ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

TESIS DE GRADO

"OPERACION ASIMETRICA DE LA MAQUINA TRIFASICA DE INDUCCION"

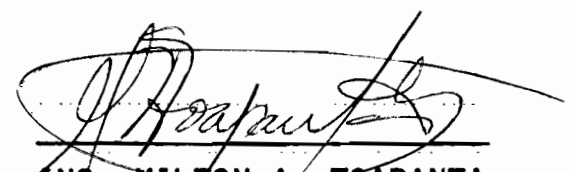
TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO
EN ELECTRONICA Y CONTROL

NELSON RUBEN PONCE CARRERA

QUITO, JULIO DE 1985

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
BIBLIOTECA
002762
E. P. N.

CERTIFICO QUE EL PRESENTE TRABAJO HA SIDO REALIZADO EN SU TOTALIDAD POR EL SEÑOR NELSON RUBEN PONCE CARRERA.



ING. MILTON A. TOAPANTA
DIRECTOR

D E D I C A T O R I A

A MI ESPOSA E HIJA,

A MIS PADRES Y HERMANOS

A G R A D E C I M I E N T O

AL SEÑOR ING. MILTON TOAPANTA POR SU VALIOSA COLABORACION
EN EL DESARROLLO DEL PRESENTE TRABAJO.

RUBEN PONCE CARRERA

I N D I C E

Pág.

INTRODUCCION

CAPITULO I: LA MAQUINA DE INDUCCION

1.1 Consideraciones básicas para el análisis 1

1.2 Representación matemática de la máquina de inducción.. 2

1.2.1 Ecuaciones de voltaje 3

1.2.2 Ecuaciones de la máquina referidas al estator 6

1.2.3 Ecuación del torque electromagnético 7

1.3 Transformaciones de las ecuaciones de la máquina de variables de fase (a, b, c) a un sistema de ejes arbitrarios de referencia (q, d, o) 9

1.3.1 Ecuaciones de las concatenaciones de flujo en varia - bles q, d, o 13

1.3.2 Ecuaciones de voltaje en variables q, d, o..... 16

1.3.3 Ecuaciones del torque electromagnético 21

1.3.4 Ecuaciones del torque electromecánico 21

1.4 Estado Estable 22

1.4.1 Ecuaciones de Voltaje en Estado Estable 29

1.5 Ecuaciones del Modelo Matemático 31

1.5.1 Ecuaciones diferenciales de la Máquina de Inducción .. 31

1.5.2 Ecuaciones de la máquina en Por Unidad 35

1.6 Saturación del núcleo 39

1.6.1 Curva de Magnetización 39

1.6.2 Ecuaciones de la máquina con saturación incluída 40

Pág.

CAPITULO II: OPERACION ASIMETRICA, FALLAS Y FUNCIONAMIENTO DE LA MAQUINA DE INDUCCION CON ALIMENTACION MONOFASICA

2.1 Operación Asimétrica 45

2.1.1 Voltajes desbalanceados 46

2.1.2 Resistencias Rotóricas Desiguales 47

2.1.3 Voltajes Desbalanceados y Resistencia Rotóricas Desiguales 48

2.2 Fallas 49

2.3 Funcionamiento de la Máquina Trifásica con alimentación monofásica 50

CAPITULO III: PRUEBAS DE LABORATORIO

3.1 Pruebas de laboratorio para obtener los oscilogramas de corriente, voltaje y velocidad durante los transitorios 55

3.1.1 Arranque con voltajes desbalanceados 57

3.1.2 Arranque con resistencias rotóricas desiguales 60

3.1.3 Arranque con resistencias rotóricas desiguales y voltajes desbalanceados 64

3.1.4 Falla Fase-Tierra 67

3.1.5 Falla de Dos Fases a Tierra 69

3.1.6 Falla trifásica cuando existen resistencias rotóricas iguales 71

3.1.7 Arranque con alimentación monofásica usando un condensador convertidor de fase 75

Pág.

CAPITULO IV: SIMULACION MATEMATICA

4.1 Ecuaciones para operación asimétrica 80

4.1.1 Voltajes balanceados 81

4.1.2 Voltajes desbalanceados 83

4.1.3 Resistencias rotóricas desiguales 86

4.1.4 Voltajes desbalanceados y resistencias rotóricas desiguales 89

4.1.5 Fallas 89

4.1.6 Alimentación monofásica 94

4.2 Condiciones iniciales 97

4.3 Descripción del método de solución 98

CAPITULO V: RESULTADOS OBTENIDOS Y COMPARACIONES

5.1 Resultados obtenidos en la simulación y comparaciones con los resultados experimentales 104

5.1.1 Estado Estable 105

5.1.2 Arranque con alimentación trifásica balanceada 121

5.1.3 Arranque con voltajes desbalanceados 130

5.1.4 Arranque con resistencias rotóricas desiguales 145

5.1.5 Arranque con voltajes y resistencias rotóricas desbalanceadas 157

5.1.6 Falla Fase-Tierra 171

5.1.7 Falla de dos Fases Tierra 184

5.1.8 Falla trifásica 202

5.1.9 Arranque con Alimentación Monofásica..... 214

5.2 Conclusiones y recomendaciones 227

Pág.

5.2.1 Conclusiones 227

5.2.2 Recomendaciones 229

5.3 Restricciones 231

ANEXO 1: PARAMETROS DE LA MAQUINA DE INDUCCION.

ANEXO 2: CALCULO DEL CONDENSADOR OPTIMO PARA ALIMENTACION MONOFASICA.

ANEXO 3: EQUIPO UTILIZADO.

ANEXO 4: MANUAL DE USO DE LOS PROGRAMAS.

ANEXO 5: LISTADO DE PROGRAMAS.

ANEXO 6: DIAGRAMAS DE FLUJO.

B I B L I O G R A F I A

I N T R O D U C C I O N

Las máquinas de inducción son muy utilizadas en muchos sectores; gracias a las innumerables ventajas que brindan, en múltiples aspectos, tienen una gran acogida en la industria por ejemplo, en diversos tipos de maquinarias, e inclusive en múltiples aparatos domésticos. Es por esta razón que se hace necesario su estudio en todas las formas de funcionamiento que pueda tener, ya que siendo su utilización tan común, en la práctica pueden ocurrir innumerables formas de funcionamiento, ya sea normal como anormal.

El comportamiento transitorio de la máquina de inducción es importante para muchos casos, como pueden ser: para diseñar protecciones, para escoger elementos electrónicos de control, actualmente muy usados para el control de estas máquinas, para estudiar la influencia que tiene sobre otros equipos conectados a la misma línea, especialmente los equipos electrónicos tienen muchos problemas debido a los fuertes transitorios que ocurren en las máquinas de inducción.

En el presente trabajo se estudian muchos casos que ocasionalmente pueden suceder, ya sean balanceados o no. Así, se considera casos de arranque y de estado estable en condiciones simétricas y asimétricas. Las condiciones asimétricas escogidas son las más comunes: voltajes aplicados desbalanceados, resistencias rotóricas desiguales y la combinación de los dos anteriores. Otro caso muy común de asimetría es la desconexión y reconexión de fases, que no se considera ya que han sido tratadas ampliamente en la Ref. 4. Se consideran también algunos tipos de fallas: Fase-Tierra, 2 Fases-Tierra, Falla Trifásica.

Además se presenta la simulación de la máquina trifásica alimentada con voltaje monofásico. Este tipo de funcionamiento se presenta como alternativa al uso de máquinas monofásicas, para zonas que carecen de alimentación trifásica, ya que los motores trifásicos son en todo sentido superiores a los monofásicos.

El modelo desarrollado consiste de un programa digital que resuelve las ecuaciones diferenciales que describen el funcionamiento de la máquina de inducción; los parámetros de la máquina y los voltajes aplicados constituyen las variables de entrada, obteniéndose como variables de salida corrientes, torque y velocidad, estos resultados son almacenados para luego ser graficados, y estos gráficos se comparan con las fotografías obtenidas de las pruebas de laboratorio. De esta manera, el programa ha sido desarrollado con la teoría de ejes arbitrarios de referencia q d 0, y se obtienen como resultados las variables en todas las fases y también en los ejes q y d, de forma que se tiene graficadas todas las variables de la máquina a la vez, pudiéndose analizar en muy buena forma los transitorios obtenidos. Además, en la mayoría de los ejemplos realizados, la simulación abarca todo el período transitorio, pudiéndose verificar a cabalidad la validez del modelo en todos los casos.

Adicionalmente en el modelo se ha introducido el fenómeno de la saturación y también se ha desarrollado un subprograma que permite calcular los condensadores adecuados para alimentación monofásica.

C A P I T U L O I

LA MAQUINA DE INDUCCION

1.1 CONSIDERACIONES BASICAS PARA EL ANALISIS (1, 3, 4, 5)

La máquina de inducción simétrica está definida como una máquina polifásica con las siguientes características ideales:

1) Entrehierro uniforme.

2) Circuito magnético lineal.

3) Devanados del estator idénticos, distribuídos de forma que produzcan una onda de f.m.m. sinusoidal en el espacio.

4) Bobinas o barras del rotor dispuestas de forma que produzcan una onda de f.m.m. en el rotor sinusoidal y que tenga el mismo número de polos que la del estator.

Los fenómenos que introducen no linealidades y que han sido despreciados en el desarrollo del modelo son:

1) Circuito magnético no lineal: se desprecia el efecto de saturación, histéresis y corrientes de Eddy.

2) Cambios en las resistencias debido a variaciones de temperatura y frecuencia.

3) Se desprecia el contenido de armónicos de la onda de f.m.m.

1.2 REPRESENTACION MATEMATICA DE LA MAQUINA DE INDUCCION (1, 3, 4, 5)

En el presente desarrollo se representa, por facilidad, una máquina trifásica de 2 polos. Los devanados del estator se hallan simétricamente desfasados 120° eléctricos entre sí, y de igual manera los devanados o barras del rotor, Fig. 1.1. (El desplazamiento angular entre los ejes del estator y rotor es θr; los subíndices a, b y c representan las fases de la máquina y los subíndices s y r, estator y rotor respectivamente).

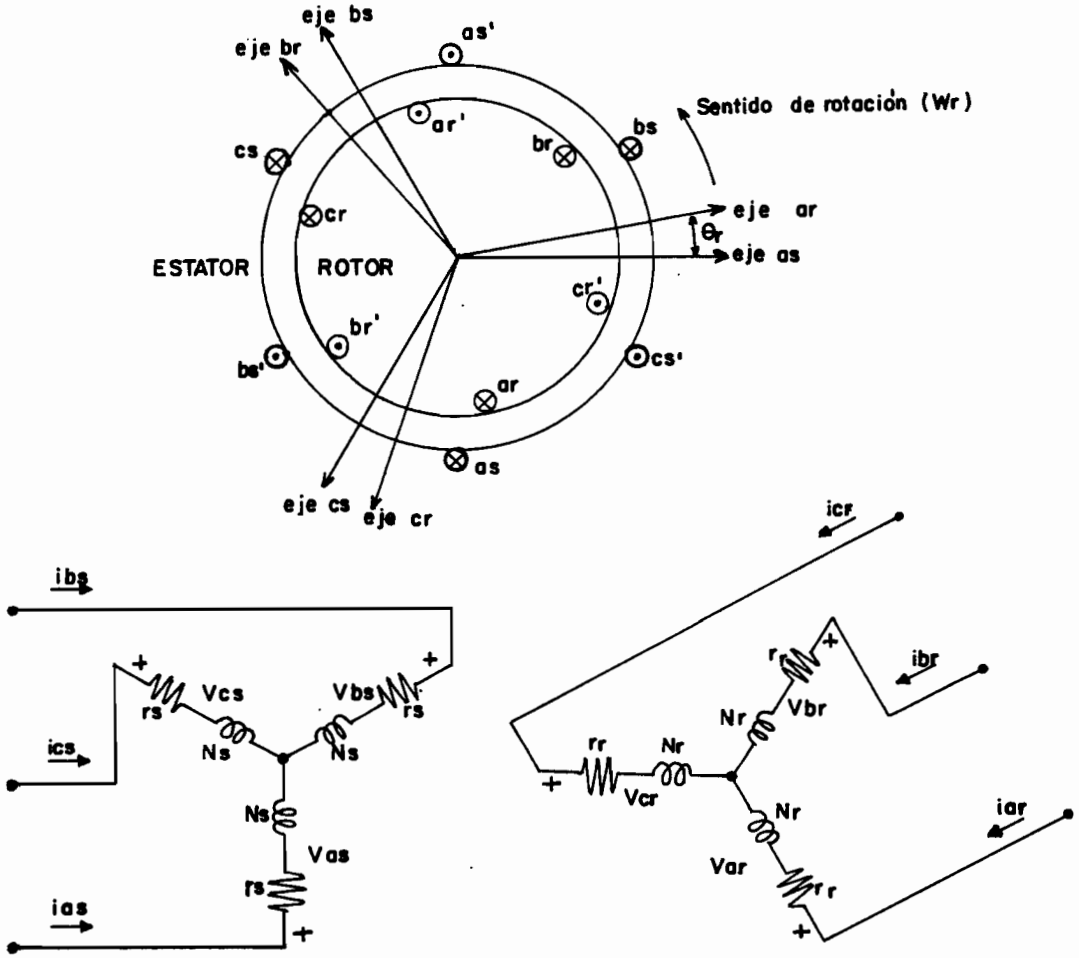


FIG. 1.1 Máquina Simétrica Trifásica de Dos Polos.

Los devanados del estator son idénticos: tienen igual número de vueltas Ns, igual resistencia r_s, igual inductancia de dispersión Lls e igual inductancia propia Ls. En igual forma, los devanados equivalentes de rotor son idénticos, tienen igual: número de vueltas Nr, resistencia r_r, inductancia de dispersión Llr e inductancia propia Lr.

1.2.1 Ecuaciones de voltaje

Para cada una de las fases la ecuación de voltaje es:

$$v = r \cdot i + p \cdot \lambda \qquad (1.1)$$

donde:
- v = voltaje por fase
- r = resistencia total por fase de cada bobina
- i = corriente por fase
- p = operador $\frac{d}{dt}$
- λ = concatenaciones de flujo totales de una bobina

Expresando en forma matricial, para los devanados del estator y del rotor los voltajes fase-neutro son:

$$\begin{vmatrix} v_{abc_s} \\ \hline v_{abc_r} \end{vmatrix} = \left|\begin{array}{c|c} r_s & 0 \\ \hline 0 & r_r \end{array}\right| \begin{vmatrix} i_{abc_s} \\ \hline i_{abc_r} \end{vmatrix} + p \begin{vmatrix} \lambda_{abc_s} \\ \hline \lambda_{abc_r} \end{vmatrix} \qquad (1.2)$$

y cada submatriz es:

$$\left|v_{abc_s}\right| = \begin{vmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{vmatrix} \quad ; \quad \left|v_{abc_r}\right| = \begin{vmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{vmatrix}$$

$$\left| r_s \right| = \begin{vmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{vmatrix} \quad ; \quad \left|r_r\right| = \begin{vmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{vmatrix} \qquad (1.3)$$

$$\left|i_{abc_s}\right| = \begin{vmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{vmatrix} \quad ; \quad \left|i_{abc_r}\right| = \begin{vmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{vmatrix}$$

$$\left|\lambda_{abc_s}\right| \quad \begin{vmatrix} \lambda_{a_s} \\ \lambda_{b_s} \\ \lambda_{c_s} \end{vmatrix} \quad ; \quad \left|\lambda_{abc_r}\right| \quad \begin{vmatrix} \lambda_{a_r} \\ \lambda_{b_r} \\ \lambda_{c_r} \end{vmatrix}$$

Las concatenaciones de flujo se definen de la siguiente forma:

$$\lambda = L \cdot i \qquad (1.4)$$

donde L es la inductancia de la bobina.

Desarrollando para expresar en forma matricial se obtiene:

$$\left|\begin{array}{c|c|c} \lambda_{abcs} & & \\ \hline \lambda_{abcr} & & \end{array}\right| = \left|\begin{array}{c|c} L_S & L_{SR} \\ \hline L_{SR}^T & L_R \end{array}\right| \left|\begin{array}{c|c|c} i_{abcs} & & \\ \hline i_{abcr} & & \end{array}\right| \qquad (1.5)$$

donde:

$$\left| L_S \right| = \left|\begin{array}{ccc} L_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ss} \end{array}\right|$$

$$\left| L_R \right| = \left|\begin{array}{ccc} L_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & L_{rr} \end{array}\right| \qquad (1.6)$$

siendo $L_{ss} = L_s - L_{sm}$

$L_{rr} = L_r - L_{rm}$

y

L_s = inductancia propia de un devanado del estator.

L_r = inductancia propia de un devanado del rotor.

L_{sm} = inductancia mutua entre fases del estator.

L_{rm} = inductancia mutua entre fases del rotor.

La submatriz de inductancias mutuas entre devanados del rotor y estator $[L_{SR}]$ tiene la siguiente forma:

$$[L_{SR}] = L_{sr} \begin{vmatrix} \cos\theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta_r \end{vmatrix} \quad (1.7)$$

L_{sr} = amplitud del acoplamiento mutuo entre los devanados del estator y del rotor.

θ_r = desplazamiento angular entre ejes del estator y del rotor.

La inductancia mutua entre cualquier devanado del estator con otro del rotor varía con el coseno del ángulo θ_r, entre sus ejes.

1.2.2 Ecuaciones de la Máquina referidas al estator

Las ecuaciones de la máquina son referidas al estator debido a que la medición de los parámetros de ésta, se los hace con respecto a los devanados del estator.

Para referir las ecuaciones del rotor al estator, se multiplica por la relación de espiras, en forma similar a lo que se hace en un transformador.

Así se tiene:

$$[i'_{abcr}] = \frac{N_r}{N_s} [i_{abcr}]$$

$$[v'_{abcr}] = \frac{N_s}{N_r} [v_{abcr}]$$

$$[r'_r] = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 [r_r] \quad (1.8)$$

$$[\lambda'_{abcr}] = \frac{N_s}{N_r}[\lambda_{abcr}]$$

$$[L'_r] = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 [L_R]$$

(Los apóstrofes indican que las cantidades afectadas están referidas al estator).

Y aplicando esta transformación a la ecuación (1.2) se obtiene:

$$\left|\begin{array}{c} [v_{abcs}] \\ \hline [v'_{abcr}] \end{array}\right| = \left|\begin{array}{c|c} [r_s] + p[L_s] & p[L_{MS}] \\ \hline p[L_{MS}]^T & [r'_r] + p[L'_r] \end{array}\right| \left|\begin{array}{c} [i_{abcs}] \\ \hline [i'_{abcr}] \end{array}\right| \quad (1.9)$$

en donde:

$$[L_{MS}] = \frac{N_s}{N_r}[L_{SR}] \quad (1.10)$$

1.2.3 Ecuación del torque electromagnético

La ecuación del torque electromagnético se obtiene a partir de la energía instantánea almacenada en el campo magnético:

$$W = \frac{1}{2}[i]^T [L][i] \quad (1.11)$$

en donde:

$$[i] = \left|\begin{array}{c} [i_{abcs}] \\ \hline [i'_{abcr}] \end{array}\right| ; [i]^T = \left|[i_{abcs}]^T \,\vdots\, [i'_{abcr}]^T\right| \quad (1.12)$$

y

$$[L] = \left| \begin{array}{c|c} [L_S] & [L_{MS}] \\ \hline [L_{MS}]^T & [L'_r] \end{array} \right| \qquad (1.13)$$

De la definición de torque electromagnético:

$$Te = \frac{P}{2} \cdot \frac{\partial W}{\partial \theta_r} \qquad (1.14)$$

y siendo P = número de polos de la máquina

se obtiene, reemplazando a la ecuación (1.11) en (1.14):

$$Te = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{P}{2} \right) \cdot [i]^T \left| \frac{\partial}{\partial \theta_r} L \right| [i] \qquad (1.15)$$

Una vez desarrollada esta ecuación se llega a:

$$Te = - \left(\frac{P}{2} \right) L_{ms} \{[i_{as}(i'_{ar} - \frac{1}{2} i'_{br} - \frac{1}{2} i'_{cr}) + i_{bs}(i'_{br} - \frac{1}{2} i'_{ar} - \frac{1}{2} i'_{cr}) +$$

$$i_{cs}(i'_{cr} - \frac{1}{2} i'_{br} - \frac{1}{2} i'_{ar})] \operatorname{sen} \theta_r + \frac{\sqrt{3}}{2} [i_{as}(i'_{br} - i'_{cr}) +$$

$$+ i_{bs}(i'_{cr} - i'_{ar}) + i_{cs}(i'_{ar} - i'_{br})] \cos \theta_r \} \qquad (1.16)$$

siendo:

$$L_{ms} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr} \qquad (1.17)$$

1.3 TRANSFORMACION DE LAS ECUACIONES DE LA MAQUINA DE VARIABLES DE FASE (a, b, c) A UN SISTEMA DE EJES ARBITRARIOS DE REFERENCIA (q, d, o) [1, 3, 4, 5]

Como se puede observar en las ecuaciones desarrolladas anterioremente , existen algunos coeficientes que son variables en el tiempo; éstos son, las inductancias mutuas entre estator y rotor, que dependen de la posición angular del rotor (θ_r), lo cual complica mucho el análisis. Para solucionar esta dificultad se refiere todas las variables al sistema de ejes arbitrarios de referencia, que gira a una velocidad arbitraria ω, mientras que los ejes del estator están fijos y los del rotor giran a una velocidad ω_r.

Las ecuaciones de transformación son expresiones que se obtienen a partir de las relaciones trigonométricas existentes entre los grupos de ejes de estator y rotor con el grupo de ejes ortogonales del sistema de referencia arbitrario. Esto se puede observar en la fig. 1.2.

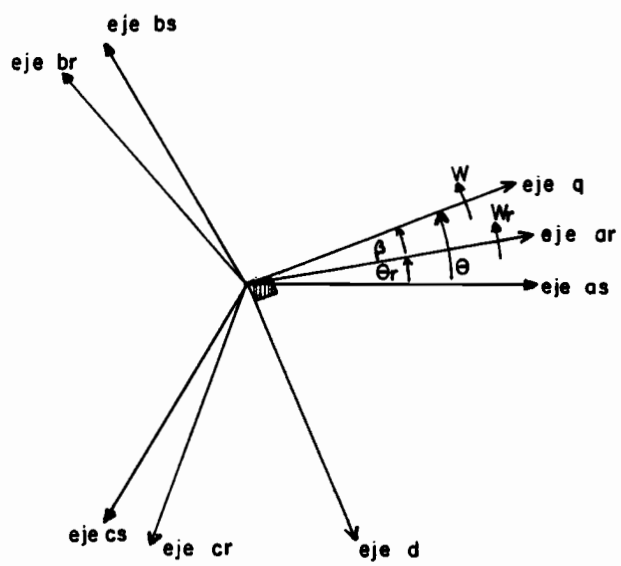


FIG. 1.2 Ejes de una Máquina Simétrica Trifásica de Dos Polos.

Las ecuaciones generalizadas para la transformación son las siguientes:

$$f_{qs} = \frac{2}{3}\left| f_{as}\cos\theta + f_{bs}\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + f_{cs}\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right|$$

$$f_{ds} = \frac{2}{3}\left| f_{as}\,\text{sen}\,\theta + f_{bs}\,\text{sen}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + f_{cs}\,\text{sen}\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right|$$

$$f_{os} = \frac{1}{3}\left| f_{as} + f_{bs} + f_{cs}\right|$$

$$f'_{qr} = \frac{2}{3}\left| f'_{as}\cos\beta + f'_{br}\cos\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) + f'_{cr}\cos\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right)\right|$$

$$f'_{dr} = \frac{2}{3}\left| f'_{ar}\,\text{sen}\,\beta + f'_{br}\,\text{sen}\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) + f'_{cr}\,\text{sen}\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right)\right|$$

$$f'_{or} = \frac{1}{3}\left| f'_{ar} + f'_{br} + f'_{cr}\right| \qquad (1.18)$$

en donde: f = es una variable que puede representar voltajes, corrientes o concatenaciones de flujo.

θ = es el ángulo de desplazamiento del sistema de referencia arbitrario.

además:

$$\theta(t) = \int_0^t \omega.dt + \theta(o)$$

$$\theta_r(t) = \int_0^t \omega_r\, dt + \theta_r(o)$$

$$y \quad \beta = \theta - \theta_r \qquad (1.19)$$

Se puede notar también que las ecuaciones están afectadas por el factor $\frac{2}{3}$, que ha sido introducido para mantener invariante la potencia, ya que la transformación se hace de un sistema trifásico (a, b, c) a un sistema bifásico (q, d). (6). Las variables f_{os} y f'_{or} se introducen después ya que, en general, se necesitan 3 variables para ser consistente la transformación.

El eje cero tiene la particularidad de que las variables referidas a éste no se ven influenciadas por la velocidad a la que gira el sistema arbitrario de referencia; esto se debe a que las variables en este eje no están asociadas a la transformación. Y, lo más importante es que las variables del eje 0 no están relacionadas con los de los ejes q y d, y sólo se presentan en el lugar donde son originadas.

Las variables en eje 0 aparecen, de acuerdo a su definición, cuando existen condiciones desbalanceadas o asimétricas y no influirán en los demás ejes o en otros lugares; así, cuando aparecen desbalances en el rotor, sólo habrán variables de eje 0 en el rotor, y de manera similar si esto ocurre en el estator, y no influirán en absoluto a las variables de los ejes q y d. (5).

Además, es importante notar que para el caso de sistemas que tienen conexión de 3 alambres, esto es, sin conexión del neutro, las componentes de eje 0 desaparecen, incluso para sistemas desbalanceados. (1).

Expresando en forma matricial, las ecuaciones de transformación serán:

$$\begin{vmatrix} |f_{qdos}| \\ \hline |f'_{qdor}| \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} |T_s| & |0| \\ \hline |0| & |T_r| \end{vmatrix} \begin{vmatrix} |f_{abcs}| \\ \hline |f'_{abcr}| \end{vmatrix} \tag{1.20}$$

en donde:

$$|T_s| = \frac{2}{3} \begin{vmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \operatorname{sen}\theta & \operatorname{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \operatorname{sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{vmatrix} \tag{1.21}$$

$$|T_r| = \frac{2}{3} \begin{vmatrix} \cos\beta & \cos(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\beta + \frac{2\pi}{3}) \\ \operatorname{sen}\beta & \operatorname{sen}(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \operatorname{sen}(\beta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{vmatrix} \tag{1.22}$$

Para obtener las variables originales se tiene las ecuaciones de la transformación inversa, y son de la siguiente forma:

$$\begin{vmatrix} |f_{abcs}| \\ \hline |f'_{abcr}| \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} |T_s|^{-1} & |0| \\ \hline |0| & |T_r|^{-1} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} |f_{qdos}| \\ \hline |f'_{qdor}| \end{vmatrix}$$

en donde:

$$|\,T_s\,|^{-1} = \begin{vmatrix} \cos\theta & \operatorname{sen}\theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \operatorname{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \operatorname{sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{vmatrix} \qquad (1.24)$$

$$|\,T_r\,|^{-1} = \begin{vmatrix} \cos\beta & \operatorname{sen}\beta & 1 \\ \cos(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \operatorname{sen}(\beta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\beta + \frac{2\pi}{3}) & \operatorname{sen}(\beta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{vmatrix} \qquad (1.25)$$

1.3.1 Ecuaciones de las concatenaciones de flujo en variables q d o

Si a las ecuaciones de las concatenaciones de flujo (1.5), expresadas en forma matricial, se las refiere al estator, y aplicando la transformación directa a ejes q d o, se obtiene lo siguiente,

definiendo:

$$[\lambda] \begin{vmatrix} [\lambda_{abcs}] \\ \text{-----} \\ [\lambda'_{abcr}] \end{vmatrix} \quad ; \quad [\lambda_{qdo}] = \begin{vmatrix} [\lambda_{qdos}] \\ \text{-----} \\ [\lambda'_{qdor}] \end{vmatrix}$$

$$[i] = \begin{vmatrix} [i_{abcs}] \\ \hline [i'_{abcr}] \end{vmatrix} \quad ; \quad [i_{qdo}] = \begin{vmatrix} [i_{qdos}] \\ \hline [i'_{qdor}] \end{vmatrix}$$

$$[L] = \left|\begin{array}{c|c} [L_S] & [L_{SR}] \\ \hline [L_{SR}]^T & [L'_r] \end{array}\right| \qquad (1.26)$$

$$[T] = \left|\begin{array}{c|c} [T_s] & [0] \\ \hline [0] & [T_r] \end{array}\right| \quad ; \quad [T]^{-1} = \left|\begin{array}{c|c} [T_s]^{-1} & [0] \\ \hline [0] & [T_r]^{-1} \end{array}\right|$$

(los subíndices q d o indican que las variables han sido referidas al sistema de ejes arbitrarios de referencia).

Si la ecuación (1.5) se la escribe de la siguiente forma, que representan valores en variables a b c,

$$[\lambda] = [L]\,[i] \qquad (1.27)$$

luego aplicando la transformación directa:

$$[T]\,[\lambda] = [T]\,[L]\,[i] \qquad (1.28)$$

y a continuación utilizando el artificio matemático de multiplicar el 2do. miembro de la ecuación por $[T]\,[T]^{-1}$ resulta,

$$[T]\,[\lambda] = [T]\,[L]\,[T]^{-1}\,[T]\,[i] \tag{1.29}$$

que luego de realizar operaciones se obtiene el siguiente resultado, ya en variables q d o,

$$[\lambda_{qdo}] = [L_{qdo}]\,[i_{qdo}] \tag{1.30}$$

donde:

$$[\lambda_{qdo}] = [T]\,[\lambda] \tag{1.31}$$

$$[i_{qdo}] = [T]\,[i] \tag{1.32}$$

$$[L_{qdo}] = [T]\,[L]\,[T]^{-1} \tag{1.33}$$

Desarrollando la ecuación (1.33):

$$[L_{qdo}] = \left|\begin{array}{c|c} [T_s]\,[L_s]\quad [T_s]^{-1} & [T_s][L_{MS}][T_r]^{-1} \\ \hline [T_r]\,[L_{MS}]^{T}\,[T_s]^{-1} & [T_r][L'_r]\,[T_r]^{-1} \end{array}\right| \tag{1.34}$$

para finalmente obtener:

$$[L_{qdo}] = \left|\begin{array}{ccc|ccc} L_{ss} & 0 & 0 & M & 0 & 0 \\ 0 & L_{ss} & 0 & 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & L_{ss} & 0 & 0 & 0 \\ \hline M & 0 & 0 & L'_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & 0 & L'_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L'_{rr} \end{array}\right| \tag{1.35}$$

en donde:

$$M = \frac{3}{2} L_{ms}$$

y como se había definido $L_{ms} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr}$; entonces M representa la inductancia de magnetización de la máquina.

Se puede así, descomponer las inductancias L_{ss} y L'_{rr} en sus componentes de dispersión y de magnetización:

$$\begin{aligned} L_{ss} &= L_{ls} + M \\ L'_{rr} &= L'_{lr} + M \end{aligned} \qquad (1.36)$$

Como se puede observar, el transformar las ecuaciones de la máquina al sistema de ejes de referencia arbitrario, ec. (1.35), se ha conseguido eliminar la dependencia que tenían las inductancias mutuas entre rotor y estator, de la posición del rotor, y por lo tanto del tiempo; nótese además que las inductancias propias no cambian de forma ni de valor.

1.3.2 Ecuaciones de voltaje en variables q d o

Partiendo de las ecuaciones de voltaje, expresadas en forma matricial, ec. (1.2), y siguiendo un procedimiento similar al aplicado a las ecuaciones de concatenaciones de flujo se tiene:

definiendo:

$$[R] = \left|\begin{array}{c|c} [r_s] & [0] \\ \hline [0] & [r'_r] \end{array}\right|$$

$$[v] = \left| \begin{array}{c} [v_{abcs}] \\ \hline [v'_{abcr}] \end{array} \right| \quad ; \quad [v_{qdo}] = \left| \begin{array}{c} [v_{qdos}] \\ \hline [v'_{qdor}] \end{array} \right| \tag{1.37}$$

la ecuación (1.2) será:

$$[v] = [R]\,[i] + p[\lambda] \tag{1.38}$$

$$[T]\,[v] = [T][R][i] + [T]\;p[\lambda] \tag{1.39}$$

$$[T]\,[v] = [T][R][T]^{-1}\,[T][i] + [T]\;p\{[T]^{-1}\,[T]\,[\lambda]\} \tag{1.40}$$

en variables q d o se obtiene:

$$[v_{qdo}] = [T]\,[R]\,[T]^{-1}\,[i_{qdo}] + [T]\;p\{[T]^{-1}[\lambda_{qdo}]\} \tag{1.41}$$

además

$$[T]\,[R]\,[T]^{-1} = [R] \tag{1.42}$$

y como $[T]^{-1}$ y $[\lambda_{qdo}]$ son funciones del tiempo, el operador p les afecta a ambas matrices; entonces se tiene:

$$[v_{qdo}] = [R][i_{qdo}] + [T]\;p[T]^{-1}[\lambda_{qdo}] + [T][T]^{-1}\;p[\lambda_{qdo}] \tag{1.43}$$

considerando que $[\lambda_{qdo}] = [L_{qdo}][i_{qdo}]$ y que $[H] = [T]\;p[T]^{-1}$ se llega a:

$$[v_{qdo}] = \{[R] + [H]\,[L_{qdo}] + [L_{qdo}]\;p\}\,[i_{qdo}] \tag{1.44}$$

desarrollando:

$$[H] = [T]\, p[T]^{-1} = \left|\begin{array}{ccc:ccc} 0 & p\theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -p\theta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hdashline 0 & 0 & 0 & 0 & p\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -p\beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}\right| \qquad (1.45)$$

Reemplazando los distintos resultados, obtenidos anteriormente, en la ecuación (1.44), se llega a las ecuaciones generales de voltaje en el sistema de ejes arbitrarios de referencia que describen el comportamiento de la máquina:

$$\left|\begin{array}{c} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{os} \\ \hdashline v'_{qr} \\ v'_{dr} \\ v'_{or} \end{array}\right| = \left|\begin{array}{ccc:ccc} (r_s+L_{ss}\,p) & L_{ss}p\theta & 0 & Mp & Mp\theta & 0 \\ -L_{ss}p\theta & (r_s+L_{ss}\,p) & 0 & -Mp\theta & Mp & 0 \\ 0 & 0 & r_s & 0 & 0 & 0 \\ \hdashline Mp & Mp\beta & 0 & (r'_r+L'_{rr}\,p) & L'_{rr}p\beta & 0 \\ -Mp\beta & Mp & 0 & -L'_{rr}\,p\beta & (r'_r+L'_{rr}p) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r'_r \end{array}\right| \left|\begin{array}{c} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{os} \\ \hdashline i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{or} \end{array}\right| \qquad (1.46)$$

Expresando las ecuaciones de voltaje en función de las concatenaciones de flujo totales, [ec. (1.46)], se obtiene:

$$
\begin{aligned}
v_{qs} &= r_s\, i_{qs} + p\,\lambda_{qs} + \lambda_{ds}\, p\theta \\
v_{ds} &= r_s\, i_{ds} + p\,\lambda_{ds} - \lambda_{qs}\, p\theta \\
v_{os} &= r_s\, i_{os} + p\,\lambda_{os} \\
v'_{qr} &= r'_r\, i'_{qr} + p\,\lambda'_{qr} + \lambda'_{dr}\, p\beta \\
v'_{dr} &= r'_r\, i'_{dr} + p\,\lambda'_{dr} - \lambda'_{qr}\, p\beta \\
v'_{or} &= r'_r\, i'_{or} + p\,\lambda'_{or}
\end{aligned}
\qquad (1.47)
$$

Las concatenaciones de flujo totales son:

$$
\begin{aligned}
\lambda_{qs} &= L_{ss}\, i_{qs} + M\, i'_{qr} \\
\lambda_{ds} &= L_{ss}\, i_{ds} + M\, i'_{dr} \\
\lambda_{os} &= L_{ss}\, i_{os} \\
\lambda'_{qr} &= L'_{rr}\, i'_{qr} + M\, i_{qs} \\
\lambda'_{dr} &= L'_{rr}\, i'_{dr} + M\, i_{ds} \\
\lambda'_{or} &= L'_{rr}\, i'_{or}
\end{aligned}
\qquad (1.48)
$$

y reemplazando los valores de las ec. (1.36) se llega a:

$$
\begin{aligned}
\lambda_{qs} &= L_{ls}\, i_{qs} + M\,(i_{qs} + i'_{qr}) \\
\lambda_{ds} &= L_{ls}\, i_{ds} + M\,(i_{ds} + i'_{dr}) \\
\lambda_{os} &= L_{ss}\, i_{os} \\
\lambda'_{qr} &= L'_{lr}\, i'_{qr} + M\,(i_{qs} + i'_{qr}) \\
\lambda'_{dr} &= L'_{lr}\, i'_{dr} + M\,(i_{ds} + i'_{dr}) \\
\lambda'_{or} &= L'_{rr}\, i'_{or}
\end{aligned}
\qquad (1.49)
$$

De las ecuaciones de voltaje (1.47) se puede obtener los circuitos equivalentes que se indican en la figura 1.3.

Los términos $\lambda_{qs}p\theta$, $\lambda_{ds}p\theta$, $\lambda'_{qr}p\beta$; $\lambda'_{dr}p\beta$ representan los voltajes de velocidad, ya que $p\theta = \omega$ y es la velocidad de giro del sistema de ejes arbitrarios, y $p\beta = \omega - \omega_r$ y es la velocidad relativa entre el sistema de ejes arbitrarios y el rotor.

Los términos $p\,\lambda_{qs}$, $p\,\lambda_{ds}$, $p\,\lambda'_{qr}$, $p\,\lambda'_{dr}$ representan los voltajes de transformación. (6)

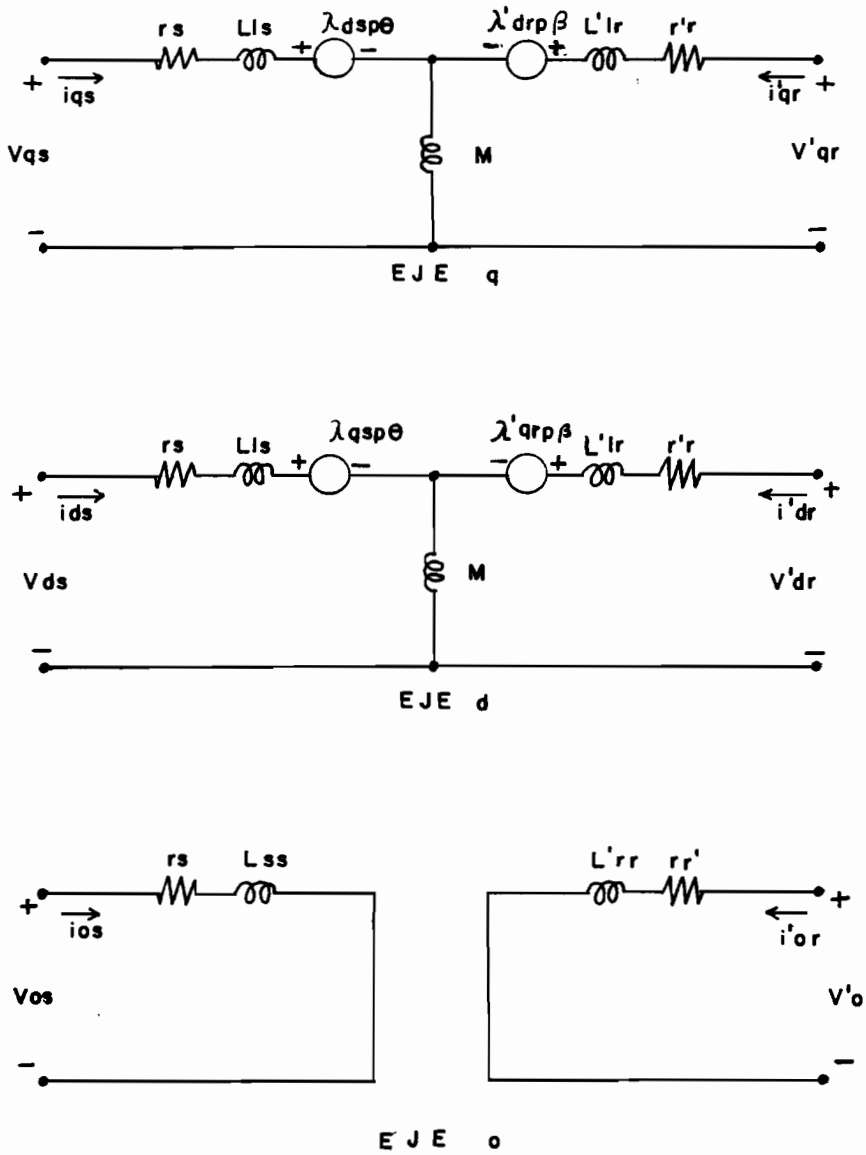


FIG. 1.3 Circuitos Equivalentes por Fase de una Máquina Simétrica Trifásica de 2 Polos Referida a un Sistema de Ejes Arbitrarios.

Se puede observar tanto en las ecuaciones de voltaje, como en el circuito equivalente, el desacoplamiento existente entre las variables del eje 0 con las de los ejes q y d, y además entre rotor y estator. En cambio, en los ejes q y d si existe acoplamiento, además del existente entre rotor y estator.

1.3.3 Ecuaciones del Torque Electromagnético

Aplicando las ecuaciones de transformación a la ecuación (1.16) se obtiene, en variables q d o:

$$Te = \frac{3}{2}\left(\frac{P}{2}\right) M \left(i_{qs}.i'_{dr} - i_{ds}.i'_{qr}\right) \qquad (1.50)$$

y en función de las concatenaciones de flujo:

$$Te = \frac{3}{2}\left(\frac{m}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)\left(\lambda'_{qr}\, i'_{dr} - \lambda'_{dr}\, i'_{qr}\right) \qquad (1.51)$$

en donde m = número de fases.

1.3.4 Ecuación del Torque Electromecánico

La ecuación (1.52) define el comportamiento electromecánico del motor de inducción:

$$Te = J\, p\, \omega_r + D\, \omega_r + T_m \qquad (1.52)$$

donde:

Te = torque electromagnético

$J\, p\, \omega_r$ = torque de aceleración

$D\,\omega_r$ = torque de amortiguamiento

T_m = torque de carga

además, J = momento de inercia del motor

y D = coeficiente angular de fricción viscosa.

1.4 ESTADO ESTABLE (3, 4, 5)

La máquina de inducción en estado estable opera bajo condiciones balanceadas. Así, las corrientes del estator producen un campo magnético que gira en el entrehierro a la velocidad sincrónica ω_e; el rotor gira a la velocidad ω_r (distinta de ω_e), induciéndose corrientes que producen un campo magnético que gira a la velocidad $(\omega_e - \omega_r)$ con respecto al rotor. Además, debido a condiciones balanceadas, todas las variables aparecen como cantidades sinusoidales. De esta forma, las variables del estator serán sinusoides de frecuencia ω_e y las variables del rotor, sinusoides de frecuencia $(\omega_e - \omega_r)$. Al transformar estas variables al sistema de ejes arbitrarios de referencia, que gira a la velocidad ω con respecto al estator y a la velocidad $(\omega - \omega_r)$ con respecto al rotor, las variables del estator tendrán la frecuencia $(\omega_e - \omega)$, y los del rotor la frecuencia $(\omega_e - \omega_r) - (\omega - \omega_r) = \omega_e - \omega$.

Se tiene así, que en estado estable tanto las variables del estator como las del rotor, referidas al sistema de ejes arbitrarios de referencia, son sinusoides de frecuencia $(\omega_e - \omega)$ para todos los sistemas de referencia, excepto para el caso en que gira a la velocidad sincrónica ω_e, en este caso todas las variables aparecen como cantidades constantes.

Seguidamente se procede a demostrarlo:

$$\begin{aligned} f_{as} &= F_s \cos \theta_e \\ f_{bs} &= F_s \cos (\theta_e - \tfrac{2\pi}{3}) \\ f_{cs} &= F_s \cos (\theta_e + \tfrac{2\pi}{3}) \end{aligned} \qquad (1.53)$$

$$\begin{aligned} f'_{ar} &= F'_r \cos (\theta_e - \theta_r) \\ f'_{br} &= F'_r \cos (\theta_e - \theta_r - \tfrac{2\pi}{3}) \\ f'_{cr} &= F'_r \cos (\theta_e - \theta_r + \tfrac{2\pi}{3}) \end{aligned} \qquad (1.54)$$

donde: F_s = amplitud máxima de las variables f_{abcs}

F'_r = amplitud máxima de las variables f'_{abcr}

Los demás términos ya han sido definidos anteriormente.

Se podría agregar para este caso,

$$\begin{aligned} \theta_e &= \omega_e . t \\ \theta_r &= \omega_r . t \\ \theta &= \omega . t \end{aligned} \qquad (1.55)$$

Utilizando los valores de las ecuaciones (1.53) y (1.54) en las ecuaciones de transformación (1.18) se llega a las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} f_{qs} &= F_s \cos (\theta_e - \theta) \\ f_{ds} &= -F_s \operatorname{sen} (\theta_e - \theta) \\ f'_{qr} &= F'_r \cos (\theta_e - \theta) \\ f'_{dr} &= -F'_r \operatorname{sen} (\theta_e - \theta) \end{aligned} \qquad (1.56)$$

Las relaciones obtenidas anteriormente son verdaderas para cualquier sistema de referencia, y de éstas se usarán algunos casos particulares como son los siguientes:

1) El sistema de referencia fijo en estator: $\omega = 0$ y $\theta = 0$

$$
\begin{aligned}
f_{qs}^{\ s} &= F_s \cos \theta_e = F_s \cos \omega_e t \\
f_{ds}^{\ s} &= -F_s \operatorname{sen} \theta_e = -F_s \operatorname{sen} \omega_e t \\
f'_{qr}{}^{s} &= F'_r \cos \theta_e = F'_r \cos \omega_e t \\
f'_{dr}{}^{s} &= -F'_r \operatorname{sen} \theta_e = -F'_r \operatorname{sen} \omega_e t
\end{aligned}
\qquad (1.57)
$$

el superíndice "s" indica que el sistema de referencia está fijo en el estator, "r" indicaría fijo en el rotor y "e" que está girando a la velocidad sincrónica ω_e.

2) El sistema de referencia fijo en el rotor: $\omega = \omega_r$ y $\theta = \theta_r$

$$
\begin{aligned}
f_{qs}^{\ r} &= F_s \cos (\theta_e - \theta_r) = F_s \cos (\omega_e - \omega_r)t \\
f_{ds}^{\ r} &= -F_s \operatorname{sen} (\theta_e - \theta_r) = -F_s \operatorname{sen} (\omega_e - \omega_r)t \\
f'_{qr}{}^{r} &= F'_r \cos (\theta_e - \theta_r) = F'_r \cos(\omega_e - \omega_r)t \\
f'_{dr}{}^{r} &= -F'_r \operatorname{sen} (\theta_e - \theta_r) = -F'_r \operatorname{sen}(\omega_e - \omega_r)t
\end{aligned}
\qquad (1.58)
$$

3) El sistema de referencia gira a la velocidad sincrónica ω_e: $\omega = \omega_e$ y $\theta = \theta_e$

$$f_{qs}^{e} = F_s$$
$$f_{ds}^{e} = 0$$
$$f'_{qr}^{e} = F'_r$$
$$f'_{dr}^{e} = 0 \qquad (1.59)$$

Así, se comprueba lo afirmado anteriormente: cuando el sistema de ejes arbitrarios está fijo en el estator o en el rotor, las variables q d o son sinusoides de frecuencia ω_e o $(\omega_e - \omega_r)$ respectivamente, y cuando el sistema está girando a la velocidad sincrónica, las variables q d o son cantidades constantes.

