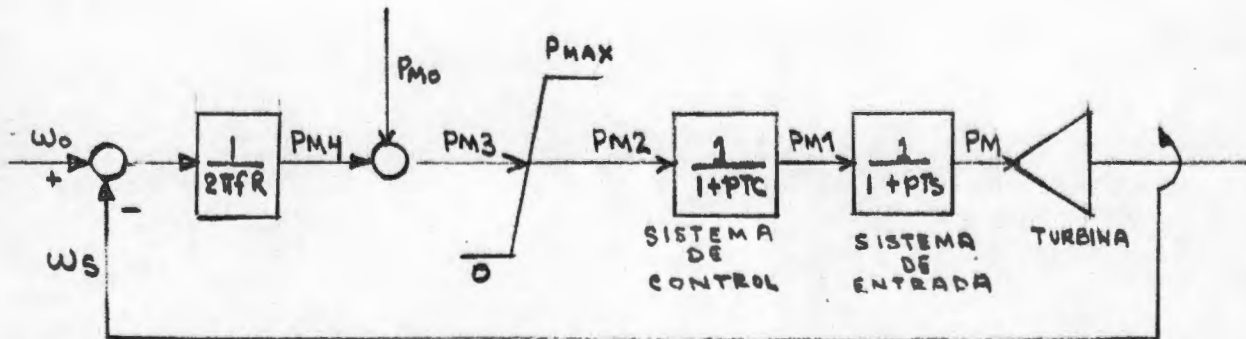


FIG. 5.19 DIAGRAMA DE BLOQUE DEL GOBERNADOR

$$PM_4 = \left( \frac{1}{2\pi f} (W_o - W_s) - DBT \right) \frac{1}{R} \quad 5.39$$

$$PM_3 = P_{m0} - PM_4 \quad 5.40$$

$P_{m0}$  = potencia mecánica inicial

$f$  = frecuencia base c.p.s.

$DBT$  = banda muerta

$R$  = velocidad de regulación.

Las variables intermedias son:

$$PM_2 = PM_3 \quad \text{cuando} \quad 0 < PM_3 < P_{MAX}$$

$$PM_2 = 0 \quad \text{cuando} \quad PM_3 < 0$$

$$PM_2 = P_{MAX} \quad \text{cuando} \quad PM_3 > P_{MAX}$$

$$\frac{dPM_1}{dt} = \frac{1}{TC} (PM_2 - PM_1) \quad 5.41$$

$$\frac{dPM}{dt} = \frac{1}{TS} (PM_1 - PM) \quad 5.42$$

5.7 Representación del sistema dinámico de ecuaciones, en forma de variables de estado.

Es conveniente escribir la ecuación de oscilación de segundo orden 3.39 en una forma diferente que la usual para facilitar su manejo en la computadora digital.

Para esto se utiliza lo que se conoce variables de estado. En el caso donde se considera la representación mas simple de la máquina, y además no se considera acción del sistema de excitación y del sistema de regulación de velocidad, se presentan las variables de estado  $X_1$  y  $X_2$  definidas como:

$$\begin{aligned} X_1 &= \delta \quad \text{posición angular del rotor} \\ X_2 &= \frac{d\delta}{dt} \quad \text{velocidad angular del rotor} \end{aligned}$$

En términos de variables de estado la ecuación de segundo orden se puede escribir como dos ecuaciones diferenciales de primer orden:

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= X_2 \\ \dot{X}_2 &= \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e) \end{aligned} \quad 5.43$$

" o " es utilizado en vez de  $\frac{d}{dt}$

Para el caso de estabilidad dinámica se tiene también que representar las ecuaciones 5.16 , 5.38, 5.41 y 5.42 en forma de variables de estado.

Así tenemos que para el gobernador de velocidad, sus ecuaciones en forma de variable de estado serían:

De las ecuaciones 5.41 y 5.42

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{TC} \left( P_{m0} - \left( \frac{1}{2\pi f} x_2 - DBT \right) \frac{1}{R} - x_3 \right) \quad 5.44$$

$$\dot{x}_4 = \frac{1}{TS} (x_3 - x_4) \quad 5.45$$

Al igual para el sistema de excitación se tiene de ecuación 5.38

$$\dot{x}_5 = \frac{1}{T_{ex}} (E_{ex2} - x_5) \quad 5.46$$

Y por último, si se considera la saliencia de las máquinas, se deberá incluir la ecuación 5.16 que nos da el voltaje debido a las variaciones de los enlaces de flujo de la excitatriz, o sea que se tiene:

$$\dot{x}_6 = \frac{1}{T_{d0}} (x_5 - E_q) \quad 5.47$$

En resumen, podemos concluir que los efectos de saliencia, acción del sistema de excitación y gobernador de velocidad, para estudios de estabilidad dinámica, se podrán incluir en una forma mas sistematizada haciendo uso de las variables de estado, y así se podrá representar a cada generador en este caso particular de estudio por las seis ecuaciones de estado descritas, 5.43 a 5.47 :

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = \frac{\pi f}{H} (x_5 - P_e)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{T_C} \left( P_{m0} - \left( \frac{1}{2\pi f} x_2 - DBT \right) \frac{1}{R} - x_3 \right)$$

5.48

$$\dot{x}_4 = \frac{1}{T_S} (x_3 - x_4)$$

$$\dot{x}_5 = \frac{1}{T_{ex}} (E_{ex2} - x_5)$$

$$\dot{x}_6 = \frac{1}{T_{d0}} (x_5 - E_q)$$

Las ecuaciones 5.48 fueron utilizadas en particular en el programa de computadora para el estudio de estabilidad dinámica.

### 5.8 Resultados obtenidos en el estudio de estabilidad dinámica.

Los resultados obtenidos en éste caso se analizarán a partir de las gráficas obtenidas del ángulo de carga contra tiempo. básicamente el procedimiento analítico del problema es similar al caso de estabilidad transitoria por el método de nodos retenidos, unicamente que en éste caso se considero una representación de máquina con saliencia así como la acción del sistema de excitación y el regulador de velocidad. Este tipo de representación implicó mas tiempo de computadora así como una mayor complicación para relacionar las ecuaciones diferenciales por resolver, ya que para este caso particular se resolvieron simultáneamente seis ecuaciones y no dos como en el caso de estabilidad transitoria.

En general el procedimiento que se siguió para analizar el problema fue partiendo de la representación mas simple de las máquinas con saliencia o sea primero se simularon las máquinas como una fuente constante de voltaje  $E_{qd}$  detras de la reactancia en

eje en cuadratura  $X_q$ , utilizando ecuación 5.8 y se considero que las variaciones de los enlaces de flujo eran constantes o en otras palabras  $E'_q$  permaneció constante, ver referencia [4] y así se obtuvieron las curvas mostradas en las figuras 5.20 a 5.22 que fueron las curvas obtenidas para tiempos de liberación de la falla de -- 0.1 seg. a 0.3 seg. Después de haber hecho éste análisis se procedió a considerar la variación de  $E'_q$  para lo cual ya se incluyó una tercera ecuación 5.16 pero sin tratar las variaciones del voltaje de excitación debido a la acción de la excitatriz es decir en esa ecuación únicamente se mantuvo constante  $E_{ex}$ , dejando únicamente que variara el voltaje proporcional a la corriente de campo  $E_q$ .

Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 5.23 a 5.25 también para tiempos de liberación de 0.1 a 0.3 seg. Así con el programa obtenido, se procedió a incluir el efecto del sistema de excitación, es decir ahora en la ecuación 5.16 ya se consideró el efecto de la variación del voltaje de excitación debido a la acción de la excitatriz ver figuras 5.26 para tiempos de liberación 0.1 seg. en este caso se vera que debido a la necesidad de hacer un estudio de estabilidad dinámica, el tiempo máximo de estudio a considerar fue 2 seg. y no 1 seg. como en los dos casos anteriores, así se podrá notar el efecto del regulador de voltaje pues en los dos primeros casos el sistema parece permanecer estable para todos los tiempos de liberación de la falla estudiados, pero en este caso donde se consideró la acción del sistema de excitación se puede ver claramente que para el caso de 0.1 seg. el sistema permanece estable, aunque el ángulo delta crece progresivamente para todas las máquinas. teniendo en cuenta que en este caso se tuvo



ron cuatro ecuaciones por integrar o sea se incluyó la ecuación -  
5.38

Por último se incluyó el efecto del gobernador de velocidad utilizando las ecuaciones 5.41 y 5.42 aumentando nuestro sistema de ecuaciones a seis, para este caso se analizaron los tiempos de liberación de 0.1 a 0.3 seg. y con un tiempo de estudio -- para estabilidad dinámica de 2 seg, ver figuras 5.27 , 5.29 en donde se puede ver claramente el efecto del gobernador de velocidad, que tiende en este caso a mantener al sistema en estabilidad en una forma aceptable para los tiempos de liberación igual a -- 0.1 seg. y 0.2 seg, tendiendo a inestabilidad en 0.3 seg. Para -- llevar a cabo este estudio se cambiaron los datos de reactancias de las máquinas para considerar el efecto de saliencia de acuerdo a la referencia[4], así como los datos de los parametros del sistema de excitación y gobernador de velocidad fueron tomados de referencias [1] , [7] , y [23] .

Los datos utilizados para este estudio se puede considerar que son los mismos utilizados para estabilidad transitoria -- unicamente que aquí como ya se menciona se cambiaron los datos -- de reactancias de las máquinas.

se debe hacer notar que para este estudio unicamente -- se consideró la representación de las cargas como Impedancia Cons tante.

LINEA	SERZQ	SHY
1	0.05 j0.20	0.0 j0.0
2	0.10 j0.50	0.0 j0.0
3	0.20 j0.80	0.0 j0.0
4	0.10 j0.30	0.0 j0.0
5	0.20 j0.40	0.0 j0.0
6	0.10 j0.15	0.0 j0.0
7	0.20 j0.50	0.0 j0.0
8	0.00 j0.60	0.0 j0.0
9	0.00 j0.50	0.0 j0.0
10	0.00 j0.60	0.0 j0.0
11	0.00 j0.90	0.0 j0.0
12	0.00 j0.00	0.0 j0.0
13	0.00 j0.00	0.0 j0.0
14	0.00 j0.00	0.0 j0.0

El orden de líneas y buses estan en base a la figura 3.11 para el modelo utilizado.

#### DATOS DE GENERADORES.

MAQUINA	POT NOMINAL	$x_d$	$x_d'$	$X_q$	H
1	1.00	0.90	0.30	0.60	4.5
2	0.30	0.75	0.250	0.50	4.0
3	0.40	0.90	0.30	0.60	4.5
4	0.15	1.35	0.450	0.90	4.0

Los datos del sistema de excitación, como los del gobernador se consideraron iguales para las cuatro máquinas.

Sistema de excitación.

$Td' = 5.0$  seg.

$Tex = 0.5$  seg.

$K_A = 25$

$VRMIN = -1.0$

$VRMAX = 1.0$

Gobernador de velocidad.

$T_s = 0.3$  seg.

$T_c = 0.35$  seg.

$DBT = 0.0006$

$R = -0.04$

$PMAX$  se tomo de los datos nominales de cada máquina.

DATOS INICIALES (Flujos de carga)

Bus	PG	QG	PL	QL	V	
1	0.332	0.091	0.00	0.00	1.00000	j0.00000
2	0.200	0.100	0.00	0.00	1.02469	j0.02522
3	0.300	0.200	0.00	0.00	1.08048	j0.08731
4	0.100	0.050	0.20	0.10	1.00200	j0.00210
5	0.000	0.000	0.40	0.15	0.95486	j0.04670
6	0.000	0.000	0.30	0.10	0.95223	j0.03825

```

COMPLEX SERZ, SHY, DX, VN, V, VI, SUM, TL, CUR
COMPLFY SHYO, SERZO
COMPLEX SERZO, AMP, EQ, EQN
INTEGER SB, EB, TLINE
COMMON TLINE(20), SB(20), EB(20), SERZ(20), V(20), PG(20), QG(20), P(20)
COMMON Q(20), Y(20,20), VN(20), SERZ(20), SHY(20), YL(20,20), UR(20,20)
COMMON PGF(20), WS(20), DS(20), DD1(20), DD2(20), DD3(20), DD4(20)
COMMON DW1(20), DW2(20), DW3(20), DW4(20), F(20), DELT(20), DEITAF(20)

```

```

COMMON DDS(20), DWS(20), H(20), NL, TMAX, VM(20), VR(20), M, AMAGV(20), NR
COMMON AM, PAI, PM(20), QM(20), QGF(20), SHYO(20), SERZO(20), AMAGF(20)
COMMON DELTA(20), DS(20), E(20)
COMMON DELTA1(103), DELTA2(103), DELTA3(103), DELTA4(103), TIME(103)
COMMON SERZO(20), AMP(20), AMPD(20), EQ(20), EQ1(20), EQN(20)
COMMON EQR(20), EQI(20), EQM(20), TETA(20)
COMMON EI(20), EEX(20), TDO1(20), DEQ1(20), DEQ2(20), DEQ3(20), DEQ4(20)
COMMON DEQ(20)
COMMON EEXMIN(20), EEXMAX(20), VO(20), KA(20), EEX1(20), EEX2(20)
COMMON DEX1(20), DEX2(20), DEX3(20), DEX4(20), DEX(20), TEX(20)
COMMON PM0(20), W0(20), PM1(20), PM2(20), PM3(20), PM4(20)
COMMON DBT(20), R(20), PMAX(20), TC(20), TS(20)
COMMON DPM11(20), DPM12(20), DPM13(20), DPM14(20), DPPM1(20)
COMMON DPM1(20), DPM2(20), DPM3(20), DPM4(20), DPM(20)