Debido a que en estado estable tanto corrientes como voltajes son cantidades sinusoides, se representa a estas variables como fasores en lugar de dar sus valores instantáneos. (3, 5)

Así: $$f_{as} = R_e[F_s e^{j\theta_e}] = R_e[F_{\tilde{as}} e^{j\theta_e}]$$

en donde $F_{\tilde{as}} = F_s e^{j\theta_e(o)}$, pudiéndose escoger, por facilidad, $\theta_e(o)=0$, y

f = voltaje, corriente o concatenaciones de flujo

$\underset{\sim}{F}$ = fasor

F_s = magnitud del fasor

R_e = parte real

de esta forma, para cada una de las fases se tendrá:

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
BIBLIOTECA
002782
U. P. N.

$$
\begin{aligned}
f_{as} &= R_e [F_{\underset{\sim}{as}} e^{j\theta_e}] \\
f_{bs} &= R_e [F_{\underset{\sim}{bs}} e^{j\theta_e}] \\
f_{cs} &= R_e [F_{\underset{\sim}{cs}} e^{j\theta_e}] \\
f'_{ar} &= R_e [F'_{\underset{\sim}{ar}} e^{j\theta_e}] \\
f'_{br} &= Re [F'_{\underset{\sim}{br}} e^{j\theta_e}] \\
f'_{cr} &= Re [F'_{\underset{\sim}{cr}} e^{j\theta_e}]
\end{aligned} \qquad (1.60)
$$

En la máquina simétrica trifásica, los devanados tanto del estator como del rotor se encuentran desfasados 120 grados eléctricos entre sí, por lo que se puede tener las siguientes relaciones:

$$
\begin{aligned}
F_{\underset{\sim}{bs}} &= a^2 F_{\underset{\sim}{as}} \\
F_{\underset{\sim}{cs}} &= a F_{\underset{\sim}{as}} \\
F'_{\underset{\sim}{br}} &= a^2 F'_{\underset{\sim}{ar}} \\
F'_{\underset{\sim}{cr}} &= a F'_{\underset{\sim}{ar}}
\end{aligned} \qquad (1.61)
$$

en donde:

$$
a = e^{j\frac{2\P}{3}}
$$

$$
a^2 = e^{-j\frac{2\P}{3}}
$$

(se ha tomado como referencia la fase "a" y una secuencia de fases "abc", de acuerdo con la figura 1.1).

Aplicando las ecuaciones de transformación (1.18):

$$f_{qs} = \frac{2}{3}\left| f_{as} R_e e^{j\theta} + f_{bs} R_e e^{j(\theta - \frac{2\pi}{3})} + f_{cs} R_e e^{j(\theta + \frac{2\pi}{3})} \right|$$

$$f_{ds} = \frac{2}{3}\left| f_{as} R_e e^{j(\theta - \frac{\pi}{2})} + f_{bs} R_e e^{j(\theta - \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2})} + f_{cs} R_e e^{j(\theta + \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2})} \right|$$

$$f'_{qr} = \frac{2}{3}\left| f'_{ar} R_e e^{j\beta} + f'_{br} R_e e^{j(\beta - \frac{2\pi}{3})} + f'_{cr} R_e e^{j(\beta + \frac{2\pi}{3})} \right|$$

$$f'_{dr} = \frac{2}{3}\left| f'_{ar} R_e e^{j(\beta - \frac{\pi}{2})} + f'_{br} R_e e^{j(\beta - \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2})} + f'_{cr} R_e e^{j(\beta + \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2})} \right|$$

(1.62)

Se reemplaza las ecuaciones (1.61) en (1.60) y luego en (1.62), para obtener:

$$f_{qs} = R_e \left| \underset{\sim}{F_{as}} \; e^{j(\theta_e - \theta)} \right|$$

$$f_{ds} = R_e \left| j \; \underset{\sim}{F_{as}} \; e^{j(\theta_e - \theta)} \right|$$

$$f'_{qr} = R_e \left| F'_{\underset{\sim}{ar}} \; e^{j(\theta_e - \theta)} \right|$$

$$f'_{dr} = R_e \left| j \; F'_{\underset{\sim}{ar}} \; e^{j(\theta_e - \theta)} \right| \qquad (1.63)$$

Como se demostró anteriormente, las variables de rotor y estator en el sistema arbitrario de referencia son sinusoides de frecuencia $(\omega_e - \omega)$, por lo tanto se pueden expresar en forma fasorial de la siguiente forma, excepto para frecuencia sincrónica.

$$f_{qs} = R_e \left| F_{\underset{\sim}{qs}} \; e^{j(\theta_e - \theta)} \right|$$

$$f_{ds} = R_e \left| F_{\underset{\sim}{ds}} \; e^{j(\theta_e - \theta)} \right|$$

$$f'_{qr} = R_e \left| F'_{\underset{\sim}{qr}} \; e^{j(\theta_e - \theta)} \right|$$

$$f'_{dr} = R_e \left| F'_{\underset{\sim}{dr}} \; e^{j(\theta_e - \theta)} \right| \qquad (1.64)$$

En base a las ecuaciones (1.63) y (1.64) se puede obtener los siguientes resultados:

$$\begin{aligned} F_{\underset{\sim}{qs}} &= F_{\underset{\sim}{as}} \\ F_{\underset{\sim}{ds}} &= j \; F_{\underset{\sim}{as}} \\ F'_{\underset{\sim}{qr}} &= F'_{\underset{\sim}{ar}} \\ F'_{\underset{\sim}{dr}} &= j \; F'_{\underset{\sim}{ar}} \end{aligned} \qquad (1.65)$$

1.4.1 Ecuaciones de voltaje en Estado Estable (3, 4)

Las ecuaciones de voltaje en estado estable constituyen un caso particular de la transformación a coordenadas q d o. Para obtener estas ecuaciones se parte de las ecuaciones de voltaje (1.46), se toman únicamente las ecuaciones del eje q y se sigue el siguiente proceso:

1.- Se reemplazan los valores obtenidos en (1.65).
2.- El operador p es reemplazado por $j(\omega_e - \omega)$.
3.- Se sustituyen: $p\theta$ por ω y $p\beta$ por $(\omega - \omega_r)$.
4.- Se fija el sistema de ejes arbitrarios en el estator, por lo tanto $\omega = 0$.
5.- Se considera las ecuaciones (1.36).

Así, las ecuaciones que rigen el comportamiento de la máquina de inducción en estado estable son las siguientes:

$$\underset{\sim}{V}_{as} = (r_s + j\, x_{ls})\, \underset{\sim}{I}_{as} + j\, x_m\, (\underset{\sim}{I}_{as} + \underset{\sim}{I}'_{ar})$$

$$\frac{\underset{\sim}{V}'_{ar}}{s} = \left(\frac{r'_r}{s} + j\, x'_{lr}\right) \underset{\sim}{I}'_{ar} + j\, x_m\, (\underset{\sim}{I}_{as} + \underset{\sim}{I}'_{ar}) \qquad (1.66)$$

en las anteriores ecuaciones $\underset{\sim}{V}_{as}$, $\underset{\sim}{V}'_{ar}$, $\underset{\sim}{I}_{as}$ e $\underset{\sim}{I}'_{ar}$ son fasores;

$$s = \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e}$$ es el deslizamiento; además,

$x_{ls} = \omega_e L_{ls}$ es la reactancia de dispersión por fase de estator.

$x'_{lr} = \omega_e L'_{lr}$ es la reactancia de dispersión, por fase, de rotor.

$x_m = \omega_e M$ es la reactancia mutua entre rotor y estator.

A partir de las ecuaciones (1.66) se obtiene el circuito equivalente del motor de inducción para estado estable, circuito que es muy utilizado en el estudio de la máquina de inducción. A continuación se muestra el citado circuito equivalente para la condición más usual, con el rotor cortocircuitado, es decir, $\underset{\sim}{V'_{ar}} = 0$

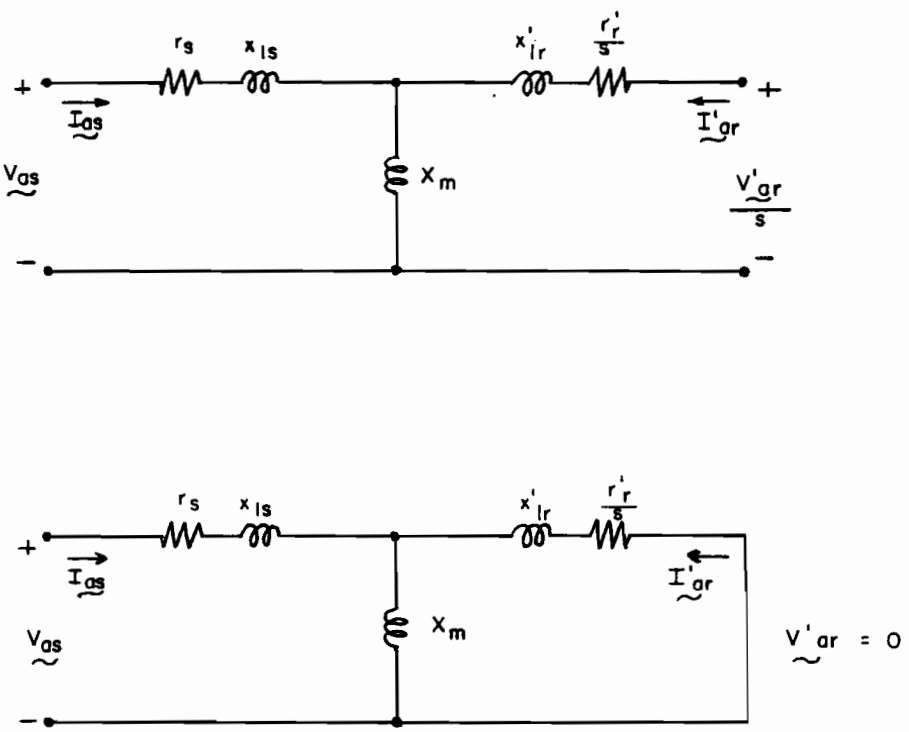


FIG. 1.4 Circuitos Equivalentes por Fase de una Máquina Trifásica de Inducción para Estado Estable.

1.5 ECUACIONES DEL MODELO MATEMATICO [1, 3, 4, 5]

1.5.1 Ecuaciones diferenciales de la Máquina de Inducción

En el presente trabajo se considera una máquina trifásica sin conexión del neutro, por lo que se anulan los componentes del eje cero, de esta forma, en adelante sólo se considerarán en el análisis las variables de los ejes q y d.

Partiendo de las ecuaciones (1.47) y (1.49); se multiplica las ecuaciones (1.49) por ω_e, donde esta variable representa la velocidad angular eléctrica correspondiente a la frecuencia nominal de la red de alimentación, esto es:

$$\omega_e = 2 \pi f \quad |\text{rad/seg}| \tag{1.67}$$

donde: f = frecuencia nominal de la red de alimentación.

Se obtiene:

$$\begin{aligned}
\psi_{qs} &= x_{ls}\, i_{qs} + x_m\, (i_{qs} + i'_{qr}) \\
\psi_{ds} &= x_{ls}\, i_{ds} + x_m\, (i_{ds} + i'_{dr}) \\
\psi'_{qr} &= x'_{lr}\, i'_{qr} + x_m\, (i'_{qr} + i_{qs}) \\
\psi'_{dr} &= x'_{lr}\, i'_{dr} + x_m\, (i'_{dr} + i_{ds})
\end{aligned} \tag{1.68}$$

Donde: ψ representa concatenaciones de flujo por segundo y

x representa reactancia; así,

$$\begin{aligned} \psi_{qs} &= \omega_e \lambda_{qs} \\ x_{ls} &= \omega_e L_{ls} \\ x_m &= \omega_e M \\ x'_{lr} &= \omega_e L'_{lr} \end{aligned} \tag{1.69}$$

similares definiciones se dan para ψ_{ds}, ψ'_{qr}, ψ'_{dr}.

La ventaja de utilizar estas variables ψ se verá en el desarrollo posterior del modelo.

Ahora, definiendo:

$$\begin{aligned} \psi_{mq} &= x_m (i_{qs} + i'_{qr}) \\ \psi_{md} &= x_m (i_{ds} + i'_{dr}) \end{aligned} \tag{1.70}$$

que representan las concatenaciones de flujo mutuo en ejes q y d respectivamente, se simplifican las ecuaciones (1.68),

$$\begin{aligned} \psi_{qs} &= x_{ls}\, i_{qs} + \psi_{mq} \\ \psi_{ds} &= x_{ls}\, i_{ds} + \psi_{md} \\ \psi'_{qr} &= x'_{lr}\, i'_{qr} + \psi_{mq} \\ \psi'_{dr} &= x'_{lr}\, i'_{dr} + \psi_{md} \end{aligned} \tag{1.71}$$

en base a estas ecuaciones (1.71) se puede obtener:

$$i_{qs} = \frac{1}{x_{ls}} (\psi_{qs} - \psi_{mq})$$

$$i_{ds} = \frac{1}{x_{ls}} (\psi_{ds} - \psi_{md})$$

$$i'_{qr} = \frac{1}{x'_{lr}} (\psi'_{qr} - \psi_{mq})$$

$$i'_{dr} = \frac{1}{x'_{lr}} (\psi'_{dr} - \psi_{md}) \qquad (1.72)$$

y reemplazando (1.72) en (1.70) se llega a:

$$\psi_{mq} = x_{mq} \left(\frac{\psi_{qs}}{x_{ls}} + \frac{\psi'_{qr}}{x'_{lr}} \right)$$

$$\psi_{md} = x_{md} \left(\frac{\psi_{ds}}{x_{ls}} + \frac{\psi'_{dr}}{x'_{lr}} \right) \qquad (1.73)$$

en donde

$$x_{mq} = x_{md} = \frac{1}{\frac{1}{x_m} + \frac{1}{x_{ls}} + \frac{1}{x'_{lr}}} \qquad (1.74)$$

Seguidamente, a las ecuaciones de voltaje (1.47), se las multiplica por ω_e y a la vez se reemplaza: $p\theta = \omega$ y $p\beta = \omega - \omega_r$, y dejando en función de las concatenaciones de flujo por segundo se llega a:

$$\omega_e v_{qs} = \omega_e \cdot \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{qs} - \psi_{mq}) + p\psi_{qs} + \psi_{ds} \cdot \omega$$

$$\omega_e v_{ds} = \omega_e \cdot \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{ds} - \psi_{md}) + p\,\psi_{ds} - \psi_{qs} \cdot \omega$$

$$\omega_e \, v'_{qr} = \omega_e \cdot \frac{r_r'}{x'_{lr}} (\psi'_{qr} - \psi_{mq}) + p \, \psi'_{qr} + \psi'_{dr} (\omega - \omega_r)$$

$$\omega_e \, v'_{dr} = \omega_e \cdot \frac{r_r'}{x'_{lr}} (\psi'_{dr} - \psi_{md}) + p \, \psi'_{dr} - \psi'_{qr} (\omega - \omega_r) \qquad (1.75)$$

De estas últimas ecuaciones se puede obtener las ecuaciones finales del modelo:

$$p \, \psi_{qs} = \omega_e \left[v_{qs} - \frac{\omega}{\omega_e} \psi_{ds} + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{mq} - \psi_{qs}) \right]$$

$$p \, \psi_{ds} = \omega_e \left[v_{ds} + \frac{\omega}{\omega_e} \psi_{qs} + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{md} - \psi_{ds}) \right]$$

$$p \, \psi'_{qr} = \omega_e \left[v'_{qr} - \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_e} \right) \psi'_{dr} + \frac{r'_r}{x'_{lr}} (\psi_{mq} - \psi'_{qr}) \right]$$

$$p \, \psi'_{dr} = \omega_e \left[v'_{dr} + \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_e} \right) \psi'_{qr} + \frac{r'_r}{x'_{lr}} (\psi_{md} - \psi'_{dr}) \right] \qquad (1.76)$$

Realizando un proceso similar para la ecuación (1.51), se obtiene la ecuación final del torque electromagnético:

$$Te = \frac{1}{\omega_e} \cdot \frac{m}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot (\psi'_{qr} \, i'_{dr} - \psi'_{dr} \, i'_{qr}) \qquad (1.77)$$

En la ecuación del torque electromecánico (1.52), se hace una pequeña aproximación, se desprecia el torque de amortiguamiento, ya que el coeficiente angular de fricción viscosa es muy pequeño; así la ecuación queda de la siguiente forma

$$Te = J \, p \, \omega_r + T_m \qquad (1.78)$$

Como puede verse, en las ecuaciones (1.76), (1.77) y (1.78), que descri

ben el funcionamiento eléctrico y mecánico de la máquina, el desarrollo realizado es generalizado, pudiendo referirse los sistemas de ecuaciones a cualquier sistema de referencia: sistema fijo en el estator, en el rotor y girando a ω_e; todo depende de las necesidades que se tenga.

Ahora se puede ver claramente las razones por las cuales se tomó a las variables ψ como variables de estado, ya que la forma obtenida para las ecuaciones (1.76) es fácilmente representada en un computador digital.

1.5.2 Ecuaciones de la Máquina en Por Unidad

Las ventajas que se obtienen al trabajar en el sistema normalizado denominado "sistema por unidad", hacen necesaria la transformación a este sistema, en donde los parámetros y variables de la máquina se expresan como fracciones de valores nominales, previamente seleccionados, y son además términos adimensionales.

Así, luego de realizar las transformaciones al sistema por unidad, las ecuaciones se reducen, se facilita el proceso para introducir la saturación, y, además se obtiene los resultados en p.u., lo que significa una fácil y rápida interpretación.

Para realizar la transformación es necesario seleccionar los valores base de Potencia, Voltaje y Frecuencia; generalmente son los datos de placa de la máquina. Así, se toma los siguientes valores base:

S_B = potencia aparente en VA por fase

V_B = voltaje base en V por fase

f_B = frecuencia base en Hz, es la frecuencia a la cual están definidos los parámetros

De estos valores se definen los demás términos base:

$$I_B = \frac{S_B}{V_B} \quad \text{es la corriente base en A} \tag{1.79}$$

$$Z_B = \frac{V_B}{I_B} \quad \text{es la impedancia base en ohmios} \tag{1.80}$$

$$W_B = \frac{2\pi f_B}{P/2} \quad \text{es la velocidad angular base en rad/seg. (P = número de polos)} \tag{1.81}$$

$$L_B = \frac{Z_B}{\omega_e} \quad \text{es la inductancia base en Henrios} \tag{1.82}$$

$\lambda_B = L_B I_B$ son las concatenaciones de flujo base (1.83),

y multiplicando ambos miembros por ω_e.

$$\psi_B = X_B \cdot I_B \tag{1.84}$$

y como $$X_B = L_B I_B \approx Z_B \tag{1.85}$$

se puede decir que $$\psi_B = V_B \tag{1.86}$$

Para transformar una cantidad al sistema p.u. se aplica la siguiente de

finición:

$$\text{Valor p.u.} = \frac{\text{Valor real}}{\text{Valor base}} \tag{1.87}$$

Aplicando la ecuación (1.87) a las ecuaciones (1.76) se obtiene las ecuaciones diferenciales de la máquina en p.u.; sin embargo, la forma de estas ecuaciones no se altera, y se puede trabajar directamente con todos los términos en p.u.

En el sistema por unidad se toma el mismo valor instantáneo base tanto para el sistema arbitrario q d o como para el sistema a b c. (5)

Se tiene además que el torque base tiene la siguiente forma:

$$T_B = \frac{V_B \cdot I_B}{\left(\frac{2}{m}\right)\left(\frac{2}{P}\right)\omega_e} \text{ en [Nw.m]} \tag{1.88}$$

Entonces, expresando la ecuación (1.77) en p.u. se obtendrán:

$$Te = \psi'_{qr}\, i'_{dr} - \psi'_{dr}\, i'_{qr} \tag{1.89}$$

La unidad de torque, en el sistema p.u., es definida como el torque producido por una unidad de potencia a la velocidad nominal ω_s, y

$$\omega_s = \frac{2}{m} \cdot \frac{2}{P}\omega_e \quad \text{es la velocidad sincrónica.} \quad (4) \tag{1.90}$$

El momento de inercia de la máquina, en el sistema p.u., se expresa por

la constante de inercia H y definida por la siguiente expresión:

$$H = \frac{\text{Energía almacenada a } \omega_s \text{ en KW.seg}}{\text{Potencia aparente nominal en KVA}} \qquad (1.91)$$

y en fórmula:

$$H = \frac{5.48\ J\ .\ n_s^{\,2}}{S_n}\ 10^{-6} \quad [\text{seg.}] \qquad (1.92)$$

donde: J = momento de inercia de la máquina en Kg-m^2

n_s = velocidad sincrónica de la máquina en rpm

S_n = potencia aparente nominal de la máquina en KVA

La constante de inercia tiene como unidad segundos, en el sistema p.u.; la unidad de energía es igual a la unidad de potencia en un segundo,por lo tanto, la constante de inercia es numéricamente igual a la energía almacenada en p.u. (10)

Si se acelera la máquina uniformemente desde el reposo hasta la velocidad sincrónica ω_s, en un segundo, el torque sería igual a $J\ \omega_s$. La energía almacenada es producida por la potencia debido a este torque a la velocidad media $\frac{\omega_s}{2}$, y es igual a $J\ \omega_s/2$ y por lo tanto,

$$H = \frac{1}{2} J\ \omega_s \quad (3, 4, 5) \qquad (1.93)$$

despejando J y reemplazando en la ecuación (1.78) se obtiene:

$$p\ \omega_r = \frac{1}{2H} (Te - Tm) \qquad (1.94)$$

que es la ecuación diferencial de la velocidad.

Las ecuaciones (1.19), (1.76, (1.89) y (1.94), en p.u., son las que se utilizan para el análisis transitorio de la máquina de inducción, ya que describen el comportamiento de la máquina en función del tiempo.

1.6 SATURACION DEL NUCLEO (5, 7, 11)

En las máquinas eléctricas el torque electromagnético y el voltaje inducido dependen del flujo concatenado por sus devanados; este flujo, además depende de las características del hierro y del entrehierro. Así, la saturación del núcleo ferromagnético puede influir sustancialmente en el comportamiento de la máquina, sobretodo en condiciones críticas de funcionamiento como son: arranque, fallas, desbalances de estator y/o de rotor, etc.

1.6.1 Curva de Magnetización (7)

La curva de magnetización describe la relación entre el voltaje inducido y la corriente de magnetización; esta relación depende de las características del circuito magnético.

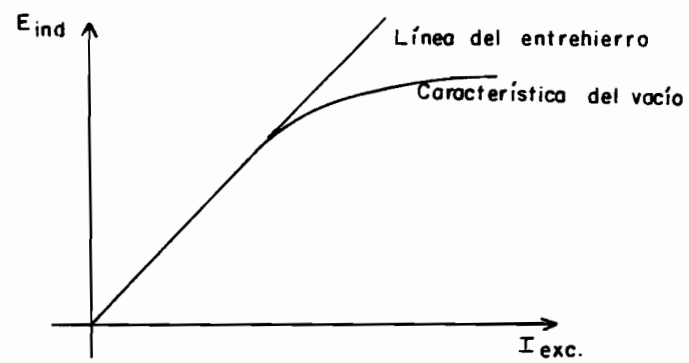


FIG. 1.5 Curva de Magnetización.

Como puede observarse en la Fig. 1.5, la curva tiene una región lineal, en la que el voltaje inducido varía en forma directa con la corriente de magnetización, esto para valores pequeños de corriente de magnetización. En cambio, para valores altos de corriente de magnetización se pierde la linealidad, denominándose a esta parte de la curva región de saturación, en la cual para grandes incrementos de la corriente de magnetización se tiene pequeños incrementos de voltaje inducido.

El fenómeno de saturación se introduce al modelo matemático en forma simple, sin considerar las alteraciones que producen las ranuras y canales de ventilación, y se desprecia las armónicas generadas.

1.6.2 Ecuaciones de la Máquina con la Saturación Incluida (5, 11)

La saturación es introducida al modelo matemático mediante la corrección de concatenaciones de flujo de magnetización, ya que en éstos es donde se refleja directamente la saturación. Así, los flujos mutuos son corregidos cuando éstos, por cualquier razón, han alcanzado la región de saturación, aunque ésto por lo general no sucede en condiciones normales de trabajo.

Si se multiplica la corriente de excitación (I exc.) por x_m se obtiene como resultado las concatenaciones de flujo mutuo (ψ_m), ya que según las ecuaciones (1.70), en general se tiene

$$\psi_m = x_m(i_s + i'_r) \tag{1.95}$$

y como

$$I\ exc = i_s + i'_r \tag{1.96}$$

entonces en el eje de las abscisas se tiene

$$\psi_m = x_m \, I \text{ exc.} \tag{1.97}$$

En el eje de las ordenadas se tiene el voltaje inducido (E ind.), que para condiciones de circuito abierto cumple la siguiente igualdad:

$$E \text{ ind} = \frac{d}{dt} \phi_m \tag{1.98}$$

al multiplicar ambos miembros por ω_e se obtiene

$$\omega_e \, E \text{ ind} = \frac{d}{dt} \psi_m \tag{1.99}$$

y luego despejando se llega a

$$\psi_m = \int \omega_e \, E \text{ ind} \cdot dt \tag{1.100}$$

De esta forma, en ambos ejes se tendrá ψ_m y la curva de la Fig. 1.5 se transforma en la siguiente curva:

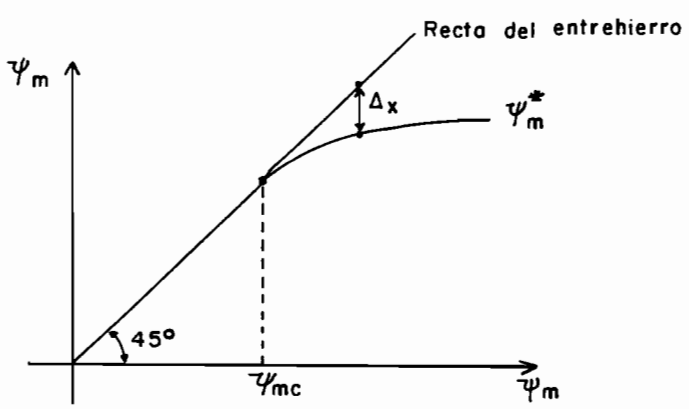


FIG. 1.6 Recta del Entrehierro a 45°.

Se observa que la pendiente de la curva en la región lineal es 1. Además, aparece una nueva variable ψ_m^*, concatenaciones de flujo mutuo en las condiciones de saturación, que se diferencia de ψ_m en un valor Δx.

Se define también ψ_{mc}, concatenaciones de flujo mutuo crítico, al valor de ψ_m en el que termina la región lineal.

Se puede definir entonces,

$$\psi^*_m = \psi_m \qquad \text{para} \quad \psi_m \leq \psi_{mc}$$

$$\psi^*_m = \psi_m - \Delta x \qquad \text{para} \quad \psi_m > \psi_{mc} \tag{1.101}$$

recordando que

$$\psi_m = x_m \, I_{exc.} \qquad \text{(ec. 1.97)}$$

Estas relaciones pueden ser también definidas de la siguiente forma:

$$\psi^*_m = \psi_m - \Delta x \tag{1.102}$$

donde

$$\Delta x = \begin{cases} 0 & \text{si} \quad \psi_m \leq \psi_{mc} \\ \psi_m - \psi^*_m & \text{si} \quad \psi_m > \psi_{mc} \end{cases} \tag{1.103}$$

que es la definición a usarse ya que la función $\Delta x = \psi_m - \psi^*_m$ puede obtenerse gráficamente de la Fig. 1.6, obteniéndose el siguiente gráfico:

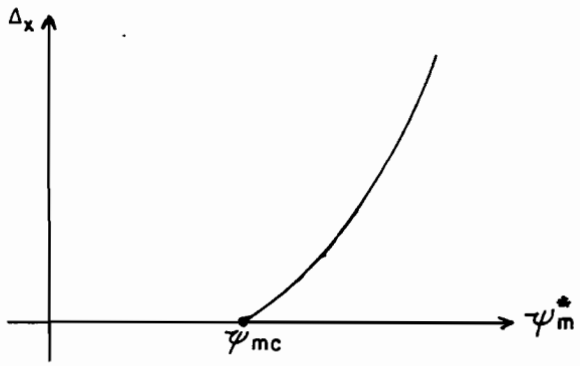


FIG. 1.7 Δx en Función de ψ^*_m.

Hay que anotar que las definiciones y el gráfico de $\Delta x = f(\psi^*_m)$ deben utilizarse considerando los valores absolutos de las variables.

La corrección de las concatenaciones de flujo mutuas consiste en reemplazar los valores de ψ_m por ψ^*_m anteriormente definidas.

Así, la ec. (1.70) se transforma en:

$$\psi^*_{mq} = x_m (i_{qs} + i'_{qr}) - \Delta x$$

$$\psi^*_{md} = x_m (i_{ds} + i'_{dr}) - \Delta x \qquad (1.104)$$

De forma similar, en la ec. (1.72):

$$i_{qs} = \frac{1}{x_{ls}} (\psi_{qs} - \psi^*_{mq})$$

$$i_{ds} = \frac{1}{x_{ls}} (\psi_{ds} - \psi^*_{md})$$

$$i'_{qr} = \frac{1}{x'_{lr}} (\psi'_{qr} - \psi^*_{mq})$$

$$i'_{dr} = \frac{1}{x'_{lr}} (\psi'_{dr} - \psi^*_{md}) \qquad (1.105)$$

y al reemplazar la ec. (1.105) en (1.104) se obtiene:

$$\psi^*_{mq} = x_{mq} \left(\frac{\psi_{qs}}{x_{ls}} + \frac{\psi'_{qr}}{x'_{lr}} \right) - \frac{x_{mq}}{x_m} \Delta x$$

$$\psi^*_{md} = x_{md} \left(\frac{\psi_{ds}}{x_{ls}} + \frac{\psi'_{dr}}{x'_{lr}} \right) - \frac{x_{md}}{x_m} \Delta x \qquad (1.106)$$

Entonces, la saturación se introduce al modelo matemático lineal, reemplazando en las ecuaciones (1.76) y (1.72) los valores ψ_{mq} y ψ_{md} por ψ^*_{mq} y ψ^*_{md} respectivamente, esto para cualquier valor de ψ^*_m ya que al encontrar la función $\Delta x = f(\psi^*_m)$ se consideró ya si se está o nó trabajando en la región de saturación, es decir, si ψ^*_m es o no mayor que ψ_{mc}.

Como puede verse, el utilizar las concatenaciones de flujo como variables de estado ha facilitado el proceso para introducir la saturación.

C A P I T U L O I I

OPERACION ASIMETRICA, FALLAS Y FUNCIONAMIENTO DE LA MAQUINA DE INDUCCION CON ALIMENTACION MONOFASICA

En el presente capítulo se trata de dar una idea general de los diferentes tipos de operación desbalanceada que se pueden presentar más comúnmente en la máquina de inducción.

El análisis que se hace es simple, y en forma cualitativa se describe el funcionamiento que tiene la máquina en los diversos casos planteados.

Así, se tiene: operación asimétrica, considerándose la operación de la máquina con voltajes desbalanceados aplicados al estator; resistencias rotóricas desiguales, y la combinación de los 2 casos anteriores. Se trata, también, varios tipos de fallas: fase-tierra, 2 fases-tierra y falla trifásica. Por último, se considera el funcionamiento de la máquina trifásica con alimentación monofásica usando un condensador convertidor de fase.

Otro caso muy común es la operación de la máquina cuando se produce la desconexión y posterior reconexión de fases, pero este caso no se considera porque ya fue tratado ampliamente en la Ref. 4.

2.1 OPERACION ASIMETRICA

Dentro de este grupo se considera los casos en los cuales se tiene desbalances en el estator y/o en el rotor, pero que no llegan a constituir

condiciones de falla.

2.1.1 Voltajes Desbalanceados (1, 8, 14)

Por lo general las máquinas de inducción funcionan bajo condiciones balanceadas, pero temporalmente pueden ocurrir diferentes tipos de asimetrias o desbalances. Así, muy fácilmente, los voltajes del estator pueden ser desbalanceados, debido a perturbaciones en el sistema, hecho que es muy común en nuestro medio.

Describiendo en forma cualitativa: el tener voltajes desbalanceados en el estator ocasiona una disminución del torque y un mayor calentamiento de la máquina. En la práctica se tiene una pequeña disminución del torque, pero si el desbalance se mantiene por largo tiempo, el calentamiento que sufre la máquina es muy alto, esto debido a que las pérdidas en el cobre de los devanados se incrementa grandemente; se tiene por lo tanto, una menor potencia mecánica y consecuentemente un bajo rendimiento.

El procedimiento comúnmente usado para analizar los casos desbalanceados es descomponer las cantidades en sus componentes simétricos: componentes de secuencia positiva y negativa, analizar independientemente los circuitos de cada una de las secuencias, ya que no interaccionan entre sí, y finalmente superponer los resultados parciales.

Así, al aplicar voltajes desbalanceados al estator, se tendrá voltajes de secuencias positiva y negativa aplicados al estator. Los voltajes de secuencia negativa producen un torque y una potencia mecánica negativos, ocasionando una disminución en los respectivos valores finales.

Las corrientes de secuencia positiva y negativa desarrollan torques pulsantes y por lo tanto vibración de la máquina; además, debido a los ciclos de flujo positivo y negativo que se producen, la saturación tiene un notable efecto en los resultados.

2.1.2 Resistencias Rotóricas Desiguales (1, 8, 14, 15)

En múltiples ocasiones es necesario utilizar resistencias en el circuito del rotor; esto es posible únicamente cuando se trata de un motor con rotor bobinado.

Al conectar resistencias en el circuito del rotor se tiene los siguientes efectos: incremento del torque de arranque, limitación de la corriente de arranque, disminución de la velocidad.

De esta forma, se usará resistencias rotóricas cuando se desee tener un alto torque de arranque, sin incrementar la corriente, ya sea para vencer la inercia de la máquina y de su carga conectada al eje o solamente de la máquina. En otros casos es aconsejable reducir la corriente de arranque para evitar depresiones de voltaje en la línea, ya que pueden estar conectados otros equipos al mismo alimentador y se altera su funcionamiento, esto sucede con motores grandes, que tienen muy altas corrientes de arranque. Se usa también las resistencias rotóricas como medio de control de la velocidad, pudiendo variarse en un gran margen, bajo la velocidad sincrónica.

Hay que anotar que todas las ventajas y facilidades anteriores se obtienen a costa de la eficiencia de la máquina, ya que una par

te de la potencia de entrada se consume en las resistencias externas conectadas con el rotor.

Los casos de desbalance en el circuito del rotor son muy comunes, y pueden producirse por malfuncionamientos en el circuito externo, en los anillos rozantes, o por la conexión de resistencias desiguales. De esta forma, se producirán corrientes desbalanceadas en el rotor, de frecuencia igual al deslizamiento por la frecuencia de la red.

Las corrientes desbalanceadas se pueden descomponer en sus componentes de secuencia positiva y negativa, que originarán campos magnéticos giratorios en sentidos contrarios. Estos últimos provocarán la inducción de voltajes de secuencia positiva y negativa en el estator, de forma que el desbalance se refleja también en el estator.

Los desbalances existentes provocarán, como en el caso anterior, disminución del torque, de la potencia mecánica, calentamiento de los devanados y por tanto una menor eficiencia.

2.1.3 Voltajes Desbalanceados y Resistencias Rotóricas Desiguales

Este caso es poco común, y no es más que la combinación de los dos anteriores, razón por la cual se tendrá un incremento notable del desbalance, acentuándose aún más los efectos desfavorables de estos tipos de operación asimétrica de la máquina de inducción.

Se debe considerar también los efectos particulares que tiene cada uno de los casos que conforman el presente tipo de operación desbalanceada,

por ejemplo: disminución de la corriente de arranque, vibración de la máquina, etc.

2.2 FALLAS (7, 16)

Las fallas que pueden producirse en sistemas eléctricos son generalmente cortocircuitos de fases o apertura y posterior reconexión de fases. Se va a comentar brevemente los diversos tipos de cortocircuitos que pueden producirse, ya que los casos de apertura de fases ya han sido tratados ampliamente en la Ref. # 4.

Los cortocircuitos pueden ser: simétricos o asimétricos.

La mayor parte de las fallas constituyen el tipo asimétrico, y se consideran en el presente trabajo los cortocircuitos de una fase a tierra y de 2 fases a tierra. Cualquier tipo de falla asimétrica origina corrientes desbalanceadas, esto se puede descomponer en los componentes de secuencia positiva y negativa y se tendrá un análisis similar a los casos anteriormente tratados.

Los cortocircuitos simétricos no son muy comunes, pero es necesario analizarlos porque producen las peores condiciones de trabajo durante la falla, siendo muy conveniente conocer los límites del funcionamiento anormal.

Los tres tipos de cortocircuitos mencionados tienen un comportamiento similar, ya que en el fondo es la respuesta de un sistema R-L en serie. Así, los transitorios que se producen luego de una de estas fallas tie

nen la forma de la Fig. 2.1, en la que se puede distinguir una componente de alterna, que varía sinusoidalmente con el tiempo, y una componente continua que tiene una variación exponencial con el tiempo.

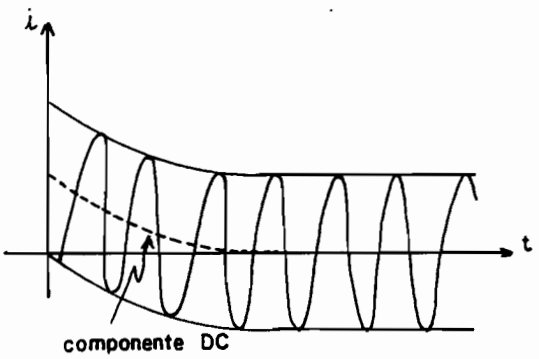


FIG. 2.1 Corriente Transitoria de Cortocircuito.

La amplitud máxima de la corriente transitoria, el valor máximo de la componente contínua, el valor de estado permanente, el tiempo de atenuación hasta el valor permanente de falla, etc., son diferentes para cada tipo de falla, y más aún, lo son para cada instante de falla. Pero siempre el comportamiento es similar aunque los valores instantáneos sean distintos.

Los componentes eléctricos de estado transitorio del estator se atenúan más rápidamente que los del rotor, y estos dos lo hacen mucho más violentamente que los componentes mecánicos, razón por la cual generalmente se asume una velocidad constante durante las fallas.

2.3 FUNCIONAMIENTO DE LA MAQUINA TRIFASICA CON ALIMENTACION MONOFASICA (2, 8)

La máquina trifásica de inducción para su funcionamiento necesita tener

aplicado al estator un sistema de tres voltajes desfasados, que pueden o no ser balanceados. Esto se puede conseguir en base a una fuente monofásica utilizando un condensador convertidor de fase, conectados como se indica en la Fig. 2.2

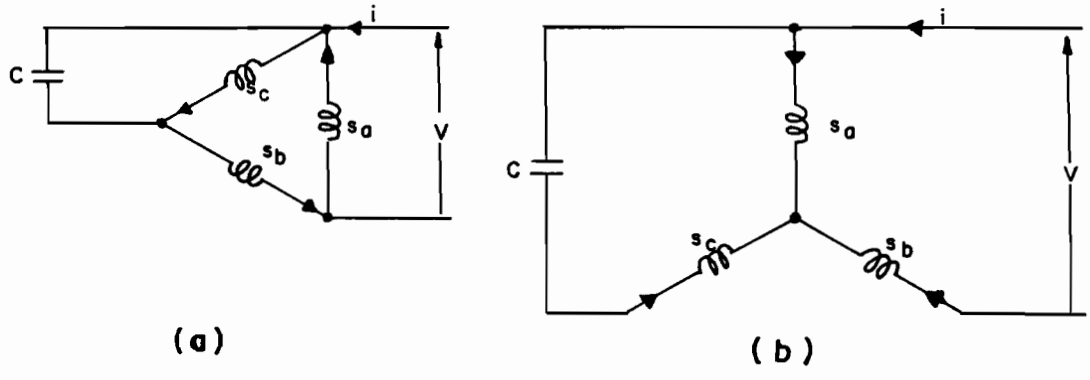


Fig. 2.2 Conexiones del Estator para Operación con Alimentación Monofásica. (a) Conexión en Delta. (b) Conexión en estrella.

En cualquiera de las dos formas de conexión, el motor se encuentra operando con conexiones asimétricas en los devanados, por lo tanto su estudio es posible hacerlo mediante componentes simétricos.

Debido a la aparición de componentes de secuencia negativa se tendrá similares efectos a los ya mencionados para los casos desbalanceados anteriormente tratados.

Para la operación satisfactoria del motor de inducción alimentado con una sola fase, es necesario escoger los condensadores que se usarán, en el arranque y en estado estable, de tal forma que el efecto de las co-

rrientes de secuencia negativa sea reducido al mínimo, para disminuir efectos perjudiciales como son vibración, ruido, calentamiento, etc. Para escoger los condensadores existen varios criterios: mínimo desbalance, mínimo voltaje de secuencia negativa o voltaje de secuencia negativo igual a cero.

En el Anexo # 2 se ha desarrollado el análisis para el criterio de mínimo desbalance. De los resultados obtenidos se concluye que lo ideal sería un condensador de variación continua, calibrado para cada valor de deslizamiento, es decir, para cada valor de deslizamiento existe un condensador que produce el mínimo desbalance. Ahora bien, esto no es posible, razón por la cual, se puede usar un condensador para el arranque y otro para estado estable, dando muy buenos resultados. La conmutación de los condensadores debe hacerse cuando la velocidad sea alrededor del 80% de la velocidad nominal.

Se ha demostrado además, que escogiendo adecuadamente los condensadores de arranque y de estado estable, se puede tener un comportamiento transitorio y de estado estable muy similar al que se tendría con alimentación trifásica balanceada.

De esta manera, el motor trifásico de inducción puede ser alimentado de una línea monofásica. Esto trae innumerables ventajas, por ejemplo, en electrificación rural: generalmente en zonas alejadas y de difícil acceso se tiene alimentación monofásica, entonces los usuarios deberán escoger entre motores monofásicos o motores trifásicos que usen un condensador convertidor de fase; si escogen el último tienen la ventaja que cuando la demanda de la zona se amplíe, y se instale la red trifásica

podrán usar sus equipos sin ninguna modificación. Además, de estudios realizados acerca del motor de inducción trifásico funcionando con alimentación monofásica, se ha llegado a la conclusión de que con una adecuada selección de los condensadores de arranque y de estado estable, se puede tener una potencia desarrollada del 70% de la potencia nominal. Ahora bien, un motor monofásico puede desarrollar también el 70% de la potencia que desarrollará un motor trifásico de las mismas dimensiones, con la desventaja que el motor monofásico es más caro que el trifásico, su construcción es más compleja y en todo sentido es mejor usar un motor trifásico que uno monofásico.

Otro ejemplo que se podrá dar de las ventajas de la conexión monofásica es un conjunto de bombas de irrigación portátiles, que funcionan con motores trifásicos, entonces, independientemente del tipo de red existente: trifásica o monofásica, podrán operar sin ningún problema en cualquiera de los casos.

C A P I T U L O I I I

PRUEBAS DE LABORATORIO

En el presente capítulo se describen los experimentos realizados y se incluyen las fotografías obtenidas de los fenómenos transitorios analizados; éstos últimos se utilizarán para verificar la validez del modelo desarrollado.

Para las distintas pruebas se utilizó el motor de inducción localizado en la Mesa Nº 11 del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional; este motor tiene las siguientes características:

- Datos de placa: 2 CV
  220/380 V
  7/4.04 A
  Δ/Y
  4 polos
  60 Hz
- Rotor intercambiable:
  - bobinado
  - jaula de ardilla

En todos los experimentos se utilizó la conexión delta en el estator, se utilizó también el rotor bobinado para poder conectar resistencias al circuito del rotor, y no se conectó carga mecánica al eje de la máquina.

En el Anexo # 1 se encuentran las mediciones efectuadas para determinar

los parámetros de la máquina. Los valores finales, una vez realizados los cálculos, son los siguientes:

$$r_s = 1.5\ \Omega$$
$$r'_r = 4.922\ \Omega$$
$$x_{ls} = 5.81\ \Omega$$
$$x'_{ls} = 5.81\ \Omega$$
$$x_m = 104.785\ \Omega$$
$$H = 0.2235 \text{ seg.}$$

Además, la velocidad en casi todas las pruebas se mantiene en un valor aproximadamente constante de n = 1.770 r.p.m.

3.1 PRUEBAS DE LABORATORIO PARA OBTENER LOS OSCILOGRAMAS DE CORRIENTE, VOLTAJE Y VELOCIDAD DURANTE LOS TRANSITORIOS

En los distintos experimentos realizados se obtuvieron los oscilogramas de los transitorios de voltaje, corriente y velocidad; no se obtuvieron de otras variables como el torque, por ejemplo, por no tener los instrumentos adecuados. Además, no se obtuvieron los oscilogramas de las corrientes en las tres fases simultáneamente, por la limitación de equipo.

La primera prueba realizada fue el arranque de la máquina con alimentación trifásica balanceada. Esta prueba se realizó para tener como referencia los transitorios que se producen en operación simétrica.

Los diagramas de control y de fuerza se indican a continuación.

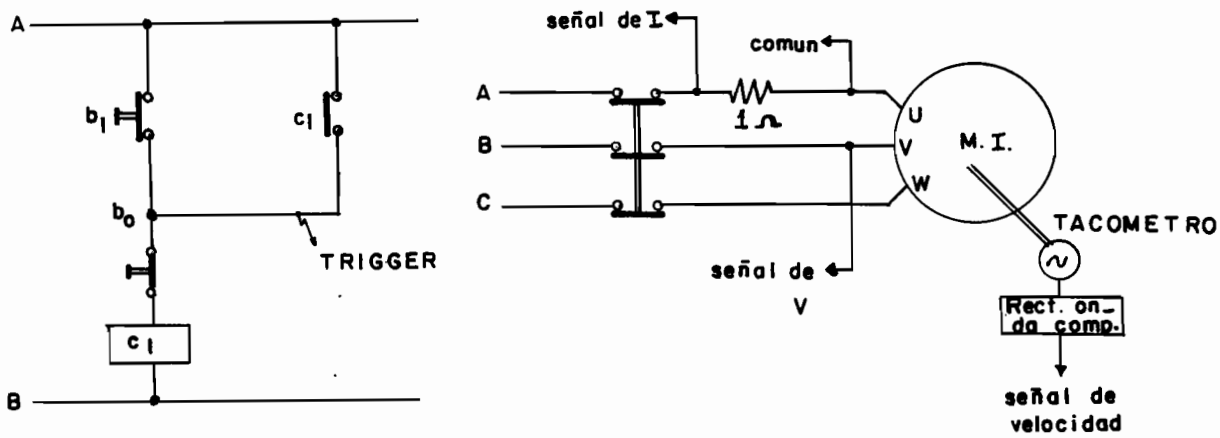
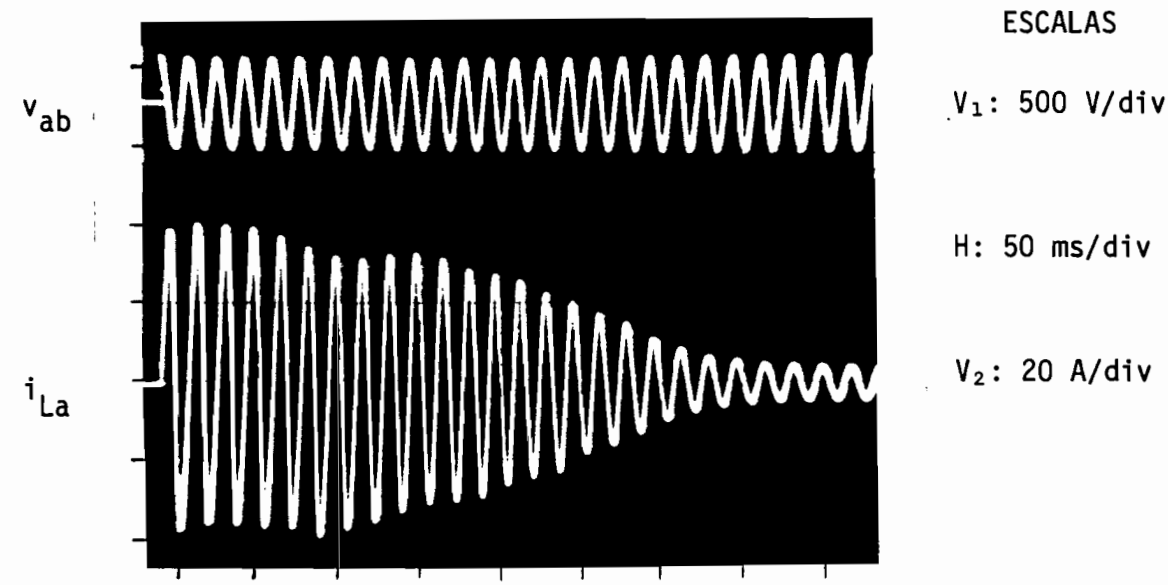


FIG. 3.1 Circuitos de Control (a) y de Fuerza (b) para Arranque en Condiciones Balanceadas.

Los voltajes aplicados fueron: $V_{ab} = V_{bc} = V_{ca} = 208$ V y los devanados del rotor se cortocircuitaron.

De esta prueba se obtuvo la Fotografía # 1, en la que se hallan el voltaje de línea y la corriente de línea, sensada a través de una resistencia de 1 Ω.



FOTOGRAFIA # 1

Arranque en condiciones balanceadas. Voltaje y corriente de línea.

Como puede observarse en la fotografía # 1, el voltaje es aplicado a los terminales de la máquina con un ángulo de 0°, para la función coseno, dando una corriente de arranque cuya amplitud máxima es 40 A pico, o sea alrededor de 5.7 veces la corriente nominal, y una corriente en estado estable de 4 A pico. La máquina tiene un tiempo de aceleración de 0.4 seg., ya que la corriente y la velocidad se estabilizan al mismo tiempo (3).

A continuación se presentan los experimentos y los resultados obtenidos para los distintos casos considerados.

3.1.1 Arranque con Voltajes Desbalanceados

Para analizar los transitorios correspondientes a voltajes desbalanceados se realiza un arranque con voltajes desbalanceados aplicados al estator, como ya se mencionó conectado en delta. Los devanados del rotor se cortocircuitaron.

Para lograr los voltajes desbalanceados se insertan resistencias variables en serie con el estator. El circuito de fuerza utilizado se encuentra en la Fig. 3.2 y se utiliza el mismo circuito de control de la Fig. 3.1 (a).

Se obtuvieron los siguientes voltajes desbalanceados, en estado estable: V_{ab} = 197 V; V_{bc} = 205 V; V_{ca} = 198 V.

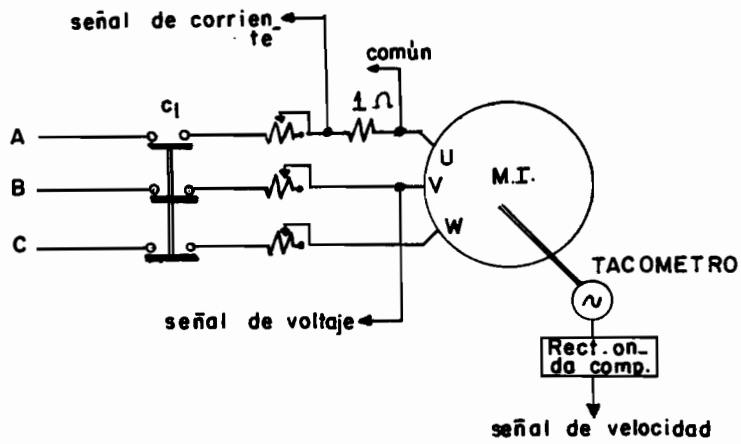
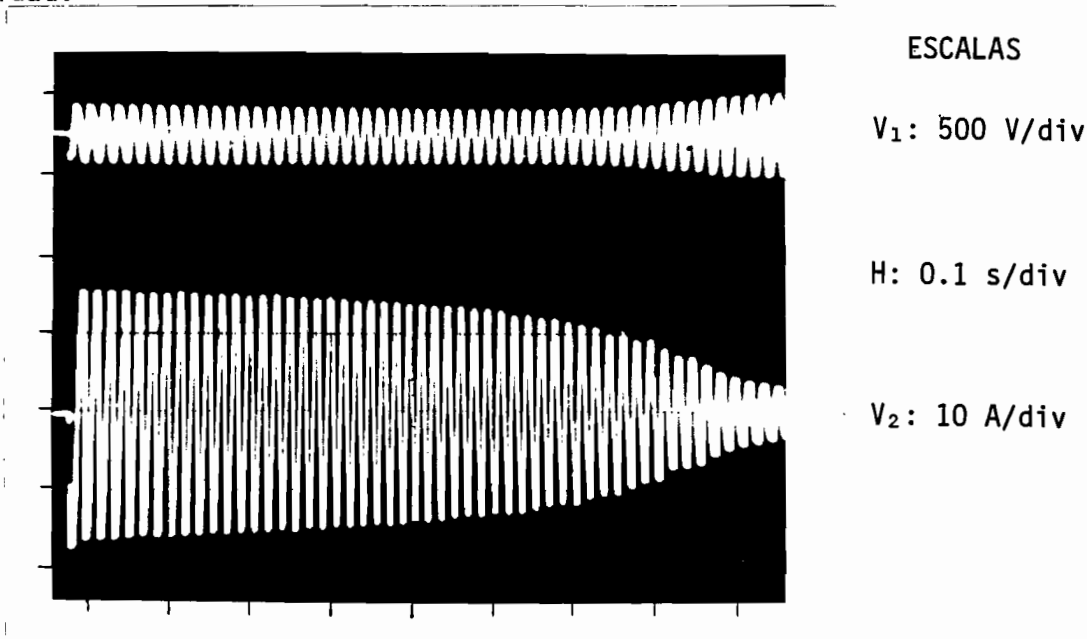


FIG. 3.2 Circuito de Fuerza para Arranque con Voltajes Desbalanceados.

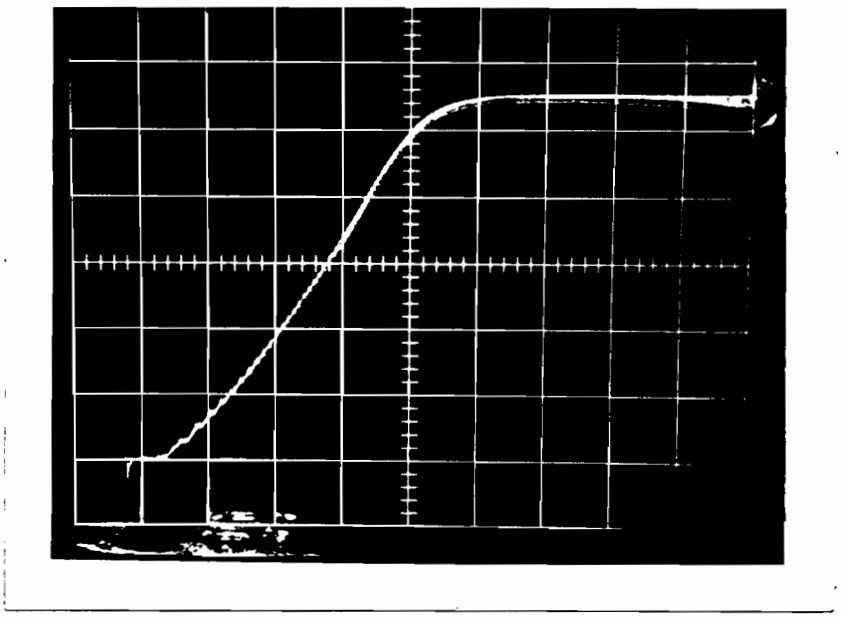
La señal de velocidad se obtiene de un tacómetro acoplado al eje de la máquina; esta señal es rectificada y filtrada para luego ingresar al osciloscopio.

En esta prueba se obtuvieron dos fotografías: la primera contiene el voltaje y corriente de línea y la segunda contiene el transitorio de la velocidad.



FOTOGRAFIA # 2

Arranque con Voltajes Desbalanceados. Voltaje y Corriente de línea.



FOTOGRAFIA # 3

Arranque con Voltajes Desbalanceados. Velocidad.

En la fotografía # 2 se observa que el voltaje aplicado a la máquina tiene una amplitud menor a la nominal, luego para t > 0.5 seg. empieza a crecer su amplitud, hasta llegar a la nominal para t = 0.9 seg.; ésto es consecuencia del método usado para producir el desbalance. Como consecuencia se tiene que el arranque se produce a voltaje reducido, alrededor del 60% del voltaje nominal, razón por la cual el tiempo de aceleración se ha incrementado a 0.9 seg. Puede observarse también en la fotografía # 2 pequeños picos en la corriente de línea, producidos por el desbalance existente; además, el ángulo de conexión es de aproximadamente 190°, la amplitud máxima es ahora 18 A pico, o sea 2.5 veces la corriente nominal, que es correcto debido a que se está arrancando con voltaje reducido, y la corriente de estado estable es de 3.6 A pico.

En la fotografía # 3 se observa el transitorio de velocidad, y se determina un tiempo de aceleración de 0.9 seg., comprobándose que corriente

y velocidad se estabilizan al mismo tiempo. Además, se notó que la velocidad era oscilante aunque esto no pudo fotografiarse.

3.1.2 Arranque con resistencias rotóricas desiguales

Esta prueba se realiza aplicando voltajes balanceados al estator y conectando resistencias desiguales al circuito del rotor, conectado en estrella.

El circuito de control y el circuito de fuerza del estator son los mismos de la Fig. 3.1 (a y b), mientras que el circuito del rotor se pone a continuación:

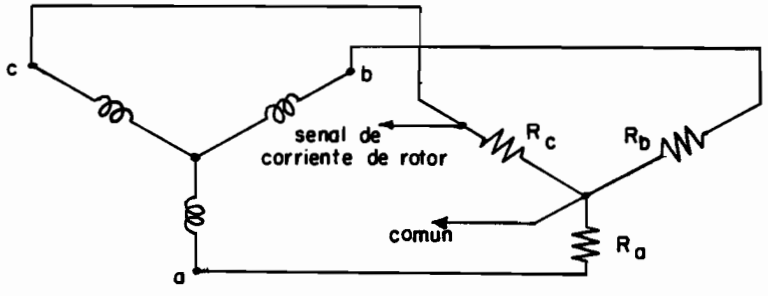


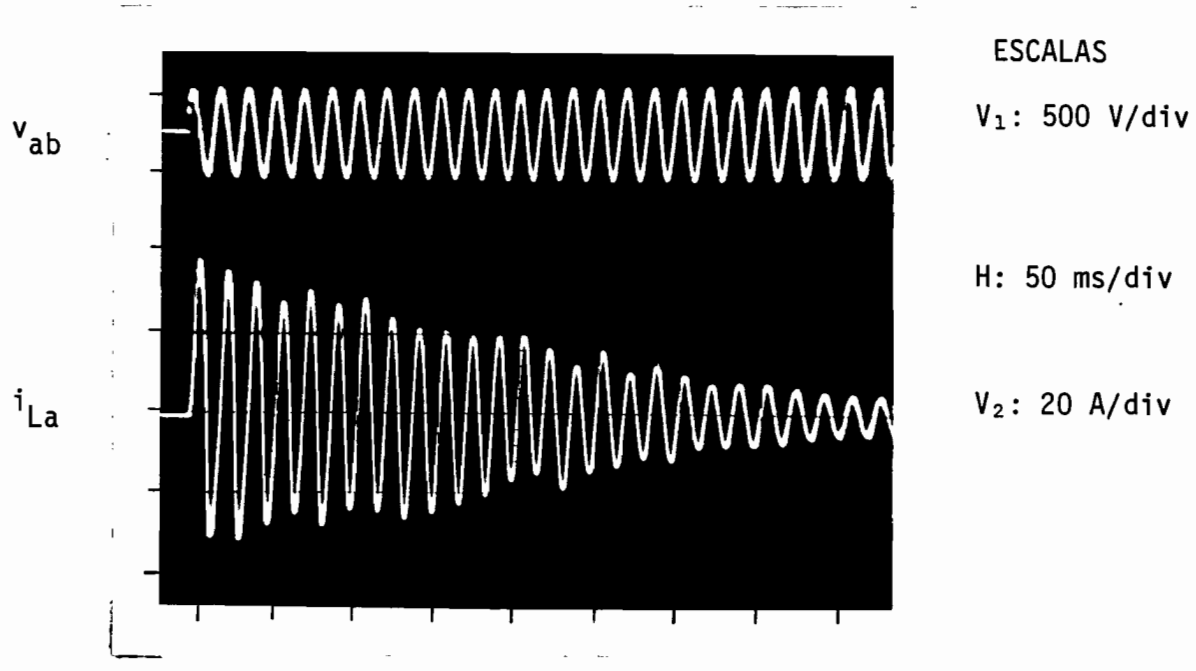
FIG. 3.3 Arranque con Resistencias Rotóricas Desiguales.
Circuito de Rotor.

Donde R_a, R_b, R_c son las resistencias externas conectadas al rotor y sus valores son:

$$R_a = 1.0\ \Omega$$
$$R_b = 0.5\ \Omega$$
$$R_c = 0.5\ \Omega$$

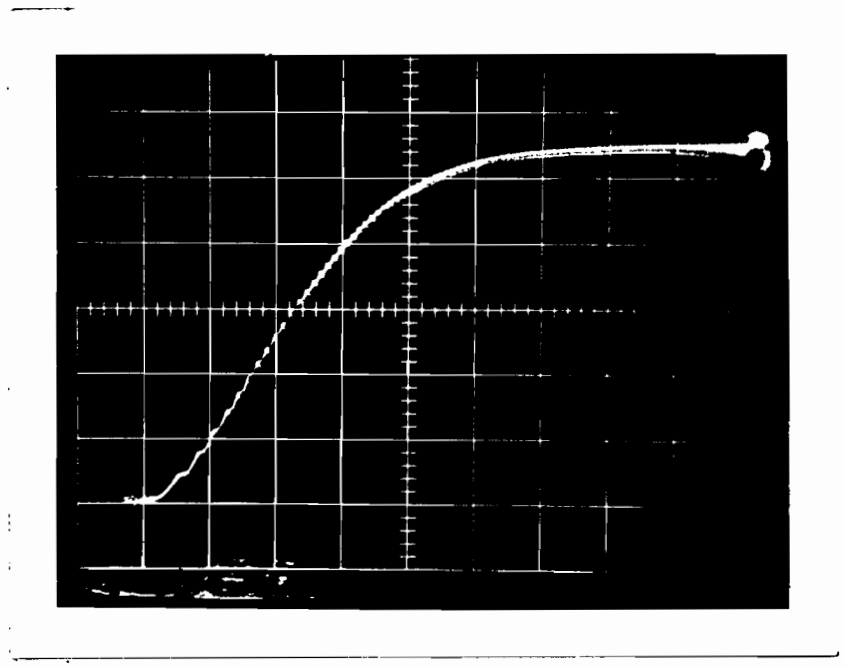
El voltaje de línea aplicado es de 205 V, para todas las líneas.

De esta prueba se obtuvieron fotografías del voltaje de línea, la corriente de línea, velocidad y la corriente de fase del rotor, medida a través de la resistencia R_c.



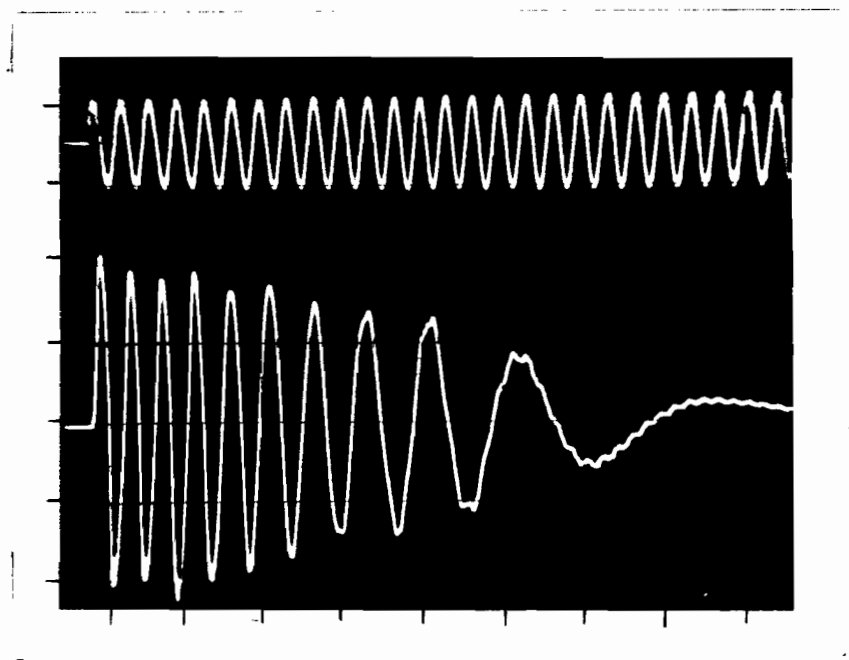
FOTOGRAFIA # 4

Arranque con resistencias rotóricas desiguales. Voltaje y corriente de línea.



FOTOGRAFIA # 5

Arranque con Resistencias Rotóricas Desiguales. Velocidad.



FOTOGRAFIA # 6

Arranque con Resistencia Rotóricas Desiguales.

Voltaje de línea y corriente de fase del rotor.

Es necesario anotar que las fotografías 4 y 5 fueron simultáneamente tomadas, mientras que la # 6 no lo fue; esta última se efectuó en otro instante, pero como se obtuvo un similar ángulo de conexión, puede asumirse que las tres son simultáneas.

En la fotografía # 4 se observa que el ángulo de conexión es aproximadamente -60°, al igual que en la fotografía # 6. Se obtiene una corriente máxima de 38 A pico, aproximadamente 5.5 veces la corriente nominal, mientras que la corriente en estado estable es 4.8 A pico; se observa además pequeños picos de corriente durante la aceleración, producto del desbalance. El tiempo de aceleración es aproximadamente 0.45 seg., esto se observa tanto en la fotografía # 4 como en la # 5.

Así, se observa que el pico máximo de corriente ha disminuido con relación al caso balanceado (Fotografía # 1), la corriente en estado estable ha aumentado y el tiempo de aceleración ha aumentado. Todo esto concuerda con la teoría, ya que, sin importar el desbalance, al insertar resistencias rotóricas debíam producirse esas variaciones.

En la fotografía # 6 se observa la corriente de rotor en la fase "c", y se puede decir que la amplitud máxima es de 48 A pico, el tiempo de aceleración también es 0.45 seg. y es el tiempo en el cual se estabiliza la corriente. Hay que notar también que la señal de corriente del rotor tiene una frecuencia variable; ésta va disminuyendo conforme acelera la máquina ya que la frecuencia de los componentes del rotor es igual al deslizamiento por la frecuencia de los componentes del estator, y como en el arranque el deslizamiento es decreciente, se tendrá que la frecuencia de la corriente del rotor lo es también.

Debido al desbalance existente, se puede ver picos que sobresalen de la envolvente promedio, tanto en la corriente del estator como del rotor; estos picos desaparecen al llegar al estado estable, pero en la corriente del rotor se mantienen oscilaciones, de pequeña magnitud y de mayor frecuencia que la del estator, sobre la componente fundamental.

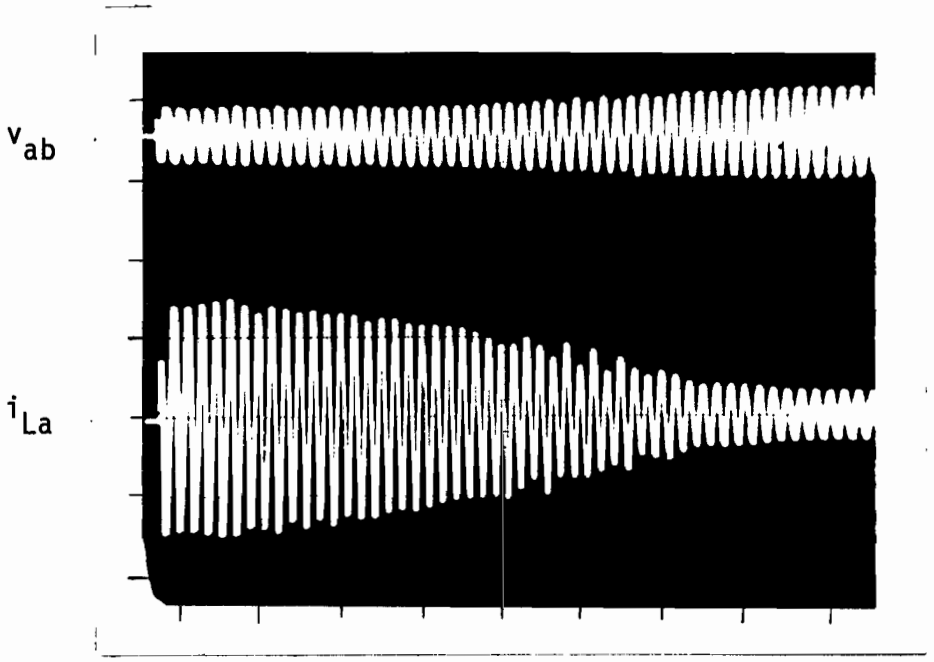
3.1.3 Arranque con resistencias rotóricas desiguales y voltajes desbalanceados

En esta prueba se combinan las condiciones desbalanceadas de los dos experimentos anteriores. De esta forma, el diagrama de fuerza del circuito del estator es el mismo de la Fig. 3.2, el circuito del rotor es el de la Fig. 3.3 y el circuito de control el de la Fig. 3.1 (a).

Los voltajes desbalanceados en estado estable para esta prueba fueron V_{as} = 199 V, V_{bv} = 207 V y V_{ca} = 194 V; las resistencias rotóricas: R_a = 1 Ω, R_b = 0.5 Ω y R_c = 0.5 Ω.

Las fotografías tomadas corresponden a voltaje y corriente de línea, velocidad y corriente de fase del rotor.

En la fotografía # 7 puede observarse el voltaje aplicado al estator, éste tiene el comportamiento descrito ya en la sección 3.1.1, para $t < 0.3$ seg. la amplitud es el 60% de la nominal, empieza a aumentar en $t = 0.3$ seg. y llega al valor nominal para $t = 0.7$ seg. Como consecuencia la máquina se arranca con voltaje reducido, ocasionando un tiempo de aceleración de alrededor de 0.8 seg., valor que se puede comprobar en la fotografía # 8.



ESCALAS

V_1: 500 V/div

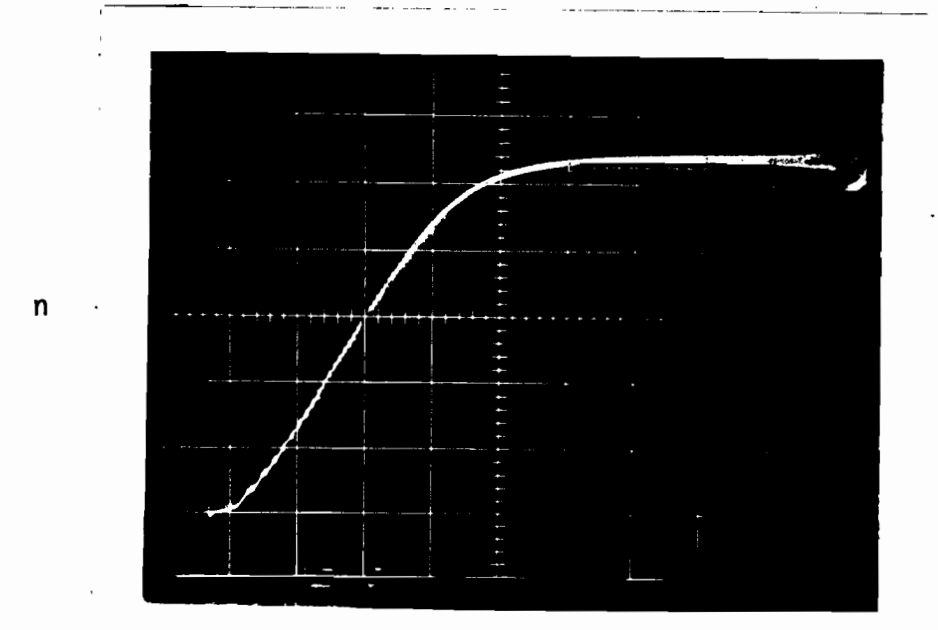
H: 0.1 s/div

V_2: 10 A/div

FOTOGRAFIA # 7

Arranque: voltajes y resistencias rotóricas desbalanceados.

Voltaje y corriente de línea.



ESCALAS

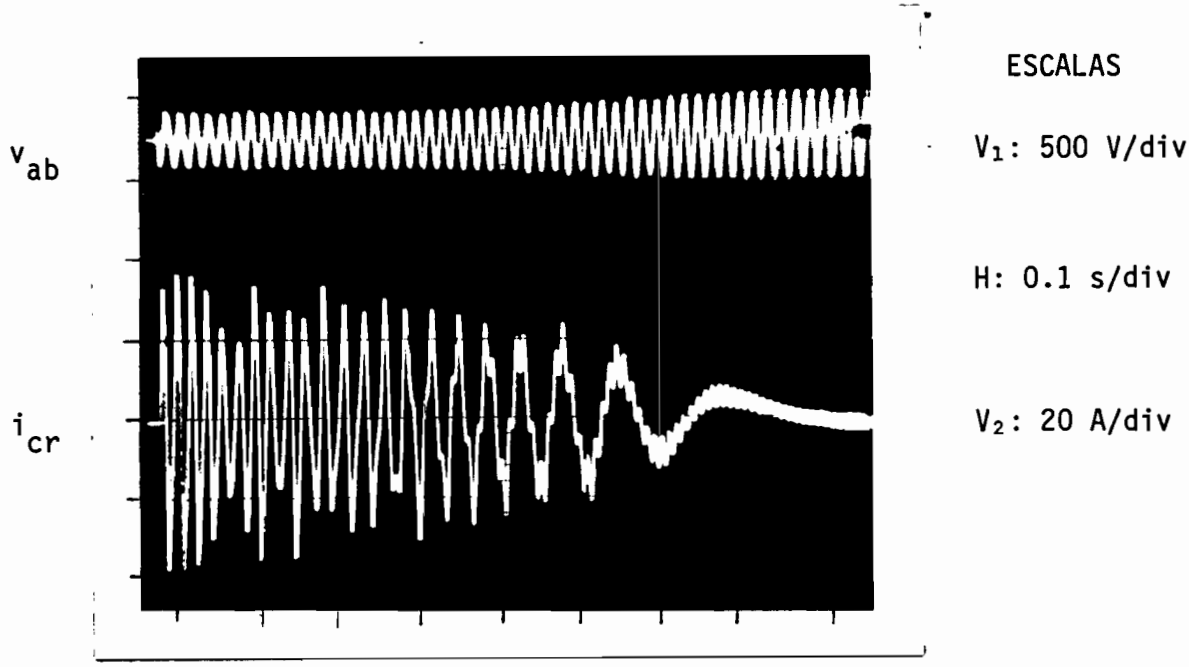
V: 326 r.p.m./div

H: 0.2 s/div

FOTOGRAFIA # 8

Arranque: Voltajes y Resistencias Rotóricas

Desbalanceadas. Velocidad.



FOTOGRAFIA # 9

Arranque: Voltajes y Resistencias Rotóricas Desbalanceados. Voltaje de Línea y Corriente de Rotor.

El ángulo de conexión es aproximadamente 60°, la corriente de línea máxima es de 15 A pico, es decir 2.1 veces la corriente nominal, la corriente en estado estable es de 3.5 A pico y se observa ya no pequeños sino apreciables picos de corriente que sobrepasan la envolvente promedio; ésto se acentúa más aún en la corriente del rotor, fotografía # 9, produciéndose grandes oscilaciones inclusive en estado estable, los cuales se superponen a la componente fundamental. El valor máximo de la corriente del rotor en la fase "c" es 35 A pico, notándose que los picos de desbalance en algunas ocasiones alcanzan este valor, además las oscilaciones de la corriente de rotor en estado estable son de una amplitud aproximada de 4.5 A pico-pico, lo cual es un valor apreciable para la máquina utilizada; también se observa la variación que sufre la frecuencia de la onda de corriente durante el arranque, es decir, mien

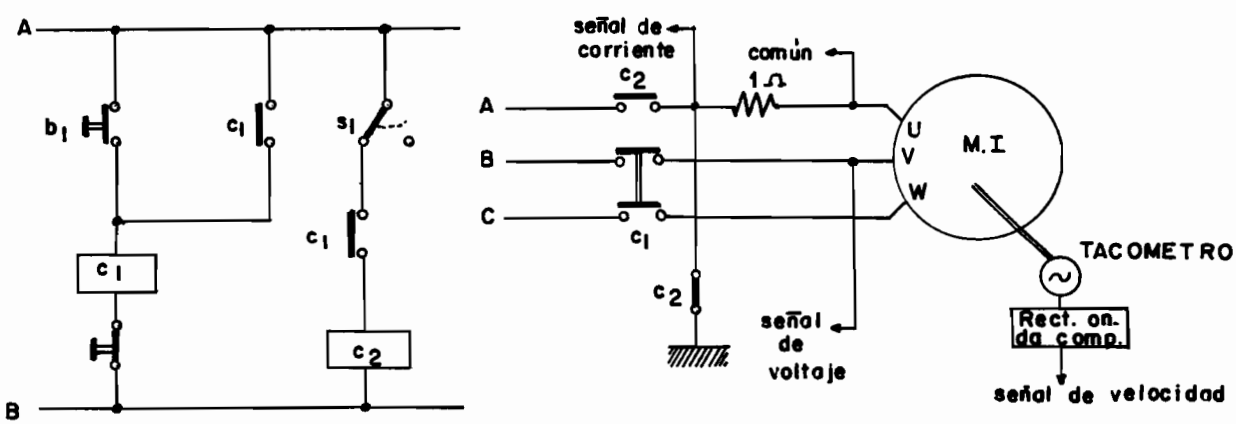
tras disminuye el deslizamiento.

Hay que anotar además, que se observó una oscilación en la velocidad en estado estable pero esto no pudo fotografiarse ni medirse.

Por último, es necesario indicar que las fotografías 7 y 8 son simultáneas mientras que la # 9 no lo es, pero se considera que si lo es debido a que el ángulo de conexión es muy similar.

3.1.4 Falla fase-tierra

Esta prueba fue realizada partiendo del estado estable balanceado; se arrancó la máquina con voltajes balanceados y una vez estabilizado su funcionamiento se produjo la falla. Esto mediante los circuitos de control y de fuerza de la Fig. 3.4 que están diseñados de forma que, primeramente se desconecta la fase "a" y luego se la conecta a tierra, evitando así un cortocircuito en la alimentación.

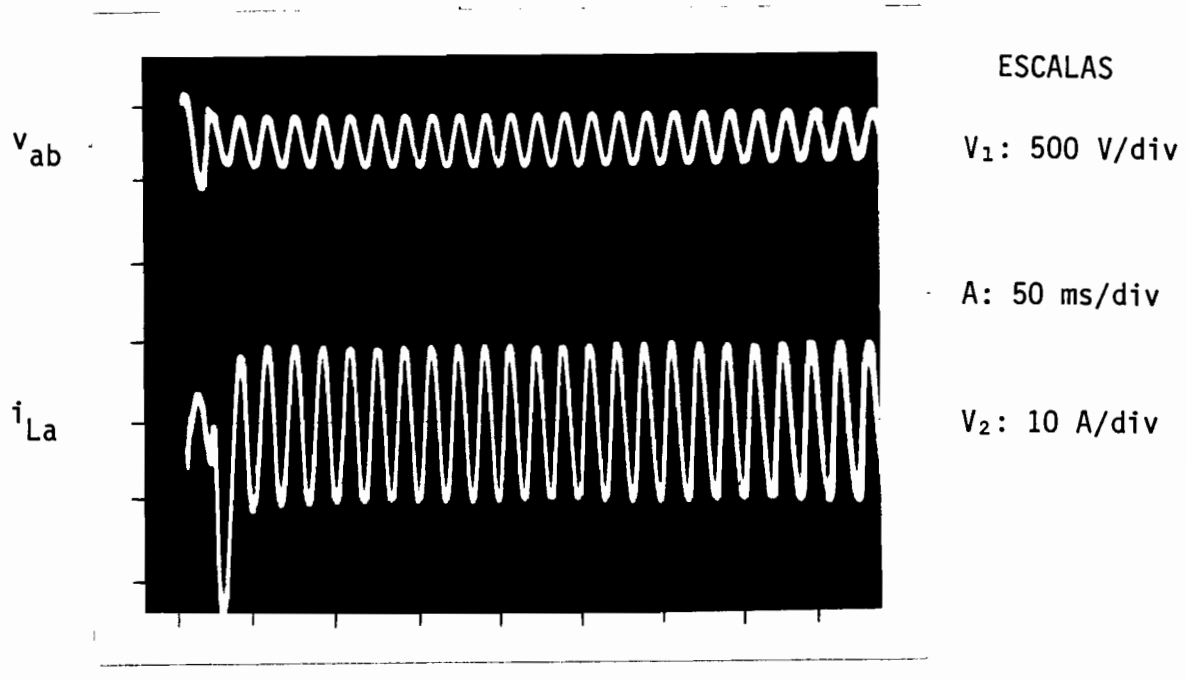


(a) (b)

FIG. 3.4 Circuitos de Control (a) y de Fuerza (b) para producir Falla de una Fase a Tierra.

Los voltajes aplicados son : $V_{ab} = V_{bv} = V_{ca} = 208$ V; los devanados del rotor se cortocircuitan.

En esta prueba se tomaron fotografías del voltaje y corriente de línea, no se tomó de la velocidad debido a que no se aprecia su variación durante el instante de falla.



FOTOGRAFIA # 10

Falla Fase-Tierra

Voltaje y Corriente de Línea

En la fotografía # 10 se observa el voltaje de línea y la corriente de línea. El ángulo al cual se produce la falla es aproximadamente -60°, observándose que luego de ésta el voltaje decrece al 60% de un valor nominal, igual comportamiento tiene el voltaje V_{ca}, mientras que el voltaje V_{bc} se mantiene constante; desafortunadamente no es posible medir en las tres fases a la vez.

La corriente en la línea "a" tiene un brusco incremento en el instante de falla, alcanzando un valor de 30 A pico, o sea 4.3 veces la corriente nominal, luego de lo cual tiene una rápida estabilización, unos tres ciclos más o menos, para llegar a un valor de estado estable de 10 A pico.

Como ya se indicó, la velocidad no tuvo una variación notable, pero se midió el valor de 1.730 r.p.m. para estado estable durante la falla. Además se notó una oscilación que no se pudo cuantificar.

3.1.5 Falla de dos Fases a Tierra

Como en el caso anterior, en esta prueba se parte del estado estable balanceado, luego de lo cual se produce la falla. Con el mismo criterio de la prueba anterior se diseñaron los circuitos de control y de fuerza. Es así, que se usa el mismo circuito de control de la Fig. 3.4 (a), mientras que el circuito de fuerza se encuentra en la Fig. 3.5

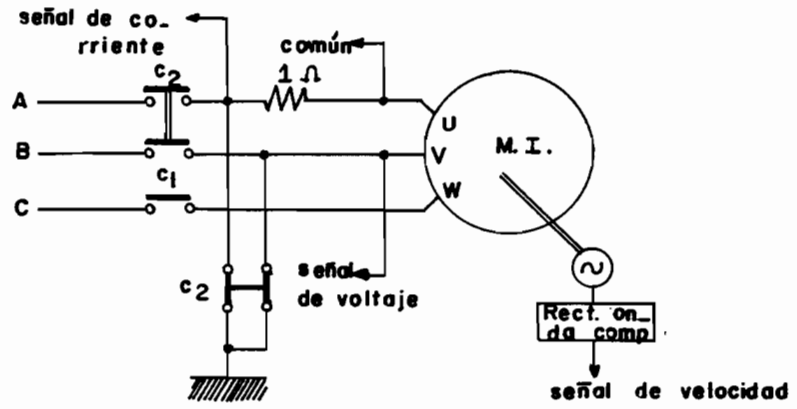
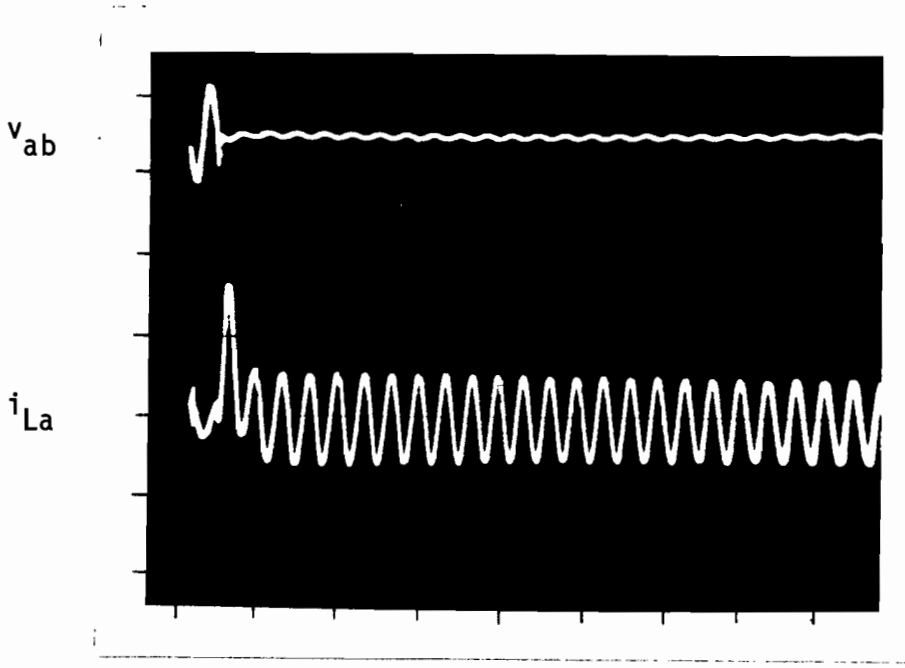


FIG. 3.5 Circuito de Fuerza para Producir Falla de Dos Fases a Tierra.

Los voltajes aplicados son: $V_{ab} = V_{bc} = V_{ca} = 208$ V y los devanados del rotor se cortocircuitan.

Se tomaron fotografías de voltaje y corriente de línea, y además de la velocidad, que esta vez si fue sensible su variación.



FOTOGRAFIA # 11

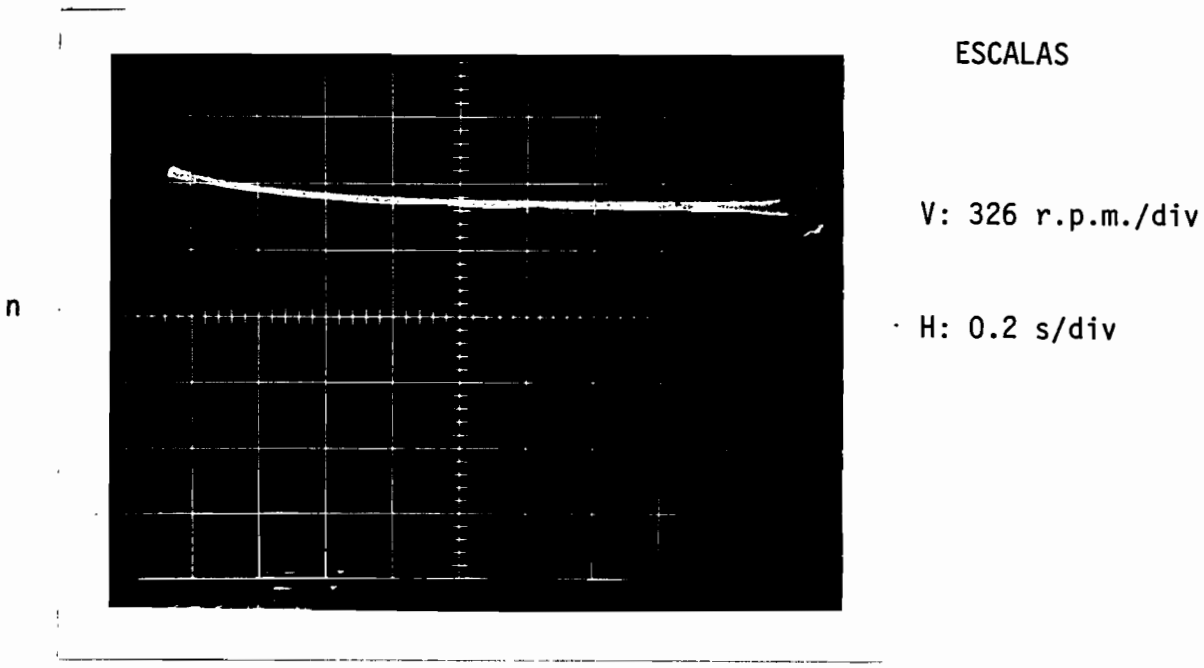
Falla de dos fases a tierra.

Voltaje y corriente de línea.

En la fotografía # 11 se observa el voltaje y la corriente de línea; se puede decir que el ángulo de falla es 120°, tras lo cual el voltaje v_{ab} debería ser cero, cosa que no ocurre debido a que existen pequeños voltajes inducidos. En las otras fases se tendrá en cambio voltajes reducidos, aproximadamente el 60% del valor nominal.

La corriente de la línea "a", que es la fotografiada tiene un pico máxi-

mo de 34 A aproximadamente, o sea 4.9 veces la corriente nominal; se estabiliza rápidamente, también lo hace en unos 3 ciclos, y llega a un valor permanente de 11 A pico aproximadamente.



FOTOGRAFIA # 12

Falla de Dos Fases Tierra

Velocidad

En la fotografía # 12 se puede ver la variación que sufre la velocidad al producirse la falla; su valor decrece hasta aproximadamente 1.580 r.p.m.,notándose oscilación como en varios casos anteriores.

3.1.6 Falla Trifásica cuando existen Resistencias Rotóricas Iguales

En forma similar a las dos pruebas anteriores, esta prueba se realizó así: se arrancó a la máquina con voltajes y resistencias rotóricas balanceadas, una vez alcanzado el estado estable se produjo la falla. Los

circuitos de control y de fuerza utilizados se ponen a continuación:

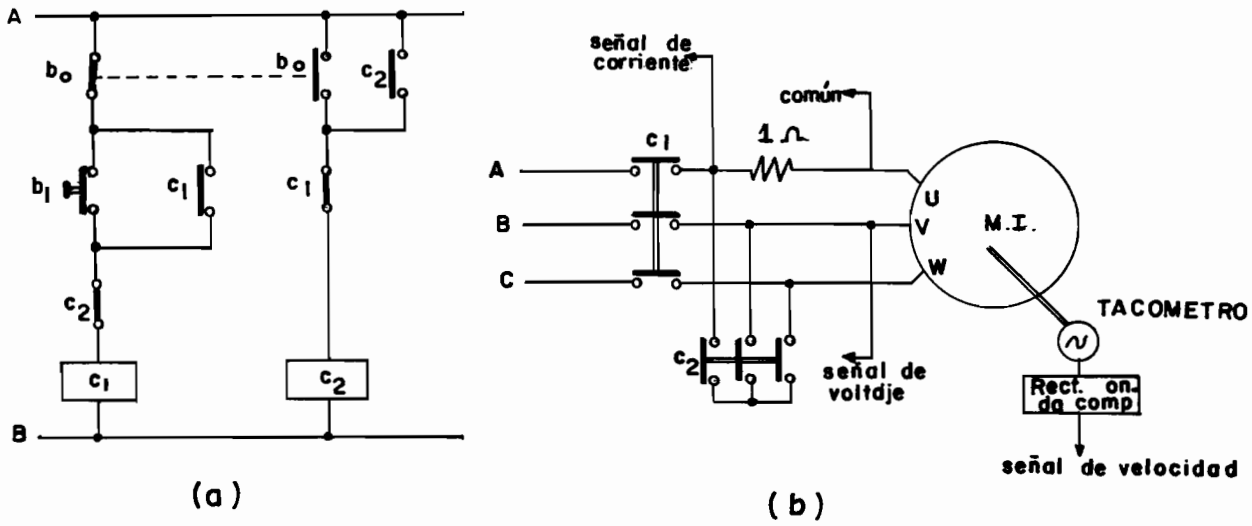


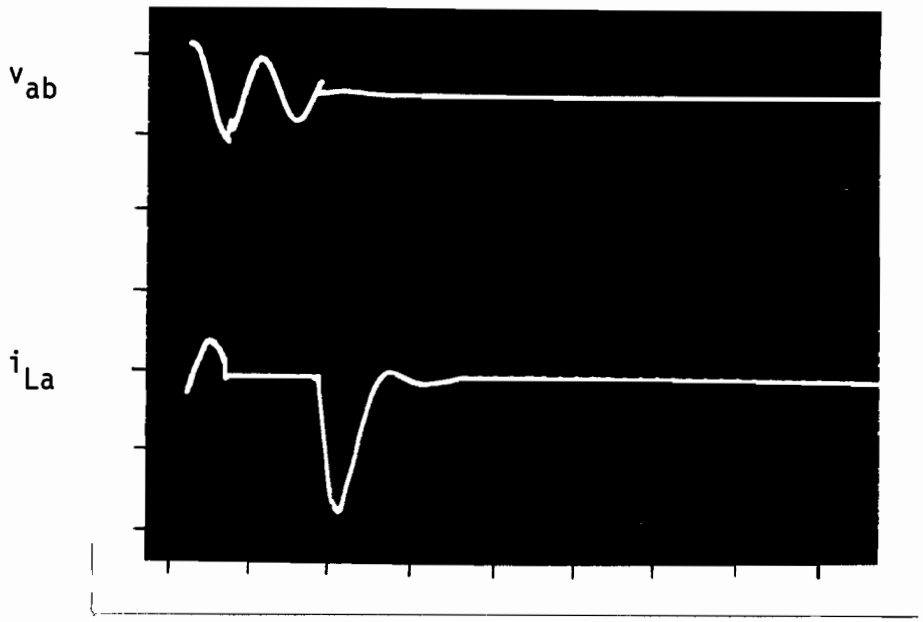
FIG. 3.6 Circuitos de Control (a) y de Fuerza (b) para producir Falla Trifásica.

Los voltajes aplicados son $V_{ab} = V_{bc} = V_{ca} = 208$ V.

El circuito de rotor está en la Fig. 3.3 y para este caso los valores de las resistencias rotóricas son: $R_a = R_b = R_c = 0.5\ \Omega$.

Se obtuvieron fotografías de voltaje y corriente de línea, velocidad y corriente de fase del rotor.

En la fotografía # 13 se tiene el voltaje y la corriente de línea; se observa que la falla no se produce instantáneamente, sino que existe un pequeño tiempo en el cual las 3 fases están desconectadas, para luego cortocircuitarse; esto se produce por la forma de conexión del circuito



ESCALAS

V_1: 500 V/div

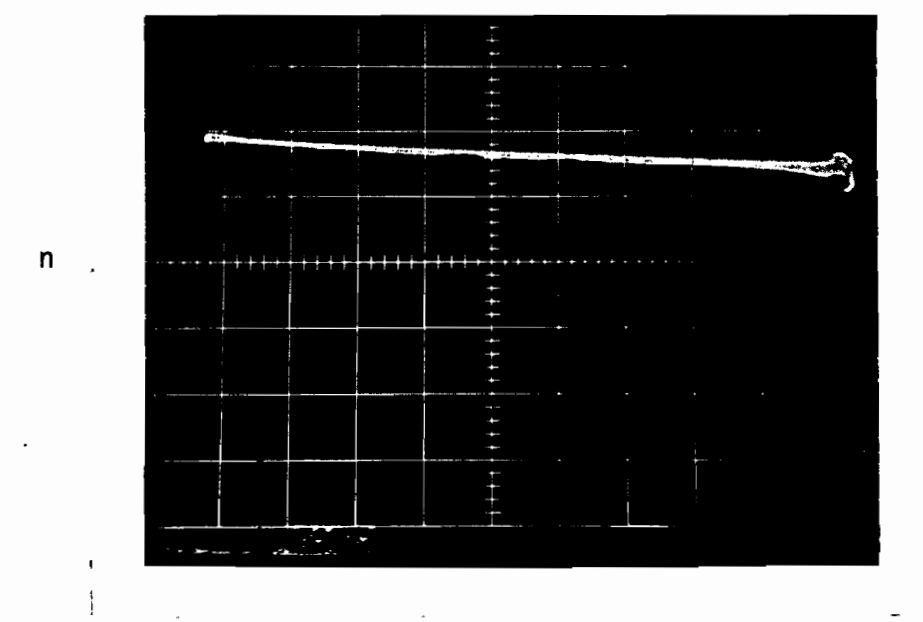
H: 20 ms/div

V_2: 10 A/div

FOTOGRAFIA # 13

Falla Trifásica: Resistencias Rotóricas Iguales

Voltaje y Corriente de Línea



ESCALAS

V: 360 r.p.m./div

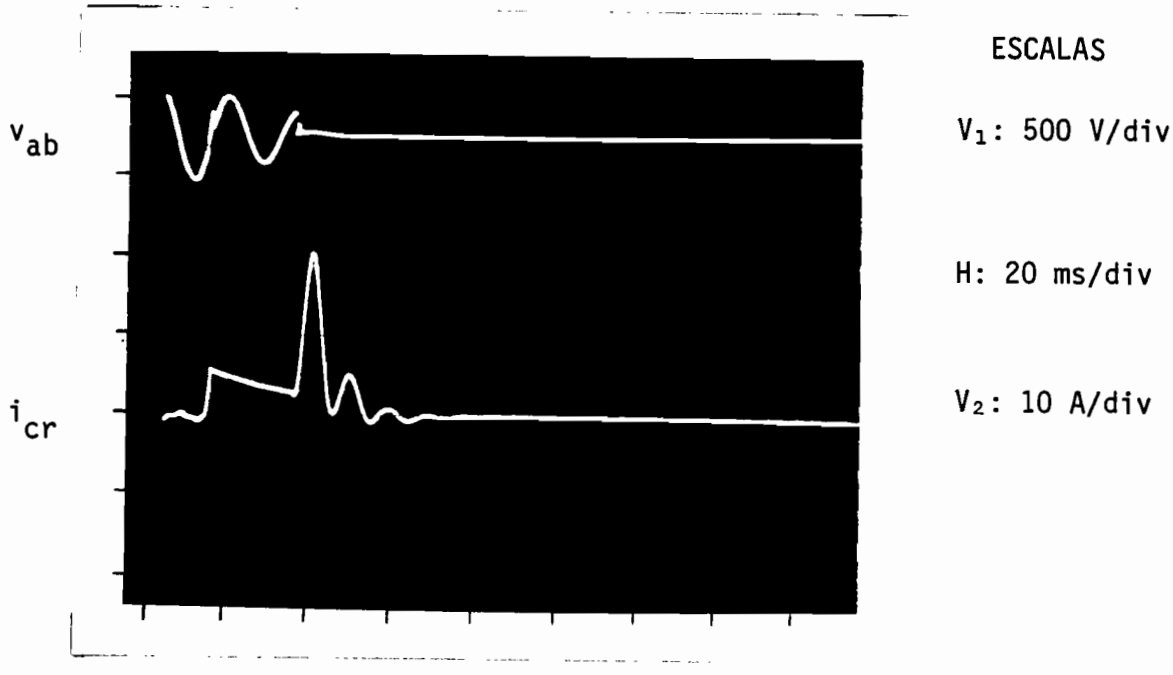
H: 0.1 s/div

FOTOGRAFIA # 14

Falla Trifásica: Resistencias Rotóricas Iguales

Velocidad

de fuerza. [Fig. 3.6 (b)]. Se puede decir que el ángulo de falla es aproximadamente -65°, tras lo cual viene un pequeño período de desconexión y luego se produce el cortocircuito, ocasionando un voltaje de línea igual a cero. La corriente de línea alcanza un valor máximo de 17 A pico, estabilizándose rápidamente en un valor igual a cero; en el transitorio de la corriente se observa más claramente el pequeño intervalo de desconexión de las fases. Además, se puede ver una corriente de 4 A pico en estado estable.