```

```

READ(5,1000)NB,NL,ACC

```

```

1000 FORMAT(2I5,F5.1)

```

```

WRITE(4,1010)NB,NL,ACC

```

```

1010 FORMAT(1X,'NB=',I5,1X,'NL=',I5,1X,'ACC=',F5.1)

```

```

READ(5,1160)DT,TMAX,FS,PAI

```

```

1160 FORMAT(F5.3,3X,F5.3,3X,F5.2,3X,F10.5)

```

```

WRITE(4,1170)DT,TMAX,FS,PAI

```

```

1170 FORMAT(//6X,'DT=',F5.3,3X,'TMAX=',F5.3,3X,'FS=',F5.2,3X,'PAI=',F10.5)

```

```

DO 25 I=1,NL

```

```

25 READ(5,1040)TLINE(I),SB(I),EB(I),SERZ(I),SHY(I),SERZO(I)

```

```

1040 FORMAT(3I5,6F10.4)

```

```

DO 5 I=1,6

```

```

READ(5,1020)PG(I),QG(I),P(I),Q(I),E(I),H(I),DELTA(I)

```

```

1020 FORMAT(4F12.4,2X,3F10.5)

```

```

VR(I)=F(I)*COS(DELTA(I)*PAI/180.0)

```

```

VM(I)=F(I)*SIN(DELTA(I)*PAI/180.0)

```

```

V(I)=CMPLX(VR(I),VM(I))

```

```

WRITE(4,1030)I,PG(I),QG(I),P(I),Q(I),V(I),H(I)

```

```

1030 FORMAT(1X,'I=',I4,1X,'PG=',F8.4,1X,'QG=',F8.4,1X,'P=',F8.4,1X,'Q=',F8.4,1X,'V=',2F10.5,1X,'H=',F10.5)

```

```

J=I+8

```

```

IF(I.GT.3)SERZ(J)=(ABS(V(I))**2)/CMPLX(P(I),-Q(I))

```

```

IF(I.GT.3)SERZO(J)=SERZ(J)

```

```

5 CONTINUE

```

```

DO 6000 I=1,4

```

```

READ(5,6001)SERZO(I),TDO1(I),EEXMIN(I),EEXMAX(I),TEX(I),KA(I)

```

```

6001 FORMAT(6F10.5,I5)

```

```

WRITE(4,6002)SERZO(I),TDO1(I),EEXMIN(I),EEXMAX(I),TEX(I),KA(I)

```

```

6002 FORMAT(//2X,'XD=',2F8.5,2X,'TDO1=',F8.5,2X,'EEXMIN=',F8.5,2X,'EEXMAX=',F8.5,2X,'TEX=',F8.5,2X,'KA=',I5/)

```

```

6000 CONTINUE

```

```

DO 7000 I=1,4

```

```

READ(5,7002)PMAX(I),TS(I),TC(I),DBT(I),R(I)

```

```

7002 FORMAT(5F8.5)

```

```

WRITE(4,7003)PMAX(I),TS(I),TC(I),DBT(I),R(I)

```

```

7003 FORMAT(//2X,'PMAX=',F8.5,2X,'TS=',F8.5,2X,'TC=',F8.5,2X,'DBT=',F8.5,2X,'R=',F8.5,2X)

```

```

M2=0
M3=0
M4=0
SALLEN=1.0
407 DO 16I=1,NB
DO 15J=1,NB

```

```

15 Y(I,J)=CMPLX(0.0,0.0)
- DUPLICATE ARGUMENT IN STANDARD FUNCTION
- IS CONSTANT ARGUMENTS FOR = CMPLX CORRECT
16 CONTINUE
DO 250I=1,NL
IF(SALLEN.GT.0.0)GOTO2009
SERY(I)=1.0/SERZ(I)
IF(SALLEN.LE.0.0)GOTO2010
2009 SERY(I)=1.0/SERZQ(I)
2010 CONTINUE
IF(I.EQ.3.AND.AM.GE.PAI)SERY(I)=CMPLX(0.0,0.0)

```

```

C FORMACION DE LA MATRIZ DE ADMITANCIA DE BUS
- DUPLICATE ARGUMENT IN STANDARD FUNCTION
- IS CONSTANT ARGUMENTS FOR = CMPLX CORRECT
L=SB(I)
M=EB(I)
Y(L,L)=Y(L,L)+SERY(I)+SHY(I)
Y(M,M)=Y(M,M)+SERY(I)+SHY(I)
Y(L,M)=Y(L,M)-SERY(I)
Y(M,L)=Y(M,L)-SERY(I)

```

```

C ESCRITURA DE DATOS Y MATRIZ DE ADMITANCIA DE RIJS
C DURANTE LA FALLA
IF(SALLEN.LE.0.0)GOTO2011
WRITE(6,1050)TLINE(I),SB(I),EB(I),SERZQ(I),SERY(I),SHY(I)
IF(SALLEN.GT.0.0)GOTO250
2011 WRITE(6,1050)TLINE(I),SB(I),EB(I),SERZ(I),SERY(I),SHY(I)
250 CONTINUE

```

```

1050 FORMAT(6X,3I5,5X,2F10.5,5X,2F10.5,5X,2F10.3)
WRITE(6,1060)
1060 FORMAT(////40X,'MATRIZ YBUSI'//)
DO 35I=1,NB
35 WRITE(6,1070)(Y(I,J),J=1,NB)
1070 FORMAT(2X,11(F5.1,1X,F5.1,1X)/)
IF(AM.GE.PAI)M=6
DO 55I=1,NB
DO 45J=1,NB
IF(I.NE.J)YL(I,J)=Y(I,J)/Y(I,I)
45 CONTINUE
55 CONTINUE

```

```

C CALCULO DE LOS VOLTAJES INTERNOS DE LAS MAQUINAS
WRITE(6,4500)
4500 FORMAT(12X,'VOLTAJES INTERNOS'//)
4501 DO 300I=7,10
IF(AM.GE.PAI)GOTO300
K=I-6
J=I+1

```

```

PM(I)=DC(K)
PM0(I)=PM(I)
PM1(I)=PM0(I)
WS(K)=2.0*PAI*FS
WD(K)=WS(K)
IF(SALLEN.GT.0.0)GOTO2006

```

```

WRITE(4,4000)V(I)
4000 FORMAT(5X,F8.4,10X,F8.4/)
IF(SALLEN.LE.0.0)GOTO2008
2006 AMP(K)=CMPLX(PG(K),-QG(K))/CONJG(V(K))
TETA(K)=ATAN2(AIMAG(AMP(K)),REAL(AMP(K)))
EQ(I)=V(K)+SERZQ(J)*AMP(K)
V(I)=EQ(I)
DELTA(I)=ATAN2(AIMAG(EQ(I)),REAL(EQ(I)))

```

```

DELT(K)=DELTA(I)
AMPD(K)=CABS(AMP(K))*SIN(ABS(TETA(K))+DELTA(I))
EQ1(I)=CABS(EQ(I))-CABS(SERZQ(J)-SERZ(J))*AMPD(K)
EI(I)=EQ1(I)+CABS(SERZO(K)-SERZ(J))*AMPD(K)
EEX(I)=EI(I)
VO(K)=V(K)

```

```

WRITE(4,2007)V(I),EQ1(I),EI(I)
2007 FORMAT(5X,'EQ=' ,2F8.5,2X,'EQ1=' ,F8.5,2X,'EI=' ,F8.5)

```

```

2008 CONTINUE

```

```

300 CONTINUE

```

```

IF(AM.GE.PAI)GOTO600
M=2

```

```

IF(SALLEN.LE.0.0)GOTO2003

```

```

600 NSAL=0

```

```

2004 DVMAXS=0.0

```

```

DO 2002 I=7,10

```

```

K=I-6

```

```

J=I+1

```

```

EQN(I)=V(I)

```

```

PM4(I)=((W0(K)-WS(K))/(2.0*PAI*FS)+DBT(K))/R(K)

```

```

PM3(I)=PM0(I)-PM4(I)

```

```

IF(PM3(I).GT.0.0.AND.PM3(I).LT.PMAX(K))PM2(I)=PM3(I)

```

```

IF(PM3(I).GT.PMAX(K))PM2(I)=PMAX(K)

```

```

IF(PM3(I).LT.0.0)PM2(I)=0.0

```

```

AMP(I)=(EQ(I)-V(K))*(-Y(I,K))

```

```

TETA(I)=ATAN2(AIMAG(AMP(I)),REAL(AMP(I)))

```

```

AMPD(I)=CABS(AMP(I))*SIN(ABS(TETA(I))+DELT(K))

```

```

EEX1(I)=EEX(I)-KA(K)*(CABS(V(K))-VO(K))

```

- CHANGE OF TYPE IN STATEMENT - DOMINANT TYPE USED

```

IF(EEX1(I).GT.EEXMIN(K).AND.EEX1(I).LT.EEXMAX(K))EEX2(I)=EEX1(I)

```

```

IF(EEX1(I).GT.EEXMAX(K))EEX2(I)=EEXMAX(K)

```

```

IF(EEX1(I).LT.EEXMIN(K))EEX2(I)=EEXMIN(K)

```

```

EI(I)=EQ1(I)+CABS(SERZO(K)-SERZ(J))*AMPD(I)

```

```

EQM(I)=EQ1(I)+CABS(SERZQ(J)-SERZ(J))*AMPD(I)

```

```

FOR(I)=EQM(I)*COS(DELT(K))

```

```

FOI(I)=EQM(I)*SIN(DELT(K))

```

```

FQ(I)=CMPLX(FOR(I),FOI(I))

```

```

DELVS=CABS(EQ(I)-EQN(I))

```

```

IF(DELVS.GT.DVMAXS)DVMAXS=DELVS

```

```

2002 V(I)=EQ(I)

```

```

NSAL=NSAL+1

```

```

IF(DVMAXS.LE.1.0E-04)GOTO2003

```

```

IF(NSAL.LT.200)GOTO2004

```

```

WRITE(4,2005)NSAL

```

```

2005 FORMAT(////6X,'NO CONVERGE',I4)

```

```

GOTO1200

```

```

2003 CONTINUE

```

PROCESO ITERATIVO PARA CALCULAR LOS VOLTAJES DE RUS

/ ECUACIONES DEL COMPORTAMIENTO DE LA RED CUANDO SE

PRODUCE LA FALLA. UTILIZANDO GAUSS SEIDEL

N=0

```

IF (I.EQ.3) J=9
IF (I.EQ.4) J=10
WS(I)=2.0*PAI*FS
DS(I)=ATAN2(AIMAG(V(J)),REAL(V(J)))
DSG(I)=DS(I)*57.2957
WRITE(6,4503)DSG(I)
4503 FORMAT(15X,F10.4)
200 CONTINUE

```

```

IP=0
TI=0.0
920 IP=IP+1
DELTA1(IP)=DSG(1)
DELTA2(IP)=DSG(2)
DELTA3(IP)=DSG(3)
DELTA4(IP)=DSG(4)
TIME(TI)=TI
DO 70 I=1,4
IF (I.EQ.1) J=7
IF (I.EQ.2) J=8
IF (I.EQ.3) J=9
IF (I.EQ.4) J=10
DD1(I)=(WS(I)-(2.0*PAI*FS))*DT
PGF(J)=PGF(J)
DPM1(J)=(PM2(J)-PM(J))*DT/TC(I)
PM1(J)=PM1(J)+DPM1(J)/2.0
DPM1(J)=(PM1(J)-PM(J))*DT/TS(I)
PM(J)=PM(J)+DPM1(J)/2.0
DW1(I)=((PAI*FS)*(PM(J)-PGF(I))*DT)/H(I)
WS(I)=WS(I)+DW1(I)/2.0
DELT(I)=DS(I)+(DD1(I)/2.0)
DEX1(I)=(EEX2(J)-EEX(J))*DT/TEX(I)
EEX(J)=EEX(J)+(DEX1(I)/2.0)
DEQ1(I)=(EEX(J)-EI(J))*DT/TD01(I)
EQ1(J)=EQ1(J)+(DEQ1(I)/2.0)
VR(J)=ABS(V(J))*COS(DELT(I))
VM(J)=ABS(V(J))*SIN(DELT(I))
V(J)=CMPLX(VR(J),VM(J))
EQ(J)=V(J)
70 CONTINUE
M4=0
M1=M
GOTO600
700 DO 73 I=1,4
IF (I.EQ.1) J=7
IF (I.EQ.2) J=8
IF (I.EQ.3) J=9
IF (I.EQ.4) J=10
DD2(I)=((WS(I)+(DW1(I)/2.0))-(2.0*PAI*FS))*DT
PGF(I)=PGF(J)
DPM12(J)=(PM2(J)-PM(J))*DT/TC(I)
PM1(J)=PM1(J)+DPM12(J)/2.0
DPM2(J)=(PM1(J)-PM(J))*DT/TS(I)
PM(J)=PM(J)+DPM2(J)/2.0
DW2(I)=((PAI*FS)*(PM(J)-PGF(I))*DT)/H(I)
WS(I)=WS(I)+DW2(I)/2.0
DELT(I)=DS(I)+(DD2(I)/2.0)
DEX2(I)=(EEX2(J)-EEX(J))*DT/TEX(I)
EEX(J)=EEX(J)+(DEX2(I)/2.0)

```

```

IF (K.EQ.3) V(K)=CMPLX(0.0,0.0)
- DUPLICATE ARGUMENT IN STANDARD FUNCTION
- IS CONSTANT ARGUMENTS FOR = CMLX CORRECT
IF (M.EQ.6.AND.AM.GE.PAI) V(3)=CMPLX(1.0,0.0)
- IS CONSTANT ARGUMENTS FOR = CMLX CORRECT
2 CONTINUE
75 DVMAX=0.0