FOTOGRAFIA # 15

Falla Trifásica: Resistencias Rotóricas Iguales

Voltaje de línea y corriente de Fase del Rotor.

En la fotografía # 14 se tiene el transitorio de la velocidad durante la falla. En el intervalo muestreado se observa un decrecimiento progresivo; partiendo de la velocidad de 1.770 r.p.m. en estado estable, se llega al valor de 1.580 r.p.m. para un tiempo t = 0.9 seg. Posterior -

mente la máquina llegará a detenerse.

En la fotografía # 15 se tiene el voltaje de línea y la corriente en la fase "c" del rotor; al igual que en la fotografía # 14 se observa el intervalo de desconexión y luego se tiene el cortocircuito. La corriente del rotor tiene un valor máximo de 21 A pico y se estabiliza rápidamente en un valor cero.

Al igual que en casos anteriores, se ha asumido que las fotografías 13, 14 y 15 son simultáneas, aunque la # 15 en realidad no lo sea.

3.1.7 Arranque con alimentación Monofásica Usando un Condensador Convertidor de Fase

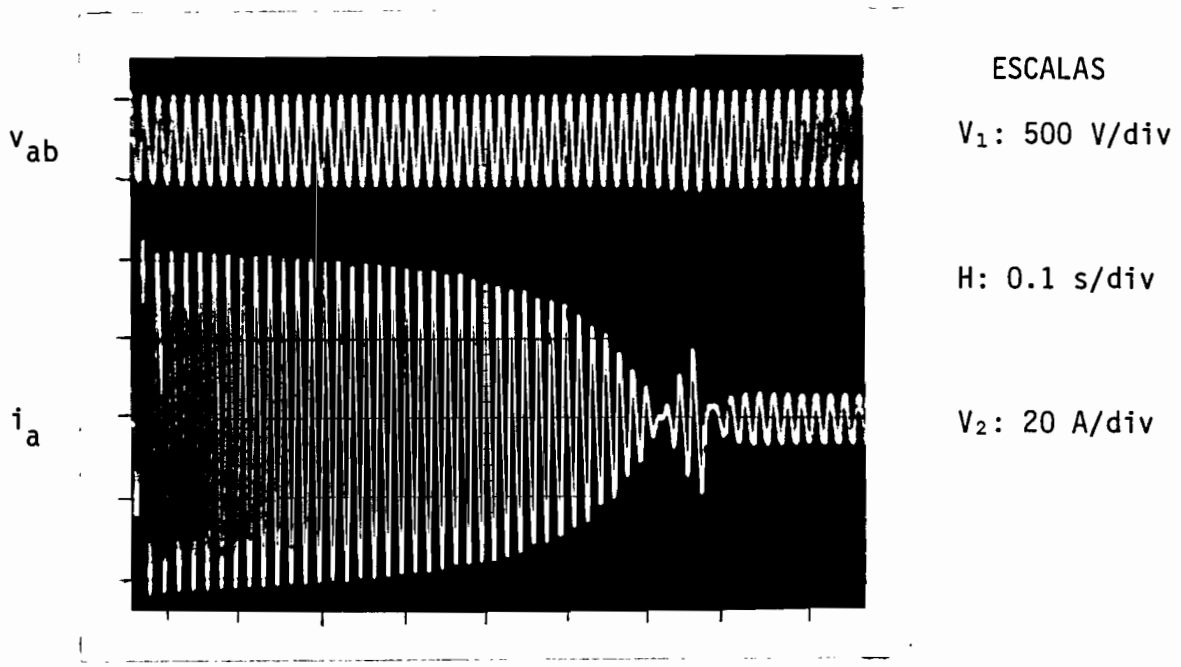
Esta prueba se efectuó de la siguiente manera: se conecta alimentación monofásica a las dos fases del estator y entre las otras dos se conectó un banco de condensadores que actuarán como convertidor de fase; hay que anotar, además que se realiza la conmutación del condensador de arranque al de estado estable una vez que la máquina ha alcanzado una velocidad cercana a la nominal. Los circuitos de control y de fuerza utilizados se indican en la figura 3.7.

De acuerdo con la teoría desarrollada en el Capítulo II, la conmutación del condensador de arranque al condensador de estado estable debe hacerse cuando la velocidad alcance un valor igual al 80% del valor nominal, debiéndose usar un interruptor centrífugo para el efecto. En la práctica en lugar del citado interruptor se usó un relé de tiempo, calibrado para que produzca la conmutación aproximadamente en ese valor de veloci

dad.

El voltaje aplicado fue 208 V, los condensadores de arranque C_1=287 μF y de estado estable C_2 = 20 μF, y los devanados del rotor cortocircuitados.

Con el circuito de la Fig. 3.7 (b) se obtuvieron fotografías de voltaje aplicado, corriente de línea y de velocidad.



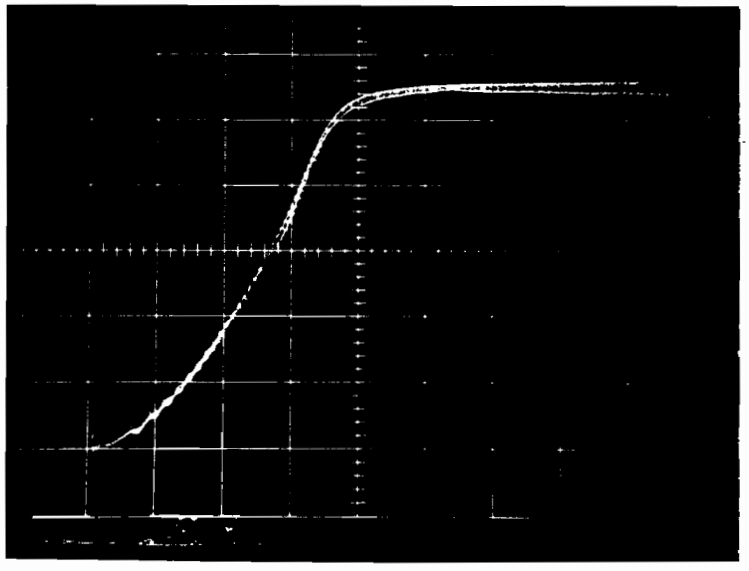
FOTOGRAFIA # 16

Arranque: Alimentación Monofásica

Voltaje y Corriente de Línea

En la fotografía # 16 se observa los transitorios de voltaje aplicado y de corriente de línea. Se puede decir que el ángulo de conexión es cercano a 0°, observándose además una disminución del voltaje aplicado, debido a la caída en la resistencia de 1 Ω utilizada para tomar la señal

de corriente; por lo tanto en realidad se tiene el 93% del voltaje nominal entre t = 0 y t = 0.6 seg., tiempo al cual la amplitud empieza a crecer hasta llegar al valor nominal en t = 0.67 seg.



ESCALAS

V: 326 r.p.m./div

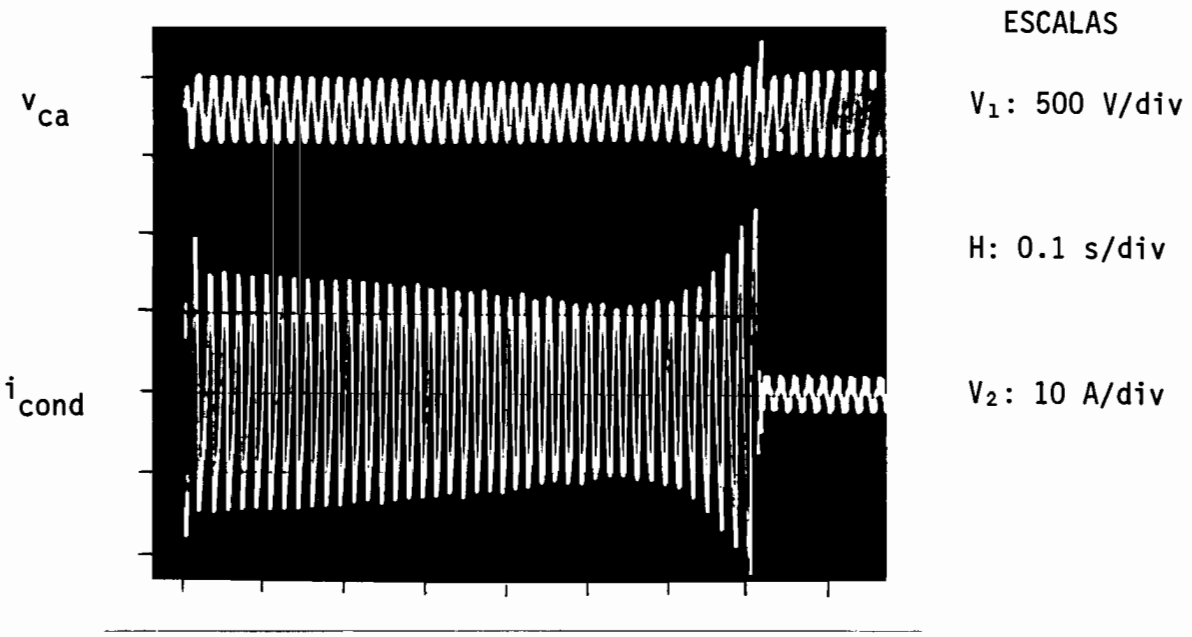
H: 0.2 s/div

FOTOGRAFIA # 17

Arranque: Alimentación Monofásica

Velocidad

En lo que respecta al transitorio de corriente puede decirse que tiene una forma muy parecida al que se obtiene con alimentación trifásica balanceada, existiendo diferencias en cuanto a magnitudes se refiere. Así, la corriente máxima es de aproximadamente 46 A pico, 6.6 veces la nominal, mientras que el tiempo de aceleración es de 0.7 seg más o menos, valor que puede verificarse en la fotografía # 17. La corriente en estado estable alcanza un valor de 6 A pico más o menos, que es mayor al valor obtenido para alimentación trifásica balanceada.



FOTOGRAFIA # 18

Arranque: Alimentación Monofásica

Voltaje entre Fases y Corriente del Condensador

De las fotografías # 16 y 17 se concluye que la conmutación del condensador no se realiza en el instante que, teóricamente, debía producirse, sino que se realiza cuando la velocidad está entre el 95% y el 100% del valor nominal; a pesar de esto, los transitorios obtenidos son aceptables aunque puede notarse que existe la tendencia a oscilar el sistema, pero luego de producirse la conmutación, la corriente se estabiliza rápidamente en su valor permanente.

Cambiando las conexiones de los puntos de prueba del osciloscopio e insertando una resistencia de 1 Ω en serie con el condensador se logró fotografiar la corriente en el condensador y el voltaje existente entre las fases "c" y "a" (fotografía # 18). Esta fotografía no fue realizada al mismo instante que las # 16 y 17, pero sirve para tener una idea

del comportamiento en las otras fases de la máquina.

En la fotografía # 18 se puede observar que el voltaje v_{ca} para $t = 0$ es cero, y con el tiempo varía en forma sinusoidal, variando su amplitud entre el 70% y el 60% del valor nominal. Se nota que empieza a crecer violentamente, cuando el sistema tiende a oscilar, más, luego de la conmutación se estabiliza en un valor cercano al 90% del valor nominal. El transitorio de corriente en el condensador tiene un valor máximo de 20 A pico para los primeros ciclos, luego empieza a disminuir, pero como la conmutación no se realiza en el instante adecuado ($\omega_r = 0.8\ \omega_s$), la corriente empieza a crecer violentamente, alcanzando picos de 25A, para estabilizarse luego de la conmutación en un valor de 2.5 A pico. En el transitorio de la corriente en el condensador se observa más fácilmente la tendencia a oscilar que se produce cuando no se conmuta a tiempo de condensadores.

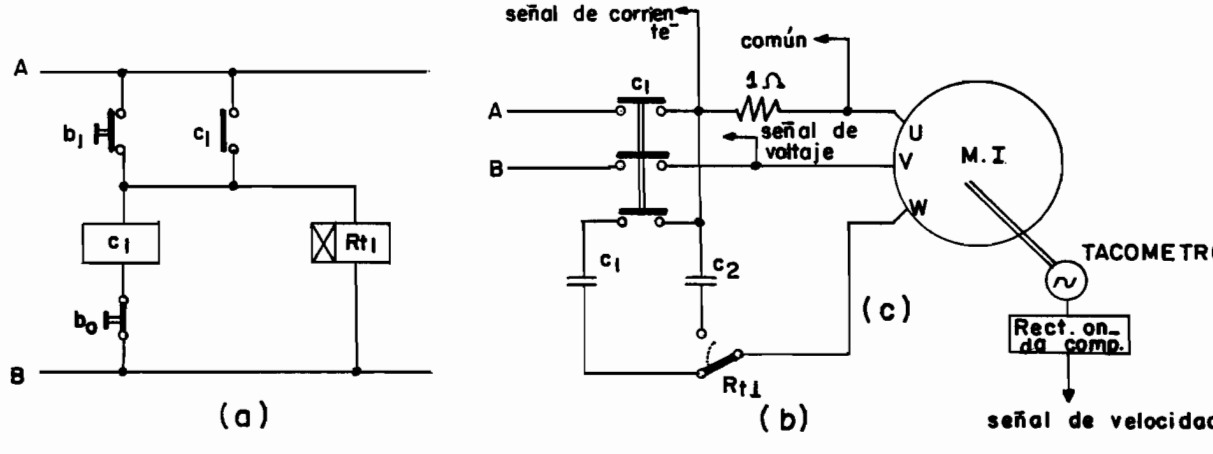


FIG. 3.7 Circuitos de Control (a) y de Fuerza (b) para arranque con alimentación monofásica.

C A P I T U L O I V

SIMULACION MATEMATICA

Una vez desarrolladas las ecuaciones generales de la máquina de inducción, incluida la saturación, ec. (1.19), (1.76), (1.89) y (1.94), las mismas que rigen su comportamiento eléctrico y mecánico, corresponde ahora, desarrollar las ecuaciones que representen el funcionamiento de la máquina bajo condiciones especiales como son: voltajes aplicados desbalanceados, resistencias rotóricas desiguales, fallas de 1 y 2 fases a tierra, falla trifásica y alimentación monofásica usando un condensador como convertidor de fase.

4.1 ECUACIONES PARA OPERACION ASIMETRICA (1)

Los distintos casos considerados serán simulados exteriormente, tomando como variables de entrada los voltajes aplicados de fase, y como variables de salida se tiene voltajes, corrientes, torque y velocidad. Se brinda además, la facilidad de programar la ecuación del torque de carga en función de la velocidad. Enfocado así el problema, desde el exterior, la simulación de los distintos casos está dada por la adecuada representación de los voltajes de estator como de rotor, variables que deberán ser referidas al sistema de ejes q d o.

Hay que recordar que debido al tipo de conexión utilizado, sin neutro , no existen componentes de secuencia cero, situación ya explicada en el Capítulo I.

Como primer caso se realiza el desarrollo de las ecuaciones de voltaje para cuando los voltajes aplicados son balanceados.

4.1.1 Voltajes Balanceados (1)

En condiciones balanceadas los voltajes instantáneos aplicados por fase (v_{as}, v_{bs}, v_{cs}) son conocidos, ya sea para la conexión del estator en delta como en estrella. Además, la forma de los voltajes aplicados, referidos al sistema de ejes q d o, está determinada por la referencia escogida, éstos deben ser adecuadamente desarrollados. Los sistemas de referencia considerados son:

a) Sistemas fijo en estator, $\omega = 0$

b) Sistema fijo en rotor, $\omega = \omega_r$

c) Sistema girando a la velocidad sincrónica, $\omega = \omega_e$

Aplicando las ecuaciones de transformación (1.18) a los voltajes aplicados se tiene:

$$v_{qs} = \left| v_{as} \cos\theta + v_{bs} \left(\cos\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + v_{cs}\left(\cos\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right|$$

$$v_{ds} = \left| v_{as} \operatorname{sen}\theta + v_{bs}\left(\operatorname{sen}\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + v_{cs}\left(\operatorname{sen}\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right| \qquad (4.1)$$

Se escoge, por facilidad, el sistema de ejes fijos en estator, o sea, $\omega = 0$ y por tanto $\theta = 0$; luego de simplificar se obtiene:

$$v_{qs}^{s} = \frac{2}{3}\left(v_{as} - \frac{1}{2} v_{bs} - \frac{1}{2} v_{cs}\right)$$

$$v_{ds}^{s} = \frac{1}{\sqrt{3}} (-v_{bs} + v_{cs}) \qquad (4.2)$$

De esta forma se ha obtenido los voltajes en ejes q d o para el caso de referencia estatórica, y en base a éstos se puede fácilmente obtener los voltajes para los casos de referencia rotórica y referencia sincrónica. Así, utilizando relaciones trigonométricas en la Fig. 1.2 se llega a los siguientes resultados:

$$v_{qs}^{r} = v_{qs}^{s} \cos \theta_r - v_{ds}^{s} \operatorname{sen} \theta_r$$

$$v_{ds}^{r} = v_{qs}^{s} \operatorname{sen} \theta_r + v_{ds}^{s} \cos \theta_r \qquad (4.3)$$

y

$$v_{qs}^{e} = v_{qs}^{s} \cos \theta_e - v_{ds}^{s} \operatorname{sen} \theta_e$$

$$v_{ds}^{e} = v_{qs}^{s} \operatorname{sen} \theta_e + v_{ds}^{s} \cos \theta_e \qquad (4.4)$$

Resumiendo: para cualquier sistema de referencia y para cualquier conexión del estator, se calcula los voltajes v_{qs}^{s} y v_{ds}^{s} mediante las ec. (4.2), y luego, de acuerdo al sistema de referencia escogido se calcula los correspondientes voltajes aplicados mediante las ec. (4.3) o (4.4).

Para condiciones balanceadas es posible realizar algunas simplificaciones en las ec. (4.2), (4.3) y (4.4), pero éstas no se hacen en la presente modelación ya que se quiere generalizar para cualquier tipo de voltajes aplicados.

Es necesario indicar que en el programa digital desarrollado, se tiene que las corrientes calculadas son las de línea para la conexión delta y las de fase para la conexión estrella; en igual forma los voltajes para conexión delta será los de fase y para conexión estrella, los de línea.

4.1.2 Voltajes Desbalanceados (1)

En este caso debe considerarse los dos tipos de conexión en el estator: en delta o en estrella.

1º Si el estator está conectado en delta, se tiene como datos los voltajes de alimentación de línea, Fig. 4.1, que serán igual a los voltajes aplicados de fase.

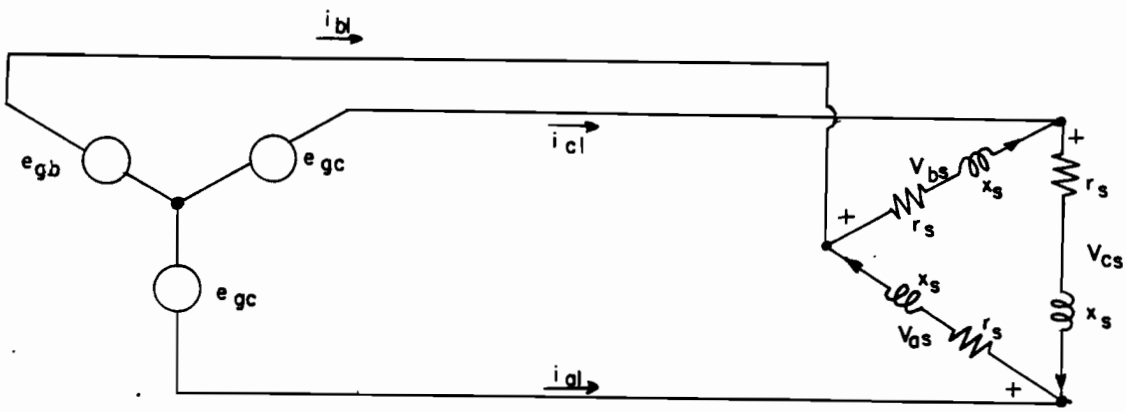


FIG. 4.1 Estator Conectado en Delta.

Así,

$$v_{as} = v_{ab}$$
$$v_{bs} = v_{bc}$$
$$v_{cs} = v_{ca} \qquad (4.5)$$

Una vez conocidos estos voltajes, se transforma al sistema de ejes q d o aplicando las ec. (4.2) y luego las ec. (4.3) o (4.4) de acuerdo a la referencia escogida.

2º Cuando el estator está conectado en estrella se necesitan conocer los voltajes fase-neutro de alimentación (ega, egb, egc), Fig. 2.2, de donde se puede obtener los voltajes de fase aplicados.

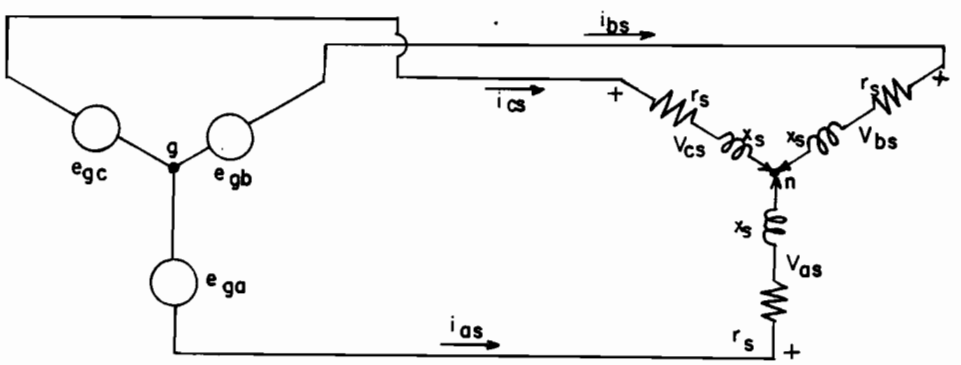


FIG. 4.2 Estator Conectado en Estrella.

Así,

$$\begin{aligned} v_{as} &= e_{ga} - v_{ng} \\ v_{bs} &= e_{gb} - v_{ng} \\ v_{cs} &= e_{gc} - v_{ng} \end{aligned} \qquad (4.6)$$

reemplazando en las ec. (4.2) se obtiene, sin importar la forma de los voltajes de alimentación:

$$v_{qs}^{s} = \frac{2}{3}\left(e_{ga} - \frac{1}{2}e_{gb} - \frac{1}{2}e_{gc}\right)$$

$$v_{ds}^{s} = \frac{1}{\sqrt{3}}\left(-e_{gb} + e_{gc}\right) \qquad (4.7)$$

y, como en el caso anterior, dependiendo del sistema de referencia escogido, se aplica las ec. (4.3) o (4.4).

Una vez hecho el desarrollo general, conviene describir el procedimiento usado para la simulación de los voltajes aplicados en los ejemplos realizados. Así, para los ejemplos en los cuales se tiene alimentación trifásica desbalanceada se sigue el proceso:

1) Se calcula los fasores de voltaje, en base a los datos obtenidos (v_{ab}, v_{bc}, v_{ca}) en estado estable.

2) Debido a la forma de conexión de las resistencias usadas para producir los voltajes desbalanceados, se tiene una amplitud variable con el tiempo para los voltajes aplicados, de acuerdo al siguiente gráfico:

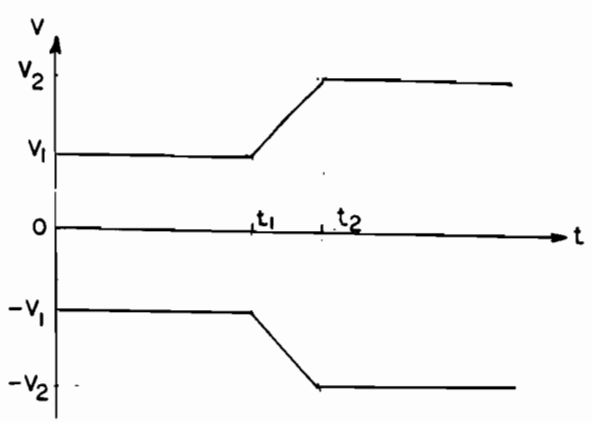


FIG. 4.3 Voltajes Aplicados Desbalanceados (Envolvente).

Se define una variable KO, función del tiempo, Fig. 4.4, que multiplicará al módulo de los voltajes aplicados, para obtener las envolventes fotografiadas.

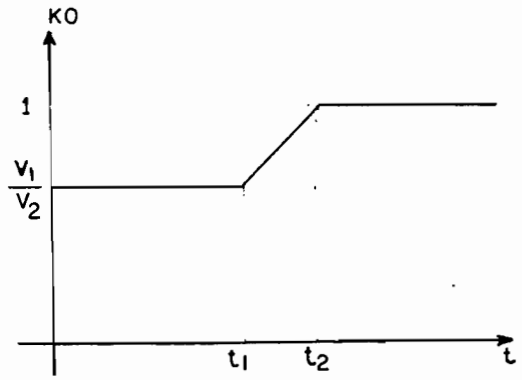


FIG. 4.4 KO = f(t)

De la Fig. 4.4 se obtiene la función de KO con el tiempo:

$$KO = \begin{cases} \dfrac{V_1}{V_2} & 0 \leq t < t_1 \\ \dfrac{1 - \dfrac{V_1}{V_2}}{t_2 - t_1} t + \dfrac{\dfrac{V_1}{V_2} t_2 - t_1}{t_2 - t_1} & t_1 \leq t \leq t_2 \\ 1 & t > t_2 \end{cases} \qquad (4.8)$$

4.1.3 Resistencias Rotóricas Desiguales ($_1$)

Al conectar resistencias rotóricas desiguales en el rotor las fases del rotor pierden simetría, en consecuencia aparecen resistencias variables en el tiempo en todos los sistemas de referencia, excepto en el sistema que está fijo en el rotor; es por esta razón que se escoge, para resolver estos casos, referencia rotórica.

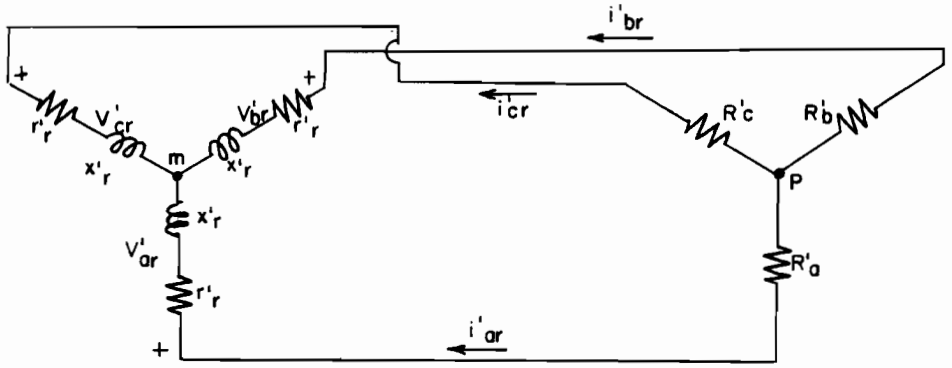


FIG. 4.5 Circuito del Rotor.

En la Fig. 4.5 se presenta el circuito del rotor para el caso considerado, y de ésta se pueden obtener los voltajes de fase aplicados al rotor:

$$v'_{ar} = v'_{pm} - i'_{ar} R'_a$$

$$v'_{br} = v'_{pm} - i'_{br} R'_b$$

$$v'_{cr} = v'_{pm} - i'_{cr} R'_c \qquad (4.9)$$

Aplicando a las ec. (4.9) las ecuaciones de transformación (1.18) y tomando como ya se había dicho, $\omega = \omega_r$ y $\theta = \theta_r$, se obtiene:

$$v'^{r}_{qr} = -\frac{2}{3} i'_{ar} R'_a + \frac{1}{3} i'_{br} R'_b + \frac{1}{3} i'_{cr} R'_c$$

$$v'^{r}_{dr} = \frac{1}{\sqrt{3}} i'_{br} R'_b - \frac{1}{\sqrt{3}} i'_{cr} R'_c \qquad (4.10)$$

Para las corrientes se aplica las ecuaciones de transformación inversa (1.23):

$$i'_{ar} = i'^{r}_{qr}$$

$$i'_{br} = -\frac{1}{2} i'^{r}_{qr} - \frac{\sqrt{3}}{2} i'^{r}_{dr}$$

$$i'_{cr} = -(i'_{ar} + i'_{br}) \qquad (4.11)$$

Reemplazando las ec. (4.11) en las ec. (4.10) se llega a los siguientes resultados:

$$v'^{r}_{qr} = -\frac{1}{6}(4R'_a + R'_b + R'_c)\, i'^{r}_{qr} - \frac{1}{2\sqrt{3}}(R'_b - R'_c)\, i'^{r}_{dr}$$

$$v'^{r}_{dr} = -\frac{1}{2\sqrt{3}}(R'_b - R'_c)\, i'^{r}_{qr} - \frac{1}{2}(R'_b + R'_c)\, i'^{r}_{dr} \qquad (4.12)$$

Es conveniente anotar que los valores de las resistencias rotóricas medidas deben ser referidas al estator mediante la relación de espiras; así:

$$R'_a = a^2 R_a$$

$$R'_b = a^2 R_b$$

$$R'_c = a^2 R_c \qquad (4.13)$$

donde "a" es la relación de espiras, calculada en el Anexo # 1, mientras que R_a, R_b y R_c son los valores medidos de resistencia, en p.u.

4.1.4 Voltajes Desbalanceados y Resistencias Rotóricas Desiguales (1)

A pesar que este caso muy rara vez ocurre, es simulado fácilmente debido a la generalidad de la modelación.

Para esto se fija el sistema de ejes en el rotor, $\omega = \omega_r$ y $\theta = \theta_r$.

A continuación se calcula los voltajes aplicados al estator, mediante el procedimiento descrito en la sección 4.1.2, tomando en cuenta el sistema con referencia rotórica. Luego se calcula los voltajes aplicados al rotor, a través de las ec. (4.12) y tomando en cuenta las ecuaciones (4.13).

Se observa que este caso es la combinación de los 2 anteriores, por lo tanto es necesario tener en cuenta las consideraciones hechas en cada caso.

4.1.5 Fallas

1) Falla Fase-Tierra.- Dentro de este caso se va a tomar las dos formas de conexión del estator: delta y estrella.

   a) Para conexión delta en estator, basándose en la Fig. 4.6:

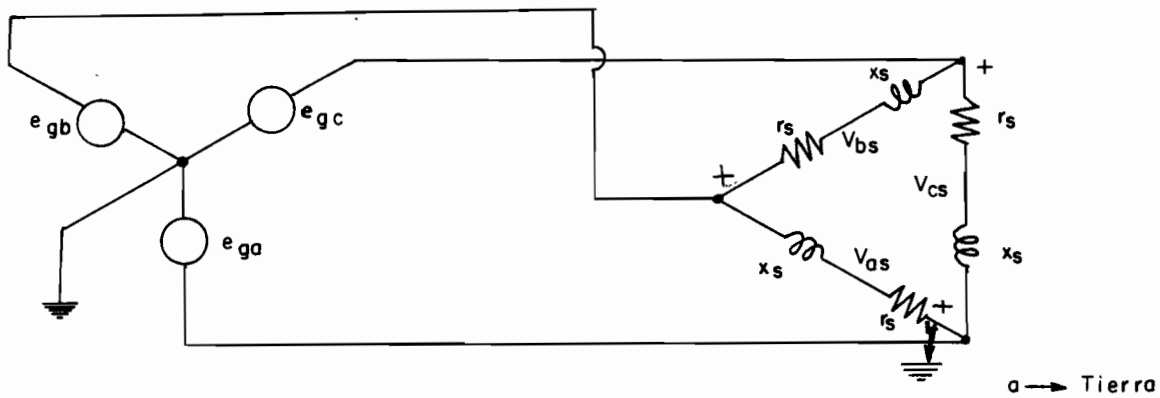


FIG. 4.6 Falla Fase-Tierra

Estator Conectado en Delta

Se asume que en la fase "a" se produce la falla y que la máquina está conectada a una barra infinita. De esta manera, los voltajes aplicados a las fases "a" y "c" serán ahora los voltajes de fase, mientras que el voltaje de la fase "b" se mantiene como el voltaje de línea. Esto se indica en el siguiente diagrama fasorial:

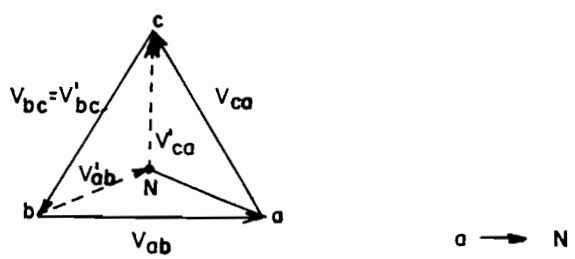


FIG. 4.7 Diagrama Fasorial de Voktajes Aplicados Durante Falla Fase-Tierra (Conexión Delta).

V_a, V_b, V_c representan los voltajes aplicados antes de la falla

V'_a, V'_b, V'_c representan los voltajes aplicados luego de la falla

Entonces:

$$V'_{ab} = \frac{V_{ab}}{\sqrt{3}} \angle 30°$$

$$V'_{bc} = V_{bc}$$

$$V'_{ca} = \frac{V_{ca}}{\sqrt{3}} \angle -30° \qquad (4.14)$$

En el modelo implementado se puede escoger el instante al que se produce la falla: ya sea directamente, ingresando ese valor de tiempo o en forma indirecta, ingresando el valor del ángulo al cual se produce la falla; en este último caso se dibujan 2 ciclos de estado estable previos a la falla.

b) Para la conexión estrella en el estator se toma la Fig. 4.8.

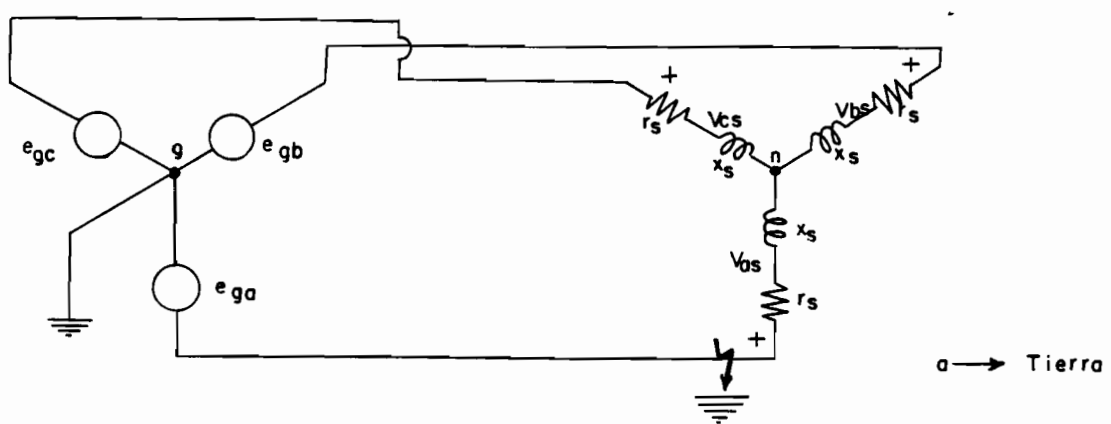


FIG. 4.8 Falla Fase-Tierra.
Estator Conectado en Estrella.

Se considera igualmente que en la fase "a" se produce la falla y que la

máquina está conectada a una barra infinita. De esta forma, los voltajes en cada fase serán:

$$v_{as} = - v_{ng}$$

$$v_{bs} = e_{gb} - v_{ng}$$

$$v_{cs} = e_{gc} - v_{ng} \qquad (4.15)$$

Así, se puede proporcionar como datos, al modelo, los siguientes valores:

$$e_{ga}' = 0$$

$$e_{gb}' = e_{gb}$$

$$e_{gc}' = e_{gc} \qquad (4.16)$$

en donde e_{ga}, e_{gb}, e_{gc} son los voltajes fase neutro de alimentación antes de la falla y respectivamente e'_{ga}, e'_{gb}, e'_{gc} luego de la falla.

2) Falla de 2 Fases-Tierra.- Se considera igualmente las 2 formas de conexión del estator.

a) Conexión en delta: se asume que la falla se produce en las fases "a" y "b". Tomando como referencia la Fig. 4.6, se puede ver que los voltajes aplicados a las fases "b" y "c" serán ahora los voltajes de fase, mientras que el voltaje aplicado a la

fase "a" será igual a cero. Esto se muestra en el siguiente diagrama fasorial.

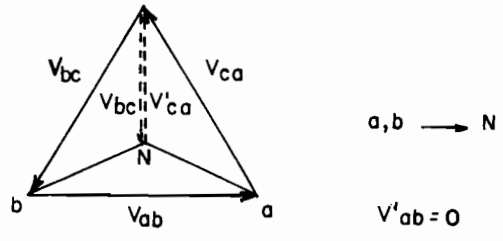


FIG. 4.9 Diagrama Fasorial de Voltajes Aplicados Durante Falla 2 Fases-Tierra (Conexión Delta).

Entonces:

$$V'_{ab} = 0$$

$$V'_{bc} = \frac{V_{bc}}{\sqrt{3}} \angle 30°$$

$$V'_{ca} = \frac{V_{ca}}{\sqrt{3}} \angle -30° \qquad (4.17)$$

b) Conexión en estrella: se asume que las fallas se producen en las fases "a" y "b". Tomando como referencia la Fig. 4.8, se tiene que los voltajes de fase aplicados son:

$$v_{as} = - v_{ng}$$

$$v_{bs} = - v_{ng}$$

$$v_{cs} = e_{gc} - v_{ng} \qquad (4.18)$$

Entonces se puede proporcionar al modelo los siguientes datos:

$$e_{ga}' = 0$$
$$e_{gb}' = 0$$
$$e_{gc}' = e_{gc} \qquad (4.19)$$

3) Falla Trifásica.- Este caso es fácilmente simulado ya que sin importar el tipo de conexión del estator todos los voltajes aplicados son cero. Entonces para el modelo se tiene:

$$v_{as} = v_{bs} = v_{cs} = 0 \qquad (4.20)$$

4.1.6 Alimentación Monofásica

Para este caso, alimentación monofásica usando un condensador convertidor de fase, se considera la conexión delta en estator; así, en la Fig. 4.10 se observa la conexión implementada y en base a esta figura se realiza el desarrollo matemático.

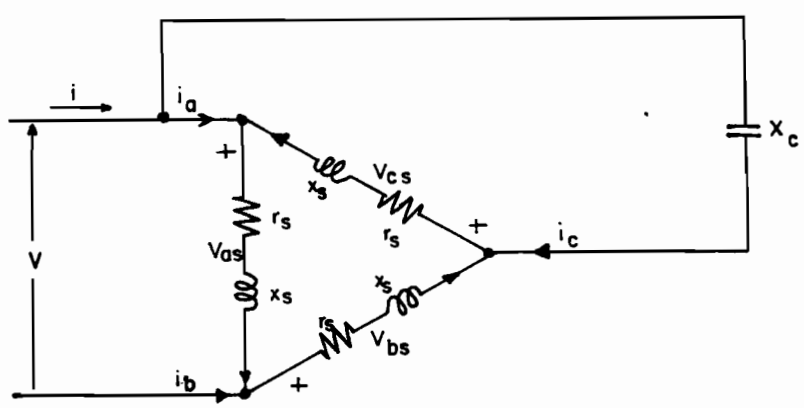


FIG. 4.10 Alimentación Monofásica (Estator en Delta).

En donde V es el voltaje monofásico aplicado y x_c es la reactancia del condensador usado.

Aplicando las leyes de Kirchhoff en la Fig. 4.10 se obtiene:

$$V - V_{as} = 0$$

$$V_{cs} + \frac{\omega_e x_c}{p} (i_{cs} - i_{bs}) = 0$$

$$V_{as} + V_{bs} + V_{cs} = 0 \qquad (4.21)$$

Despejando se llega a:

$$V_{as} = V$$

$$V_{bs} = - V_{as} - V_{cs}$$

$$V_{cs} = \frac{\omega_e x_c}{p} (i_{bs} - i_{cs}) \qquad (4.22)$$

Ahora bien, por las ec. de transformación inversa (1.23) se sabe que:

$$i_{bs} = i_{qs} \cos (\theta - \frac{2\pi}{3}) + i_{ds} \operatorname{sen} (\theta - \frac{2\pi}{3})$$

$$i_{cs} = i_{qs} \cos (\theta + \frac{2\pi}{3}) + i_{ds} \operatorname{sen} (\theta + \frac{2\pi}{3})$$

valores que son reemplazados en la ec. (4.22):

$$V_{cs} = \frac{\omega_e x_c}{p} \left| i_{qs}\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + i_{ds}\ \text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) - i_{qs}\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) - i_{ds}\text{sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) \right| \tag{4.23}$$

Escogiendo el sistema de ejes en estator, $\omega = 0$ y $\theta = 0$, se llega a:

$$V_{cs} = \frac{\omega_e x_c}{p} \left| -\sqrt{3}\ i_{ds}^{s} \right| \tag{4.24}$$

Además, reemplazando i_{ds}^{s} por su valor en concatenaciones de flujo, ec. (1.105), se obtiene la ecuación diferencial:

$$p\ V_{cs} = \sqrt{3}\ \frac{\omega_e x_c}{x_{ls}}\ (\psi_{md}^{*} - \psi_{ds}) \tag{4.25}$$

Esta ecuación se agrega al grupo de ecuaciones diferenciales planteadas en el Capítulo I, ec. (1.76), y su resolución dará el voltaje aplicado a la fase "c" en cada paso de integración.

Una vez determinados los voltajes de fase aplicados, se sigue el mismo procedimiento usado para el caso de voltajes desbalanceados, con el sistema de ejes q d o fijo en estator.

En el programa digital se obtiene como variables de salida los mismos en todos los casos, pero ahora las corrientes del estator cumplen las siguientes relaciones:

W(1) = corriente de la línea "a" de estator.

W(2) = corriente de la línea "b" del estator y es a la vez la corriente total del circuito.

W(3) = corriente de la línea "c" del estator y es a la vez la corriente del condensador.

además, W(4) = v_{as} es también el voltaje aplicado.

y W(6) = v_{cs} es el voltaje en los terminales del condensador.

Hay que anotar además, que para el correcto funcionamiento del modelo , en el programa se cambia el valor del condensador usado en el arranque por uno de menor valor para el estado estable, variando x_c cuando la velocidad sea cercana a la nominal; según el Anexo # 2, al 80% del valor nominal.

4.2 CONDICIONES INICIALES

El programa desarrollado contempla 2 casos: arranque y estado estable, y para cada caso se necesita, para iniciar el proceso de integración, determinar las condiciones iniciales de las variables de estado, o sea de las concatenaciones de flujo.

Para el caso de arranque se asume que todas las variables de estado, las concatenaciones de flujo, son cero para t = 0, sin importar si el sistema es o no balanceado.

Para sistemas balanceados las condiciones iniciales se obtienen resolviendo el circuito equivalente y asumiendo que el tiempo t = 0 los ejes del estator y del rotor coinciden. Así, tomando el circuito equivalente de la máquina de inducción para estado estable, Fig. 1.4, se puede resolver fasorialmente y encontrar las corrientes, de la siguiente manera:

$$\underset{\sim}{I}_{as} = \frac{\underset{\sim}{V}_{as}\,(Z_2 + Z_3)}{Z_1Z_2 + Z_2Z_3 + Z_1Z_3}$$

$$\underset{\sim}{I}'_{ar} = \frac{-\,\underset{\sim}{I}_{as}Z_3}{Z_2 + Z_3} \qquad (4.26)$$

en donde:

$$Z_1 = r_s + j\,x_{ls}$$

$$Z_2 = \frac{r'_r}{s} + j\,x'_{lr}$$

$$Z_3 = j\,x_m \qquad (4.27)$$

Determinados $\underset{\sim}{I}_{as}$ e $\underset{\sim}{I}'_{ar}$ se procede a calcular los fasores $\underset{\sim}{I}_{qs}$, $\underset{\sim}{I}_{ds}$ $\underset{\sim}{I}'_{qr}$ e $\underset{\sim}{I}'_{dr}$, mediante las ec. (1.65). Luego se halla los valores instantáneos para t = 0 y se puede encontrar las concatenaciones de flujo usando las ec. (1.70) y (1.71).

Debido a que el modelo implementado tiene ajustes para introducir la saturación, y como el circuito equivalente es un modelo lineal, los ajustes se realizarán en forma iterativa hasta adquirir el punto de funcionamiento real. Esto es lo que se denomina la saturación inicial; el proceso seguido es así:

1) Se calcula $I_{qd(s,r)}$ del circuito equivalente.
2) Se halla ψ_{mq} y ψ_{md}, ec. (1.70).
3) Se introduce la saturación, ec. (1.106).
4) Se calcula $\psi_{qd(s,r)}$, ec. (1.71).

5) Se calcula las corrientes $i_{qd(s,r)}$, ec. (1.105).

6) Se compara si los flujos mutuos actuales son iguales a los anteriores, si es así se sale del lazo, si no lo es se regresa al paso 2.

Igual procedimiento se usa para calcular las condiciones iniciales cuando se han conectado resistencias rotóricas iguales, pero con una pequeña modificación: se reemplaza

$$Z_2 = R' + \frac{r'_r}{s} + j\, x'_{lr} \qquad (4.28)$$

donde R' es el valor de la resistencia rotórica de c/fase, referida al estator.

Para condiciones desbalanceadas se toma las condiciones iniciales de un archivo creado para el efecto; ya que los ejemplos realizados generalmente constan de arranque, los valores finales son almacenados en el archivo que servirá de condiciones iniciales para el estado estable. Así, una vez realizado el arranque, los datos finales servirán para simular el estado estable y cualquiera de las otras opciones del programa general.

4.3 DESCRIPCION DEL METODO DE SOLUCION

El método usado resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento eléctrico y mecánico de la máquina de inducción. Para esto se utiliza el método numérico de integración Runge-Kutta de 4º Orden; este método ha sido utilizado anteriormente en numerosos trabajos de simulación de máquinas eléctricas, dando buenos resultados; a

demás con el algoritmo que se describe a continuación se puede utilizar eficientemente la memoria y el tiempo de ejecución del programa. (11,13)

Así, dado un sistema de ecuaciones diferenciales de la forma:

$$\dot{y} = f(t; y) \tag{4.29}$$

la solución será:

$$y_{i+1} = y_i + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

en donde:

$$K_1 = f(t_i; y_i)$$

$$k_2 = f\left(t_i + \frac{1}{2}h; y_i + \frac{1}{2}h\,k_1\right)$$

$$k_3 = f\left(t_i + \frac{1}{2}h; y_i + \frac{1}{2}h\,k_2\right)$$

$$k_4 = f(t_i + h; y_i + h\,k_3) \tag{4.30}$$

siendo "y" las variables de estado, "t" el tiempo y "h" el paso de integración.