```

```

DO 85 I=1,NB
SUM=CMPLX(0.0,0.0)
- DUPLICATE ARGUMENT IN STANDARD FUNCTION
- IS CONSTANT ARGUMENTS FOR = CMLX CORRECT
VI=V(I)
IF (I.EQ.3.AND.AM.GE.PAI) GOTO 92
IF (I.EQ.3) GOTO 3
IF (I.EQ.7) GOTO 3
IF (I.EQ.8) GOTO 3
IF (I.EQ.9) GOTO 3
IF (I.EQ.10) GOTO 3
IF (I.EQ.11) GOTO 3
92 DO 95 J=1,NB
IF (J.EQ.11) V(J)=CMPLX(0.0,0.0)
- DUPLICATE ARGUMENT IN STANDARD FUNCTION
- IS CONSTANT ARGUMENTS FOR = CMLX CORRECT
95 IF (I.NE.J) SUM=-(Y(I,J)*V(J))+SUM
VN(I)=SUM
GOTO 7
3 VN(I)=V(I)
7 DX=VN(I)-V(I)
VN(I)=VI+ACC*DX
DELV=CABS(VN(I)-VI)
IF (DELV.GT.DVMAX) DVMAX=DELV
85 V(I)=VN(I)
N=N+1
IF (DVMAX.LE.1.0E-04) GOTO 100
IF (N.LT.200) GOTO 75
WRITE (4,1120) N
1120 FORMAT (///6X,'NO CONVERGE EN',I4)
GOTO 1200
100 CONTINUE
DO 201 I=7,10
IF (I.EQ.7) J=1
IF (I.EQ.8) J=2
IF (I.EQ.9) J=3
IF (I.EQ.10) J=4
CUR(I,J)=(V(I)-V(J))*(-Y(I,J))
PGF(I)=REAL(CUR(I,J)*CONJG(V(I)))
QGF(I)=-AIMAG(CUR(I,J)*CONJG(V(I)))
201 CONTINUE
C
C CALCULO DE LOS CAMBIOS EN LOS ANGULOS INTERNOS
DE LAS MAQUINAS POR RUNGE-KUTTA
K=M+1
IF (M.EQ.M1) GOTO 700
IF (M.EQ.M2) GOTO 800
IF (M.EQ.M3) GOTO 900
IF (M.EQ.M4) GOTO 910
IF (M.GT.2) GOTO 920
WRITE (4,4502)
4502 FORMAT (12X,'ANGULOS INICIALES'//)

```



```

VM(J)=CABS(V(J))*SIN(DELT(I))
V(J)=CMPLX(VR(J),VM(J))
EQ(J)=V(J)
73 CONTINUE
M1=0
M2=M
GOTO600
R00 DO 77I=1,4
IF(I.EQ.1)J=7

IF(I.EQ.2)J=8
IF(I.EQ.3)J=9
IF(I.EQ.4)J=10
DD3(I)=(WS(I)+(DW2(I)/2.0)-(2.0*PAI*FS))*DT
PGF(I)=PGF(J)
DPM13(J)=(PM2(J)-PM1(J))*DT/TC(I)
PM1(J)=PM1(J)+DPM13(J)/2.0
DPM3(J)=(PM1(J)-PM(J))*DT/TS(I)
PM(J)=PM(J)+DPM3(J)/2.0
DW3(I)=(PAI*FS)*(PM(J)-PGF(I))*DT/H(I)
WS(I)=WS(I)+DW3(I)/2.0
DELT(I)=DS(I)+(DD3(I)/2.0)
DEX3(I)=(EEX2(J)-EEX(J))*DT/TEX(I)
EEX(J)=EEX(J)+(DEX3(I)/2.0)
DEQ3(I)=(EEX(J)-EI(I))*DT/TD01(I)
EQ1(J)=EQ1(J)+(DEQ3(I)/2.0)
VR(J)=CABS(V(J))*COS(DELT(I))
VM(J)=CABS(V(J))*SIN(DELT(I))
V(J)=CMPLX(VR(J),VM(J))
EQ(J)=V(J)
77 CONTINUE
M2=0
M3=M
GOTO600
900 DO 80I=1,4
IF(I.EQ.1)J=7
IF(I.EQ.2)J=8
IF(I.EQ.3)J=9
IF(I.EQ.4)J=10
DD4(I)=(WS(I)+(DW3(I))-(2.0*PAI*FS))*DT
PGF(I)=PGF(J)
DPM14(J)=(PM2(J)-PM1(J))*DT/TC(I)
DPPM1(J)=(DPM11(J)+(2.0*DPM12(J))+(2.0*DPM13(J))+DPM14(J))/6.0
PM1(J)=PM1(J)+DPPM1(J)
DPM4(J)=(PM1(J)-PM(J))*DT/TS(I)
DPM(J)=(DPM1(J)+(2.0*DPM2(J))+(2.0*DPM3(J))+DPM4(J))/6.0
PM(J)=PM(J)+DPM(J)
DW4(I)=(PAI*FS)*(PM(J)-PGF(I))*DT/H(I)
DEX4(I)=(EEX2(J)-EEX(J))*DT/TEX(I)
DDS(I)=(DD1(I)+(2.0*DD2(I))+(2.0*DD3(I))+DD4(I))/6.0
DS(I)=DS(I)+DDS(I)
DELT(I)=DS(I)
DWS(I)=DS(I)*57.2957
DWS(I)=(DW1(I)+(2.0*DW2(I))+(2.0*DW3(I))+DW4(I))/6.0
WS(I)=WS(I)+DWS(I)
DEQ4(I)=(EEX(J)-EI(J))*DT/TD01(I)
DEX(I)=(DEX1(I)+(2.0*DEX2(I))+(2.0*DEX3(I))+DEX4(I))/6.0
EEX(J)=EEX(J)+DEX(I)
DEQ(I)=(DEQ1(I)+(2.0*DEQ2(I))+(2.0*DEQ3(I))+DEQ4(I))/6.0
EQ1(J)=EQ1(J)+DEQ(I)

```

R0 CONTINUE

AK=K

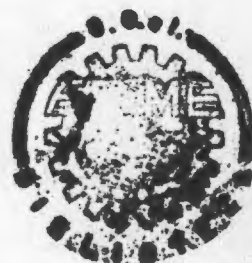
T=DT\*AK

IF (T.GT.TMAX)GOTO120

M3=0

M4=M

IF (T.GT.0.08)AM=PAI



IF (T.GT.0.10)GOTO600

IF (T.GT.0.08)GOTO407

GOTO600

910 DO 308 I=7,10

IF (J.EQ.7)L=1

IF (J.EQ.8)L=2

IF (J.EQ.9)L=3

IF (J.EQ.10)L=4

308 WRITE (4,1210)M,T,J,V(J),F(L),DS(L),PGF(J),QGF(J),DSG(L)

1210 FORMAT (2X,'M=',I3,1X,'T=',F6.3,1X,'J=',I3,1X,'V=',2F10.5,1X,'F=',F18.5,1X,'DS=',F7.3,1X,'PGF=',F9.5,1X,'QGF=',F8.5,1X,'DSG=',F9.3/)

DO 110 I=1,11

IF (I.EQ.3.AND.T.GT.0.08)GOTO930

IF (I.EQ.3)GOTO500

IF (I.EQ.11)GOTO500

930 DELTAF(I)=ATAN2(AMAG(V(I)),REAL(V(I)))\*57.2957

GOTO50

500 DELTAF(I)=0.0

50 AMAGF(I)=CABS(V(I))

J=1

IF (I.EQ.7)DINT7=DELTAF(I)-DELTAF(J)

J=2

IF (I.EQ.8)DINT8=DELTAF(I)-DELTAF(J)

J=3

IF (I.EQ.9)DINT9=DELTAF(I)-DELTAF(J)

J=4

IF (I.EQ.10)DINT10=DELTAF(I)-DELTAF(J)

110 CONTINUE

DO 1130 I=1,6

1130 WRITE (4,1140)I,V(I),AMAGF(I),DELTAF(I),DINT7,DINT8,DINT9,DINT10

1140 FORMAT (1X,'BUS=',I3,2X,'V=',2F8.5,2X,'MAGNITUD=',F8.5,'ANGULO EN GRADOS=',F8.3,'DINT7=',F8.5,'DINT8=',F8.5,'DINT9=',F8.5,'DINT10=',2F8.5/)

TI=TI+DT

M=M+1

GOTO600

120 CONTINUE

CALL START

CALL PLOT(3.0,3.0,-3)

CALL SYMROL(2.0,19.0,0.14,5HCLAVE,0.0,5)

CALL SYMBOL(1.6,18.4,0.14,0,0.0,-1)

CALL SYMBOL(1.8,18.6,0.14,9HMAQUINA 1,0.0,9)

CALL SYMBOL(1.6,18.2,0.14,1,0.0,-1)

CALL SYMBOL(1.8,18.2,0.14,9HMAQUINA 2,0.0,9)

CALL SYMBOL(1.6,17.2,0.14,2,0.0,-1)

CALL SYMBOL(1.8,17.2,0.14,9HMAQUINA 3,0.0,9)

CALL SYMBOL(1.6,17.4,0.14,3,0.0,-1)

CALL SYMBOL(1.8,17.4,0.14,9HMAQUINA 4,0.0,9)

DELTA1(102)=-270.0

DELTA2(102)=-270.0

DELTA3(102)=-270.0

DELTA4(102)=-270.0

```
DELTA2(103)=+30.0  
DELTA3(103)=+30.0  
DELTA4(103)=+30.0  
TIME(102)=0.0  
TIME(103)=0.10  
CALL AXIS(0.0,0.0,15,ANGULO DE CARGA,+15.21.0,+90.0,DELTA1(102),DE  
LTA1(103))  
CALL AXIS(0.0,9.0,6,HTIEMPO,-6,20.0,0.0,TIME(102),TIME(103))  
CALL LINE(TIME,DELTA1,101,1,+1,0)
```

```
CALL LINE(TIME,DELTA2,101,1,+1,1)  
CALL LINE(TIME,DELTA3,101,1,+1,2)  
CALL LINE(TIME,DELTA4,101,1,+1,3)  
CALL ENPLOT(25)
```

```
1200 STOP  
END
```

1 1 4  
 2 4 3  
 3 3 2  
 4 2 5  
 5 5 5

1.17647  
 .38462  
 .29412  
 1.00000  
 1.00000

-4.70588  
 -1.92708  
 -1.17647  
 -3.00000  
 -2.00000

.20000  
 .50000  
 .80000  
 .30000  
 .40000

.05000  
 .10000  
 .20000  
 .10000  
 .20000

3.07692  
 .68966  
 0  
 0  
 0  
 0  
 0  
 0  
 0  
 0

-4.61538  
 -1.72414  
 -1.66667  
 -2.00000  
 -1.66667  
 -1.11111  
 -.09940  
 -.16413  
 -.11011

.15000  
 .50000  
 .60000  
 .50000  
 .60000  
 .90000

.10000  
 .20000  
 0  
 0  
 0  
 0

4.01402  
 2.00801  
 .75114  
 .90821

MATRIZ YBUS

4.3	-11.0	0	0	0	0	-1.2	4.7	0	0	-3.1	4.6	0	1.7	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1.3	-6.2	-0.3	1.2	0	0	-1.0	3.0	0	0	0	0	0	2.0	0	0	0	0	0
0	0	-0.3	1.2	.7	-4.8	-0.4	1.9	0	0	0	0	0	0	1.7	0	0	0	0	0	0
-1.2	6.7	0	0	-0.4	1.9	2.4	-9.6	-0.7	1.7	0	0	0	0	0	0	0	1.1	-0.2	.1	.2
0	0	-1.0	3.0	0	0	-0.7	1.7	3.1	-6.9	-1.0	2.0	0	0	0	0	0	0	0	-0.4	.1
-3.1	6.6	0	0	0	0	0	0	-1.0	2.0	4.4	-6.7	0	0	0	0	0	0	0	-0.3	.1
0	1.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.7	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	2.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2.0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.7	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.1	0
0	0	0	0	0	0	-0.2	.1	-0.4	.2	-0.3	.1	0	0	0	0	0	0	0	1.0	-0.4

VOLTajes INTERNOS

E0= 1.05460 F01= 1.02794 EI= 1.11856  
 E0= 1.07105 F01= 1.04950 EI= 1.10691  
 E0= 1.17764 F01= 1.13993 EI= 1.27244  
 E0= 1.04710 F01= 1.02454 EI= 1.07697

ANGULOS INICIALES

10.4044  
 6.4015  
 12.5328

M=	2	T=	.020	i=	7	V=	1.21871	.	22928	F=	59.9A15A	DS=	.146	PGF=	.3A557	OGF=	.94556	USG=	10.655
M=	2	T=	.020	i=	8	V=	1.28805	.	14596	F=	59.95489	DS=	.113	PGF=	.32064	OGF=	1.41A03	USG=	6.465
M=	2	T=	.020	i=	9	V=	2.19160	.	50166	F=	60.10001	DS=	.225	PGF=	.00000	OGF=	8.42458	USG=	12.893
M=	2	T=	.020	i=	10	V=	1.33483	.	11072	F=	59.98240	DS=	.083	PGF=	.15073	OGF=	1.01A71	USG=	4.735
AUS=	1	V=	.7845A	-	.04222	MAGNITUD=	.78571	ANGULO	EN	GRADOS=	-3.0A0	INT7=	13.73507	INTA=	9.371A7	INT9=	12.89287	INT10=	8.72138
AUS=	2	V=	.75850	-	.03852	MAGNITUD=	.75958	ANGULO	EN	GRADOS=	-2.907	INT7=	13.73507	INTA=	9.371A7	INT9=	12.89287	INT10=	8.72138
AUS=	3	V=	.0	0	MAGNITUD=	.0	ANGULO	EN	GRADOS=	.0	INT7=	13.73507	INTA=	9.371A7	INT9=	12.89287	INT10=	8.72138	
AUS=	4	V=	.66536	-	.04637	MAGNITUD=	.66697	ANGULO	EN	GRADOS=	-3.9A7	INT7=	13.73507	INTA=	9.371A7	INT9=	12.89287	INT10=	8.72138
AUS=	5	V=	.69276	-	.08031	MAGNITUD=	.69740	ANGULO	EN	GRADOS=	-6.612	INT7=	13.73507	INTA=	9.371A7	INT9=	12.89287	INT10=	8.72138
AUS=	6	V=	.73020	-	.06941	MAGNITUD=	.73349	ANGULO	EN	GRADOS=	-5.430	INT7=	13.73507	INTA=	9.371A7	INT9=	12.89287	INT10=	8.72138
M=	3	T=	.040	i=	7	V=	1.24193	.	22905	F=	59.95764	DS=	.182	PGF=	.40130	OGF=	1.02970	USG=	10.433
M=	3	T=	.040	i=	8	V=	1.3112A	.	13682	F=	59.90467	DS=	.104	PGF=	.32905	OGF=	1.44490	USG=	5.957
M=	3	T=	.040	i=	9	V=	2.14062	.	53265	F=	60.20002	DS=	.244	PGF=	.00000	OGF=	8.10997	USG=	13.973
M=	3	T=	.040	i=	10	V=	1.3521A	.	10715	F=	59.96121	DS=	.079	PGF=	.15582	OGF=	1.01508	USG=	4.531
AUS=	1	V=	.79802	-	.04662	MAGNITUD=	.79918	ANGULO	EN	GRADOS=	-3.343	INT7=	13.77668	INTA=	9.29987	INT9=	13.97301	INT10=	8.77661
AUS=	2	V=	.77091	-	.04503	MAGNITUD=	.77222	ANGULO	EN	GRADOS=	-3.343	INT7=	13.77668	INTA=	9.29987	INT9=	13.97301	INT10=	8.77661
AUS=	3	V=	.0	0	MAGNITUD=	.0	ANGULO	EN	GRADOS=	.0	INT7=	13.77668	INTA=	9.29987	INT9=	13.97301	INT10=	8.77661	
AUS=	4	V=	.67571	-	.05016	MAGNITUD=	.67757	ANGULO	EN	GRADOS=	-4.246	INT7=	13.77668	INTA=	9.29987	INT9=	13.97301	INT10=	8.77661
AUS=	5	V=	.70177	-	.08590	MAGNITUD=	.70809	ANGULO	EN	GRADOS=	-6.959	INT7=	13.77668	INTA=	9.29987	INT9=	13.97301	INT10=	8.77661
AUS=	6	V=	.74236	-	.07426	MAGNITUD=	.74607	ANGULO	EN	GRADOS=	-5.713	INT7=	13.77668	INTA=	9.29987	INT9=	13.97301	INT10=	8.77661
M=	4	T=	.060	i=	7	V=	1.23001	.	21952	F=	59.93512	DS=	.175	PGF=	.39A94	OGF=	1.02092	USG=	10.047
M=	4	T=	.060	i=	8	V=	1.30470	.	11645	F=	59.85783	DS=	.089	PGF=	.32052	OGF=	1.44760	USG=	5.100
M=	4	T=	.060	i=	9	V=	2.08278	.	58829	F=	60.29977	DS=	.275	PGF=	.0	OGF=	7.80477	USG=	15.772
M=	4	T=	.060	i=	10	V=	1.34216	.	09803	F=	59.94070	DS=	.073	PGF=	.15544	OGF=	1.01767	USG=	4.178
AUS=	1	V=	.79295	-	.05272	MAGNITUD=	.79440	ANGULO	EN	GRADOS=	-3.800	INT7=	13.85100	INTA=	9.17688	INT9=	15.77242	INT10=	8.88371
AUS=	2	V=	.76520	-	.05454	MAGNITUD=	.76774	ANGULO	EN	GRADOS=	-4.077	INT7=	13.85100	INTA=	9.17688	INT9=	15.77242	INT10=	8.88371
AUS=	3	V=	.0	0	MAGNITUD=	.0	ANGULO	EN	GRADOS=	.0	INT7=	13.85100	INTA=	9.17688	INT9=	15.77242	INT10=	8.88371	
AUS=	4	V=	.67095	-	.05523	MAGNITUD=	.67322	ANGULO	EN	GRADOS=	-4.704	INT7=	13.85100	INTA=	9.17688	INT9=	15.77242	INT10=	8.88371



M= 99 T= 1.960 I= 7 V= .45927 .91459 F=60.11343 DS= 1.107 PGF= .32190 OGF= .30461 DSC= 63.436  
M= 99 T= 1.960 I= 8 V= .90452 .44334 F=59.58867 DS= .455 PGF= -.18308 OGF= .32739 DSC= 26.061  
M= 99 T= 1.960 I= 9 V= -.12700 .95303 F=60.24104 DS= 1.703 PGF= .54609 OGF= .24249 DSC= 97.590  
M= 99 T= 1.960 I= 10 V= .55260 .84524 F=60.50599 DS= .992 PGF= .06527 OGF= .10220 DSC= 56.824  
RUS= 1 V= .54894 .67480 MAGNITUD= .86988 ANGULO EN GRADOS= 50.8720 INT7=12.564260 INT9=23.140600 INT10= 3.92669  
RUS= 2 V= .72595 .45356 MAGNITUD= .85175 ANGULO EN GRADOS= 32.1750 INT7=12.564260 INT9=23.140600 INT10= 3.92669  
RUS= 3 V= .23247 .83543 MAGNITUD= .86777 ANGULO EN GRADOS= 74.4500 INT7=12.564260 INT9=23.140600 INT10= 3.92669  
M=100 T= 1.980 I= 7 V= .44432 .92522 F=60.11200 DS= 1.121 PGF= .32257 OGF= .31045 DSC= 64.248  
M=100 T= 1.980 I= 8 V= .93119 .40753 F=59.73934 DS= .413 PGF= -.21730 OGF= .30338 DSC= 23.636  
M=100 T= 1.980 I= 9 V= -.14464 .94231 F=60.10752 DS= 1.725 PGF= .54118 OGF= .25727 DSC= 98.845  
M=100 T= 1.980 I= 10 V= .50202 .88663 F=60.50797 DS= 1.056 PGF= .10847 OGF= .20111 DSC= 60.481  
RUS= 1 V= .53723 .68004 MAGNITUD= .86664 ANGULO EN GRADOS= 51.6910 INT7=12.556390 INT9=23.269010 INT10= 6.49748  
RUS= 2 V= .72657 .43383 MAGNITUD= .84442 ANGULO EN GRADOS= 30.9100 INT7=12.556390 INT9=23.269010 INT10= 6.49748  
RUS= 3 V= .21669 .83472 MAGNITUD= .86189 ANGULO EN GRADOS= 75.5760 INT7=12.556390 INT9=23.269010 INT10= 6.49748  
RUS= 4 V= .49787 .68485 MAGNITUD= .84649 ANGULO EN GRADOS= 53.9840 INT7=12.556390 INT9=23.269010 INT10= 6.49748  
RUS= 5 V= .60887 .49091 MAGNITUD= .77979 ANGULO EN GRADOS= 39.0160 INT7=12.556390 INT9=23.269010 INT10= 6.49748  
RUS= 6 V= .55809 .58806 MAGNITUD= .80524 ANGULO EN GRADOS= 46.9100 INT7=12.556390 INT9=23.269010 INT10= 6.49748  
M=101 T= 2.000 I= 7 V= .43237 .92934 F=60.11098 DS= 1.135 PGF= .31872 OGF= .30168 DSC= 65.050  
M=101 T= 2.000 I= 8 V= .94148 .38793 F=59.90507 DS= .390 PGF= -.24350 OGF= .30302 DSC= 22.351  
M=101 T= 2.000 I= 9 V= -.15103 .93855 F=59.97506 DS= 1.730 PGF= .53348 OGF= .24149 DSC= 99.142  
M=101 T= 2.000 I= 10 V= .45801 .94259 F=60.49107 DS= 1.118 PGF= .15415 OGF= .20048 DSC= 64.085  
RUS= 1 V= .52784 .69052 MAGNITUD= .86887 ANGULO EN GRADOS= 52.6470 INT7=12.402600 INT9=22.904310 INT10= 8.94093  
RUS= 2 V= .72606 .42676 MAGNITUD= .84047 ANGULO EN GRADOS= 30.5150 INT7=12.402600 INT9=22.904310 INT10= 8.94093  
RUS= 3 V= .20882 .84032 MAGNITUD= .86576 ANGULO EN GRADOS= 76.2370 INT7=12.402600 INT9=22.904310 INT10= 8.94093  
RUS= 4 V= .48887 .69898 MAGNITUD= .85180 ANGULO EN GRADOS= 55.1440 INT7=12.402600 INT9=22.904310 INT10= 8.94093

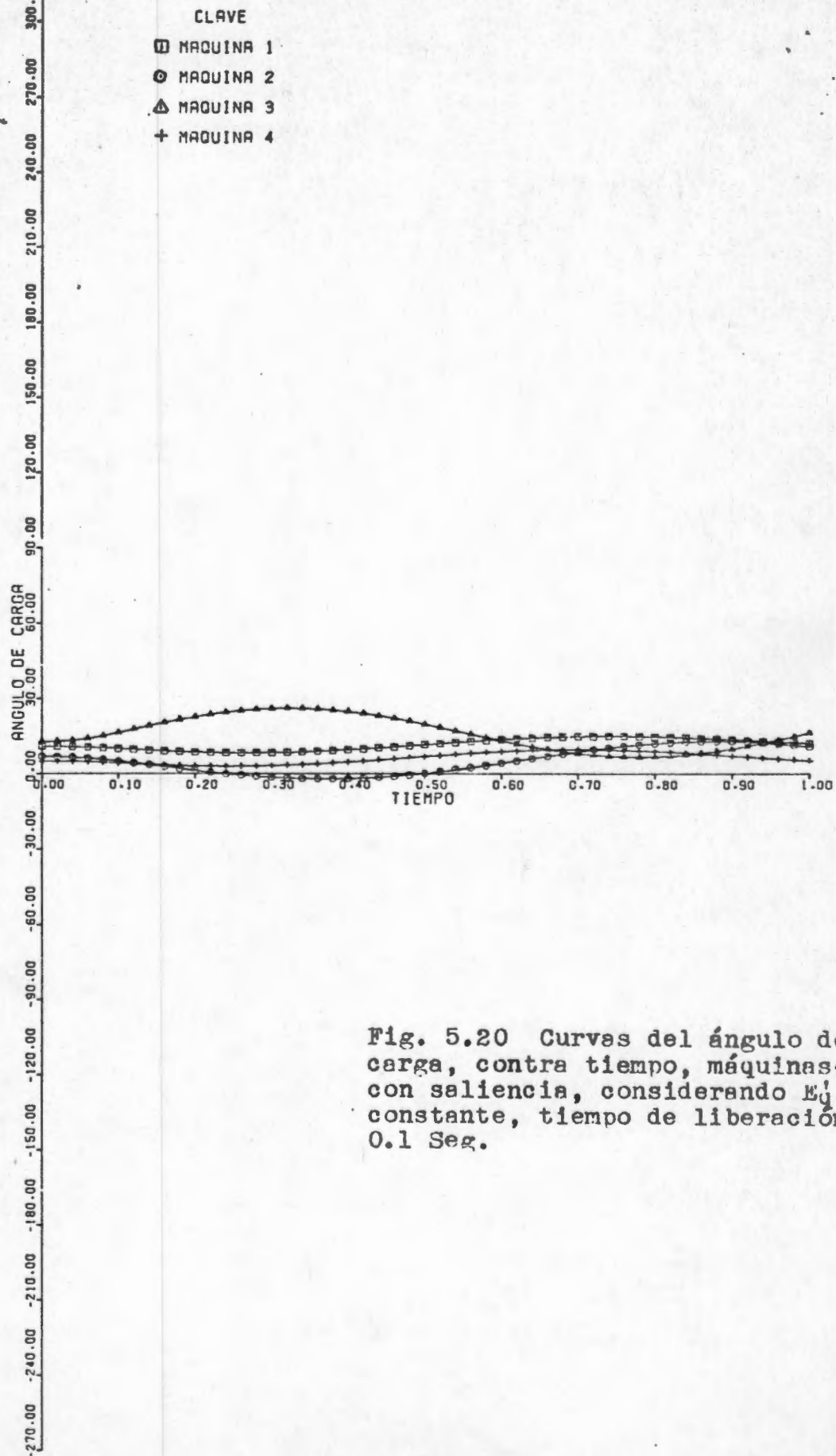


Fig. 5.20 Curvas del ángulo de carga, contra tiempo, máquinas con saliencia, considerando  $E'_d$  constante, tiempo de liberación 0.1 Seg.