Paralelamente con el método numérico de integración hay que determinar el paso de integración adecuado. En el presente trabajo se toma el valor de h = 0.001 seg. que es conveniente por las siguientes razones: se obtiene una resolución y apreciación adecuada de los transitorios, dado que la frecuencia de la red tiene un período de 16.66 m seg; además, el

tiempo de ejecución de los programas es adecuado.

Los resultados obtenidos con este valor de "h" son satisfactorios y no existe variación con aquellos en los que se usó un valor menor de "h". Se probó con h = 0.0005 seg. y = 0.0002 seg.. Excepto para alimentación monofásica, en donde se usa h = 0.0005 seg., siendo necesario un menor valor.

El procedimiento seguido comienza con el ingreso de datos y la selección de funcionamiento; además en la sección 4.1 se desarrollan ya las ecuaciones que representan los casos considerados, que como se dijo éstos son simulados con la adecuada modelación de los voltajes aplicados, tanto al estator como al rotor; debiéndose considerar además, las respectivas condiciones iniciales. Luego se ingresa al proceso de integración y los resultados obtenidos se almacenan en un archivo; a continuación se chequea si el tiempo de estudio ha concluido, si es así, se procede a realizar los gráficos, y si no lo es se continúa con la integración.

Adicionalmente, se ha realizado un programa que permite calcular los condensadores óptimos para el funcionamiento de la máquina trifásica con alimentación monofásica, en base a los parámetros eléctrocs de la máquina.

4.4 DIAGRAMAS DE BLOQUES DEL PROGRAMA

El programa desarrollado cumple las siguientes funciones, con la secuencia indicada en el siguiente diagrama de bloques:

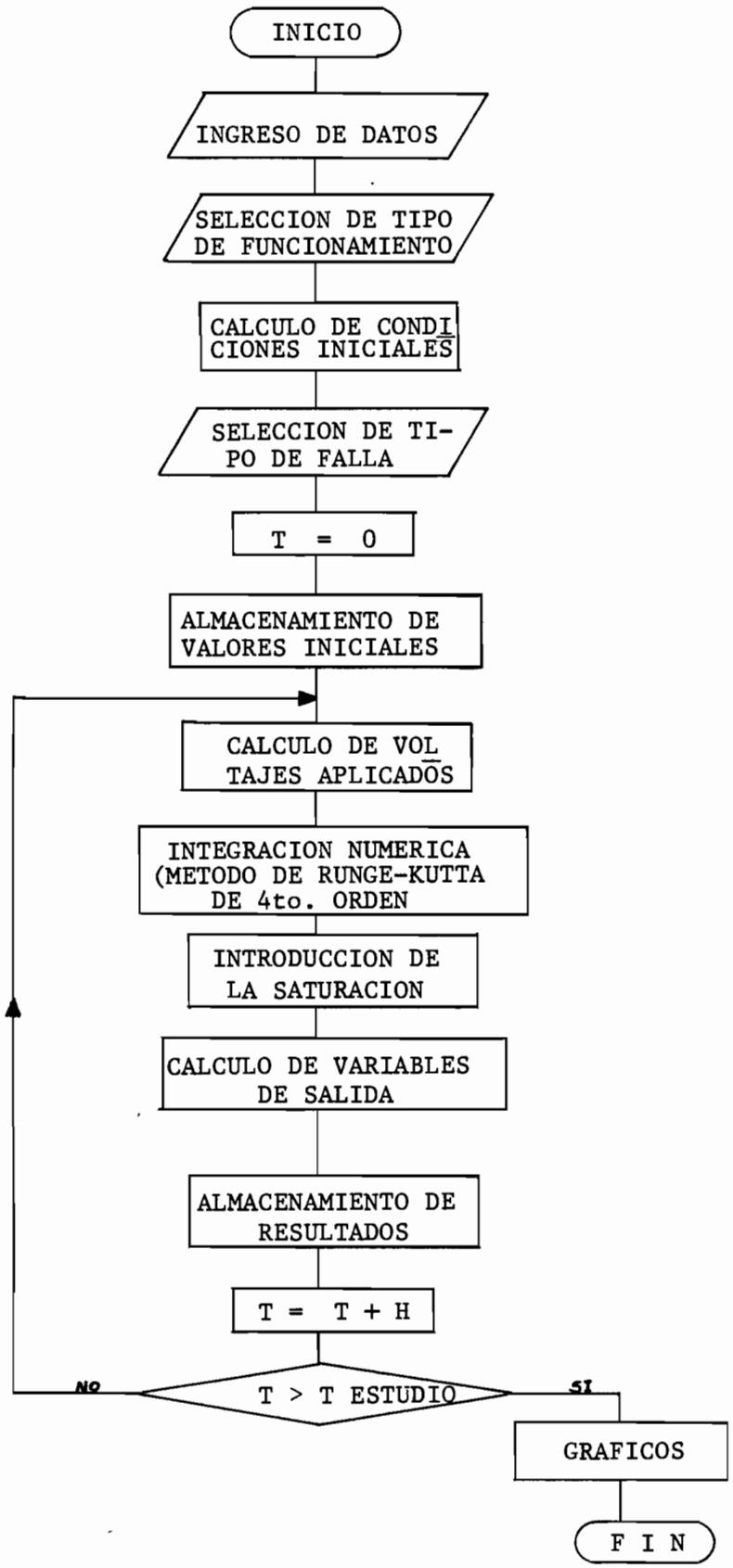


FIG. 4.12 Diagrama de Bloques del Programa

La explicación completa de la estructura del programa y de las diferentes subrutinas se encuentra en el manual de uso del programa.

C A P I T U L O V

RESULTADOS OBTENIDOS Y COMPARACIONES

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos en la simulación digital, éstos se comparan con los que fueron obtenidos en las pruebas de laboratorio (Cap. III) y de esta forma se prueba la validez del modelo.

De las fotografías tomadas en el laboratorio, se obtienen los datos que se ingresan al programa digital; éstos son, por ejemplo, amplitud del voltaje aplicado, ángulos de conexión, etc.

Los parámetros de la máquina de inducción utilizada se calculan detalladamente en el Anexo # 1 y sus valores finales son, en p.u.:

$$x_{ls} = 0.1067$$
$$x'_{lr} = 0.1067$$
$$x_m = 1.9242$$
$$r_s = 0.0276$$
$$r'_r = 0.0904$$
$$H = 0.2235$$

Los valores base son:

$$f_B = 60 \text{ Hz}$$
$$V_B = 220 \text{ V}$$
$$I_B = 4.04 \text{ A}$$
$$S_B = 888.8 \text{ VA}$$
$$T_B = 7.073 \text{ Nw.m}$$

y la relación de espiras es:

$$a = 2.74$$

Además, de los datos de la curva de saturación se ha obtenido ψ_{mc} y la función $\Delta x = f(\psi_m^*)$, dando los siguientes resultados:

$$\psi_{mc} = 0.95$$
$$\Delta x = -5.43 + 5.72\ \psi_m^*$$

Dentro de este capítulo se incluyen además, los gráficos de las señales de voltaje, corriente, torque y velocidad en estado estable balanceado , para los tres sistemas de referencia más comunes: a) sistema fijo en estator, b) fijo en rotor, c) girando a la velocidad sincrónica. Esto se hace con el fin de comprobar el modelo y también para darle un sentido didáctico a los ejemplos realizados.

5.1 Resultados Obtenidos en la Simulación Y Comparaciones con los Resultados Experimentales

Como primer caso se realiza la simulación del estado estable en condiciones balanceadas, utilizando los 3 sistemas de referencia más comunes;luego se simula el arranque de la máquina en vacío, con alimentación trifásica balanceada, y a continuación se simulan todos los casos desbalanceados: arranque con voltaje desbalanceado, arranque con resistencias rotóricas desiguales, arranque con voltajes y resistencias rotóricas desbalanceadas, fallas de una y dos fases a tierra, falla trifásica y por último el arranque de la máquina trifásica con alimentación monofásica.

5.1.1 Estado Estable

Para los fines demostrativos del presente ejemplo, se considera como dato un deslizamiento del 10%, valor muy alto, pero esto se hace para poder observar más fácilmente el comportamiento de las variables cuando se tiene referencia rotórica.

De este ejemplo se grafican voltaje y corriente de línea (estator en delta), corriente del rotor, torque y velocidad, éstos deberán ser los mismos para cualquier sistema de referencia escogido. Se obtienen también, para cada uno de los sistemas de referencia, voltajes y corrientes en ejes q d, tanto para estator como para rotor.

En la siguiente página se encuentra la hoja de datos con los que se realizó el presente ejemplo. Los valores de corriente son el resultado del circuito equivalente, incluida la saturación inicial.

Y a continuación se hallan los resultados obtenidos.

```
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
ELECTRONICA Y CONTROL

OPERACION ASIMETRICA DE LA MAQUINA
      TRIFASICA DE INDUCCION              FECHA: 03-AUG-85 13:05:58
================================================================================

CASO SIMULADO:  ESTADO ESTABLE - REFERENCIA EN ESTATOR

      ***   PARAMETROS DE LA MAQUINA   ***
              (valores en p.u.)
REACTANCIA DEL ESTATOR:                          X(1)= 0.1067
REACTANCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:        X(2)= 0.1067
REACTANCIA MUTUA:                                X(3)= 1.9242
RESISTENCIA DEL ESTATOR:                         R(1)= 0.0276
RESISTENCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:       R(2)= 0.0904
CONSTANTE DE INERCIA:                             H1= 0.2235
FRECUENCIA DE LA RED:                             F1= 60

        *  PARAMETROS DE LA CURVA DE SATURACION:  *
                    Dx  vs.  Fm (sst)
CONCATENACIONES DE FLUJO MUTUO CRITICO:           Y6= 0.95
PUNTO DE CORTE CON EL EJE VERTICAL:               S3= -5.43
PENDIENTE DE LA RECTA:                            S4= 5.72

      ***   INTERVALO DE SOLUCION   ***
                (en ses.)
TIEMPO INICIAL:          T1= 0
TIEMPO FINAL:            T2= 0.15
PASO DE INTEGRACION:      H= 1.0E-3

Pasos  LEO  -  Tejec. 1050 ses.  -  Long. Arch. 33400 bytes

        *  ALIMENTACION TRIFASICA  *
VOLTAJES DE LINEA APLICADOS:
(SECUENCIA POSITIVA: V1,V2,V3)
                MODULO (p.u.)       ANGULO DE DESFASAJE (rad.)
      V1        V9(1)=1             Q6(1)=0
      V2        V9(2)=1             Q6(2)=-2.094395
      V3        V9(3)=1             Q6(3)=2.094395

        *  VOLTAJES DE LINEA BALANCEADOS  *

        *  CONEXION TIPO DELTA EN ESTATOR  *

      ***   SISTEMA DE EJES FIJO EN ESTATOR   ***


      ***   SISTEMA BALANCEADO   ***
```

CONTINUACION ...


```
  ***   CONDICIONES INICIALES DE ESTADO ESTABLE    ***
                *  SISTEMA BALANCEADO  *
 DESLIZAMIENTO:          S= 0.1
 TIEMPO:                 T= 0
                          MAGNITUD              ANGULO
 CORRIENTE DE ESTATOR:   Is= 1.14991081367   A7=-0.625652084259
 CORRIENTE DE ROTOR:     Ir= 0.995343692)35   A8=-3.3484540457
 CORRIENTES EN EJES q,d (s,r):
  0.93210          0.67342         -0.97412          -0.20443
 TORQUE MECANICO T8= : 0.895600995097

 *  EC. DEL TORQUE (T8) EN FUNCION DE LA VELOC. (W6)  *
1090 T8=0.8956


 NOmbRE DEL ARCHIVO DE DATOS:  @ESTABLE/WCERO
```