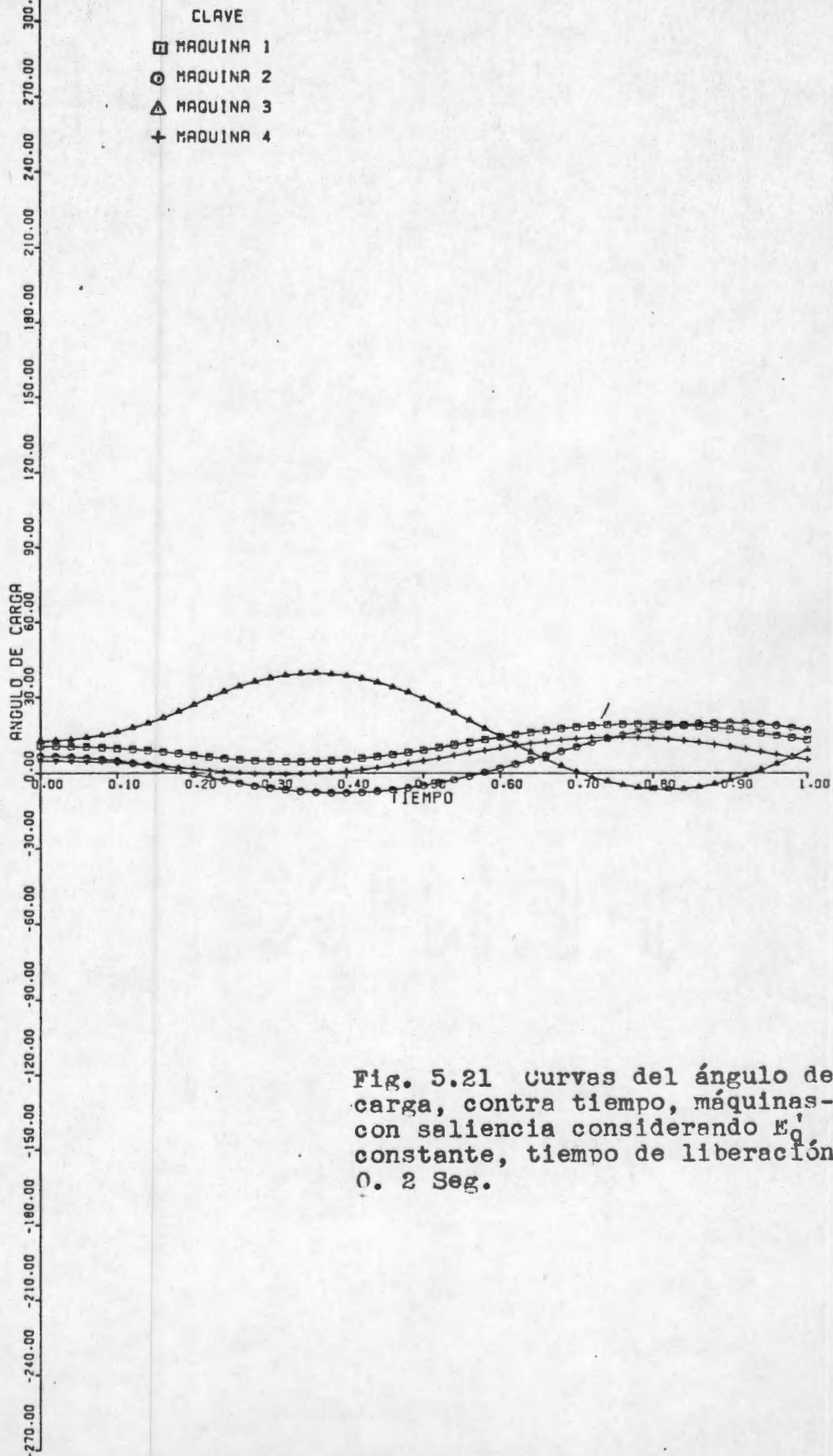


Fig. 5.21 Curvas del ángulo de carga, contra tiempo, máquinas con saliencia considerando  $E'_q$  constante, tiempo de liberación 0. 2 Seg.

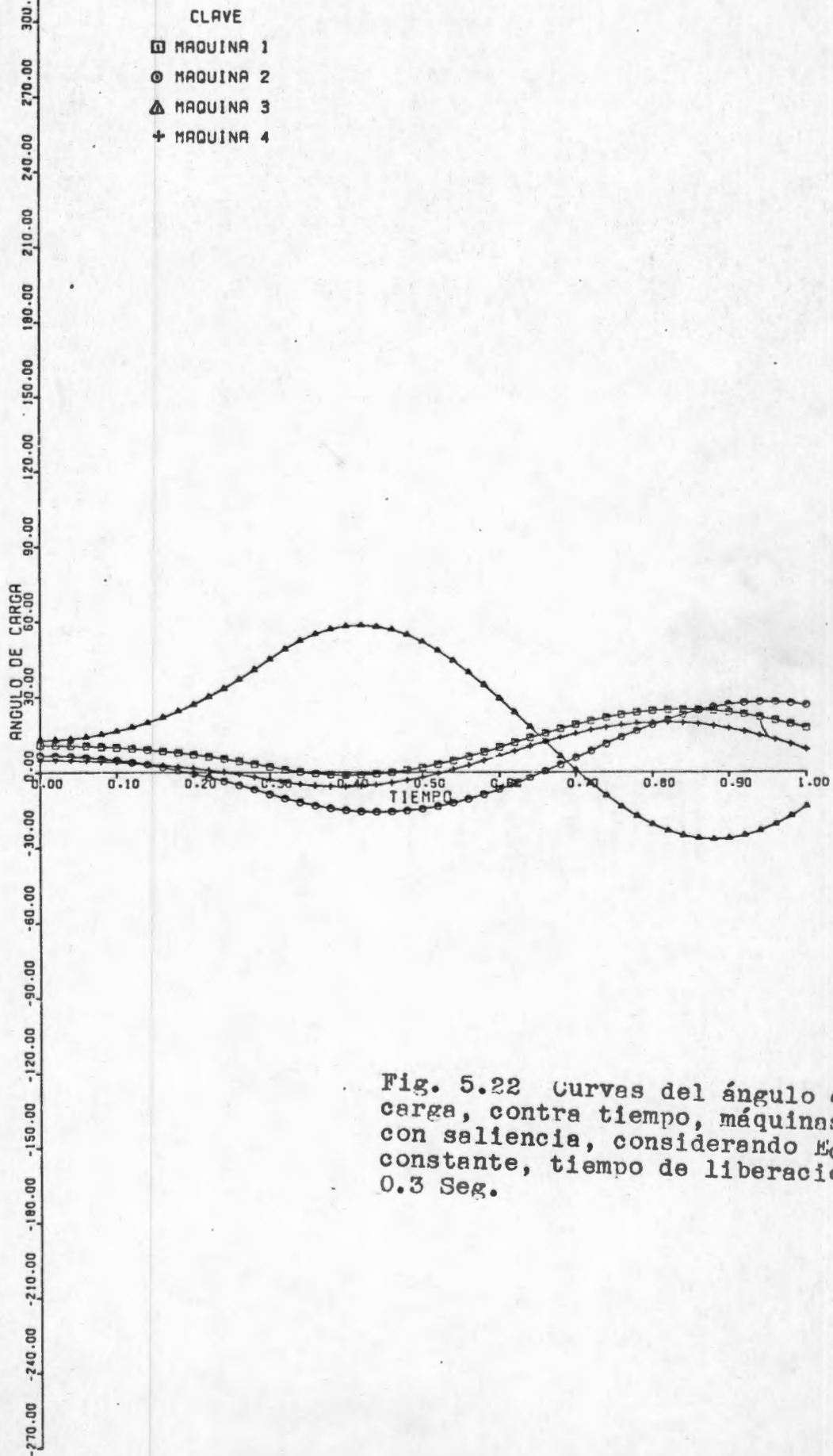


Fig. 5.22 Curvas del ángulo de carga, contra tiempo, máquinas con saliencia, considerando  $E_q$  constante, tiempo de liberación 0.3 Seg.

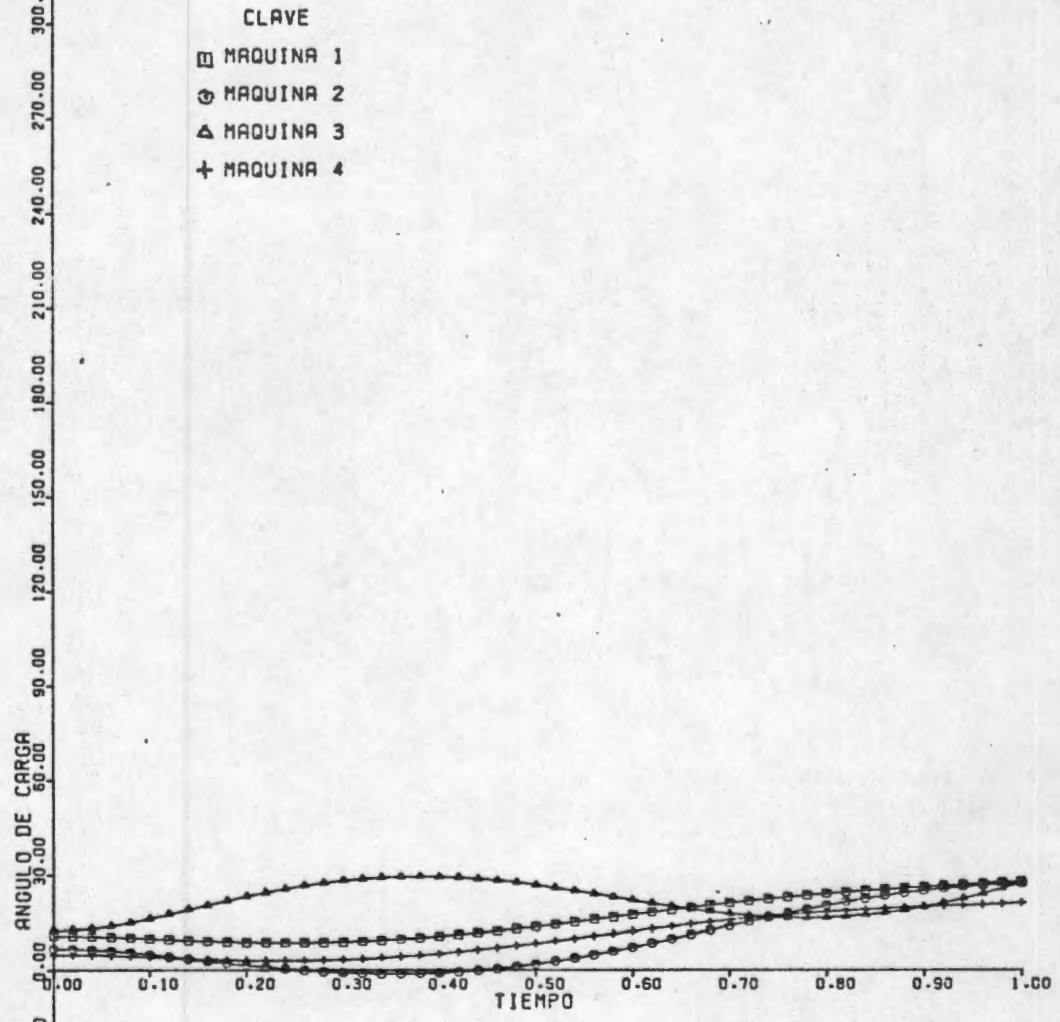


Fig.5.23 curvas del ángulo de carga, contra tiempo, máquinas con saliencia, considerando  $E_q'$  variable, sin acción del regulador de voltaje, tiempo de liberación 0.1 Seg.

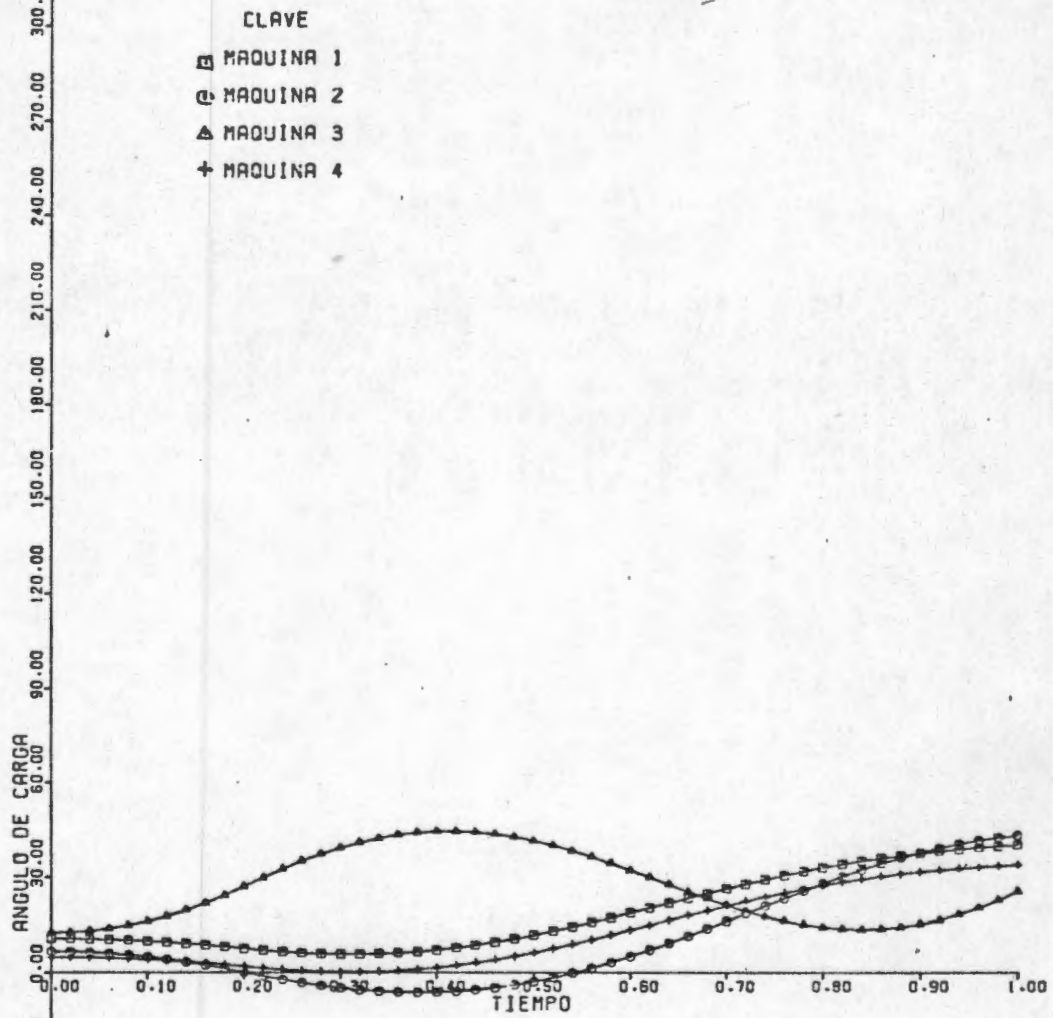


Fig.5.24 curvas del ángulo de carga, contra tiempo, máquinas con saliencia, considerando  $E_q$  variable, sin acción del regulador de voltaje, tiempo de liberación 0.2 Seg.