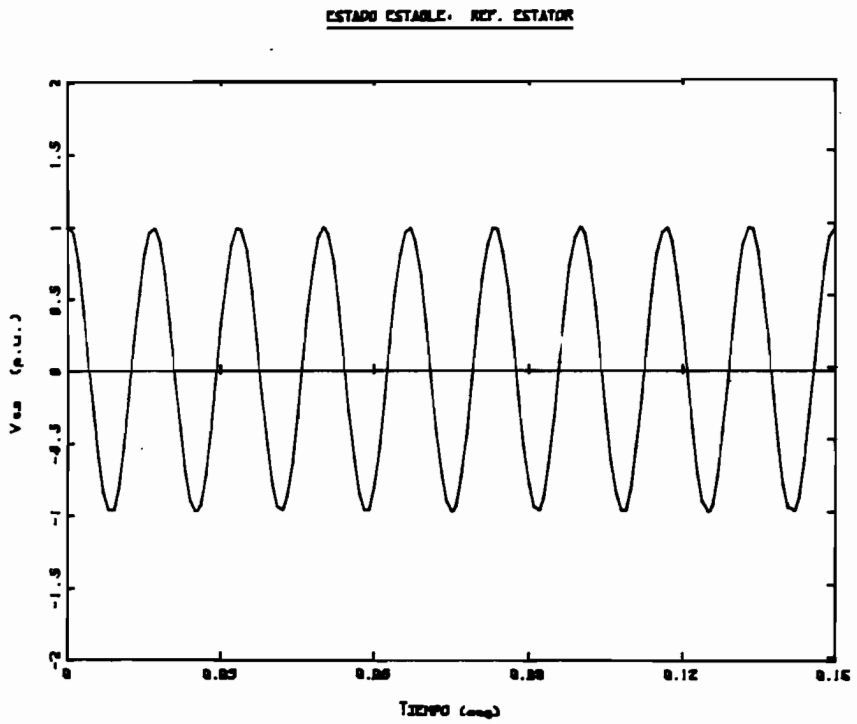


FIG. 5.1.1

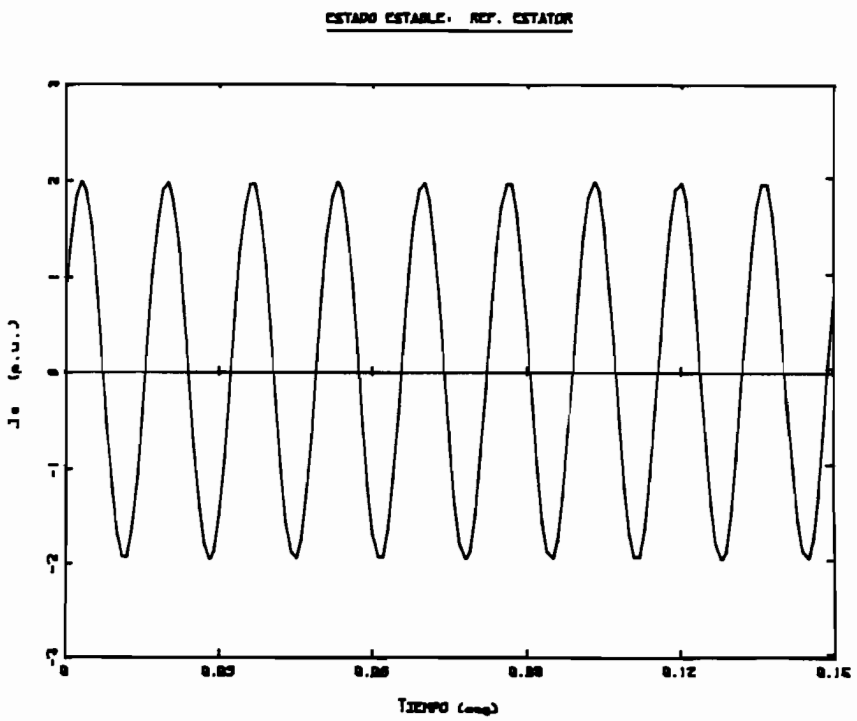


FIG. 5.1.2

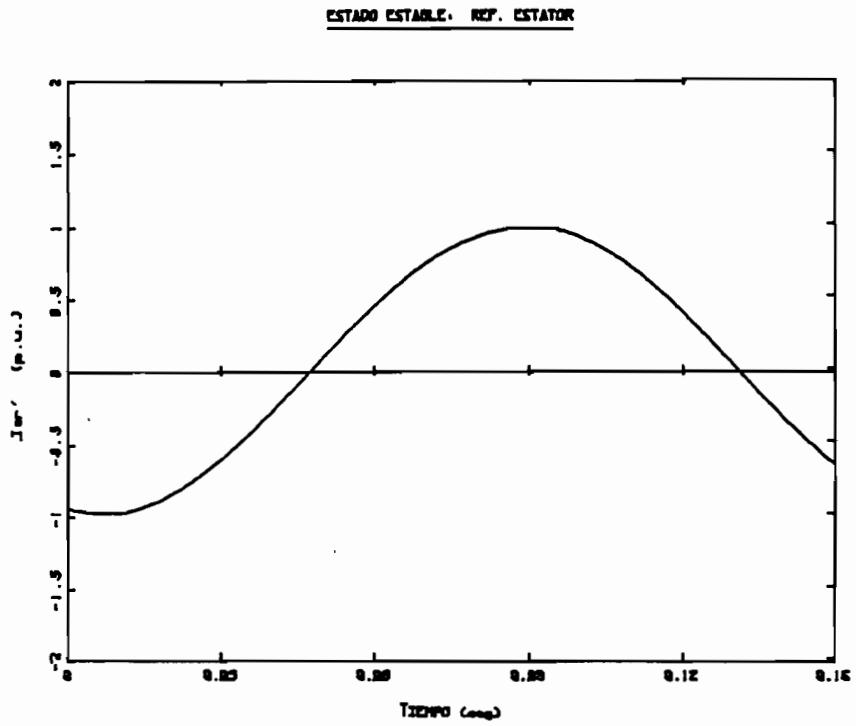


FIG. 5.1.3

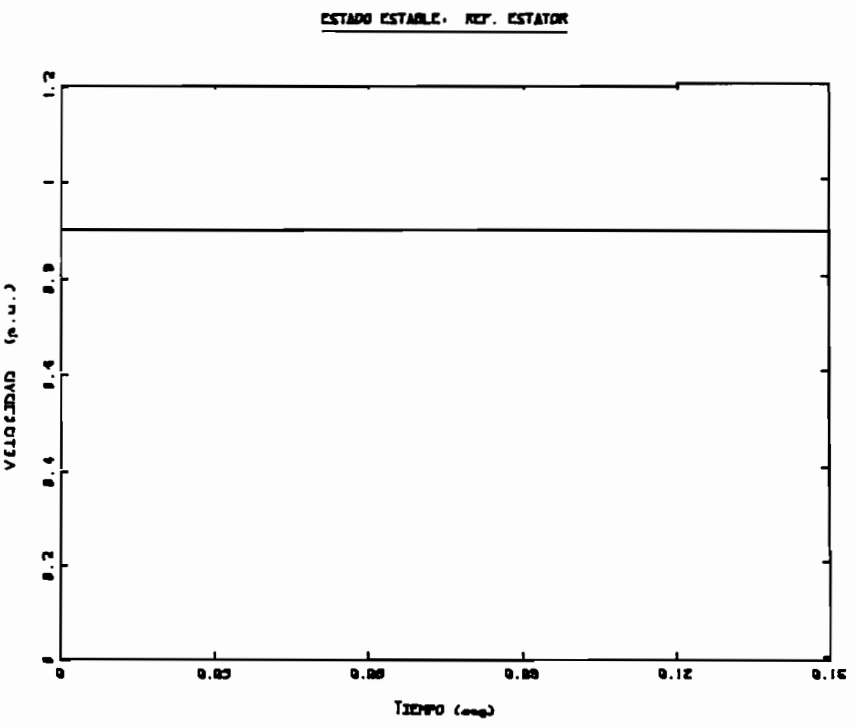


FIG. 5.1.4

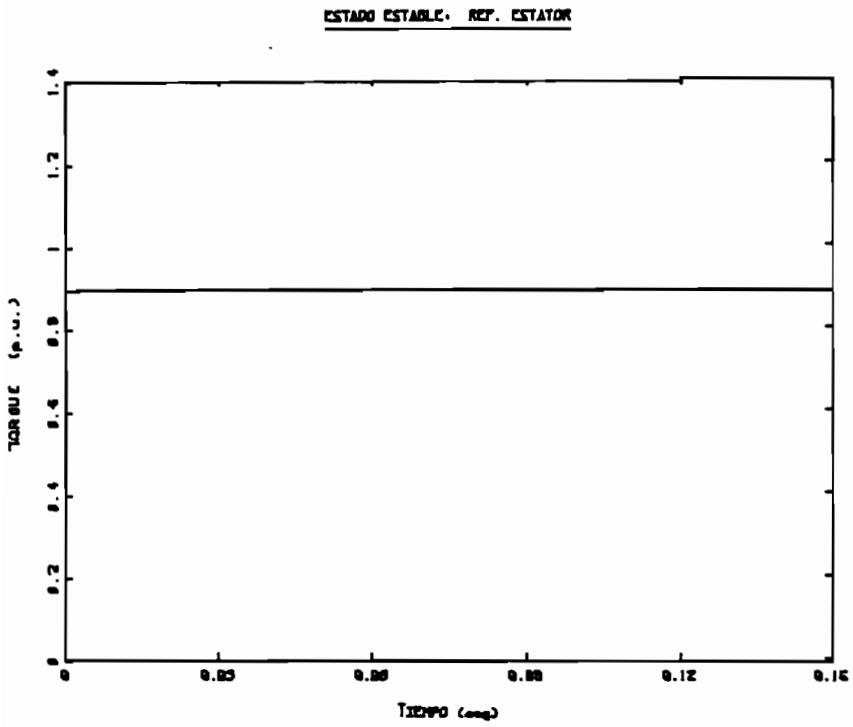


FIG. 5.1.5

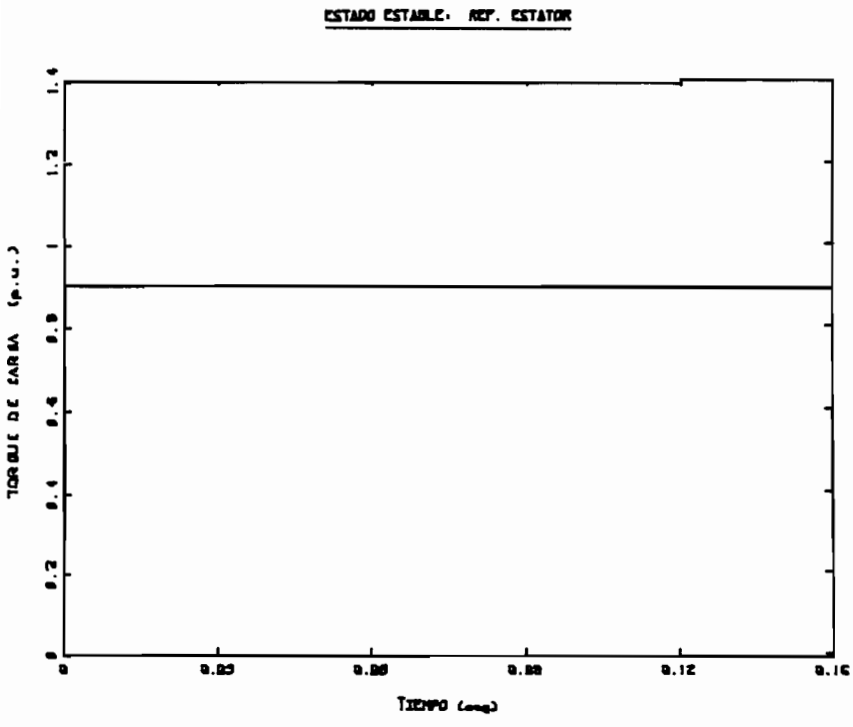


FIG. 5.1.6

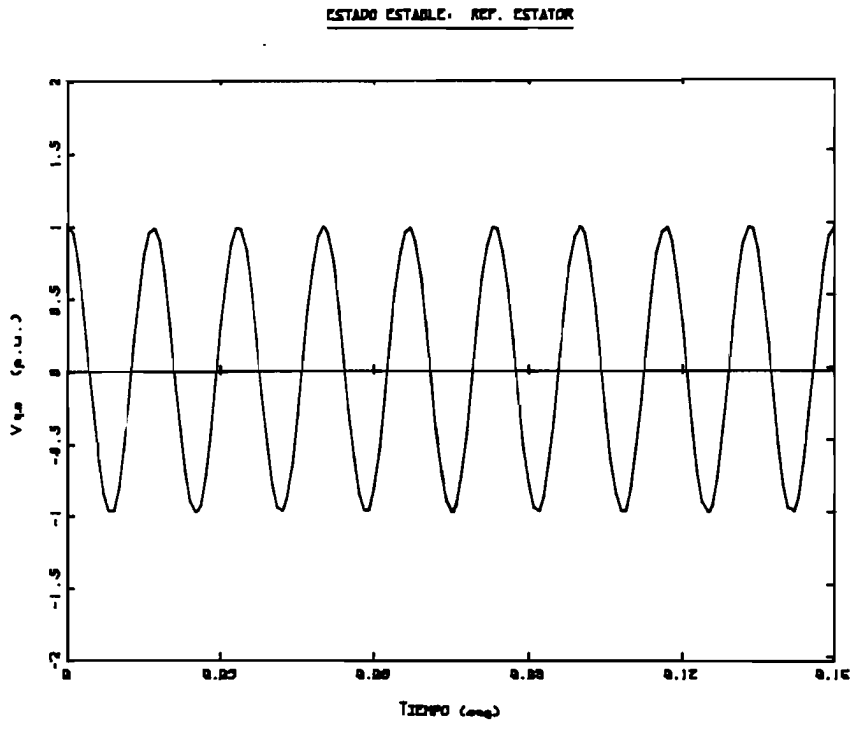


FIG. 5.1.7

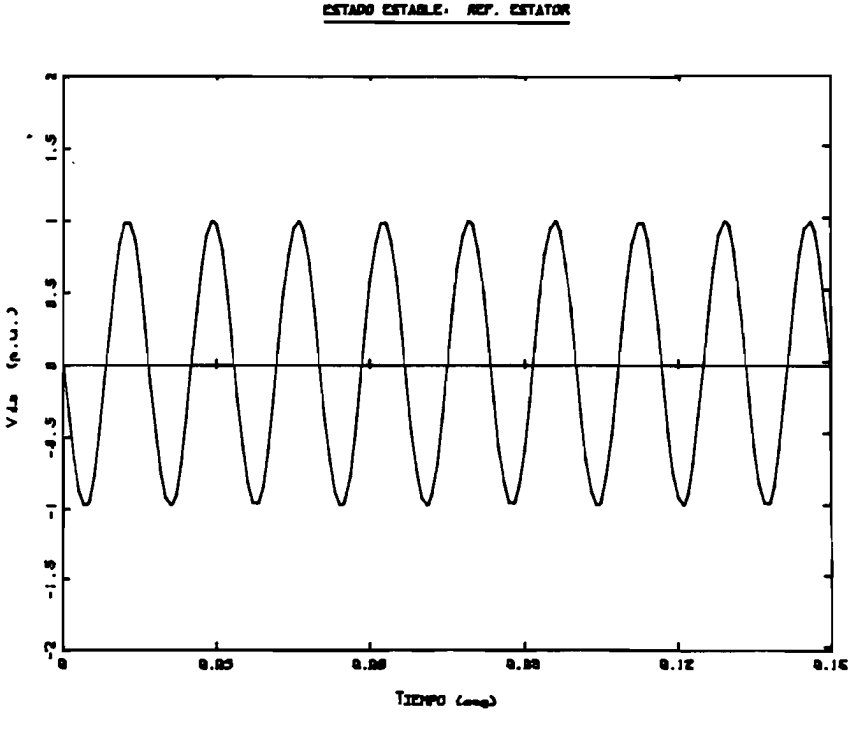


FIG. 5.1.8

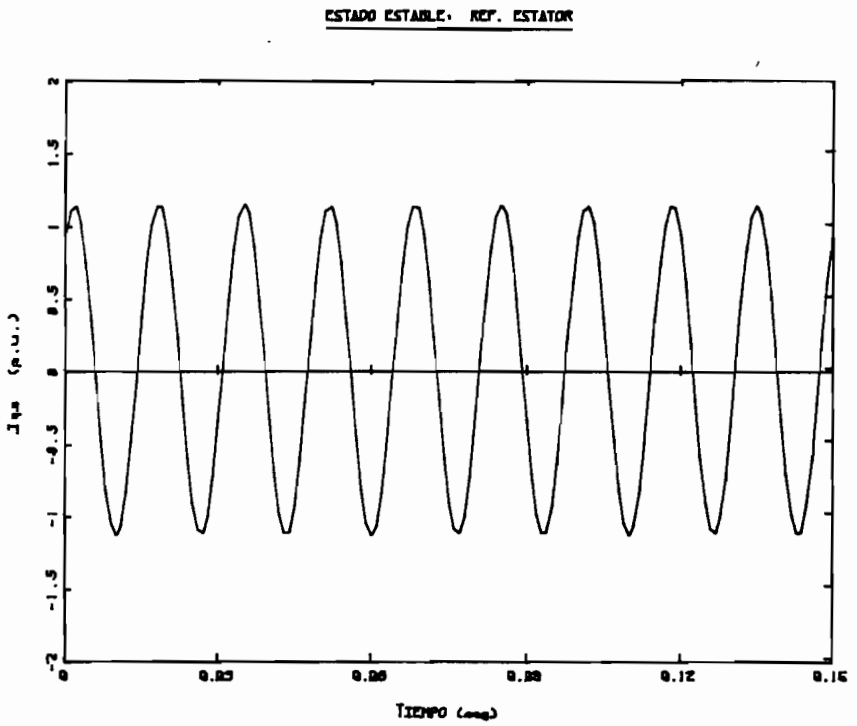


FIG. 5.1.9

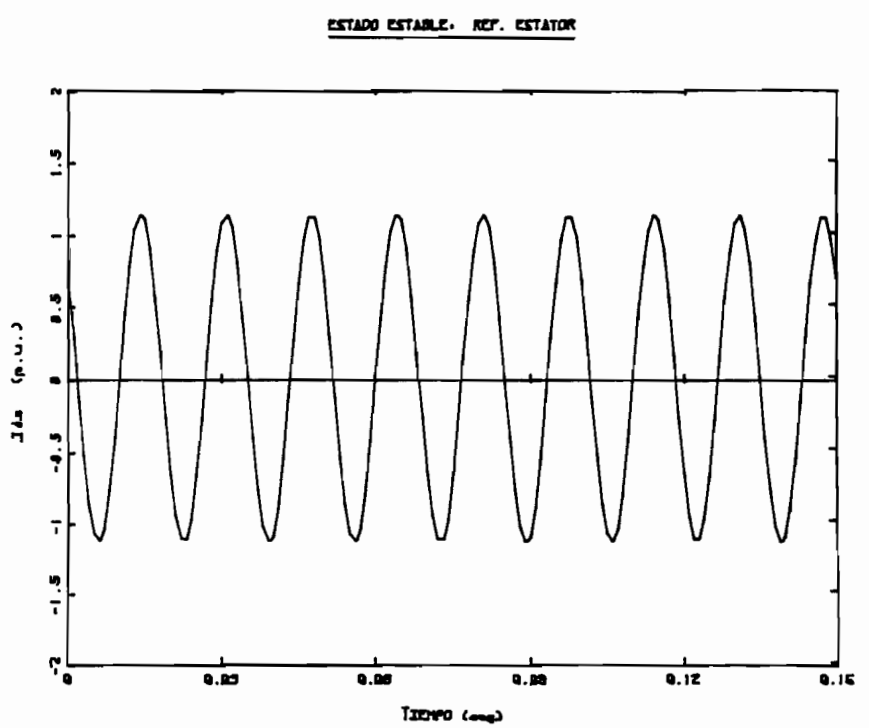


FIG. 5.1.10

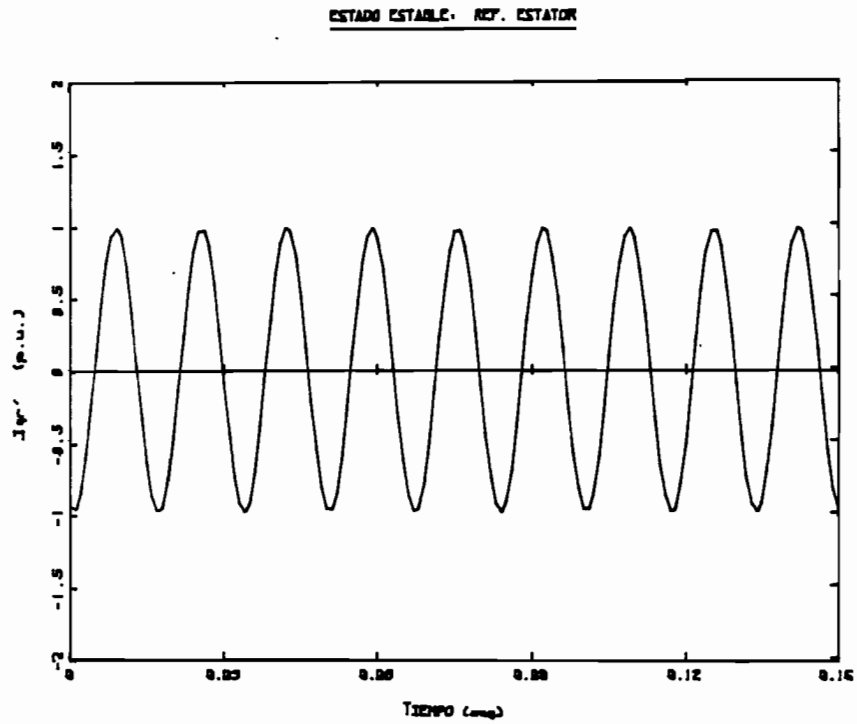


FIG. 5.1.11

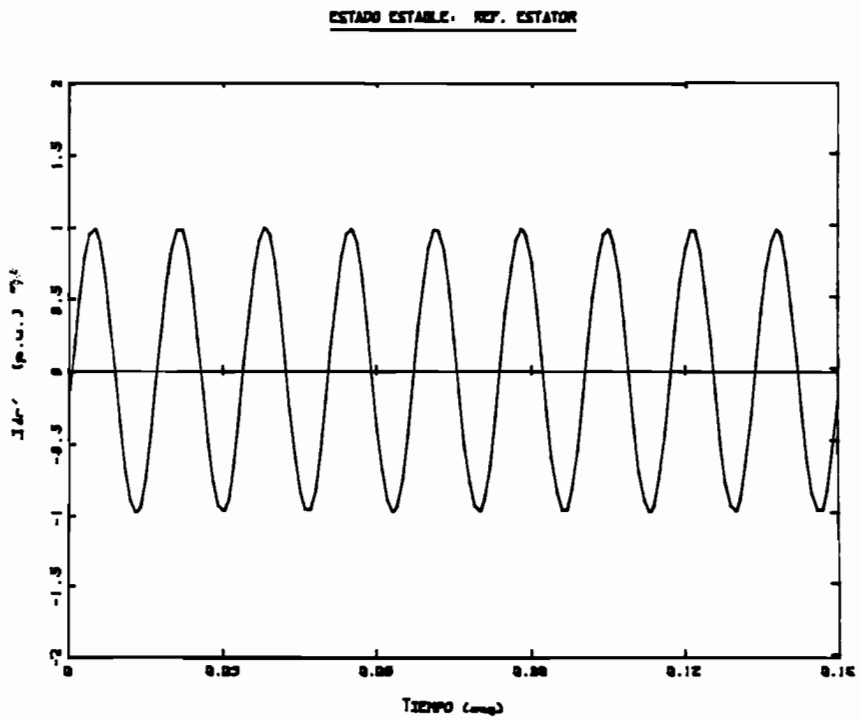


FIG. 5.1.12

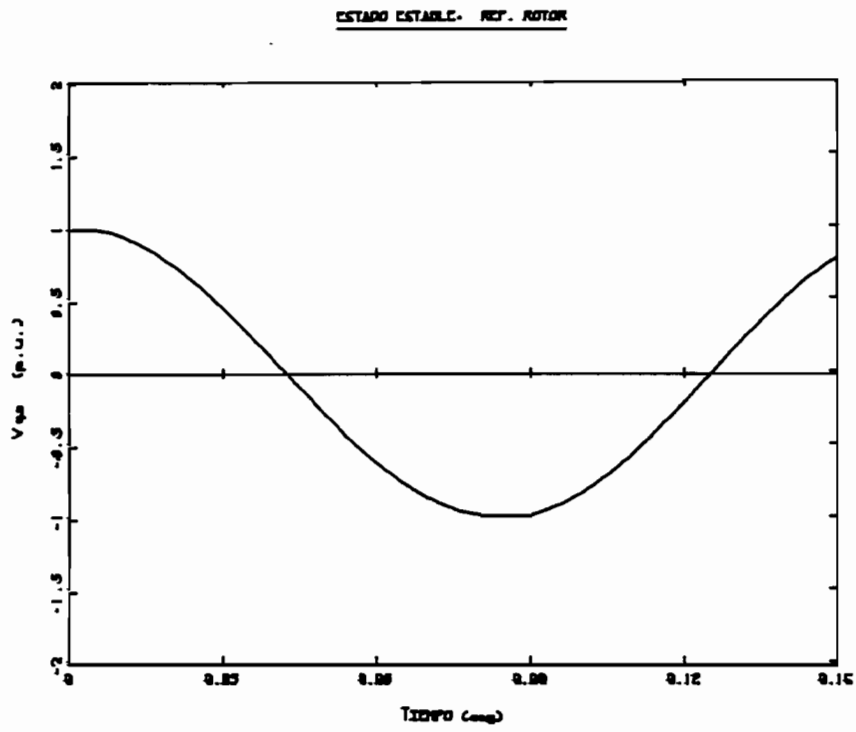


FIG. 5.1.13

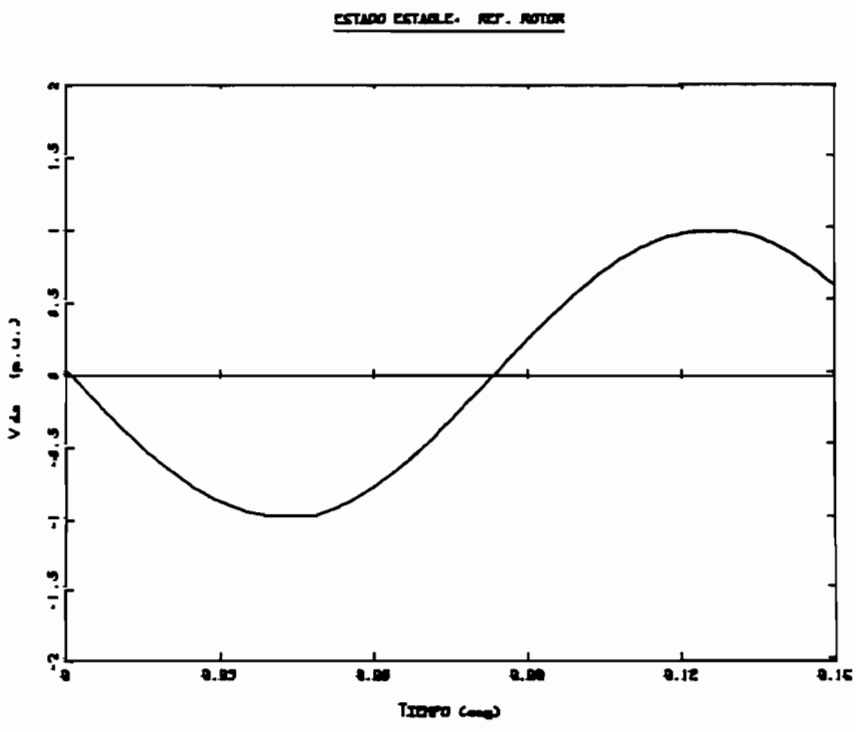


FIG. 5.1.14

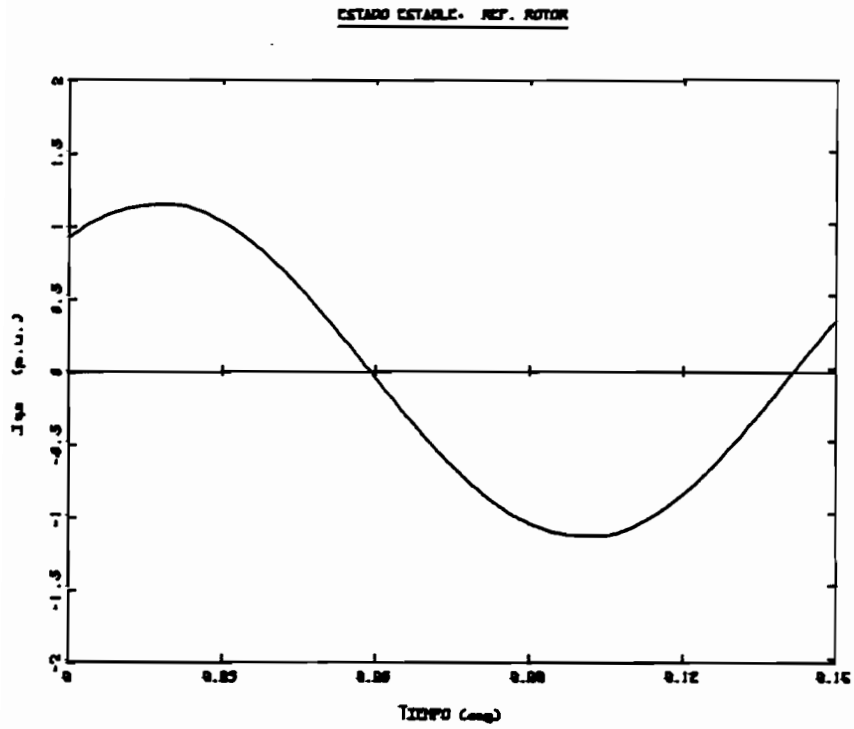


FIG. 5.1.15

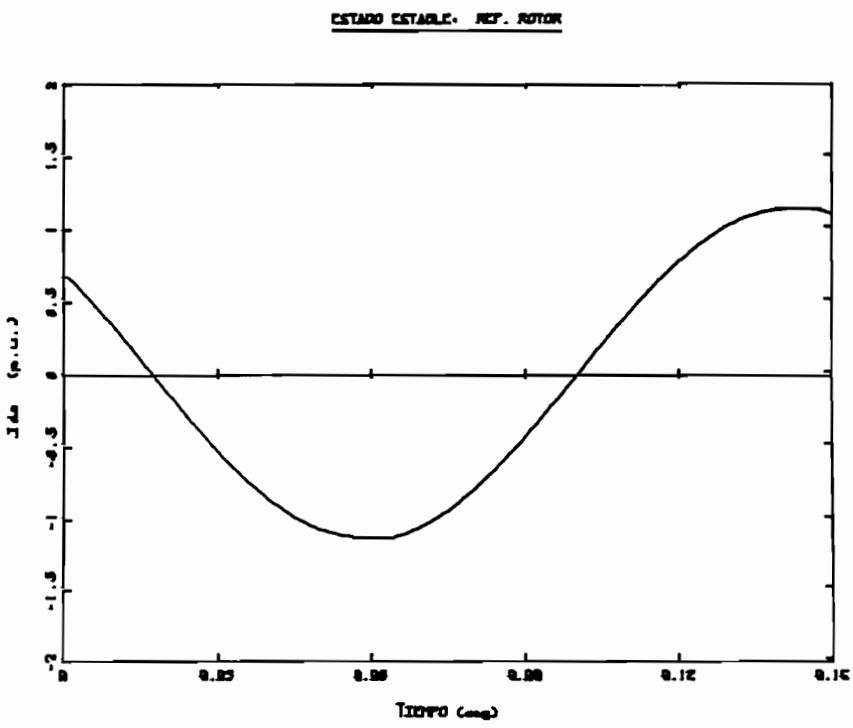


FIG. 5.1.16

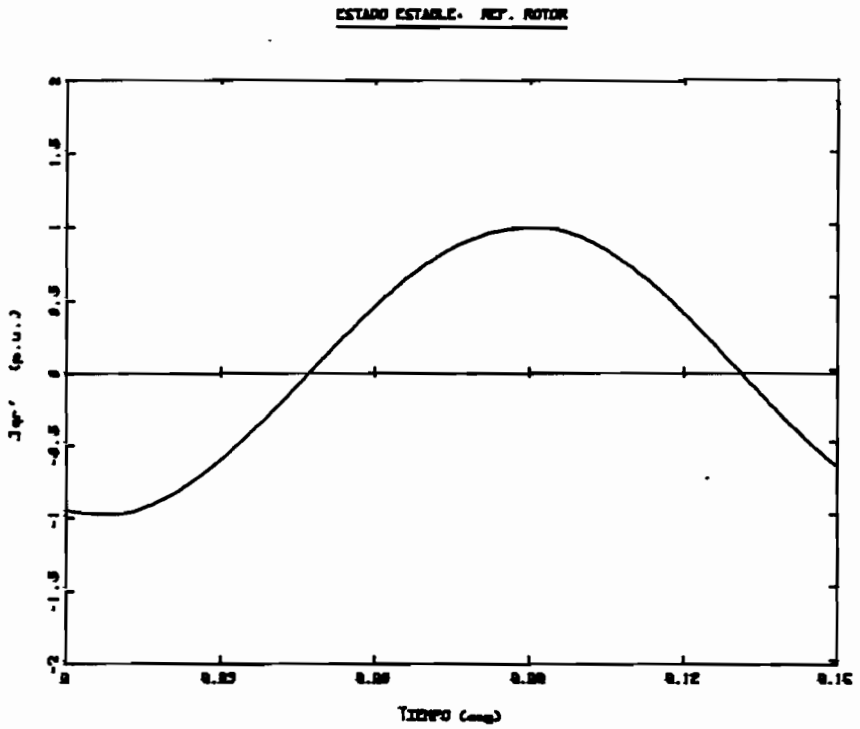


FIG. 5.1.17

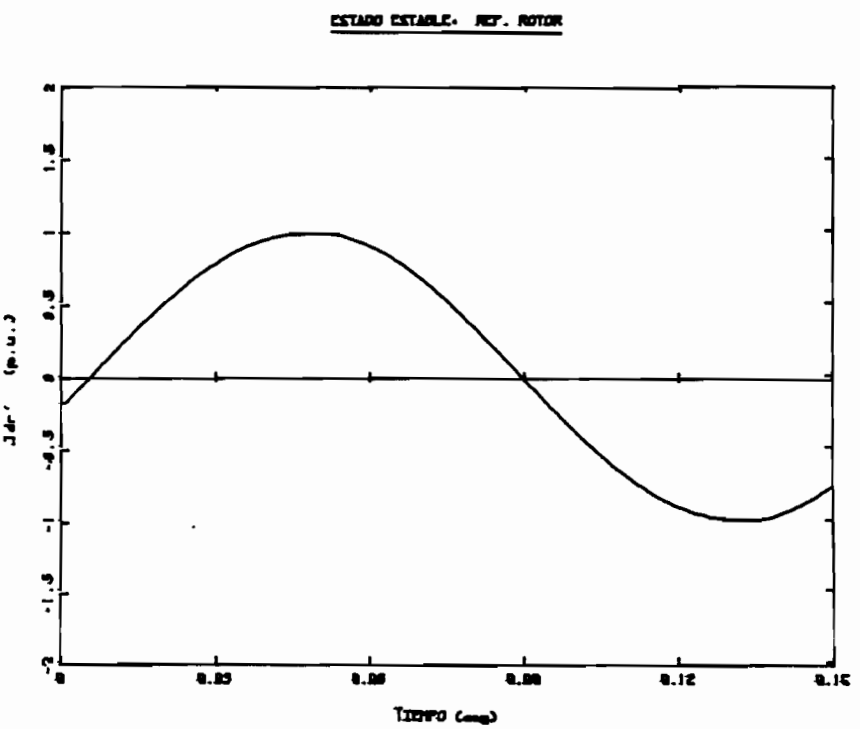


FIG. 5.1.18

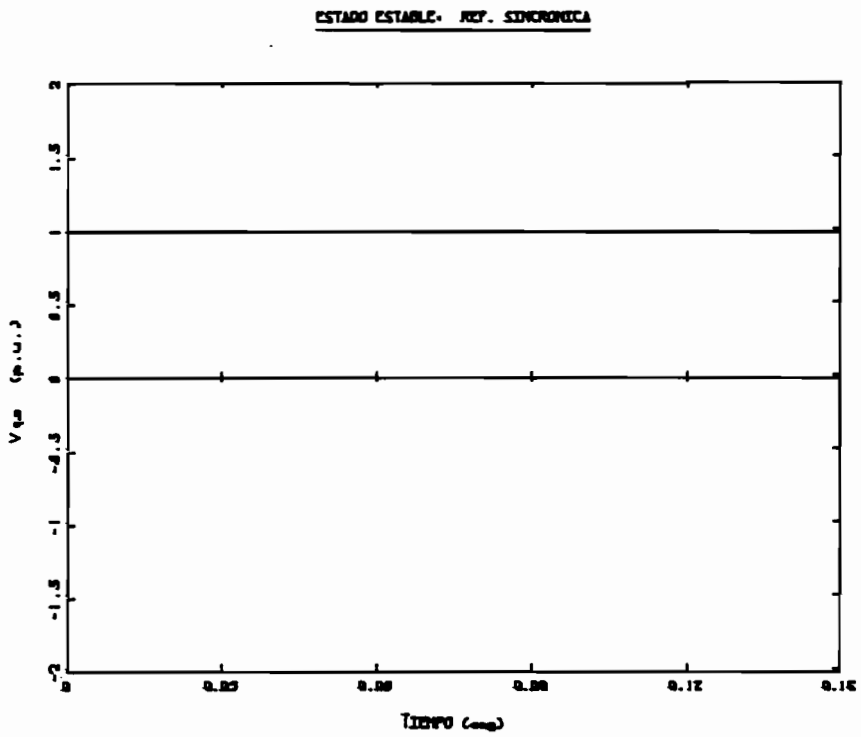


FIG. 5.1.19

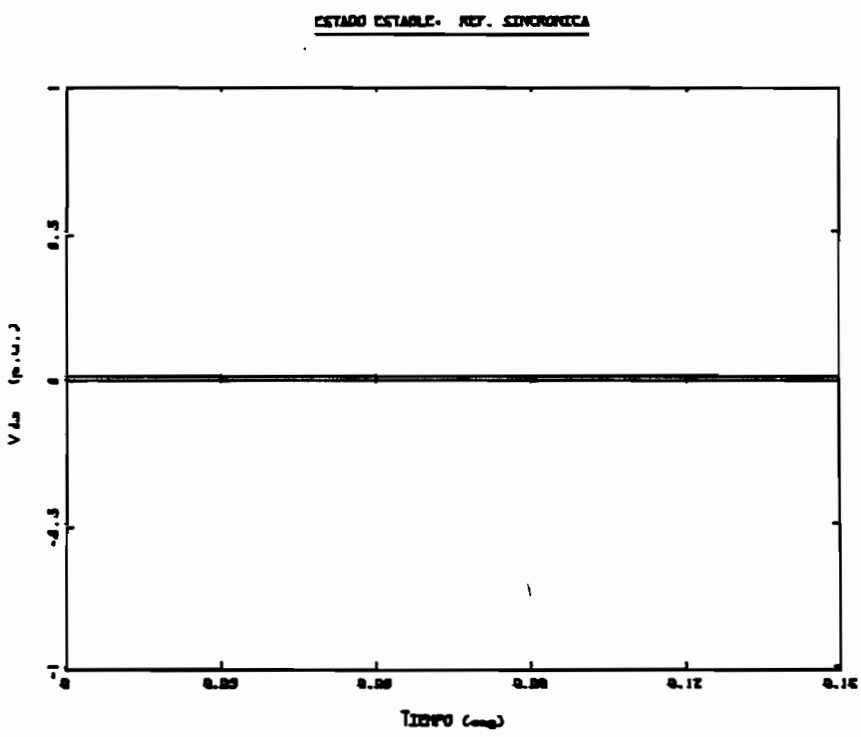


FIG. 5.1.20

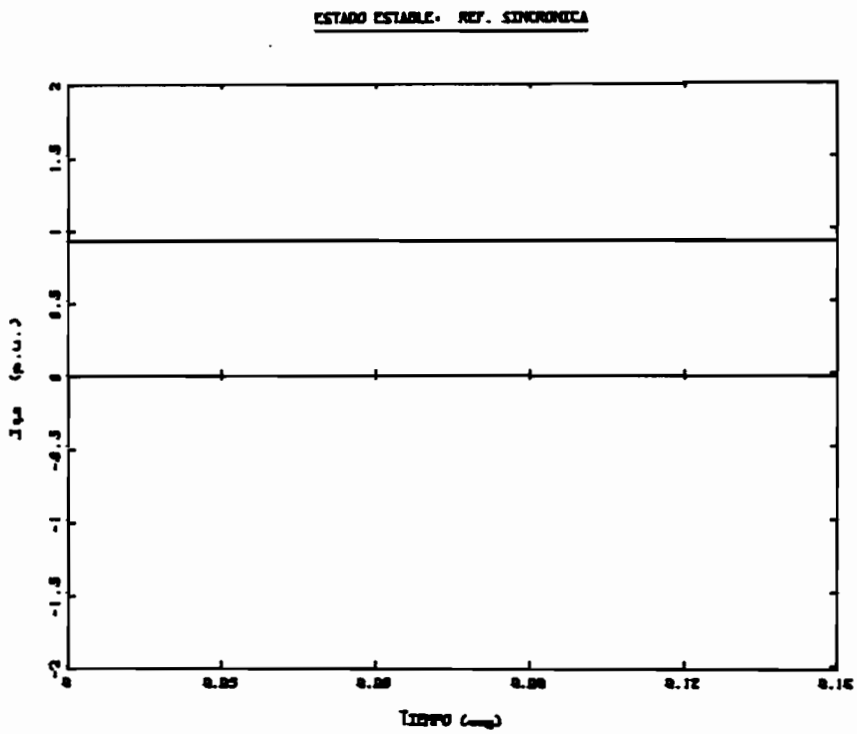


FIG. 5.1.21

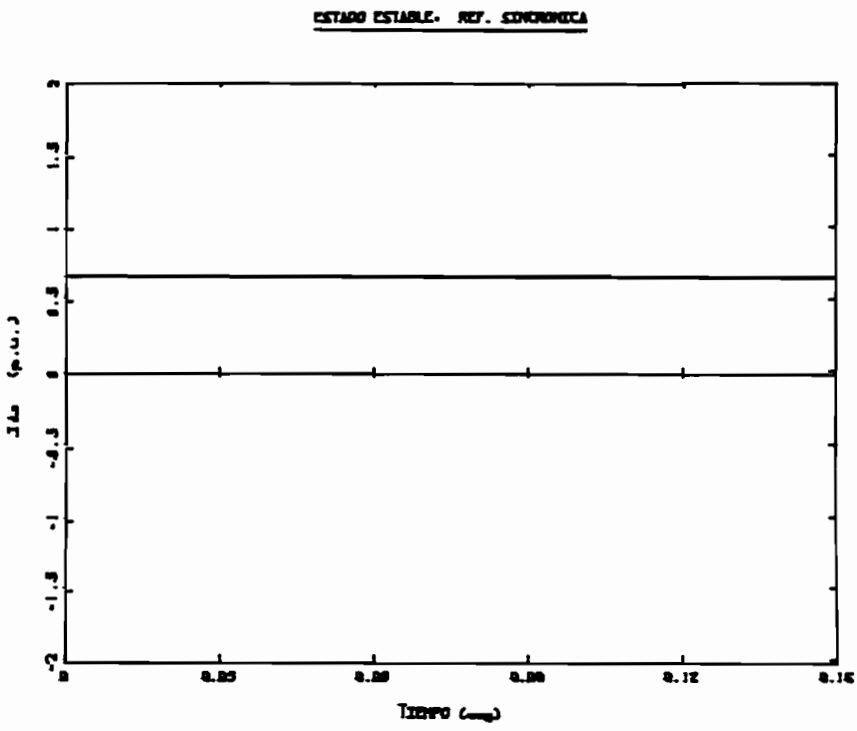


FIG. 5.1.22

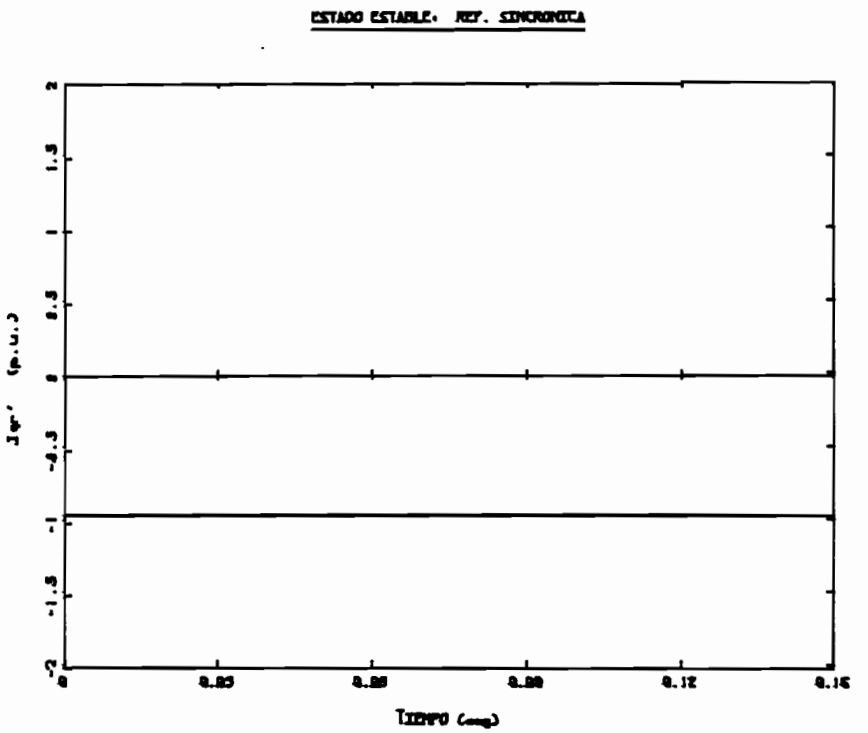


FIG. 5.1.23

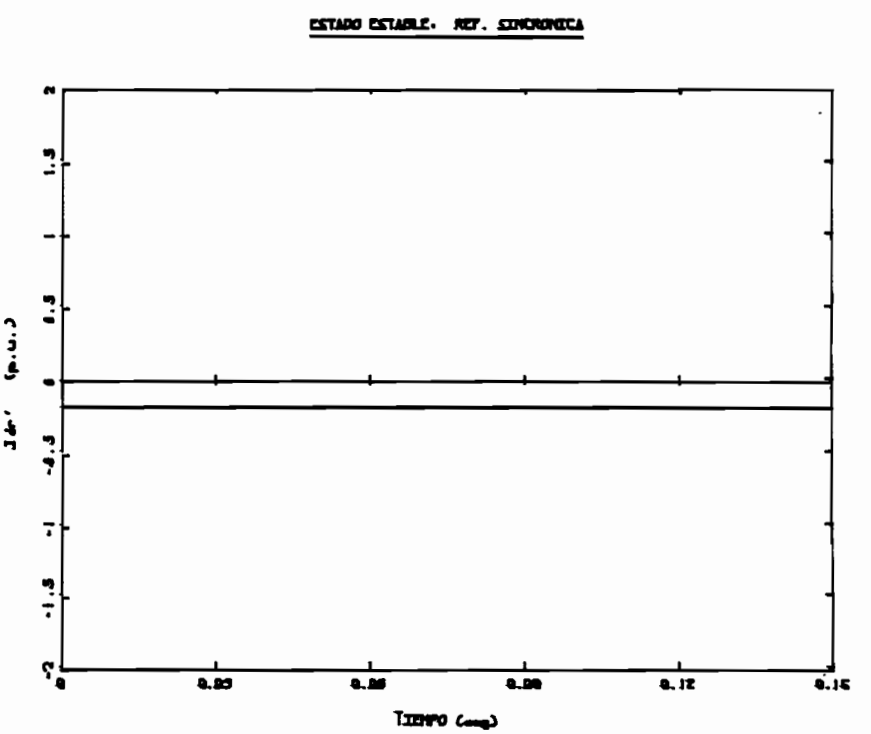


FIG. 5.1.24

En las figuras 5.1.1 y 5.1.2 se encuentran, respectivamente, los gráficos del voltaje y de la corriente de línea del estator. Estas señales son sinusoides y tienen la frecuencia de la red; el voltaje tiene una magnitud de 1 p.u. mientras que la corriente llega a 2 p.u., esto es ocasionado por el excesivo deslizamiento asumido (10%). En la figura 5.1.3 se halla la corriente de fase del rotor, ésta es sinusoide y su magnitud es de 1 p.u., su frecuencia es menor que la de la red, aproximadamente 1/10 (teóricamente f_{rotor} = s. festator).

Los tres gráficos anteriores corresponden a la fase "a"; las señales de las otras fases se encuentran desfasadas 120° con respecto a la primera.

Las figuras 5.1.4, 5.1.5 y 5.1.6 contienen, respectivamente, la velocidad, el torque electromagnético y el torque de carga. Todas estas variables tienen un valor constante: la velocidad se mantiene en 0.9 p.u. (s = 10%), el torque electromagnético y el torque de carga son iguales y valen 0.9 p.u. aproximadamente, verificándose que existe equilibrio mecánico.

Todas las variables anteriores [Fig. 5.1.1 a Fig. 5.1.6] son las mismas para cualquier sistema de referencia escogido. En el presente ejemplo las diferentes variables han sido obtenidas tomando el sistema de referencia fijo en el estator.

En el Capítulo I se demostró que las variables en ejes q y d tienen una frecuencia igual a $(\omega_e - \omega)$, excepto para la referencia sincrónica, para la cual todas las variables son cantidades constantes. Esto se comprueba en las Fig. 5.1.7 hasta la Fig. 5.1.24.

Así, en las Fig. 5.1.7 a 5.1.12 se tiene, respectivamente, las variables: voltajes de estator en ejes q y d, corrientes en ejes q y d, y corrientes de rotor en ejes q y d, para el sistema de referencia fijo en estator ($\omega = 0$), y es así que todas estas variables son sinusoides de frecuencia igual a la de la red ($\omega_e - \omega = \omega_e$).

Ahora, en las Fig. 5.1.13 a 5.1.18 se tiene, respectivamente, las variables: voltajes de estator en ejes q y d, corrientes de estator en ejes q y d, y corrientes de rotor en ejes q y d, para el sistema de ejes fijo en el rotor ($\omega = \omega_r$). Todas estas variables son sinusoides con la frecuencia del rotor ($\omega_e - \omega = \omega_e - \omega_r$), que es proporcional al deslizamiento.

Por último, en las Fig. 5.1.19 a 5.1.24 se tiene, respectivamente, las variables: voltaje del estator en ejes q y d, corrientes del estator en ejes q y d, y corrientes del rotor en ejes q y d, para el sistema de ejes girando a la velocidad sincrónica ($\omega = \omega_e$). Para este caso todas las variables de ejes q y d son cantidades constantes.

De esta manera, se ha comprobado el modelo para estado estable.

Hay que anotar además, que en ningún caso se obtienen los voltajes del rotor, debido a que las fases se hallan cortocircuitadas.

5.1.2 Arranque con Alimentación Trifásica Balanceada

Este ejemplo se realizó con los datos que se encuentran en la siguiente página, y son:

voltaje aplicado: 208 V = 0.95 p.u.

ángulo de conexión: 0° = 0 rad.

ecuación del torque mecánico: Tm = 0.147 p.u.,

se asume un valor constante, ya que no se conoce con precisión esta ecuación, y el valor de 0.147 p.u. es el valor que debe tener el torque electromagnético para un deslizamiento, en estado estable, del 1,66%, y para que se cumpla el equilibrio mecánico Tm = Te.

A continuación se presentan los gráficos obtenidos.

```
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
ELECTRONICA Y CONTROL

OPERACION ASIMETRICA DE LA MAQUINA
      TRIFASICA DE INDUCCION              FECHA: 03-AUG-85 13:31:03
================================================================================

CASO SIMULADO:  ARRANQUE  -  VOLTAJES BALANCEADOS

      ***   PARAMETROS DE LA MAQUINA   ***
                (valores en p.u.)
REACTANCIA DEL ESTATOR:                          X(1)= 0.1067
REACTANCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:        X(2)= 0.1067
REACTANCIA MUTUA:                                X(3)= 1.9242
RESISTENCIA DEL ESTATOR:                         R(1)= 0.0276
RESISTENCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:       R(2)= 0.0904
CONSTANTE DE INERCIA:                             H1= 0.2235
FRECUENCIA DE LA RED:                             F1= 60

        *  PARAMETROS DE LA CURVA DE SATURACION:  *
                    Dx  vs.  Fm (sat)
CONCATENACIONES DE FLUJO MUTUO CRITICO:           Y6= 0.95
PUNTO DE CORTE CON EL EJE VERTICAL:               S3= -5.43
PENDIENTE DE LA RECTA:                            S4= 5.72

      ***   INTERVALO DE SOLUCION   ***
                (en ses.)
TIEMPO INICIAL:          T1= 0
TIEMPO FINAL:            T2= 0.5
PASO DE INTEGRACION:      H= 1.0E-3

Pasos  500  -  Tejec. 3500 ses.  -  Long. Arch. 109000 bytes

        *  ALIMENTACION TRIFASICA  *
VOLTAJES DE LINEA APLICADOS:
(SECUENCIA POSITIVA: V1,V2,V3)
                MODULO (p.u.)      ANGULO DE DESFASAJE (rad.)
      V1        V9(1)=0.95         Q6(1)=0
      V2        V9(2)=0.95         Q6(2)=-2.094395
      V3        V9(3)=0.95         Q6(3)=2.094395

        *  VOLTAJES DE LINEA BALANCEADOS  *

        *  CONEXION TIPO DELTA EN ESTATOR  *

      ***  SISTEMA DE EJES GIRANDO A Ws   ***


      ***   SISTEMA BALANCEADO   ***
```

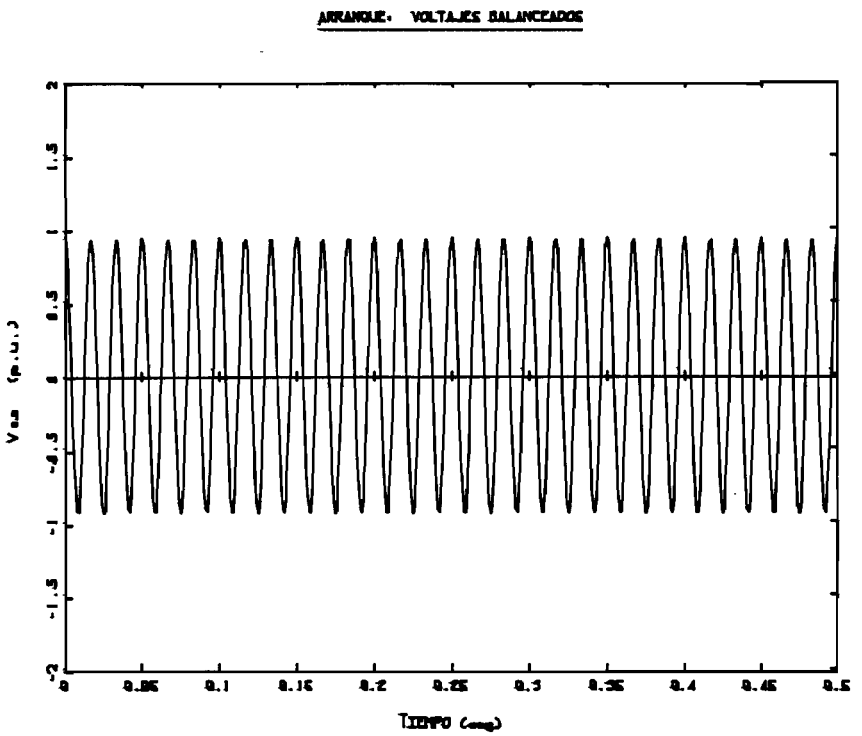


FIG. 5.2.1

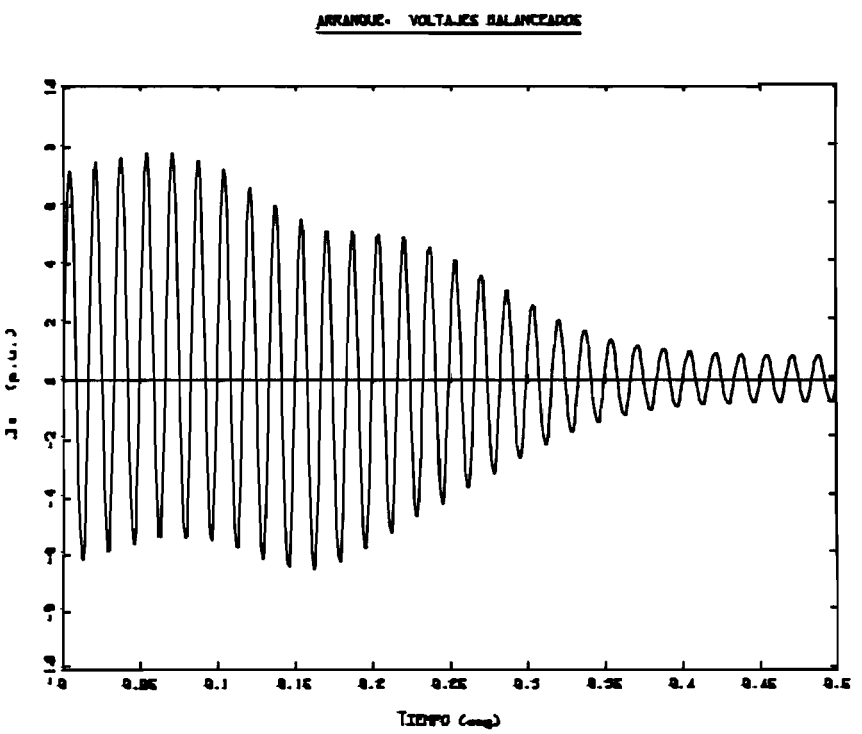


FIG. 5.2.2

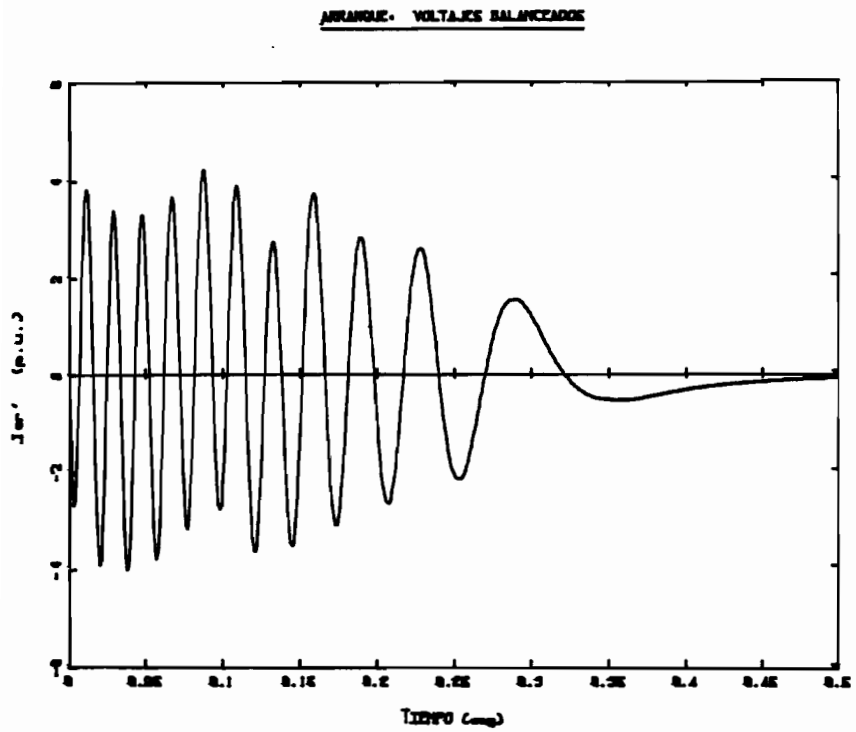


FIG. 5.2.3

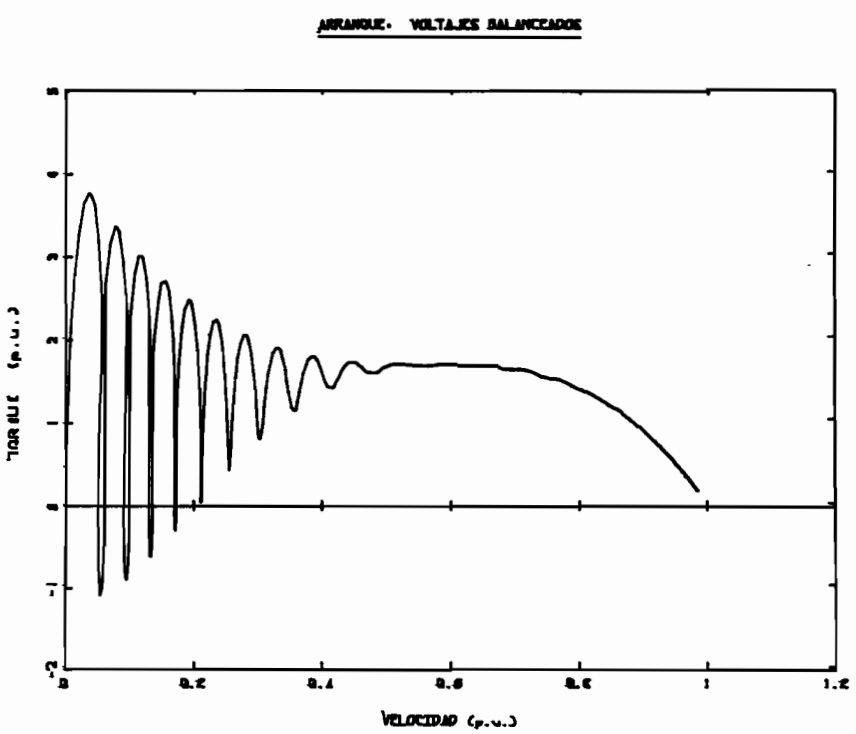


FIG. 5.2.4

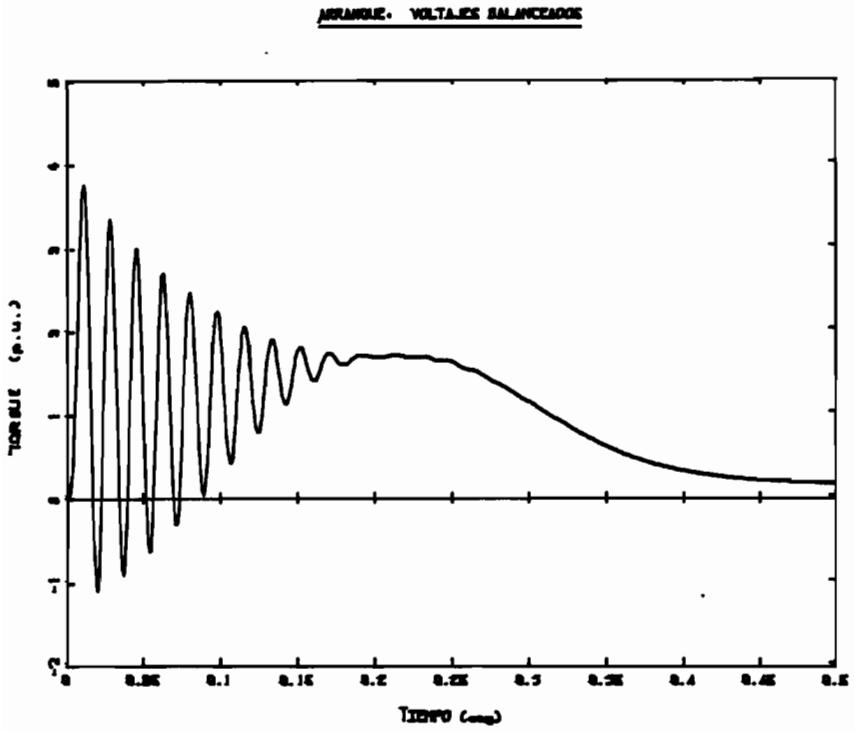


FIG. 5.2.5

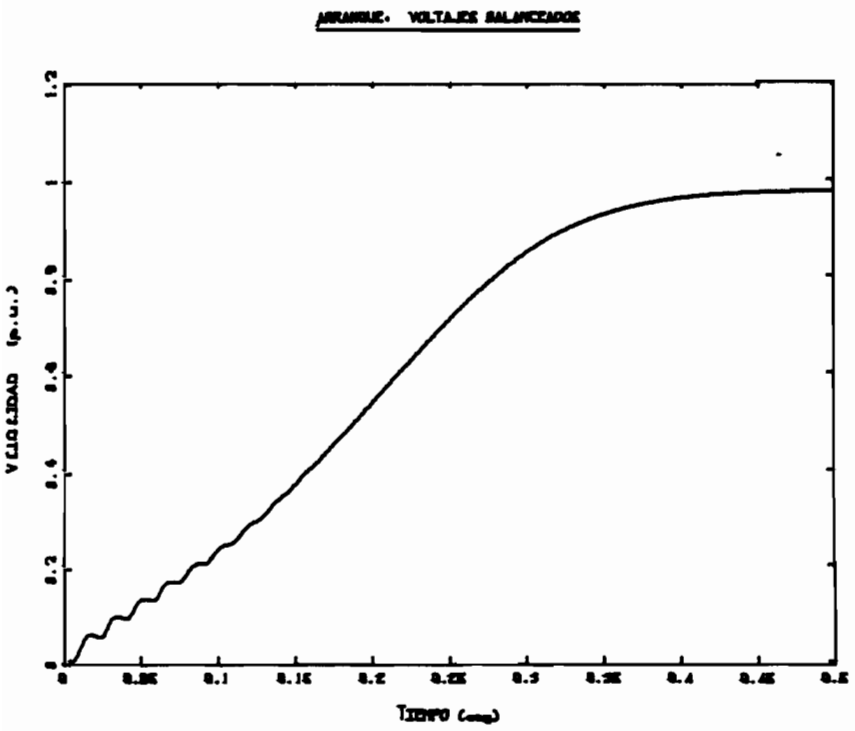


FIG. 5.2.6

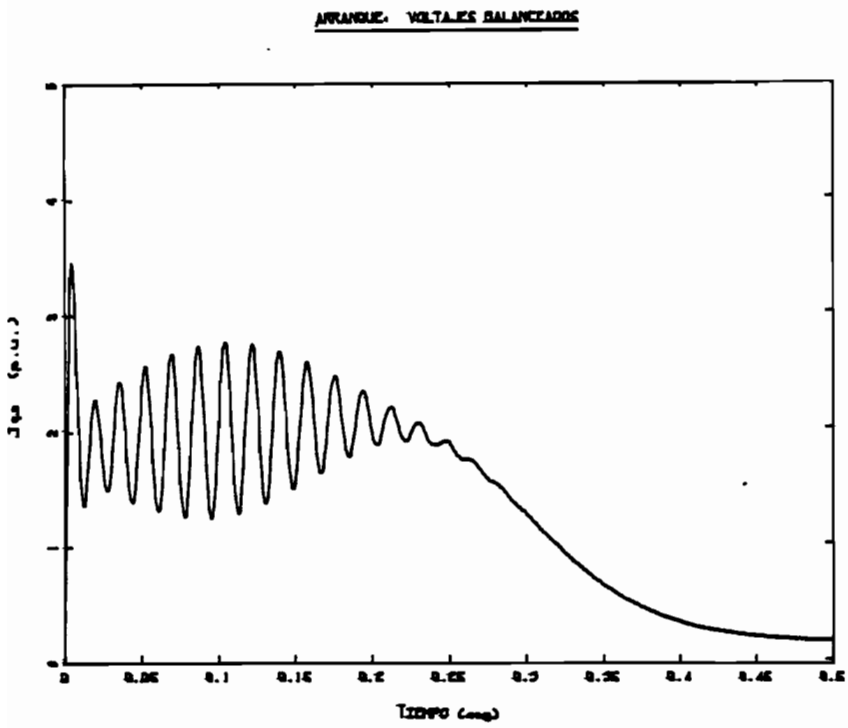


FIG. 5.2.7

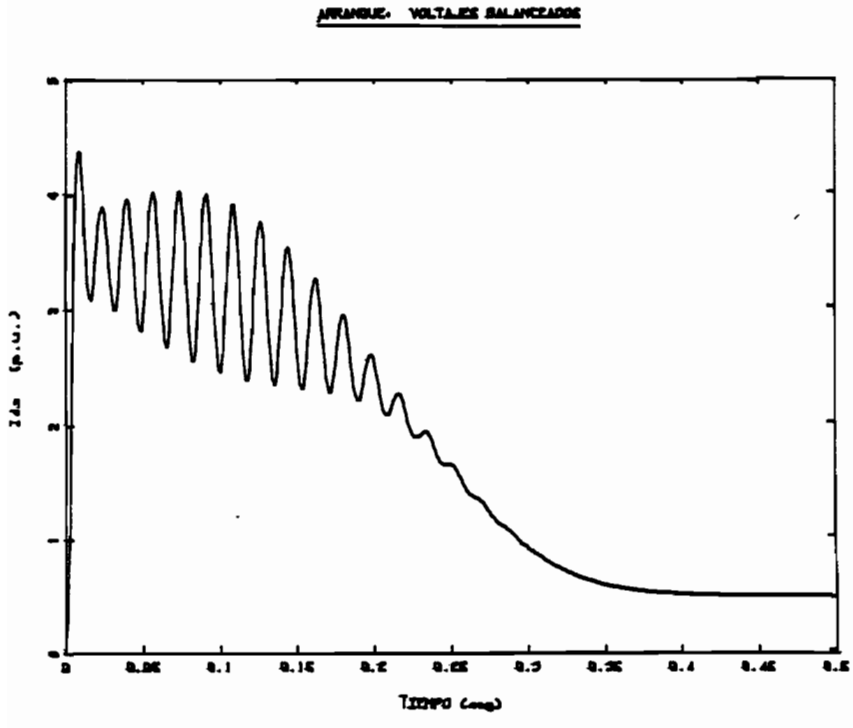


FIG. 5.2.8

Los gráficos 5.2.1 y 5.2.2 corresponden al voltaje y corriente de línea, éstos pueden ser comparados fácilmente con la Fotografía # 1. El voltaje tiene un valor de 0.95 p.u., equivalente a 208 V, y un ángulo de conexión de 0°. La corriente de línea tiene un valor máximo de aproximadamente 7.5 p.u., equivalente a 43 A pico, mientras que la corriente en estado estable es de 0.75 p.u., o sea,4.3 A pico. El tiempo de aceleración es de aproximadamente 0.4 seg.

Como puede observarse, todos estos valores son muy similares a los hallados en la Fotografía # 1: Imax = 40 A pico, Iestable = 4 A pico y t_a = 0.4 seg., pudiendo decirse, sin mucho error, que son respectivamente iguales, debido a la pobre apreciación que se tiene. Además, observando detenidamente la Fotografía # 1 y la Fig. 5.2.2 se puede concluir que las envolventes son los mismas.

De esta manera se ha comprobado la validez del modelo para el arranque en condiciones balanceadas.

Ahora, en la Fig. 5.2.3 se tiene la corriente del rotor: su frecuencia es decreciente, y como ya se dijo anteriormente, depende del deslizamiento; alcanza un valor máximo de 4.2 p.u., equivalente a 65 A pico; no se puede determinar el valor de estado estable, pero puede decirse que es muy pequeño.

Las figuras 5.2.4, 5.2.5 y 5.2.6 corresponden, respectivamente, a los gráficos: torque-velocidad; torque-tiempo y velocidad-tiempo. Las formas de estas variables son las mismas que se hallan en textos, con la diferencia que en éstos se toma el valor del torque promedio. Se observa

que el torque tiene un comportamiento oscilatorio en los primeros ciclos, pero con un valor promedio mayor que cero, razón por la cual la máquina arranca sola. El valor máximo es de -1.1 p.u. y el valor máximo es de 3.7 p.u., pudiendo decirse que el valor promedio de torque en el arranque es de 1.3 p.u., mientras que el torque promedio máximo es de 1.7 p.u. y ocurre cuando ω_r = 0.6 p.u., o sea s = 0.4. Luego el torque disminuye a medida que alcanza la velocidad nominal, estabilizándose en un valor igual a 0.147 p.u., que es el valor del torque de carga, para mantener el equilibrio mecánico. La velocidad es creciente y presenta pequeñas oscilaciones en los primeros cicloes, como consecuencia del torque inicial que es también oscilante; alcanza su valor de estado estable, ω_r = 0.9833 (s = 1.66%), en un tiempo aproximado de 0.4 seg. Torque y velocidad alcanza sus valores permanentes de estado estable al mismo tiempo.

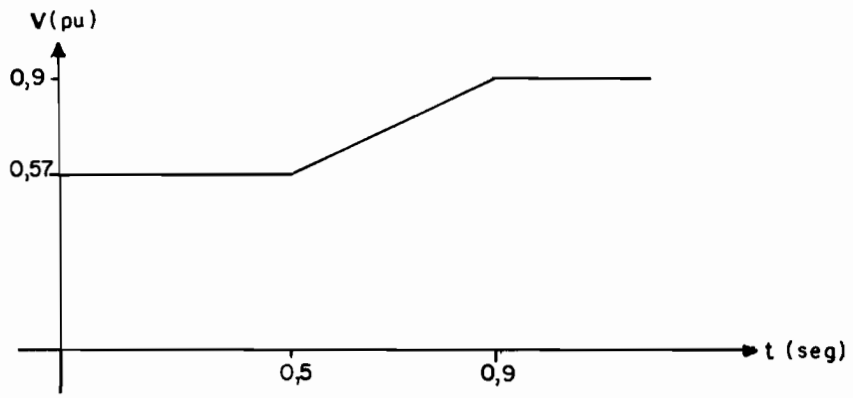
El presente ejemplo fue realizado con referencia sincrónica. En las Fig. 5.2.7 y 5.2.8 se encuentran las corrientes en ejes q y d del estator, y se observa la forma especial que tienen, llegando a ser valores constantes para el estado estable.

5.1.3 Arranque con Voltajes Desbalanceados

Los datos para este ejemplo son los siguientes:

$$V_{ab} = 197 \cos \omega_{et}$$
$$V_{bc} = 205 \cos (\omega_{et} - 2.1092)$$
$$V_{ca} = 198 \cos (\omega_{et} + 2.0503)$$

Estos valores han sido calculados en base a los voltajes de estado estable, medidos en las pruebas de laboratorio, y luego aplicando la teoría de fasores. El ángulo de conexión para la fase "a" es aproximadamente 190°, o sea 3.3 rad. Además, la envolvente tiene la siguiente forma: (tomado de la Fotografía # 2, por lo que en realidad corresponde al voltaje V_{ab}, pero se asume que en las otras fases es similar).



Como en el ejemplo anterior, la ecuación del torque mecánico es:

$$Tm = 0.147 \text{ p.u.}$$

Se obtuvieron los siguientes gráficos:

OPERACION ASIMETRICA DE LA MAQUINA
TRIFASICA DE INDUCCION FECHA: 03-AUG-95 13:34:29

CASO SIMULADO: ARRANQUE - VOLTAJES DESBALANCEADOS

*** PARAMETROS DE LA MAQUINA ***
(valores en p.u.)

REACTANCIA DEL ESTATOR:	X(1)= 0.1067
REACTANCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:	X(2)= 0.1067
REACTANCIA MUTUA:	X(3)= 1.9242
RESISTENCIA DEL ESTATOR:	R(1)= 0.0276
RESISTENCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:	R(2)= 0.0904
CONSTANTE DE INERCIA:	H1= 0.2235
FRECUENCIA DE LA RED:	F1= 60

* PARAMETROS DE LA CURVA DE SATURACION: *
Dx vs. Fm (sat)

CONCATENACIONES DE FLUJO MUTUO CRITICO:	Y6= 0.95
PUNTO DE CORTE CON EL EJE VERTICAL:	S3= -5.43
PENDIENTE DE LA RECTA:	S4= 5.72

*** INTERVALO DE SOLUCION ***
(en ses.)

TIEMPO INICIAL:	T1= 0
TIEMPO FINAL:	T2= 1
PASO DE INTEGRACION:	H= 1.0E-3

Pasos 1000 - Tejec. 7000 ses. - Long. Arch. 217000 bytes

* ALIMENTACION TRIFASICA *
VOLTAJES DE LINEA APLICADOS:
(SECUENCIA POSITIVA: V1,V2,V3)

	MODULO (p.u.)	ANGULO DE DESFASAJE (rad.)
V1	V9(1)=0.8955	Q6(1)=0
V2	V9(2)=0.9318	Q6(2)=-2.1092
V3	V9(3)=0.9	Q6(3)=2.0503

* VOLTAJES DE LINEA DESBALANCEADOS *

* CONEXION TIPO DELTA EN ESTATOR *

* DATOS DE LA ENVOLVENTE:
(V en p.u. y T en ses.)

V1= 0.5700 V2= 0.9000 T1= 0.5000 T2= 0.9000

*** SISTEMA DE EJES FIJO EN ESTATOR ***

*** SISTEMA DESBALANCEADO ***

CONTINUACION ...


```
  CONDICIONES INICIALES PARA EL ARRANQUE SON CERO.

  ANGULO DE CONEXION PARA EL ARRANQUE:  A6=  3.3

  *  EC. DEL TORQUE (T8) EN FUNCION DE LA VELOC. (W6)  *
1090 T8=0.147

  NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS DE CONDICIONES FINALES

  DE ESTADO ESTABLE PARA SISTEMA DESBALANCEADO: @CONDFIN/VOLDSB

  NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS:  @ARRANQUE/VOLDSB
```

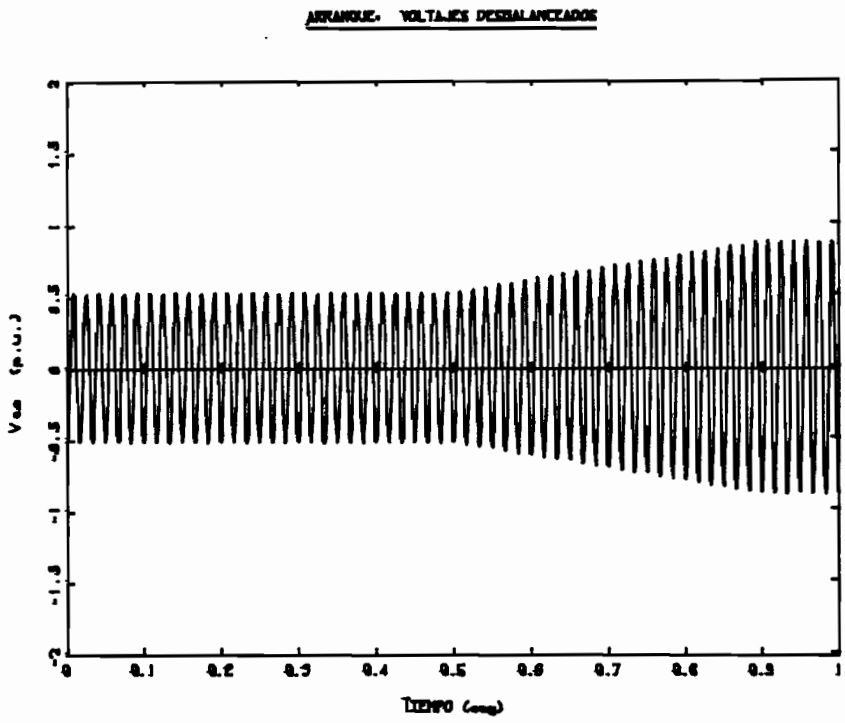


FIG. 5.3.1

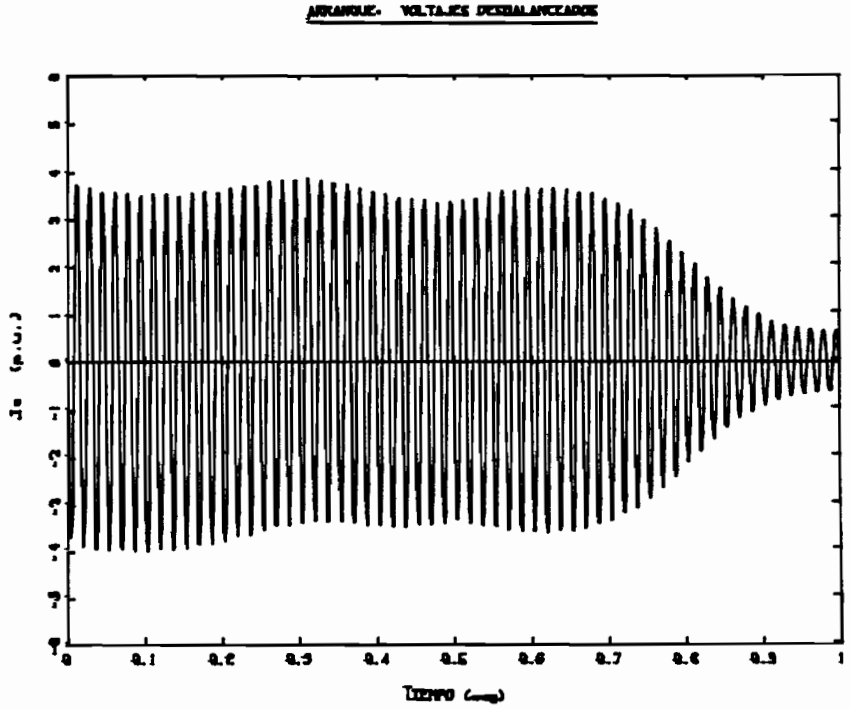


FIG. 5.3.2

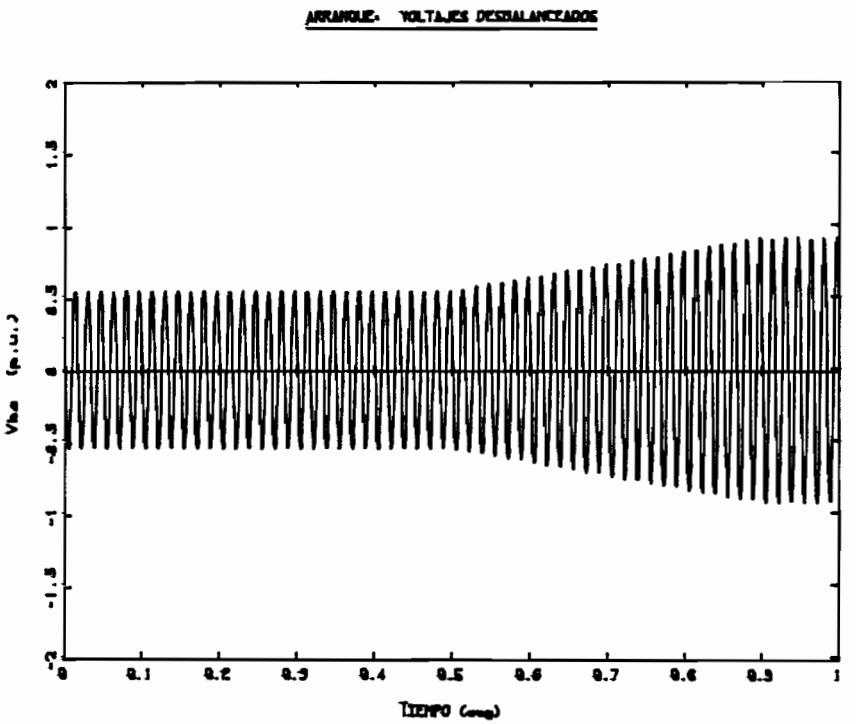


FIG. 5.3.3

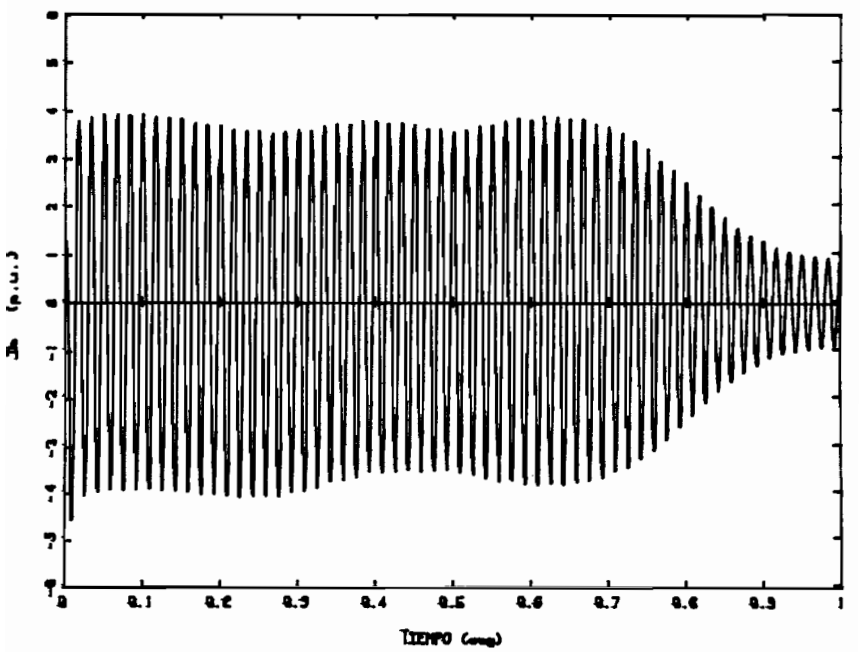


FIG. 5.3.4

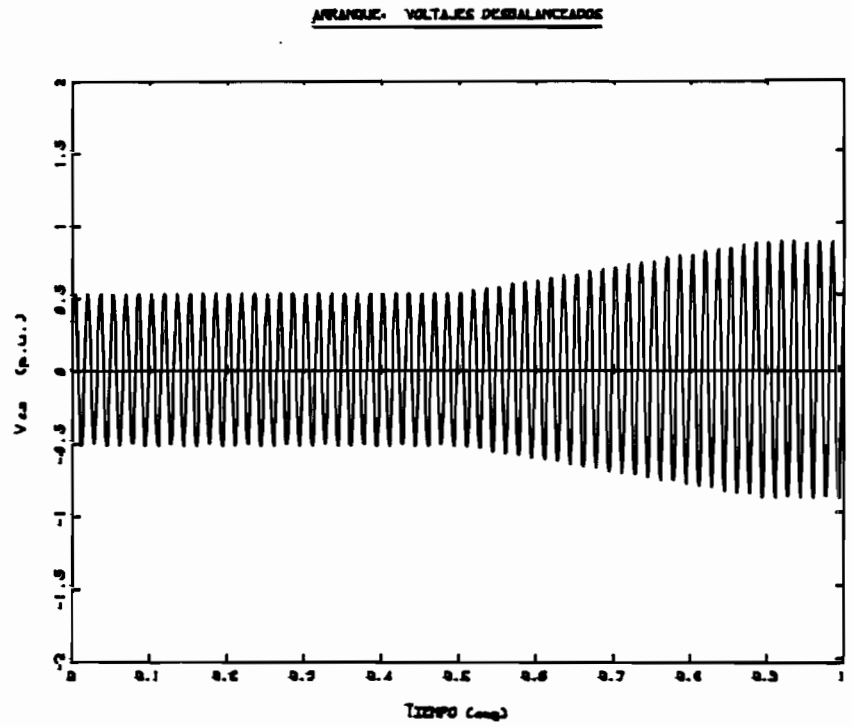


FIG. 5.3.5

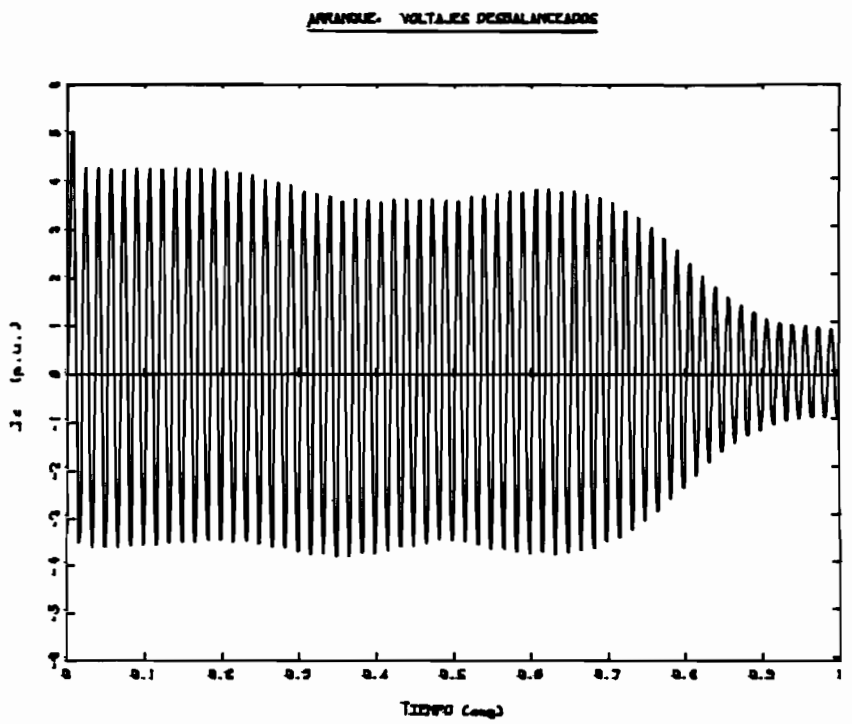


FIG. 5.3.6

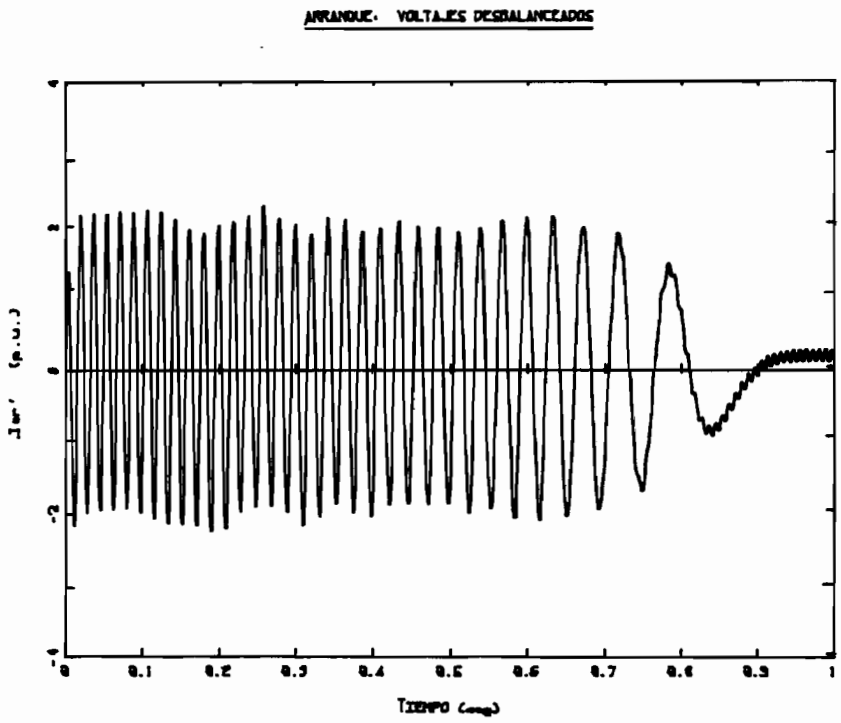


FIG. 5.3.7

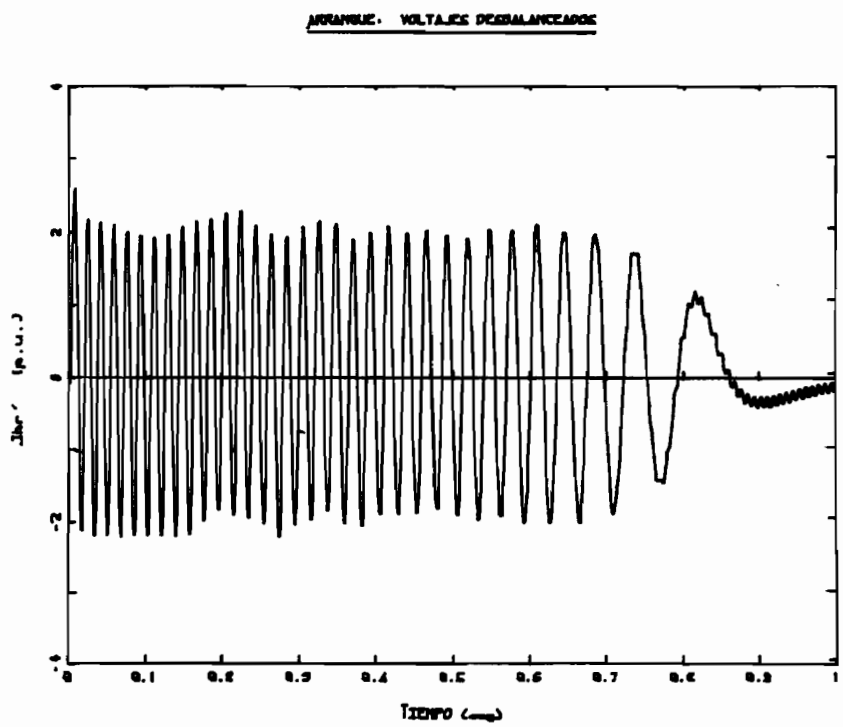


FIG. 5.3.8

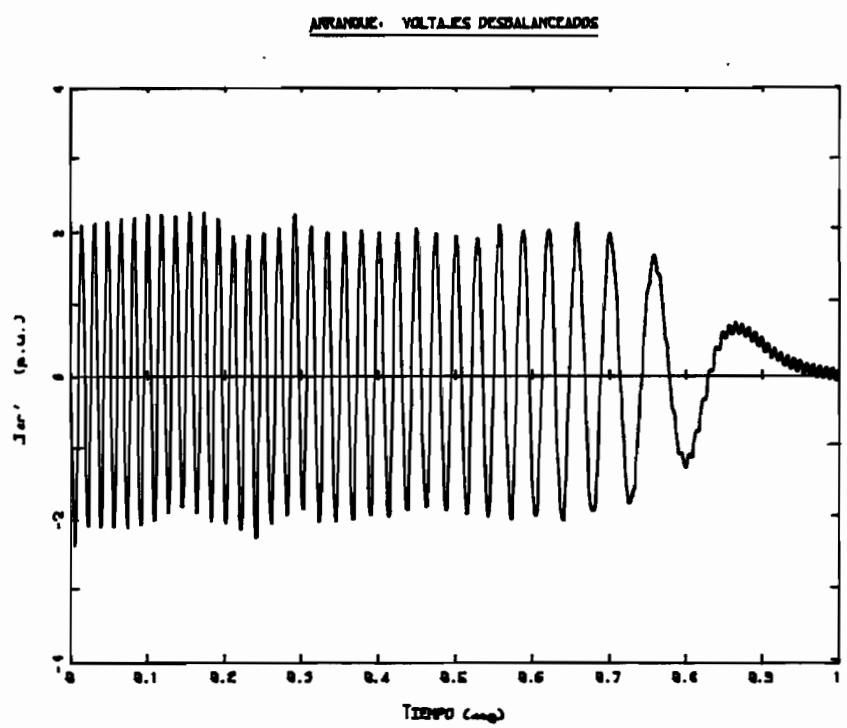


FIG. 5.3.9

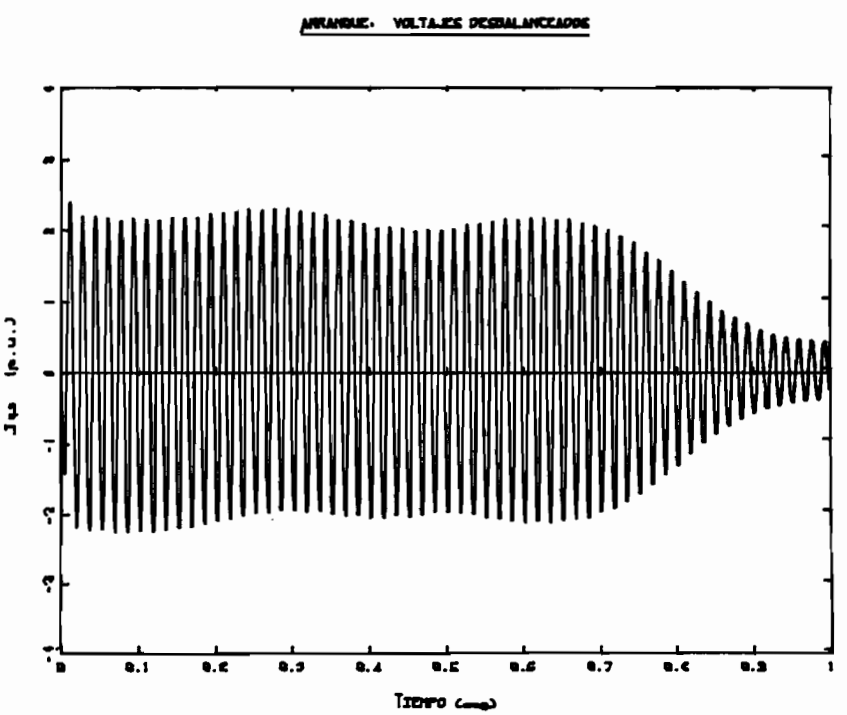


FIG. 5.3.10

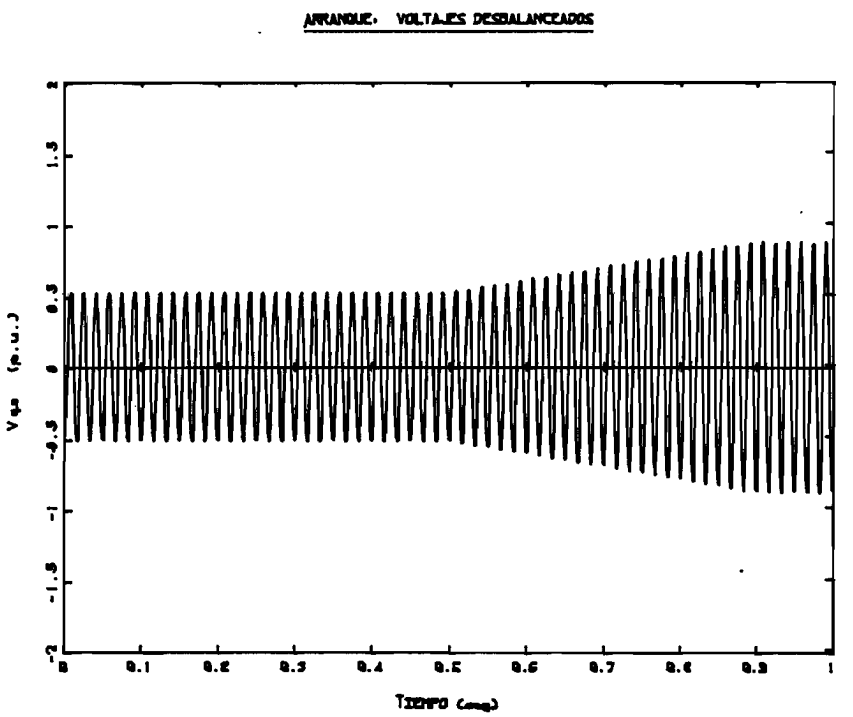


FIG. 5.3.11

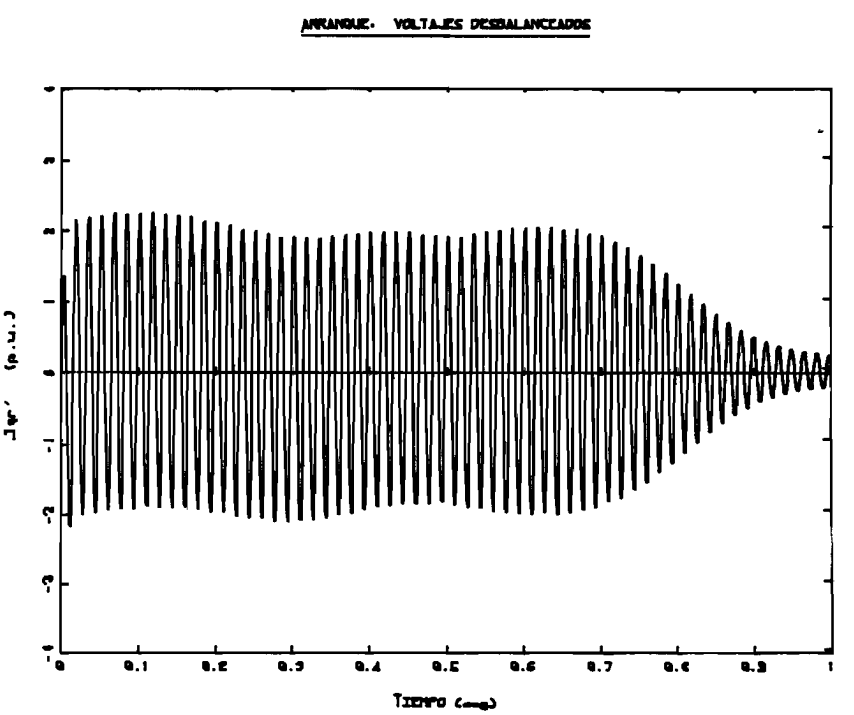


FIG. 5.3.12

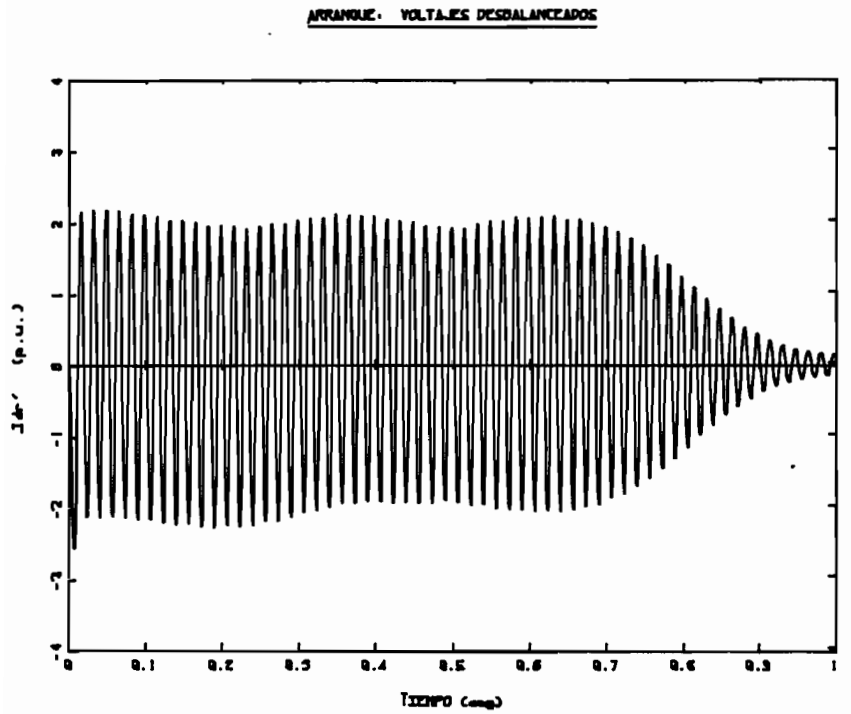


FIG. 5.3.13

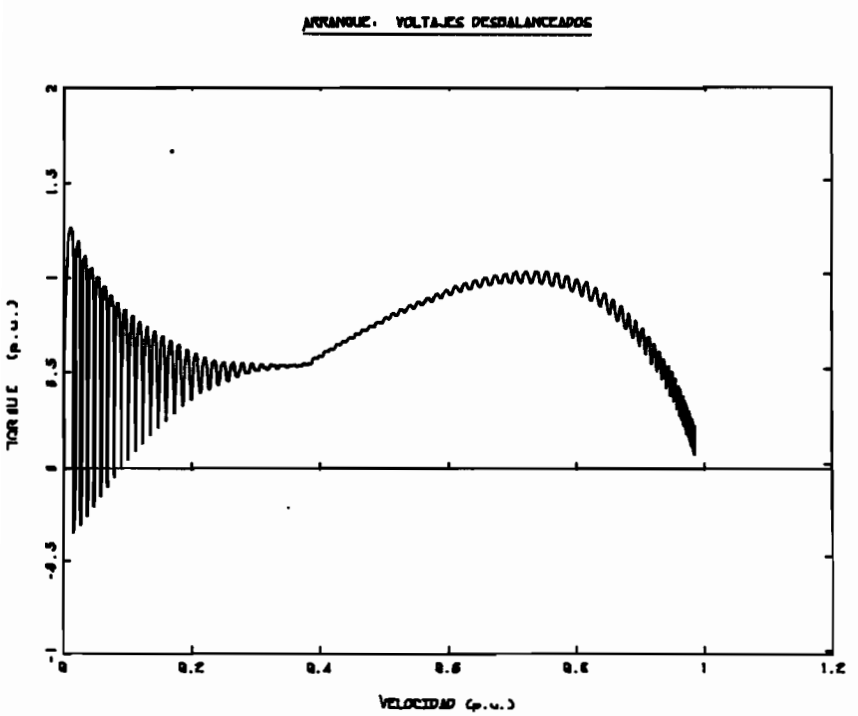


FIG. 5.3.14

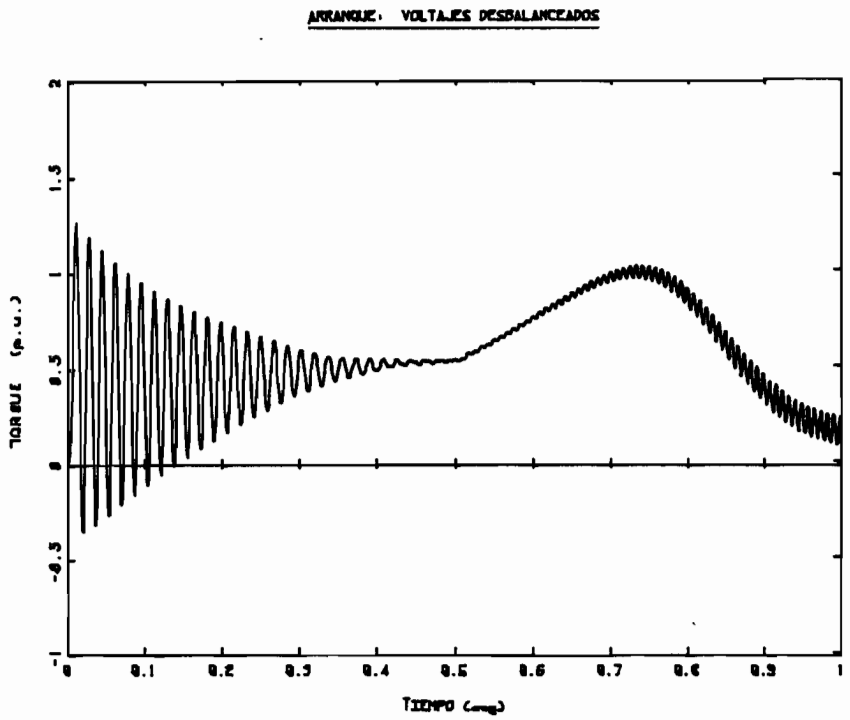


FIG. 5.3.15

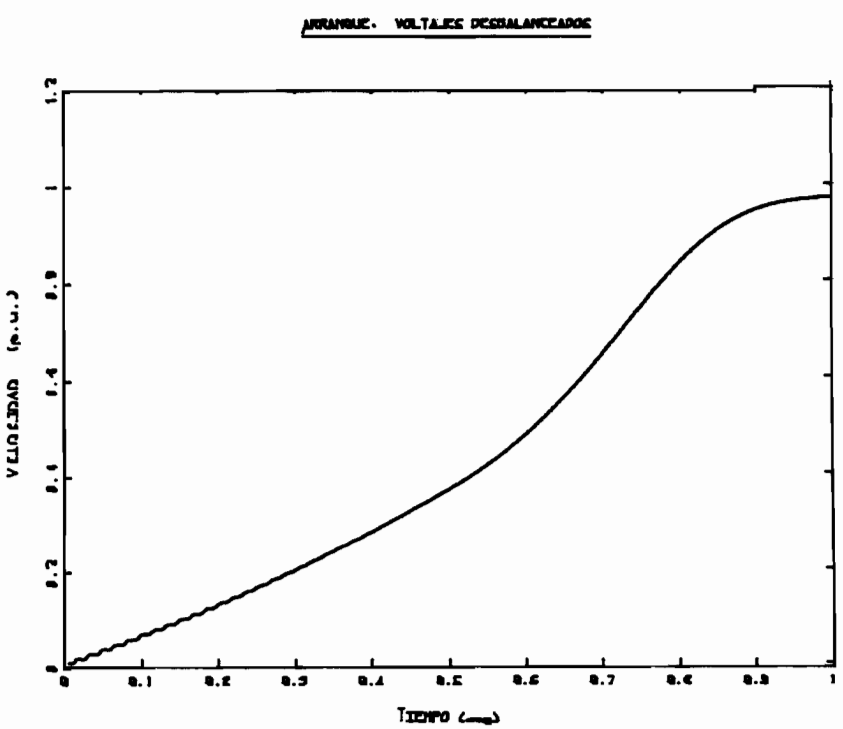


FIG. 5.3.16

En las Fig. 5.3.1 y 5.3.2 se encuentran el voltaje y la corriente de la línea "a". El voltaje aplicado tiene la forma y magnitud deseadas, ya que es simulada en base a la Fotografía # 2, y es una variable de entrada; el ángulo de conexión es de 190° aproximadamente, para la fase "a", mientras que en las otras fases serán diferentes. La corriente de línea tiene un valor máximo de 3.9 p.u., equivalente a 22 A pico, mientras que la corriente en estado estable es de 0.6 p.u., que equivale a 3.4 A pico. El tiempo de aceleración es de 0.5 seg. aproximadamente.

Como puede notarse, todos estos valores son muy parecidos a los determinados en la Fotografía # 2: Imax = 18 A pico, Iestable = 3.6 A pico y t_a = 0.95 seg., existiendo pequeñas diferencias, que son causadas por la pobre apreciación que se tiene; pero para los fines de la simulación puede decirse que son resultados válidos.

Se observa además, que los envolventes del voltaje y de la corriente de la Fotografía # 2 son un poco distintos a los envolventes respectivos de las Fig. 5.3.1 y 5.3.2, esto se debe a que se ha asumido que el voltaje aplicado no sufre ninguna disminución durante el transitorio, pero esto si sucede en la realidad, ya que la máquina no está conectada a una barra infinita, y el voltaje si tiene pequeñas depresiones que no se alcanzan a notar.

Para este caso debalanceado es práctico observar las corrientes y voltajes en las otras dos fases, ya que existe asimetría. Así, en las Fig. 5.3.3 y 5.3.4 se hallan el voltaje y la corriente de la línea "b", y para la línea "c" en las Fig. 5.3.5 y 5.3.6. De estas figuras, se puede decir que los voltajes si son simulados adecuadamente, por las mismas ra

zones expuestas anteriormente para la línea "a". Se observa que las corrientes tienen el mismo comportamiento que la de la línea "a", pero son diferentes en magnitud. En la línea "b" la corriente llega a 4.5 p.u. (26 A pico), mientras que en la "c" alcanza a 5 p.u. (28.5 A pico). De esta manera se verifica que el valor máximo de la corriente de arranque depende del ángulo de conexión (Ref. 3), ya que en cada línea se tiene distinto ángulo de conexión. Para estado estable, la corriente en la fase "b" es de 0.9 p.u. (5.1 A pico), y en la fase "c" es de 0.95 p.u. (5.4 A pico). Para este caso las corrientes de arranque, son menores que para alimentación trifásica balanceada, debido a que se arranca con voltaje reducido; en cambio los de estado estable son mayores, por el desbalance existente.

Se observa que las corrientes se estabilizan en su valor permanente en 0.95 seg. Hay que notar además, que los desbalances ocurren tanto en estado transitorio como en estado estable.

En las Fig. 5.3.7, 5.3.8 y 5.3.9 se encuentran las corrientes del rotor de las tres fases: se observan que tienen el comportamiento ya descrito: frecuencia variable y dependiente del deslizamiento. La forma de las corrientes es similar, se diferencian en amplitud y en fase, pero en general se puede decir que su valor está alrededor de 2.1 p.u. (33 A pico) , llegando a un máximo en la fase "b", de 2.5 p.u. (39 A pico). Se puede observar, también, que existen pequeños picos sobre la envolvente promedio, consecuencia del desbalance, y, además, se mantiene una pequeña oscilación sobre la componente fundamental, en estado estable, de aproximadamente 0.15 p.u. (2.3 A pico) y del doble de frecuencia de la red. Así mismo, estas corrientes adquieren su valor permanente en 0.95 seg. más o

menos.

En las Fig. 5.3.10, 5.3.11, 5.3.12 y 5.3.13 se tienen el voltaje y la corriente de estator en ejes q, y las corrientes de rotor de ejes q y d. Debido a que este ejemplo fue realizado con referencia estatórica, todas estas variables tienen la frecuencia del estator, o sea de la red. Se observa que tanto la corriente como el voltaje del estator en ejes q y d tienen una forma muy parecida a los valores de fase; en cambio, las corrrientes del rotor en ejes q y d son diferentes a las de fase, siendo más notorio en estado estable, ya que estas corrientes en ejes q y d tienen la frecuencia del estator y una amplitud constante, mientras que en valores de fase su frecuencia es la correspondiente al deslizamiento, presentándose además una oscilación sobre la componente fundamental, ocasionada por el desbalance. En ejes qyd no se presenta esta oscilación.

En las Fig. 5.3.14, 5.3.15 y 5.3.16 se encuentran las variables mecánicas. De estos gráficos se puede concluir lo siguiente: el torque promedio de arranque es más o menos 0.45 p.u., este valor es mucho menor que el obtenido con alimentación trifásica balanceada, y es correcto debido a que se arranca a tensión reducida. El torque promedio máximo es cercano a 1 p.u. y ocurre con un deslizamiento de 0.25 (ω_r = 0.75 p.u.), esta disminución del torque máximo es ocasionada por las condiciones desbalanceadas. Es importante notar que las oscilaciones del torque son permanentes, manteniéndose inclusive en estado estable, donde alcanzan un valor permanente de 0.16 p.u., pero el valor promedio es igual al valor del torque de carga, manteniéndose el equilibrio mecánico. La curva de la velocidad presenta oscilaciones en los primeros instantes, pudién-

dose notar inclusive muy pequeñas oscilaciones durante todo el período de aceleración, esto también puede verse en la Fotografía # 3. La velocidad alcanza su valor permanente, ω_r = 0.9833 p.u. en un tiempo aproximado de 0.95 seg., sin notarse oscilaciones en adelante.

De lo anteriormente comentado puede concluirse que no solamente se tienen los mismos resultados en la simulación que en el laboratorio, sino que todos los resultados de la simulación concuerdan con el conocimiento teórico.

5.1.4 Arranque con Resistencias Rotóricas Desiguales

Los datos para este ejemplo son:

$V_{aplicado}$: 205 V = 0.932 p.u. (voltajes balanceados)

ángulo de conexión: - 60° = - 1.05 rad.

Resistencias rotóricas: a: 1 Ω = 0.1379 p.u.

b: 0.5 Ω = 0.069 p.u.

c: 0.5 Ω = 0.069 p.u.

Tm = 0.147 p.u.

Los resultados obtenidos son:

```
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
ELECTRONICA Y CONTROL

OPERACION ASIMETRICA DE LA MAQUINA
TRIFASICA DE INDUCCION                    FECHA: 03-AUG-85 13:38:00
================================================================================

CASO SIMULADO:  ARRANQUE - RESISTENCIAS ROTORICAS DESIGUALES

      ***   PARAMETROS DE LA MAQUINA   ***
                (valores en p.u.)
REACTANCIA DEL ESTATOR:                          X(1)= 0.1067
REACTANCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:        X(2)= 0.1067
REACTANCIA MUTUA:                                X(3)= 1.9242
RESISTENCIA DEL ESTATOR:                         R(1)= 0.0276
RESISTENCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:       R(2)= 0.0904
CONSTANTE DE INERCIA:                             H1= 0.2235
FRECUENCIA DE LA RED:                             F1= 60

        *  PARAMETROS DE LA CURVA DE SATURACION:  *
                     Dx  vs.  Fm (sat)
CONCATENACIONES DE FLUJO MUTUO CRITICO:           Y6= 0.95
PUNTO DE CORTE CON EL EJE VERTICAL:               S3= -5.43
PENDIENTE DE LA RECTA:                            S4= 5.72

      ***   INTERVALO DE SOLUCION   ***
                  (en ses.)
TIEMPO INICIAL:          T1= 0
TIEMPO FINAL:            T2= 0.5
PASO DE INTEGRACION:      H= 1.0E-3

Pasos  500  -  Tejec. 3500 ses.  -  Long. Arch. 109000 bytes

        *  ALIMENTACION TRIFASICA  *
VOLTAJES DE LINEA APLICADOS:
(SECUENCIA POSITIVA: V1,V2,V3)
                MODULO (p.u.)        ANGULO DE DESFASAJE (rad.)
      V1        V9(1)=0.932          Q6(1)=0
      V2        V9(2)=0.932          Q6(2)=-2.094395
      V3        V9(3)=0.932          Q6(3)=2.094395

        *  VOLTAJES DE LINEA BALANCEADOS  *

        *  CONEXION TIPO DELTA EN ESTATOR  *

        * RESISTENCIAS EXTERNAS CONECTADAS AL ROTOR *
                  (valores en p.u.)
R1(1)= 0.13790     R1(2)= 0.06900     R1(3)= 0.06900

      ***   SISTEMA DE EJES FIJO EN ROTOR   ***


      ***   SISTEMA DESBALANCEADO   ***
```

```
  CONDICIONES INICIALES PARA EL ARRANQUE SON CERO.

  ANGULO DE CONEXION PARA EL ARRANQUE:  A6=  -1.05

  *  EC. DEL TORQUE (T8) EN FUNCION DE LA VELOC. (W6)  *
1090 T8=0.147

  NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS DE CONDICIONES FINALES
  DE ESTADO ESTABLE PARA SISTEMA DESBALANCEADO: @CONDFIN/RESMDSB

  NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS:  @ARRANQUE/RESRDSB
```