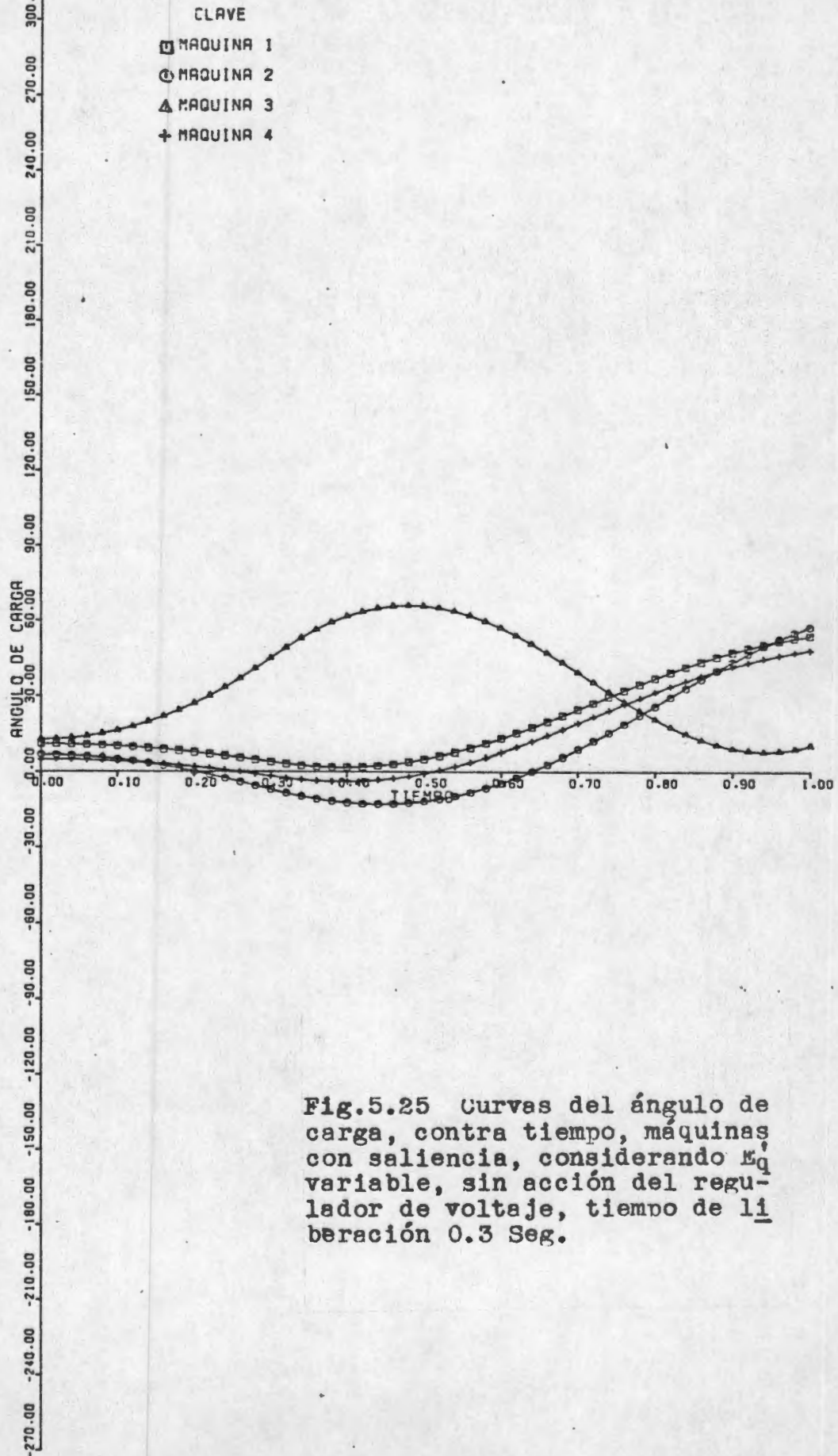
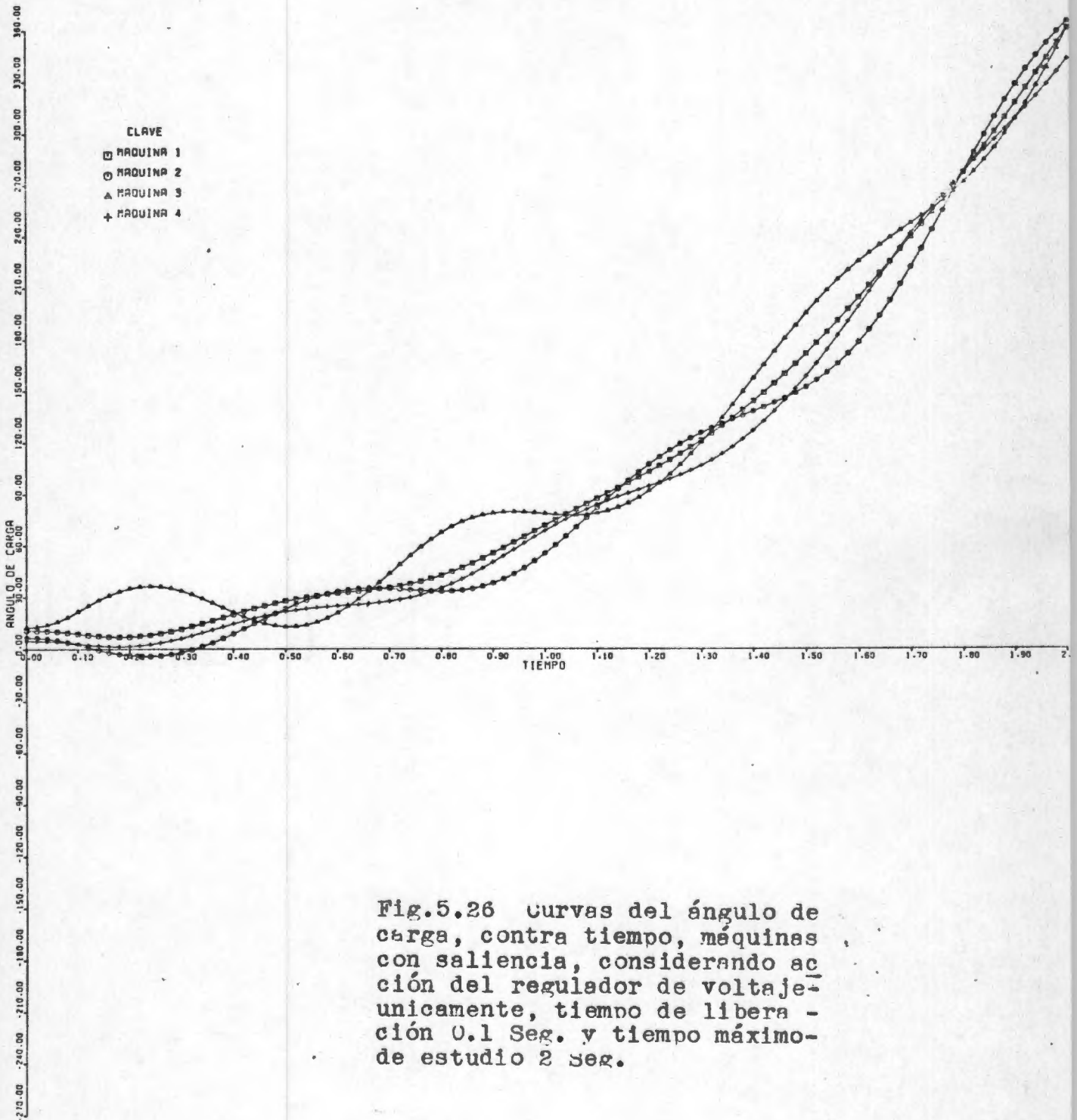


Fig.5.25 Curvas del ángulo de carga, contra tiempo, máquinas con saliencia, considerando  $E_q$  variable, sin acción del regulador de voltaje, tiempo de liberación 0.3 Seg.



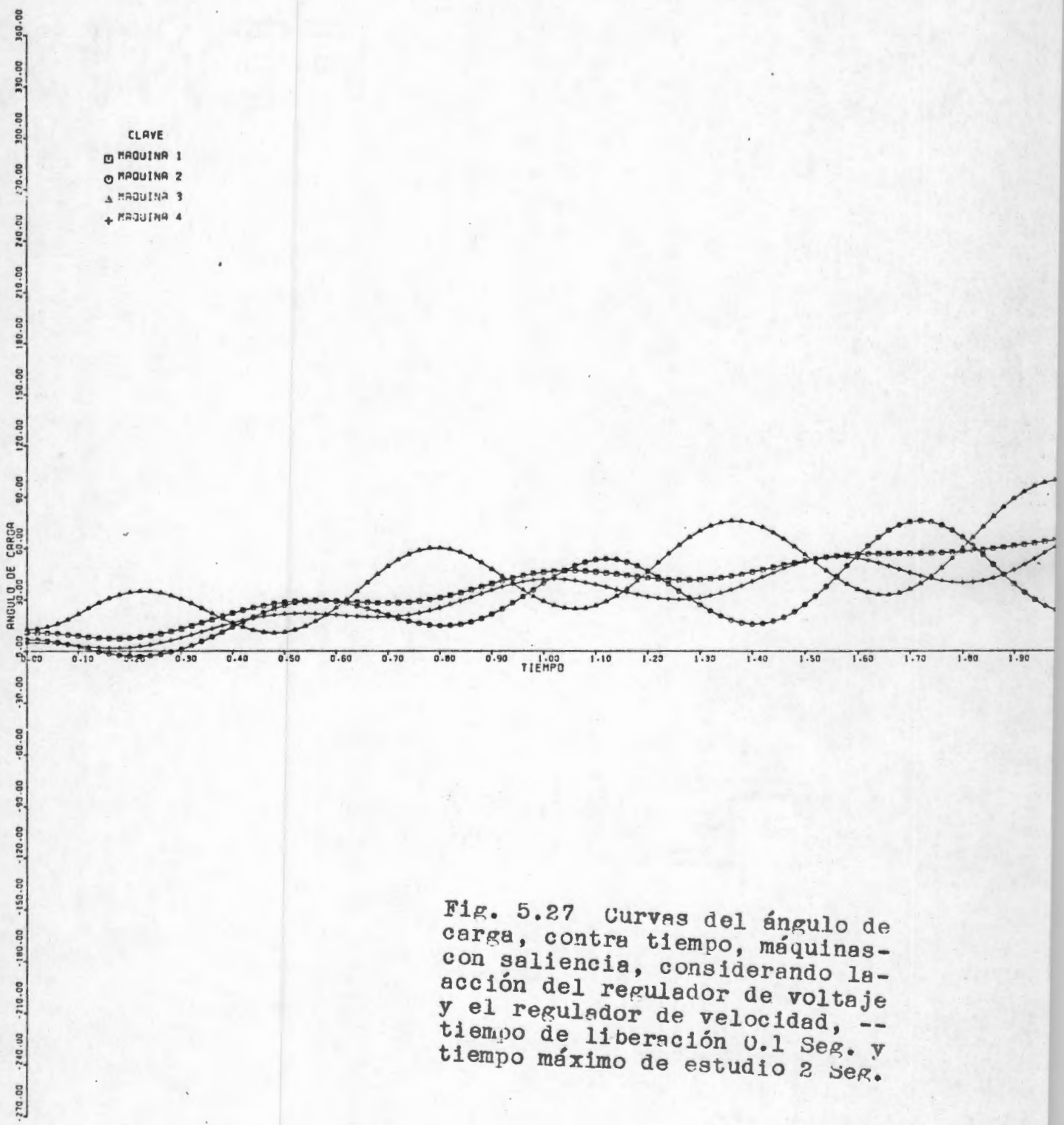
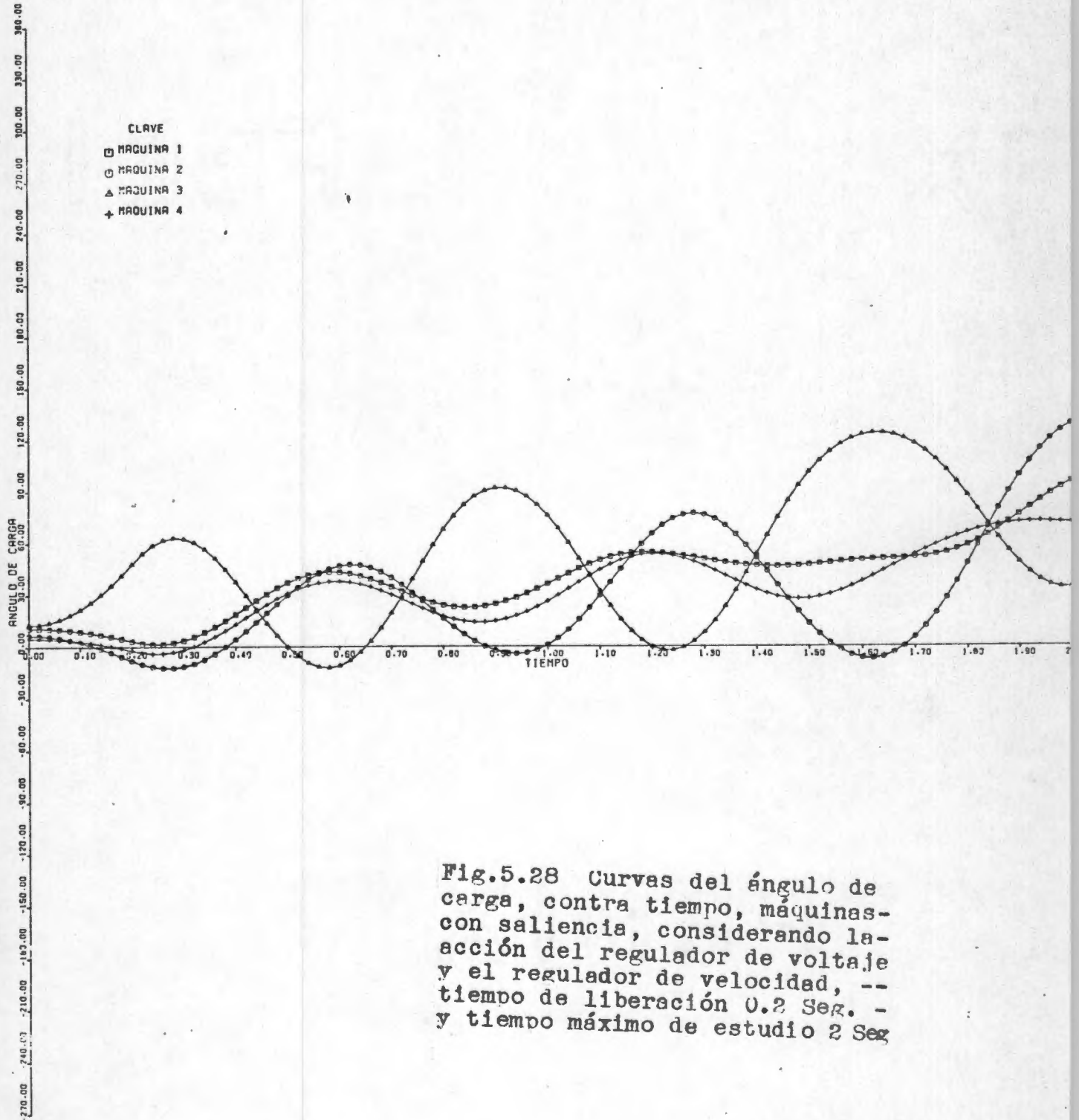
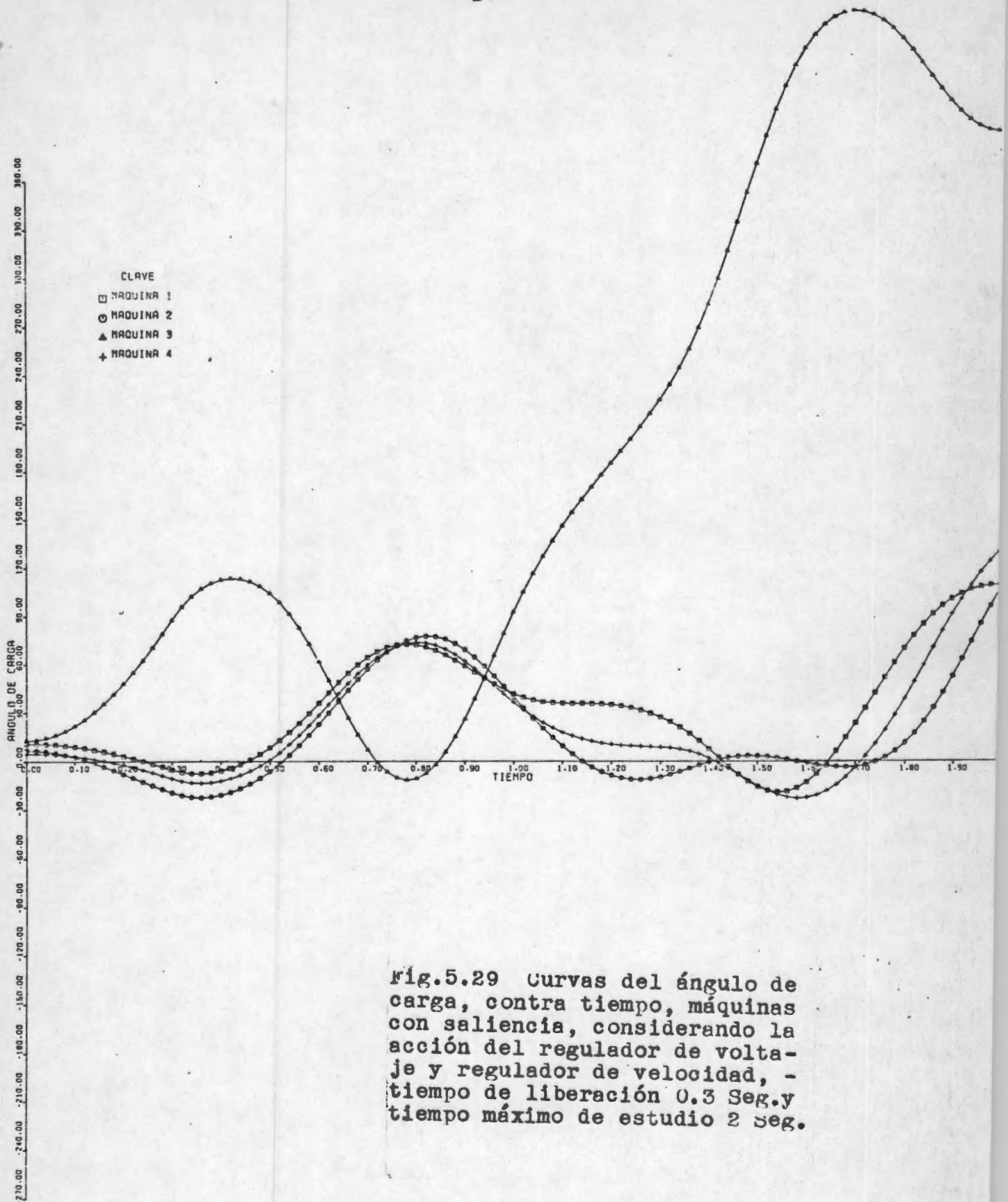


Fig. 5.27 Curvas del ángulo de carga, contra tiempo, máquinas-con saliencia, considerando la acción del regulador de voltaje y el regulador de velocidad, -- tiempo de liberación 0.1 Seg. y tiempo máximo de estudio 2 Ser.







## CONCLUSIONES

Tomando como base los resultados obtenidos en el análisis de estabilidad transitoria por los dos métodos descritos se puede concluir que:

- 1.- Las simplificaciones realizadas en el método de reducción de la red a los nodos internos de las máquinas, dan como resultado que el modelo implementado en el análisis no lleve a cabo una simulación adecuada, dichas simplificaciones se podrían interpretar como factores de seguridad, desde el punto de vista de estabilidad, pero esto implica un efecto negativo desde el punto de vista económico.
- 2.- El método de nodos retenidos optimiza la solución al sistema ya que esta es mas completa.

Lo anterior es basado en:

a).- Los tiempos criticos de liberación de la falla obtenidos por los dos métodos estan alrededor de 0.3 seg. para el primero y 0.44 seg para el segundo.

Lo que implicaría en el caso del primer método, la necesidad de tener un sistema de protección mas rápido; derivado de esto se podría afirmar que la confiabilidad del sistema es mayor, aun cuando económicamente no es optimo. sin embargo el segundo método establece que para condiciones de confiabilidad absoluta, es necesario un equipo de protección mas lento, y en consecuencia se tendría una optimización del sistema.

b).- Por otra parte la no simplificación de la red implica que el modelo utilizado es mas real, y de esta manera se puede obtener una información mas adecuada acerca de todos los parámetros de la red.

- 3.- Con respecto a las distintas representaciones de carga en el método de nodos retenidos, los resultados parecen indicar que dependiendo de dicha representación, los tiempos críticos de liberación de la falla, lo cual era de esperarse ya que para los casos de cargas representadas como impedancia constante y corriente constante los resultados muestran similitud y son menos críticos que en el caso de cargas representadas como potencia constante ya que para este último caso la potencia eléctrica suministrada por los generadores, tiende a aumentar a medida que transcurre el tiempo, esto implica que el tiempo crítico de liberación obtenido para este caso es menor que en los dos anteriores. Se considera que es absolutamente necesario el ampliar el estudio al respecto, mención a esto se hará en la sección de recomendaciones para trabajos futuros.
- 4.- Con referencia a estabilidad dinámica se puede decir que el estudio estuvo enfocado a obtener un programa de computadora el cual trabajara considerando diferentes tipos de representación de la máquina síncrona. Los resultados obtenidos parecen ser satisfactorios. En este caso el tiempo crítico de liberación de la falla se obtuvo en una zona alrededor de 0.3 seg. Aquí se puede apreciar en una mejor forma, como las máquinas lejanas a la falla tienen un comportamiento mas estable, mientras que la que se encuentra mas cercana a la falla sale de paso mas rápidamente.

Es conveniente mencionar que un estudio de estabilidad que requiere mayor complejidad del modelo matemático,

eleva las condiciones actuales de tiempo de computación y la capacidad de memoria, por lo que es necesario optimizar este tipo de representaciones.

La conclusión final es que, hay la necesidad de efectuar los estudios de operación del sistema, tanto en el estado transitorio como en el dinámico para llegar a obtener resultados satisfactorios.

## RECOMENDACIONES PARA INVESTIGACIONES FUTURAS.

Las recomendaciones que se mencionan a continuación se basan en que el presente trabajo unicamente trata lo referente a tiempos críticos de liberación de falla para el caso de un corto circuito trifásico, así como el efecto de la representación de cargas estáticas, así como la consideración de diferentes tipos de máquinas para el estudio de estabilidad dinámica. Así que las recomendaciones para investigaciones futuras son:

- 1.- Considerar el efecto de recierres de los interruptores, así como los casos de fallas asimétricas.
- 2.- Tratar el caso de representar las cargas en función de las variaciones de voltaje y frecuencia, analizando su efecto en estudios de estabilidad.
- 3.- Analizar lo referente a representación de cargas dinámicas (motores de inducción) y su efecto en estudios de estabilidad.
- 4.- Trabajar en el campo referente a equivalentes.
- 5.- Tratar de analizar el problema de representación de las máquinas en estudios de estabilidad transitoria y dinámica, dependiendo de su cercanía a la falla para optimizar lo referente a capacidad de memoria y también los pasos de integración de las ecuaciones diferenciales para reducir el tiempo de computación.

A P E N D I C E A

S I M B O L O G I A

$E_g$	.. . . . .	voltaje detrás de la reactancia transitoria.
$E_v$	.. . . . .	Voltaje de la barra infinita.
$\delta$	.. . . . .	Ángulo de carga.
$\theta$	.. . . . .	Ángulo de defasamiento.
$X$	.. . . . .	Reactancia de línea.
$P$	.. . . . .	Potencia activa.
$Q$	.. . . . .	Potencia reactiva.
$H$	.. . . . .	Constante de inercia.
$H_e$	.. . . . .	Constante de inercia equivalente.
$T_m$	.. . . . .	Par aplicado a la máquina.
$T_e$	.. . . . .	Par electromagnético.
$\omega_s$	.. . . . .	Velocidad sincrónica.
$X_e$	.. . . . .	Reactancia de la máquina equivalente.
$I_A, I_B$	.. . . . .	Corrientes inyectadas a los nodos.
$V_1, V_2$	.. . . . .	voltajes de nodo.
$Y_{11}, Y_{22}$	.. . . . .	Admitancias propias.
$Y_{12}, Y_{21}$	.. . . . .	Admitancias mutuas.
$Y$	.. . . . .	Vector de admitancias.
$V$	.. . . . .	Vector de voltajes.
$I$	.. . . . .	Vector de corrientes.
$S_k$	.. . . . .	Potencia compleja del nodo K
$V_k^*$	.. . . . .	Conjugado de la tensión en el bus K
$\epsilon$	.. . . . .	Tolerancia.
$\alpha$	.. . . . .	factor de aceleración.
$X_d'$	.. . . . .	Reactancia transitoria en eje directo.

$X_q'$	Reactancia transitoria en eje en cuadratura.
$M$	Constante de inercia.
$f$	frecuencia del sistema.
$p$	Operador.
$V_d$	Voltaje en eje directo.
$V_q$	voltaje en eje en cuadratura.
$V_f$	Voltaje del devanado de campo.
$V_{kd}$	Voltaje del devanado de amortiguamiento en - eje directo.
$V_{kq}$	Voltaje del devanado de amortiguamiento en - eje en cuadratura.
$\Psi_d$	Eslabonamientos de flujo en eje directo.
$\Psi_q$	Eslabonamientos de flujo en eje en cuadratura.
$\Psi_{kd}$	Eslabonamientos de flujo de los devanados de- amortiguamiento en eje directo.
$\Psi_{kq}$	Eslabonamientos de flujo de los devanados de amortiguamiento en eje en cuadratura.
$\Psi_f$	Eslabonamientos de flujo del devanado de -- campo.
$i_d$	Corriente en el devanado en eje directo.
$i_q$	Corriente en el devanado en eje en cuadra- tura.
$i_{kd}$	Corriente en el devanado de amortiguamiento en eje directo.
$i_{kq}$	Corriente en el devanado de amortiguamiento en eje en cuadratura.
$i_f$	Corriente en el devanado de campo.

$X_d$	. . . . .	Reactancia del devanado en eje directo.
$X_q$	. . . . .	Reactancia del devanado en eje en cuadratura.
$E_{qd}$	. . . . .	voltaje detrás de la reactancia $X_q$ .
$E'_q$	. . . . .	voltaje debido a los eslabonamientos de flujo en eje en cuadratura.
$E_{ex}$	. . . . .	voltaje de armadura a circuito abierto.
$T_{do}$	. . . . .	Constante de tiempo transitoria a circuito abierto.
$M_f$	. . . . .	Inductancia mutua del devanado de campo.
$T_E$	. . . . .	Constante de tiempo de la excitatriz.
$S_E$	. . . . .	Constante de saturación de la excitatriz.
$K_A$	. . . . .	Ganancia del regulador.
$T_A$	. . . . .	Constante de tiempo del regulador.
$T_S$	. . . . .	Constante de tiempo del sistema de alimentación a la turbina.
$T_C$	. . . . .	Constante de tiempo del sistema de control del gobernador de velocidad.
$P_M$	. . . . .	Potencia mecánica.



## A P E N D I C E B

En esta parte se dará una breve explicación de la forma en que se deben dar los datos a cada uno de los programas de computadora utilizados.

1.- Programa para el estudio de flujos de carga (Programa Guerra) página 38.

La 1a. Fila de datos deberá tener:

NB . . . . Número de buses.  
NL . . . . Número de Lineas.  
MB . . . . Bus Slack.  
ALFA . . . Factor de aceleración.

La 2a. Fila de datos serán:

LINEA (I) . . . . Número de Linea.  
S B (I) . . . . Número del bus donde sale la línea.  
E B (I) . . . . Número del bus donde entra la línea.  
SERZ(I) . . . . Impedancia de la línea en P.u.  
SHY(I) . . . . Admitancia a tierra.

La 3a. Fila de datos deberán ser los datos especificados como:

P (I) . . . . Potencia neta activa en el bus.  
Q (I) . . . . Potencia neta reactiva en el bus.

2.- Programa para el método de reducción de la red a los nodos internos. (Programa Estab ) página 73.

La 1a. Fila de datos será:

N . . . . .Número de nodos.  
Tmax . . . . Tiempo máximo de estudio 1.0 Seg.

F . . . . . Frecuencia 60 HZ.

AH . . . . . Incremento de tiempo para los pasos de  
integración.

TAP . . . . . Tiempo de liberación de la falla.

La 2a. Fila de datos será:

PB1 . . . . . Potencia base.

PAI . . . . . 3.14159 o sea el número  $\pi$ .

La 3a. Fila de datos será:

W (I) . . . . . Valor de omega inicial de cada máquina,  
que en este caso se le da el valor cero.

La 4a. Fila de datos será:

G (I) . . . . . Capacidad nominal de cada máquina en P.u.

La 5a. fila de datos será:

XH (I). . . . Constantes de inercia.

La 6a. Fila de datos será

PM (I) . . . . . Potencia mecánica.

La 7a. Fila de datos será:

SERZ (I) . . . . Impedancia de la máquina ó generalmente  $X_d$

PL(I) . . . . Potencia activa entregada por cada máquina

QL (I) . . . . . Potencia reactiva entregada por cada ma -  
quina.

V (I) . . . . . Magnitud del voltaje de nodos.

DELTA (I) . . . . Angulo de cada voltaje de nodo

La 8a. Fila de datos será:

NB . . . . . Número total de buses considerando los bu -  
ses internos.

NE . . . . Número de líneas.

NNE . . . . Número de buses por eliminar.

La 9a. Fila de datos será:

TLINE (I) . . . . Número de línea (orden)

SB (I) . . . . Nodo donde sale la línea.

EB (I) . . . . Nodo donde entra la línea.

SEZ (I) . . . . Impedancia de la línea en P.u.

SHY (I) . . . . Admitancia a tierra.

SHY1 (I) . . . . Admitancia que representa a las cargas.

3.- Programa para el método de nodos retenidos (Programa Maris)  
página 89.

La 1a. Fila de datos será:

NB . . . . .Número de buses.

NL . . . . .Número de Líneas.

ACC . . . . .Factor de aceleración.

La 2a. Fila de datos será:

DT . . . . . Incremento de tiempo para los pasos de inte -  
eración.

TMAX . . . . . Tiempo máximo de análisis

FS . . . . . Frecuencia:.

PAI . . . . . Numero P

La 3a. Fila de datos será:

TLINE (I) . . . . Número de línea.

SB (I) . . . . .Número del bus donde sale la línea.

EB (I) . . . . .Número del bus donde entra la línea.

SERZ (I) . . . . . Impedancia de la línea.

SHY (I) . . . . . Admitancia a tierra.

La 4a. Fila de datos será:

PG (I) . . . . . Potencia activa entregada por cada generador.

QG (I) . . . . . Potencia reactiva entregada por cada generador.

E (I) . . . . . Magnitud de voltaje de cada bus.

H (I) . . . . . Constante de inercia.

DELTA(I) . . . . . Ángulo del voltaje de bus.

4.- Programa para el estudio de estabilidad dinámica (Programa maris) Página 142.

La 1a. Fila de datos será:

NB . . . . . Número de buses.

NL . . . . . Número de líneas.

ACC . . . . . Factor de aceleración.

La 2a. Fila de datos será:

DT . . . . . Incremento de tiempo para los pasos de integración.

TMAX . . . . . Tiempo máximo de estudio.

FS . . . . . Frecuencia.

PAI . . . . . Número Pi

La 3a. Fila de datos será:

TLINE (I) . . . . . Número de líneas.

SB (I) . . . . . Número del bus donde sale la línea.

EB (I) . . . . .Número del bus donde entra la línea.  
SERZ(I) . . . . .Impedancia de la línea.  
SHY(I) . . . . .Admitancia a tierra.  
SERZQ(I) . . . . .Reactancia en eje en cuadratura de cada máquina.

La 4a. Fila de datos será:

PG (I) . . . . .Potencia activa entregada por cada máquina.  
QG (I) . . . . .Potencia reactiva entregada por cada máquina.  
P (I) . . . . .Potencia activa de carga.  
Q (I) . . . . .Potencia reactiva de carga.  
E (I) . . . . .Magnitud del voltaje en cada bus.  
H (I) . . . . .Constante de inercia.  
DELTA(I) . . . . .Angulo del voltaje de bus.

La 5a. Fila de datos será:

SERZO (I) . . . . .Impedancia en eje directo de cada máquina.  
TD01 (I) . . . . .Constante de tiempo transitoria a circuito abierto.  
EEXMIN (I) . . . . .Voltaje limite mínimo del regulador de voltaje.  
EEXMAX (I) . . . . .Voltaje limite máximo del regulador de voltaje.  
TEX (I) . . . . .Constante de tiempo de la excitatriz.  
KA (I) . . . . .Ganancia del regulador de voltaje.

La óa. Fila de datos será:

PMAX (I) . . . . . Potencia limite máxima del gobernador.

TS (I) . . . . . Constante de tiempo del sistema de alimentación a la turbina.

TC (I) . . . . . Constante de tiempo del sistema de control.

DBT (I) . . . . . Constante de banda muerta.

R (I) . . . . . Velocidad de regulación ó característica -  
del regulador de velocidad.

## REFERENCIAS

- 1.- STAGG AND EL-ABIAD  
COMPUTER METODS IN POWER SVSTEMS  
ANALYSIS. MC. GRAW HILL BOOK COMPANY. 1968
- 2.- OLLE. I. ELGERD  
ELECTRIC ENERGY SYSTEMS THEORY  
AN INTRODUCTION. Mc GRAW HILL 1971
- 3.- S.B. CRARY.  
POWER SYSTEMS STABILITY  
VOL. I, II NEW YORK JOHN WILEY 1947
- 4.- E.W. KIMBARK.  
POWER SYSTEM STABILITY  
VOL. I,III NEW YORK JOHN WILEY 1957
- 5.- BERNARD ADKIMS.  
THE GENERAL THEORY OF  
ELECTRICAL MACHINES, CHAPMAN  
& HALL L # D 1964
- 6.- EFFECT OF TURBINE-GENERATOR REPRE-  
SENTATION IN SVSTEM STABILITY STU-  
DIES.  
H.E. LOKAY, SENIOR MEMBER IEEE R.L.  
BOLGER, MEMBER IEEE.VOL.PAS-84 No.10  
OCTOBER 1905
- 7.- COMPUTER REPRESENTATION OF EXCITA-  
TION SYSTEMS IEEE.  
VOL.PAS-87 No.6 JUNE. 1968
- 8.- EL EFECTO DEL MODELO DE CARGAS EN  
ESTABILIDAD DINAMICA DE LOS SISTE-  
MAS DE POTENCIA.  
REPORTE PRESENTADO POR  
G.ENRIQUEZ HARPER EN EL IMPERIAL  
COLLEGE DE LONDRES 1973
- 9.- TRANSIENT STABILITY STUDIES  
II.-AUTOMATIC DIGITAL COMPUTATION  
C.M.LANE R.W.LONG  
J.N. POWERS  
FEBRUARY (PAG 1291) 1959
- 10.- TRANSIENT STABILITY REGIONS OF  
MULTIMACHINE POWER SYSTEMS.  
D H MED H EL - ABIAD AND.  
K. NAGAPPAN, TRANS. IEEE  
VOL. PAS-85, N.2 FE. 1966
- 11.- CALCULATION OF TRANSIENT  
STABILITY PROBLEMS USING A-  
HIGH-SPEED DIGITAL COMPUTER  
GW STAGG A.F. GABRIELLE. AIEE  
D.R.MOORE J.F.HOHENSTEIN AGOSTO 1959

- 12.- NEW DIGITAL TRANSIENT STABILITY PROGRAM. TRANS. AIEE  
M.S. DYRKACZ.  
D.G LEWIS  
OCTOBER (Pag. 913) 1959
- 13.- NEW TECHNIQUES FOR THE CALCULATION OF DYNAMIC STABILITY  
A.W. OLIVE. TRANS. IEEE.  
JULY.(Vol.Pas-85. No.7) 1966
- 14.- DIGITAL COMPUTATION OF INDUCTION MOTOR TRANSIENT STABILITY  
J.L. GABBARD Jr.  
J.E. ROWE TRANS AIEE  
(Pag 970) DECEMBER 1957
- 15.- REPRESENTATION OF INDUCTION MOTOR LOADS.DURING POWER-SYSTEM STABILITY STUDIES TRANS. AIEE  
D.S. BRERETON  
D.G. LEWIS  
CC.YOUNG. PAG. 451 AUGUST 1957
- 16.- POWER SYSTEM DYNAMIC EQUIVALENTS  
ALBERT CHANG  
M.ADIBI TRANS. IEEE  
VOL. PAS-89 No.8  
NOVEMBER-DECEMBER 1970
- 17.- ANALYSIS OF OVERALL STABILITY OF MULTI-MACHINE.  
POWER SYSTEMS.  
BY J.G. MILES.  
THE INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS PAPER No. 3715 S  
NOV. 1961 1961
- 18.- SOLUTION METHODS FOR TRANSIENT AND DYNAMIC STABILITY, TRANS IEEE  
M.M. ADIBI  
PETER M. HIRSCH.  
JAMES A. JORDAN JR.  
VOL. 62, No. 7 JULY 1974
- 19.- NUMERICAL ALGORITHMS ORIGINS AND APPLICATIONS ARDEN/ASTILL  
ADDISON WESLEY PUBLISHING 1970
- 20.- IMPROVEMENT OF POWER SYSTEM STABILITY BY CHANGES IN THE NETWORK.  
EDWARD W. KIMBARK  
I.E.E.E. PAG. 459.- MAY. 1969



- 21.- EXPERIENCE IN COMPUTATION OF LOAD  
FLOW  
STUDIES USING HIGH-SPEED COMPUTERS.  
H.P. ST. CLAIR. TRANS. AIEE  
G.W. STAGG.  
PAG. 1275 FEBRUARY 1959
- 22.- ITERATION METHODS FOR DIGITAL LOAD  
FLOW STUDIES. TRANS AIEE  
JAMES E. VAN NESS.  
AUGOST 1959 Pag. 583. 1959
- 23 A DIGITAL TRANSIENT STABILITY PRO-  
GRAM INCLUDING THE EFFECTS OF EXCI  
TATION SYSTEM AND SPEED REGULATOR.  
M.S. DYRKACZ, D.G. LEWIS  
TRANS AIEE, VOL, 79, pt III  
pp 1245 1257 1960
- 24 REPRESENTATION OF LOADS  
PAPER BASED IN PARTON  
INFORMATION GATHERED FOR THE  
GENERAL ELECTRIC POWER SYSTEM  
STABILITY SEMINAR  
C. CONCORDIA, FELLOW IEEE  
NEW YORK.