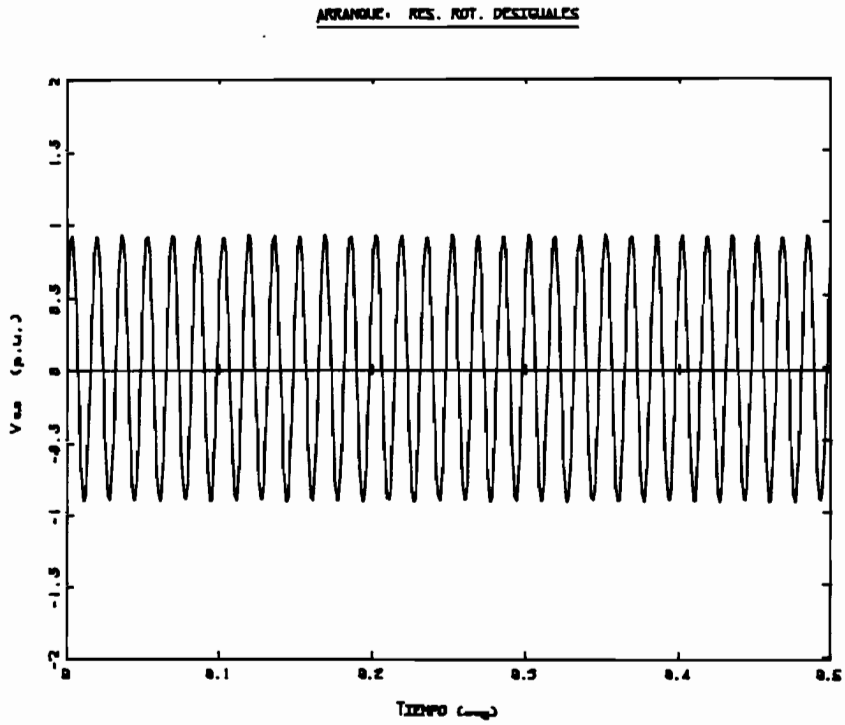


FIG. 5.4.1

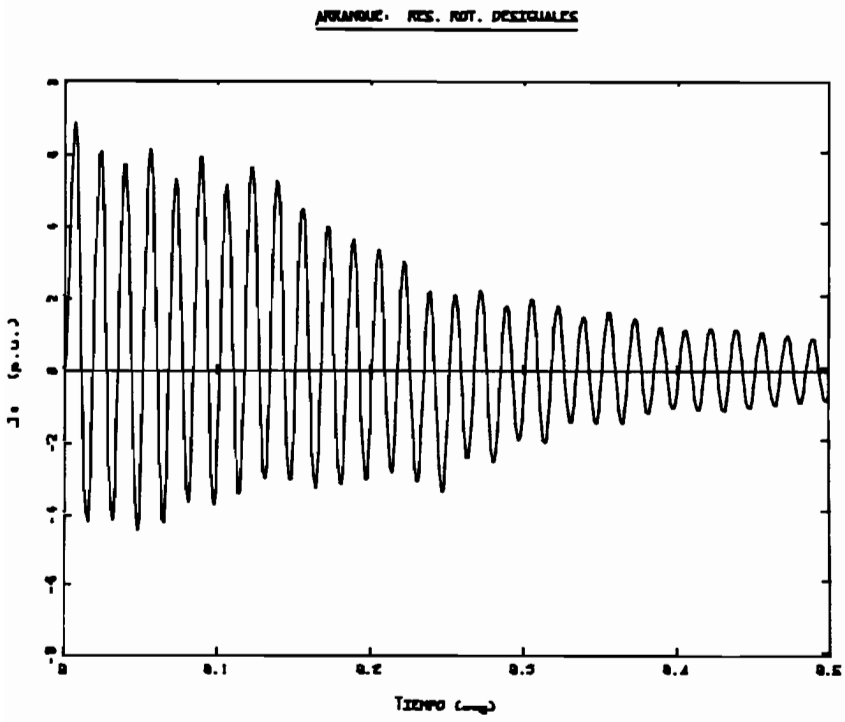


FIG. 5.4.2

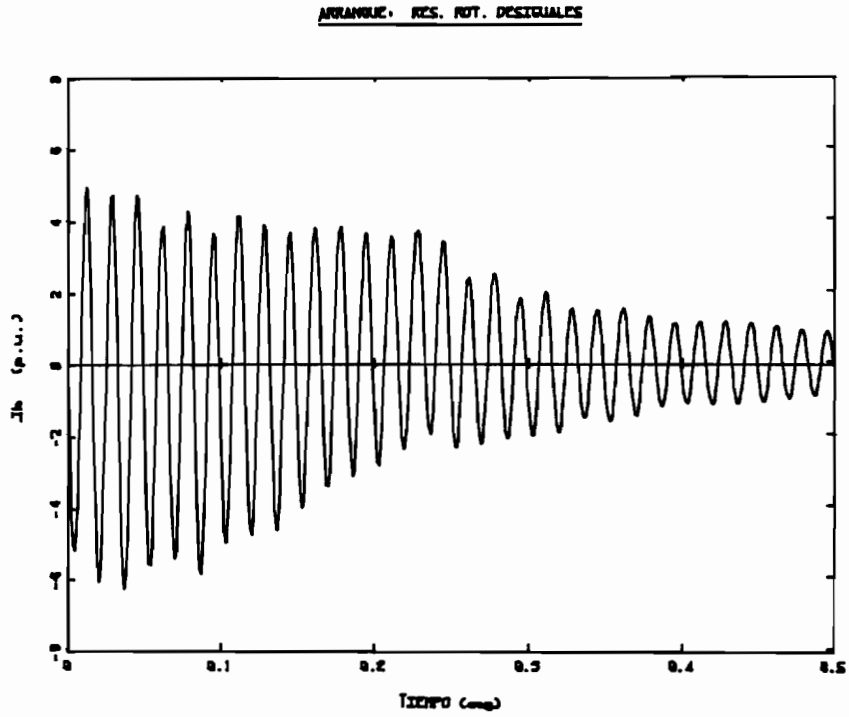


FIG. 5.4.3

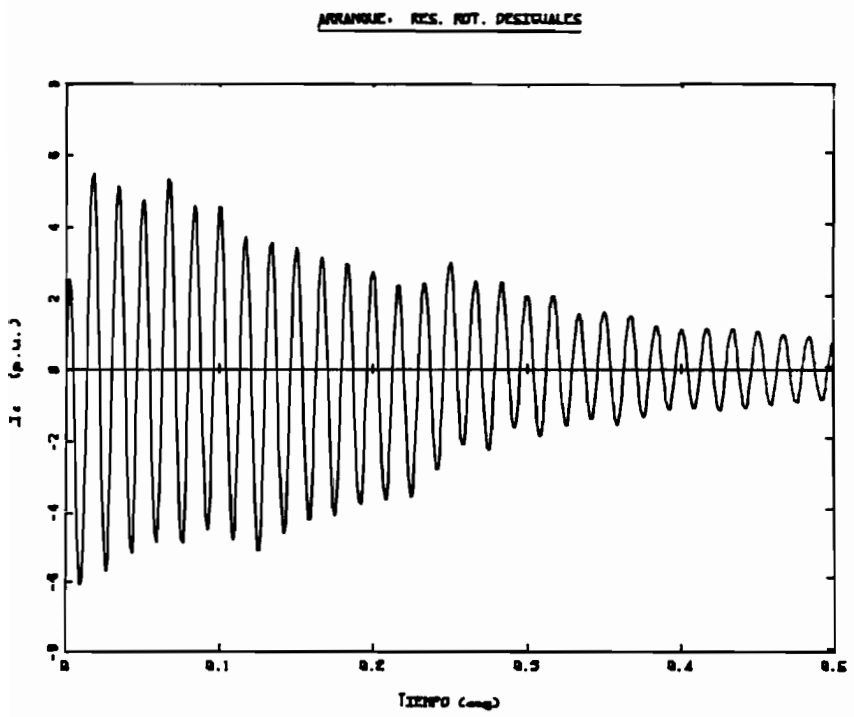


FIG. 5.4.4

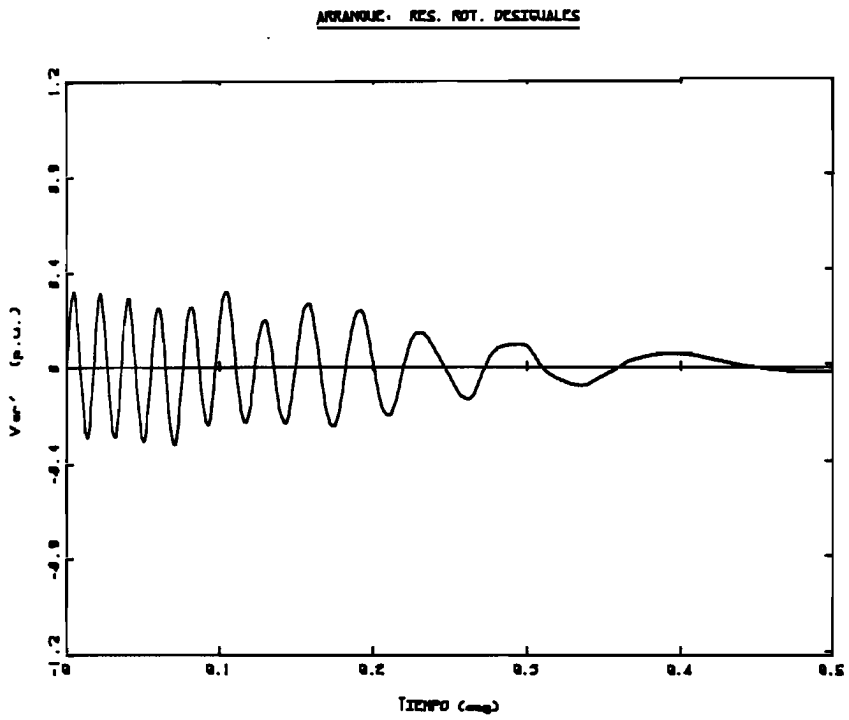


FIG. 5.4.5

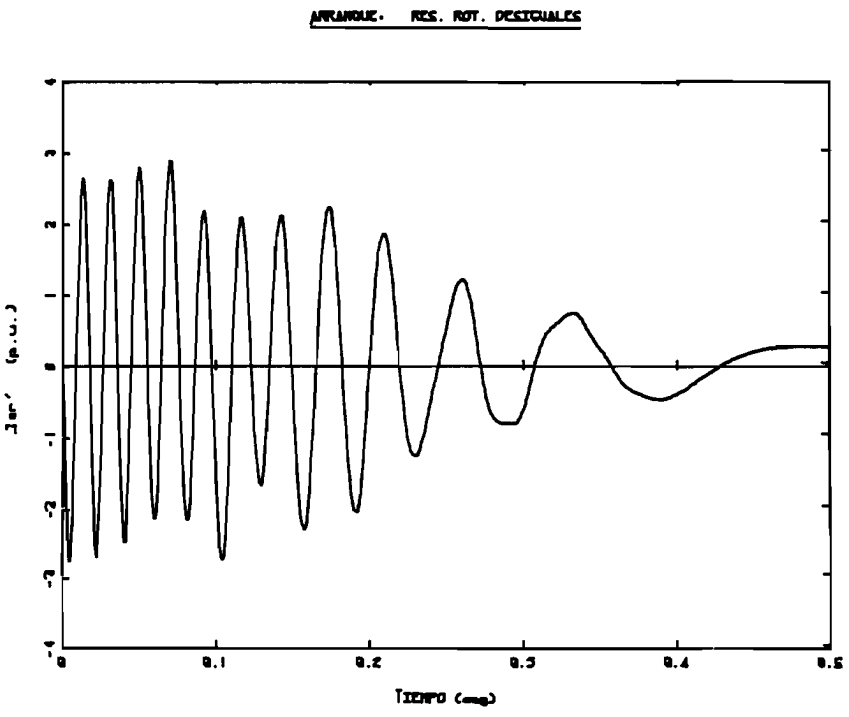


FIG. 5.4.6

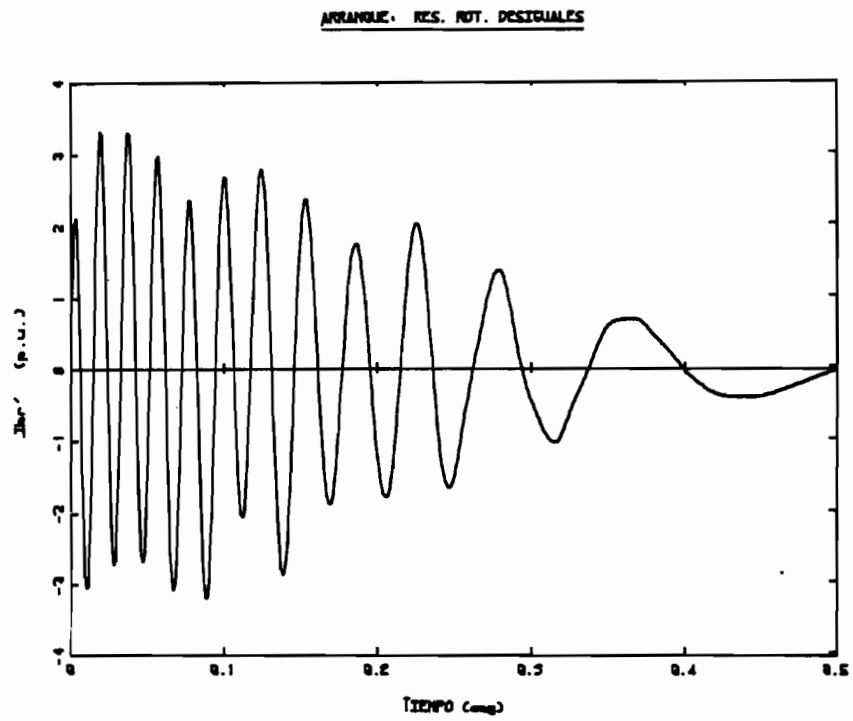


FIG. 5.4.7

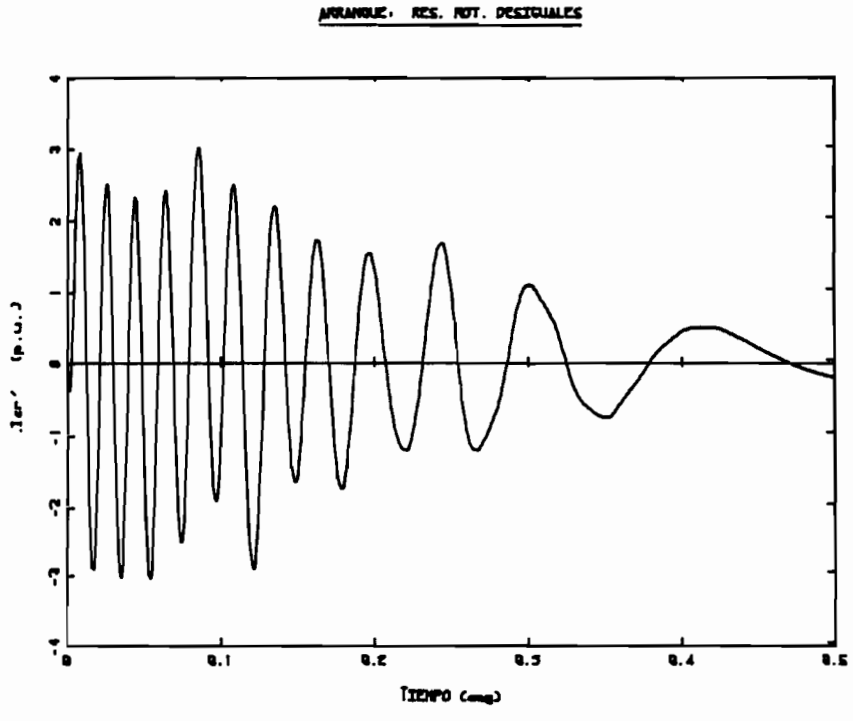


FIG. 5.4.8

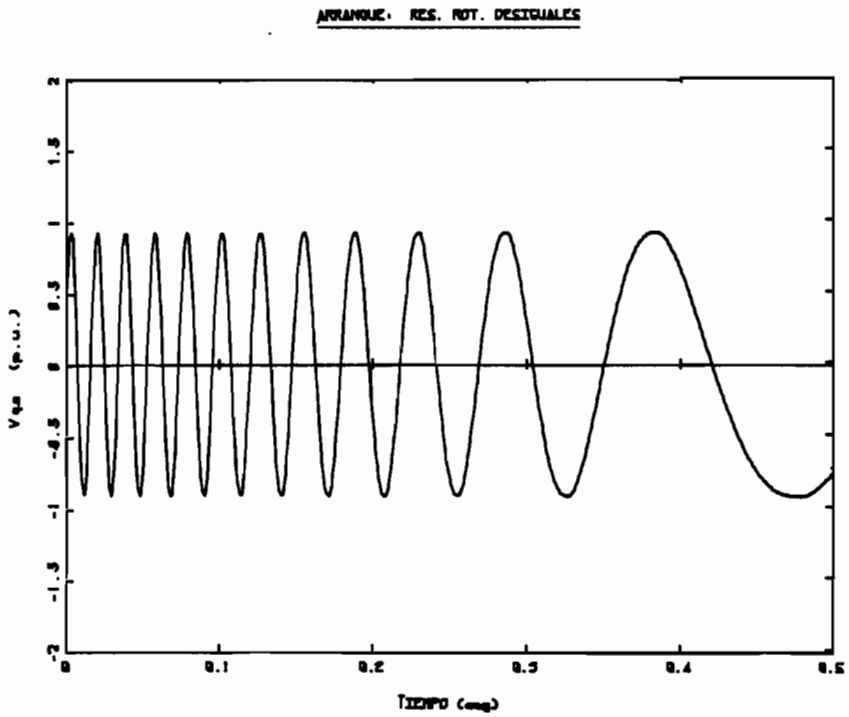


FIG. 5.4.9

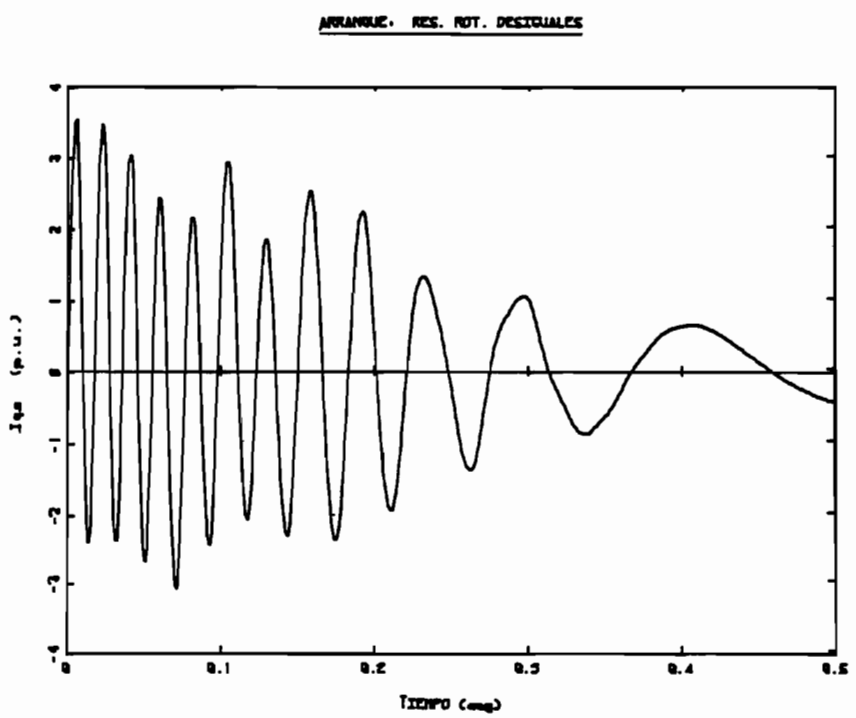


FIG. 5.4.10

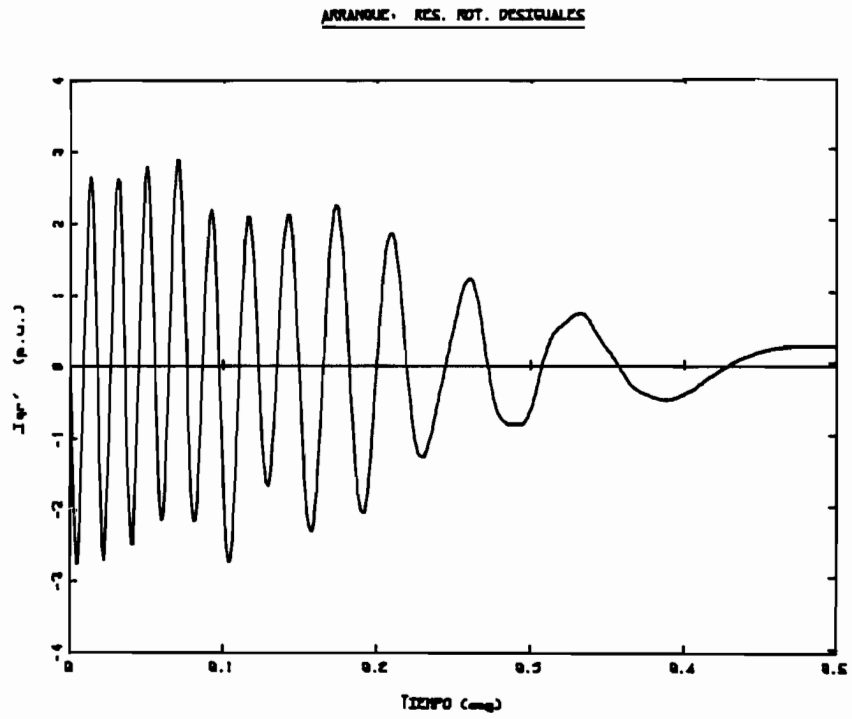


FIG. 5.4.11

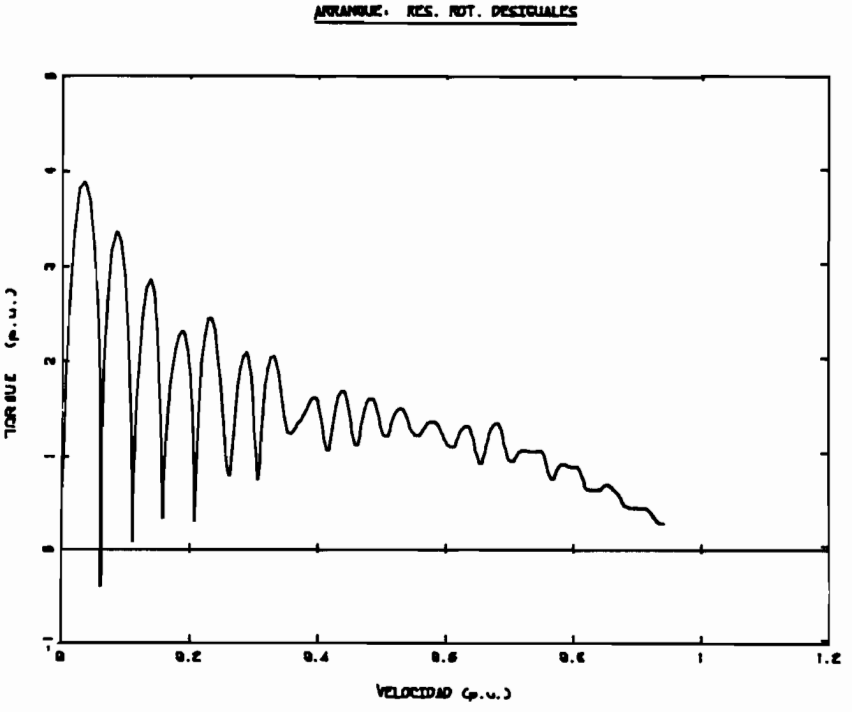


FIG. 5.4.12

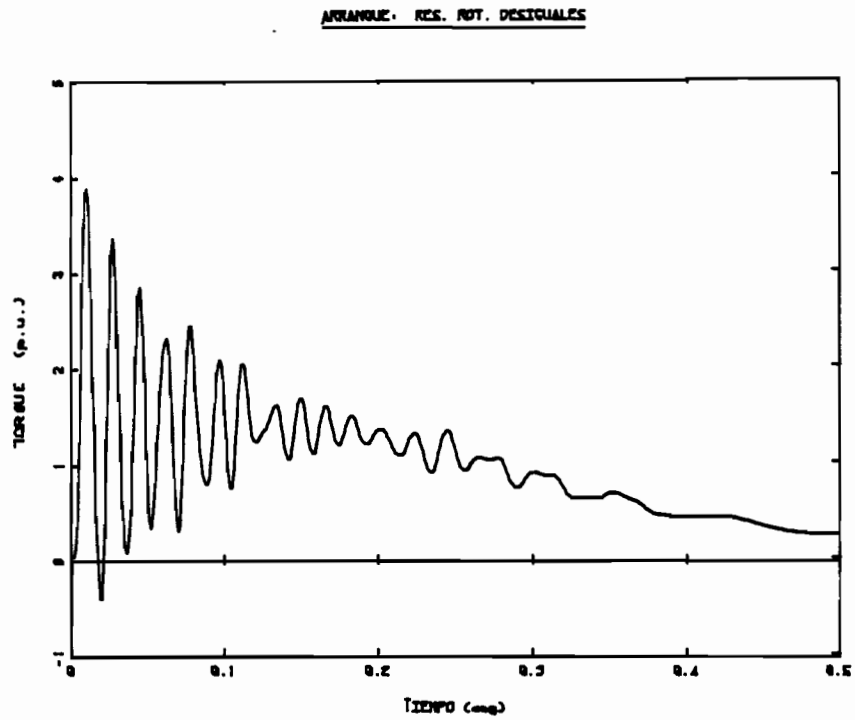


FIG. 5.4.13

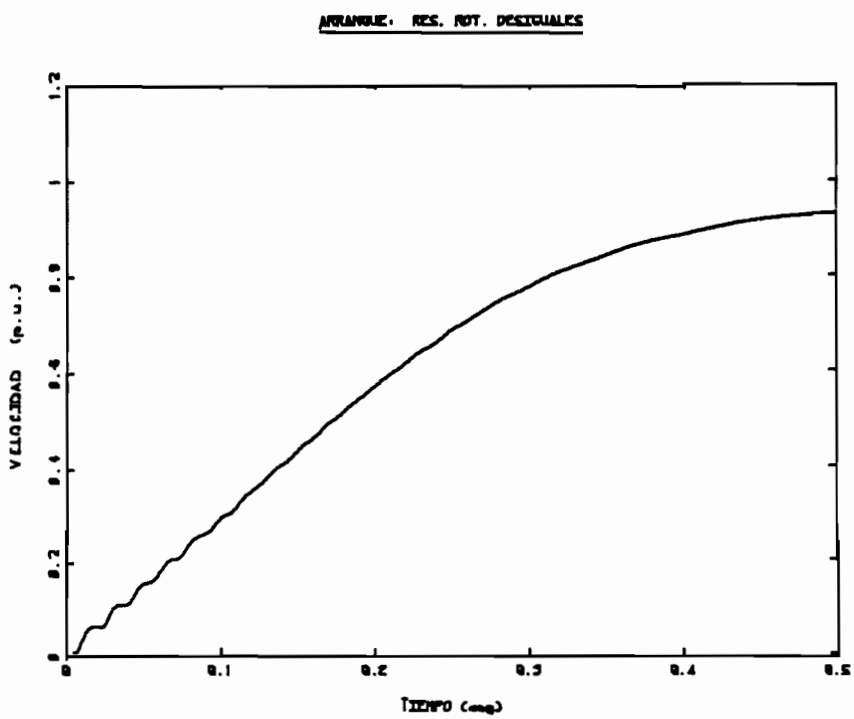


FIG. 5.4.14

En la Fig. 5.4.1 se encuentran el voltaje aplicado a la fase "a", se observa que el ángulo de conexión y la magnitud (datos), son los mismos de la Fotografía # 4.

En la Fig. 5.4.2 se tiene el gráfico de la corriente de la línea "a", presenta un valor máximo de 7 p.u., o sea, 40 A pico, y un valor de estado estable igual a 0.85 p.u., o sea, 4.8 A pico, el tiempo al cual se estabiliza la corriente es de aproximadamente 0.45 seg. Como puede verse, estos valores son muy parecidos a los determinados en la Fotografía # 4: Imáx = 38 A pico, Iestable = 4.8 A pico y t_a = 0.45 seg., además, comparando las formas de onda puede decirse que son muy parecidas, aunque no son exactamente iguales; ambas presentan similares picos sobre la envolvente promedio. La corriente de arranque ha disminuido con relación a la obtenida en el arranque balanceado, en cambio, la de estado estable aumentó, esto sucede por la conexión de resistencias en el rotor, y por el desbalance existente.

En las Fig. 5.4.3 y 5.4.4 se hallan las corrientes de las líneas "b" y "c", y puede verse que tienen un comportamiento muy parecido al de la línea "a", pero se diferencian en magnitud y en fase. Así, en las líneas "b" y "c" alcanza un valor máximo de 6.0 p.u. (34 A pico) y en estado estable se mantienen iguales a la línea "a", se estabilizan, igualmente, en 0.45 seg.

En las Fig. 5.4.5 y 5.4.6 se encuentran el voltaje y la corriente de la fase "a" del rotor. Como puede verse, tienen la misma forma, pero están invertidos, esto es por la convención de signos adoptada, lo que es normal ya que el voltaje aplicado a las fases del rotor es igual a la co-

rriente de fase multiplicada por la resistencia externa conectada a esa fase. En las Fig. 5.4.7 y 5.4.8 se hallan las corrientes de las fases "b" y "c" del rotor; estas 4 últimas variables tienen la forma ya descrita anteriormente para las corrientes del rotor, notándose además que los desbalances se presentan en forma de picos que sobresalen de la envolvente promedio. La corriente de la fase "c" del rotor tiene un valor máximo de 3 p.u. (46 A pico), muy aproximado al valor de 48 A pico que fue medido en la Fotografía # 6; el valor de estado estable no es posible determinarlo, y, en forma aproximada, puede decirse que la Fig. 5.4.1 es la misma que la Fotografía # 6. Las corrientes de las fases "a" y "b" alcanzan también valores máximos de 3 p.u., siendo un poco distintos entre sí debido a los desbalances existentes. Hay que anotar además, que tanto en la Fotografía # 6 como en la Fig. 5.4.8 se observan pequeñas oscilaciones sobre la componente fundamental, durante la aceleración, pero se atenuan casi totalmente en estado estable.

Para los casos en que existen resistencias en el circuito de rotor, se toma referencia rotórica, por facilidad de los cálculos en el programa . En las Fig. 5.4.9, 5.4.10 y 5.411 puede observarse al comportamiento de las variables de ejes q y d para referencia rotórica. Se observa también que los picos de corriente debidos al desbalance, en este caso si se reflejan en los ejes q y d.

En la Fig. 5.4.12, 5.4.13 y 5.4.14 están las variables mecánicas, pudiendo notarse lo siguiente: el torque máximo es 3.9 p.u. y el máximo es -0.4 p.u., entonces en el arranque el torque promedio será alrededor de 1.75 p.u., que es mayor al obtenido con alimentación balanceada y sin resistencias en el rotor; además éste es el valor del torque máximo, por

lo tanto en este caso el arranque se produce con torque máximo. Las oscilaciones del torque se mantienen durante todo el período de aceleración, llegando a amortiguarse en estado estable. Para estado estable el torque adquiere un valor igual al torque de carga, o sea, 0.147 p.u. La velocidad es oscilante en los primeros instantes, pero luego se amortiguan esas oscilaciones, llegando a valores muy pequeños durante la aceleración, y a desaparecer en estado estable, este comportamiento puede observarse también en la Fotografía # 5. El tiempo de aceleración se comprueba que es de 0.45 seg., con lo que se tiene una total concordancia con los resultados experimentales.

Nuevamente vale comentar, que no sólo se ha demostrado la igualdad entre los resultados experimentales y los de simulación, sino que adicionalmente existe una total consistencia de los resultados con los conocimientos teóricos.

5.1.5 Arranque con Voltajes y Resistencia Rotóricas Desbalanceadas

Los datos para este ejemplo son:

$$V_{ab} = 199 \cos \omega_{et}$$
$$V_{bc} = 207 \cos(\omega_{et} - 2.1459)$$
$$V_{ca} = 194 \cos(\omega_{et} + 2.0324)$$

las envolventes de los voltajes aplicados son de la siguiente forma: (Fotografía # 7)

```
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
ELECTRONICA Y CONTROL

OPERACION ASIMETRICA DE LA MAQUINA
      TRIFASICA DE INDUCCION              FECHA: 03-AUG-85 13:40:44
================================================================================

CASO SIMULADO:  ARRANQUE - VOLTAJES Y RESISTENCIAS ROTORICAS DESBAL.

      ***   PARAMETROS DE LA MAQUINA   ***
                (valores en p.u.)
REACTANCIA DEL ESTATOR:                          X(1)= 0.1067
REACTANCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:        X(2)= 0.1067
REACTANCIA MUTUA:                                X(3)= 1.9242
RESISTENCIA DEL ESTATOR:                         R(1)= 0.0276
RESISTENCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:       R(2)= 0.0904
CONSTANTE DE INERCIA:                             H1= 0.2235
FRECUENCIA DE LA RED:                             F1= 60

        *  PARAMETROS DE LA CURVA DE SATURACION:  *
                    Dx  vs.  Fm (sat)
CONCATENACIONES DE FLUJO MUTUO CRITICO:           Y6= 0.95
PUNTO DE CORTE CON EL EJE VERTICAL:               S3= -5.43
PENDIENTE DE LA RECTA:                            S4= 5.72

      ***   INTERVALO DE SOLUCION   ***
                (en ses.)
TIEMPO INICIAL:          T1= 0
TIEMPO FINAL:            T2= 0.9
PASO DE INTEGRACION:      H= 1.0E-3

Pasos  900  -  Tejec. 6300 ses.  -  Long. Arch. 195400 bytes

        *  ALIMENTACION TRIFASICA  *
VOLTAJES DE LINEA APLICADOS:
(SECUENCIA POSITIVA: V1,V2,V3)
                MODULO (p.u.)      ANGULO DE DESFASAJE (rad.)
      V1        V9(1)=0.9040       Q6(1)=0
      V2        V9(2)=0.9409       Q6(2)=-2.1459
      V3        V9(3)=0.8818       Q6(3)=2.0324

        *  VOLTAJES DE LINEA DESBALANCEADOS  *

        *  CONEXION TIPO DELTA EN ESTATOR  *

        *  DATOS DE LA ENVOLVENTE:
           (V en p.u. y T en ses.)
V1= 0.5430      V2= 0.9050      T1= 0.3000      T2= 0.7000

        * RESISTENCIAS EXTERNAS CONECTADAS AL ROTOR *
                (valores en p.u.)
R1(1)= 0.13790     R1(2)= 0.06900     R1(3)= 0.06900

      ***   SISTEMA DE EJES FIJO EN ROTOR   ***


      ***   SISTEMA DESBALANCEADO   ***
```

CONDICIONES INICIALES PARA EL ARRANQUE SON CERO.

ANGULO DE CONEXION PARA EL ARRANQUE: A6= 1.05

```
*  EC. DEL TORQUE (T6) EN FUNCION DE LA VELOC. (W6)  *
1090 T8=0.147
```

NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS DE CONDICIONES FINALES

DE ESTADO ESTABLE PARA SISTEMA ¿DESBALANCEADO: @CONDFIN/VYRRDSB

NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS: @ARRANQUE/VYRRDSB

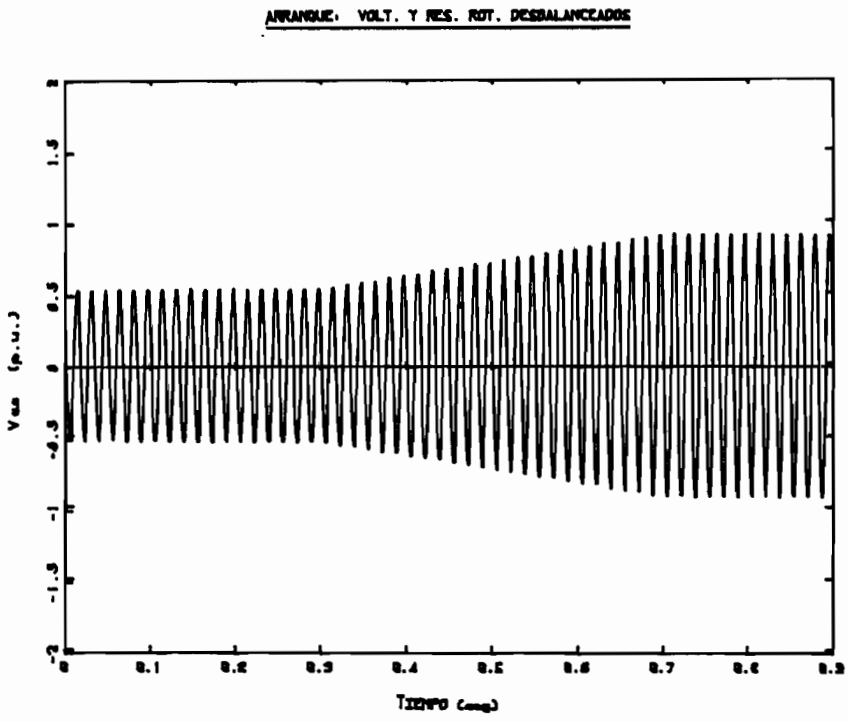


FIG. 5.5.1

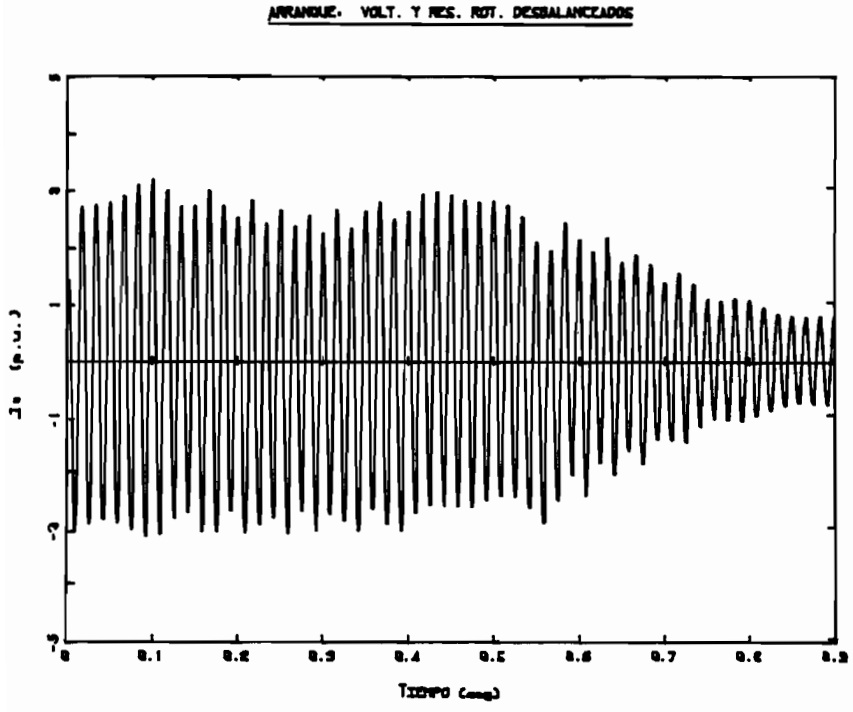


FIG. 5.5.2

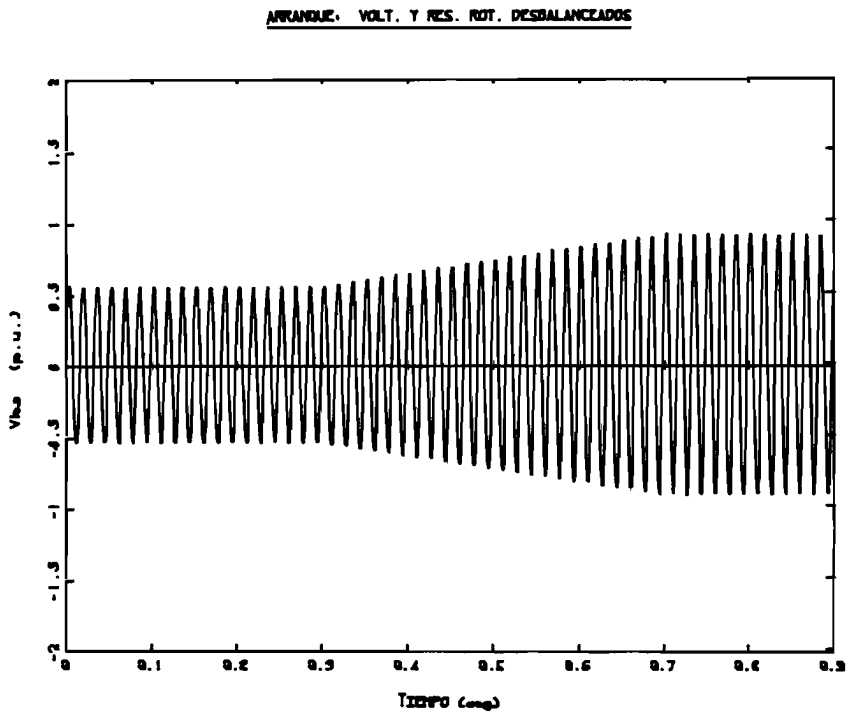


FIG. 5.5.3

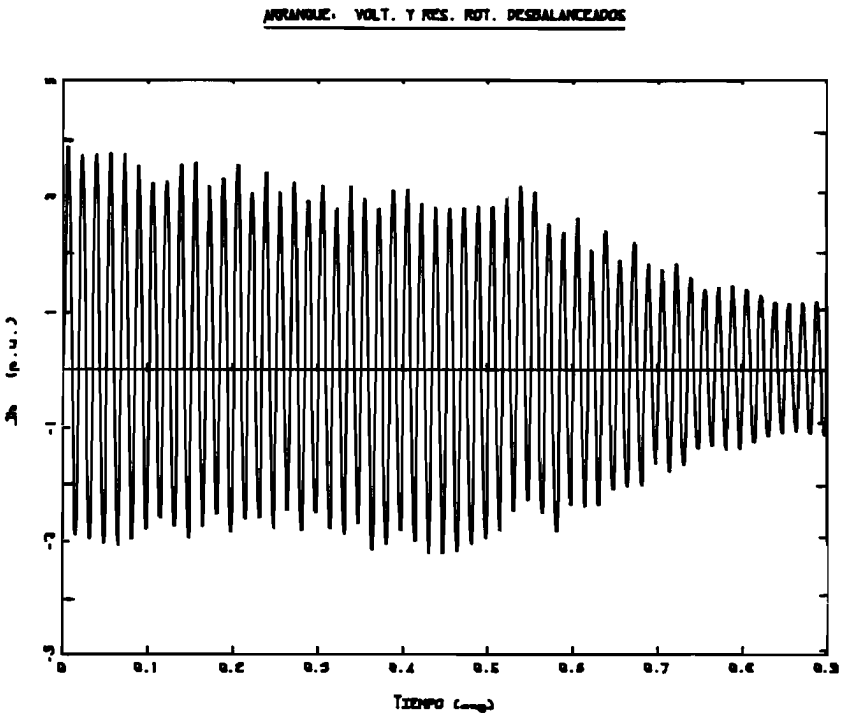


FIG. 5.5.4

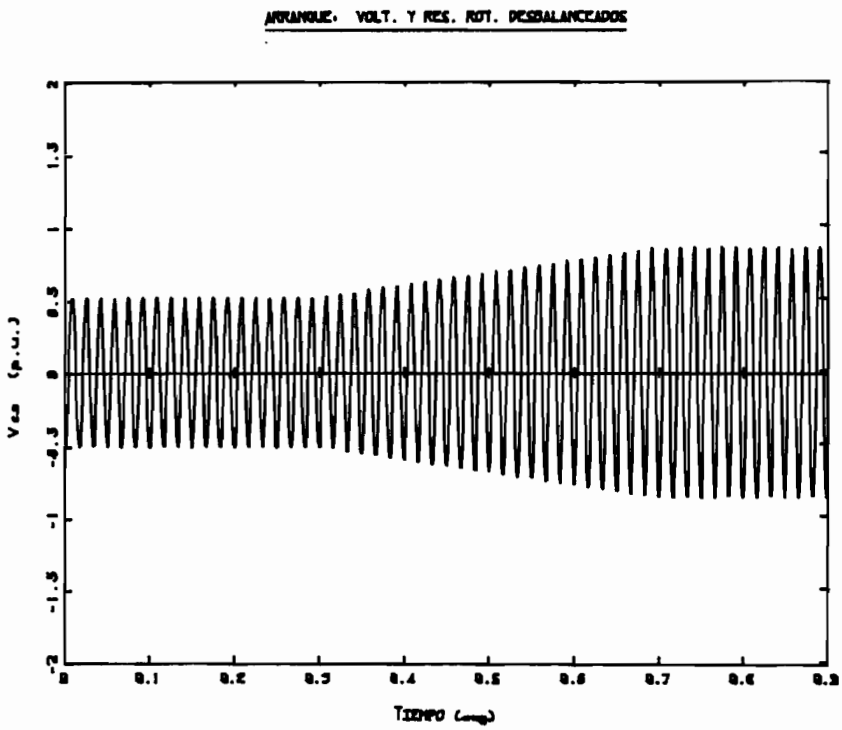


FIG. 5.5.5

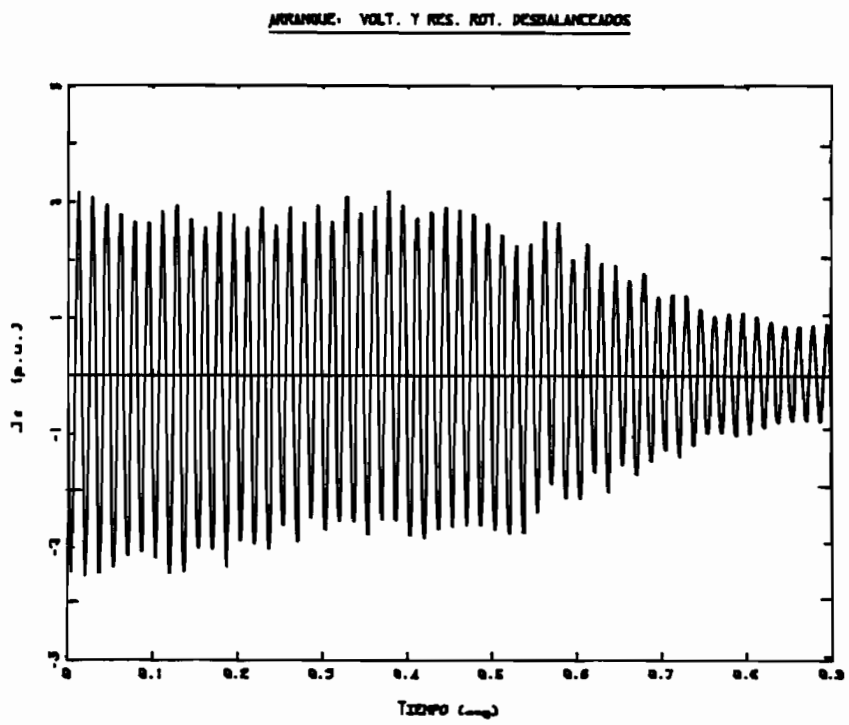


FIG. 5.5.6

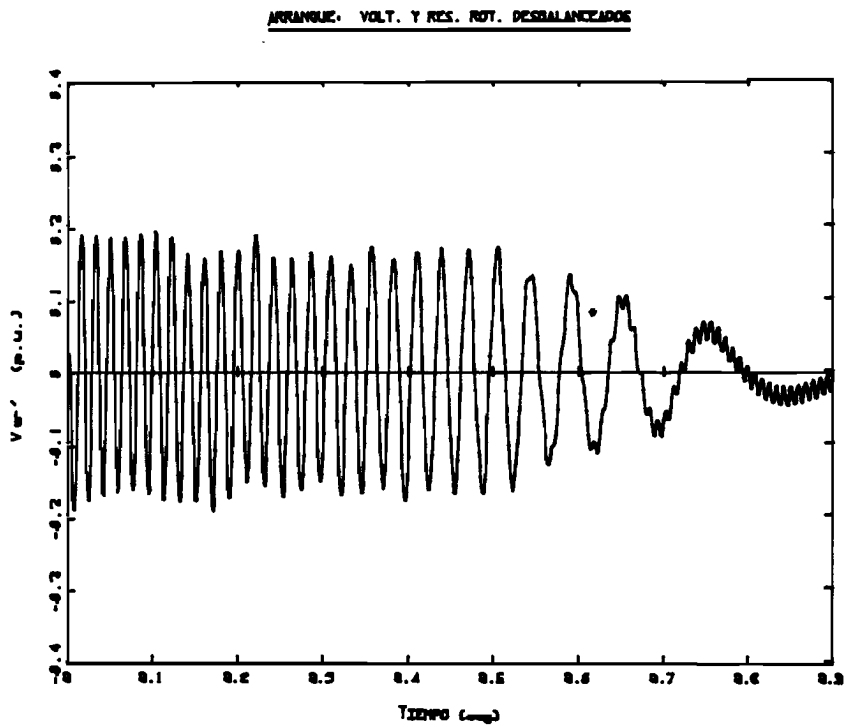


FIG. 5.5.7

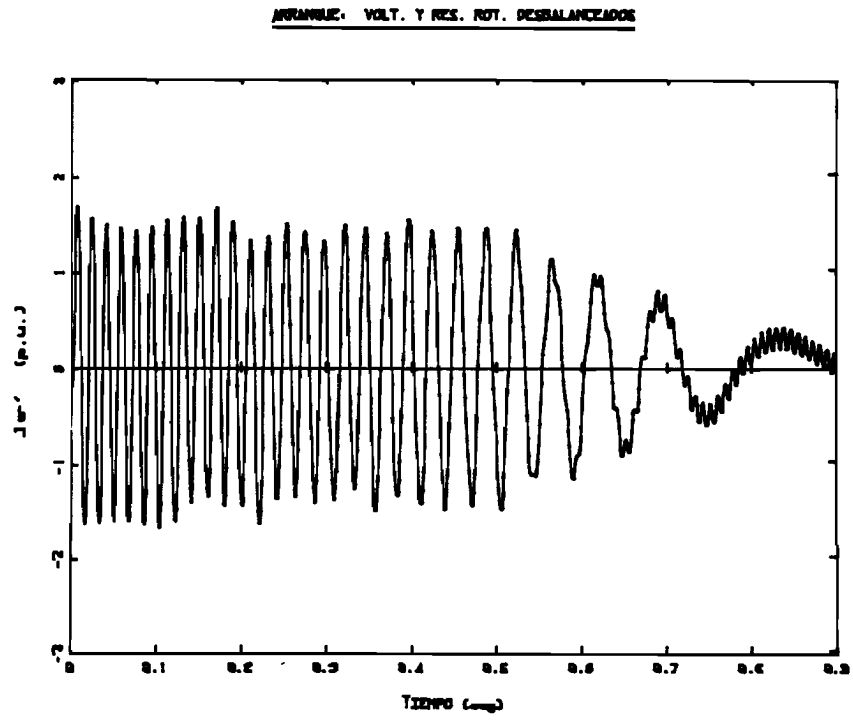


FIG. 5.5.8

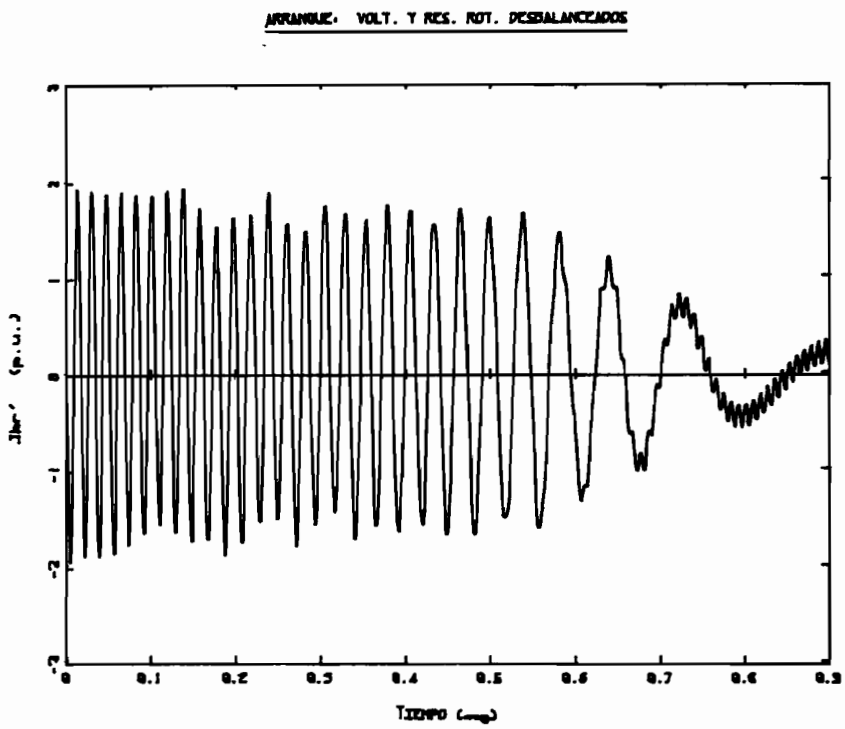


FIG. 5.5.9

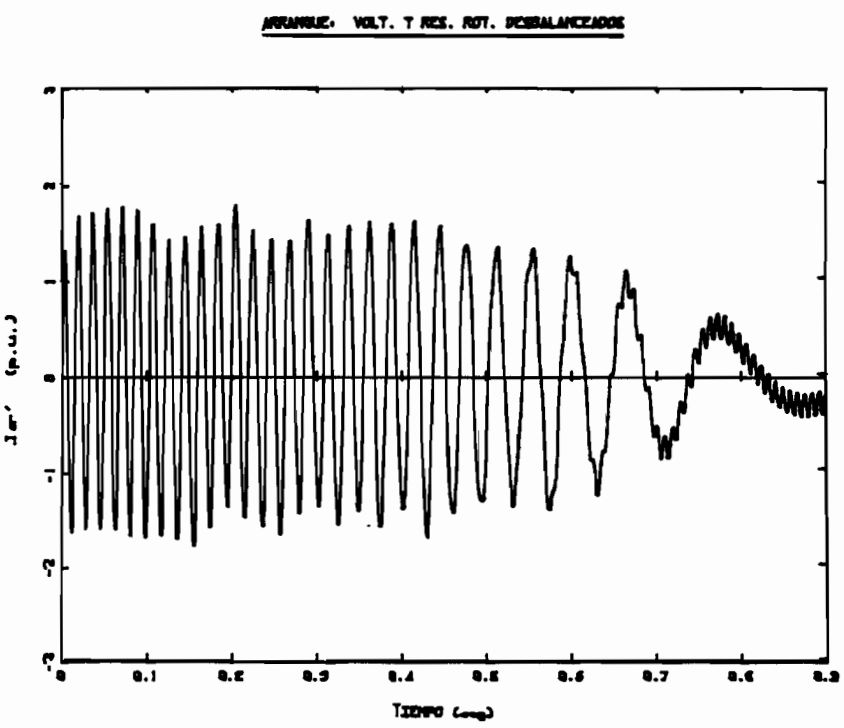


FIG. 5.5.10

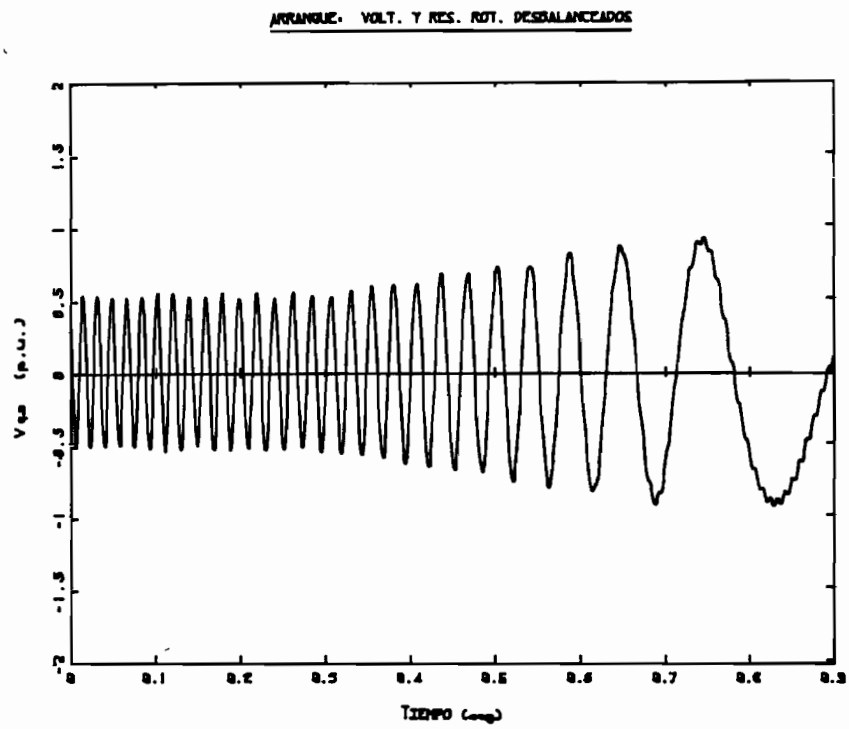


FIG. 5.5.11

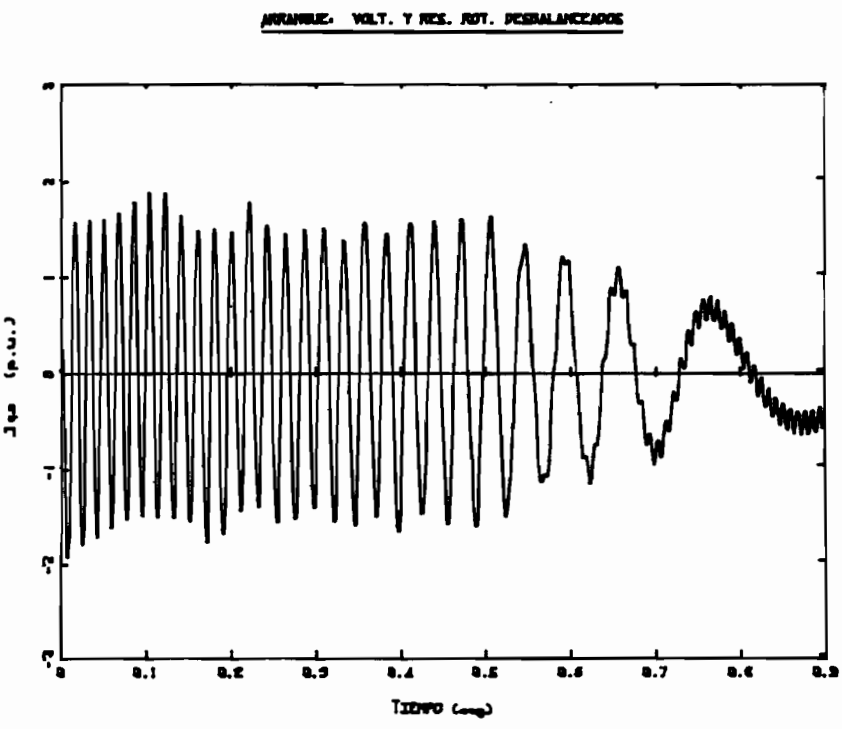


FIG. 5.5.12

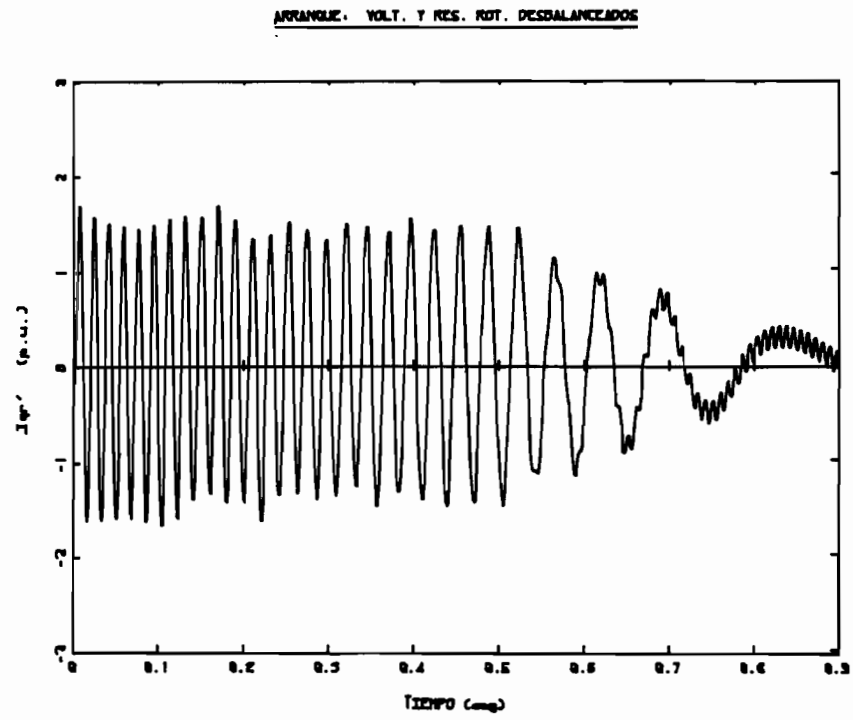


FIG. 5.5.13

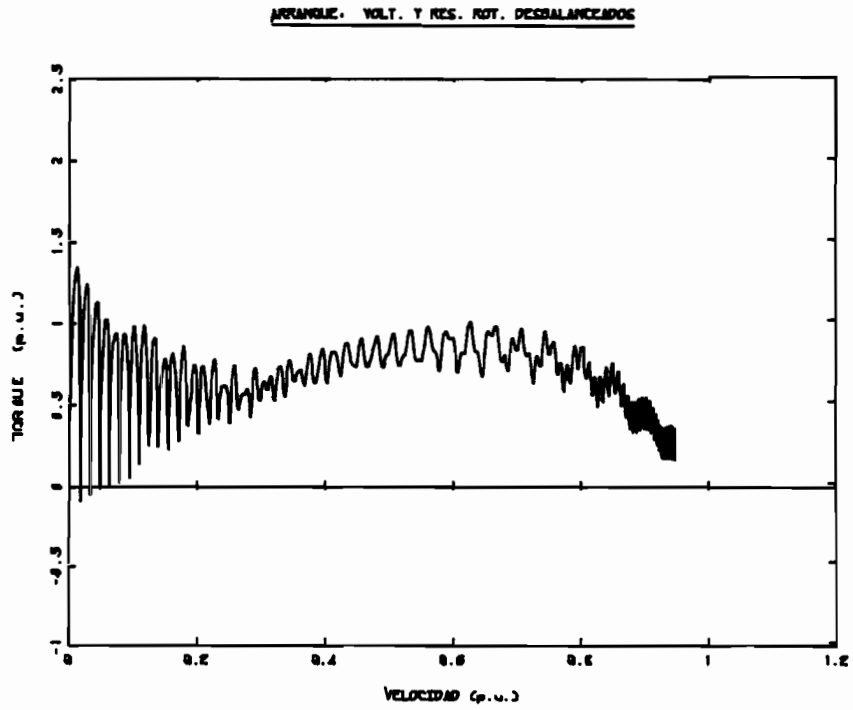


FIG. 5.5.14

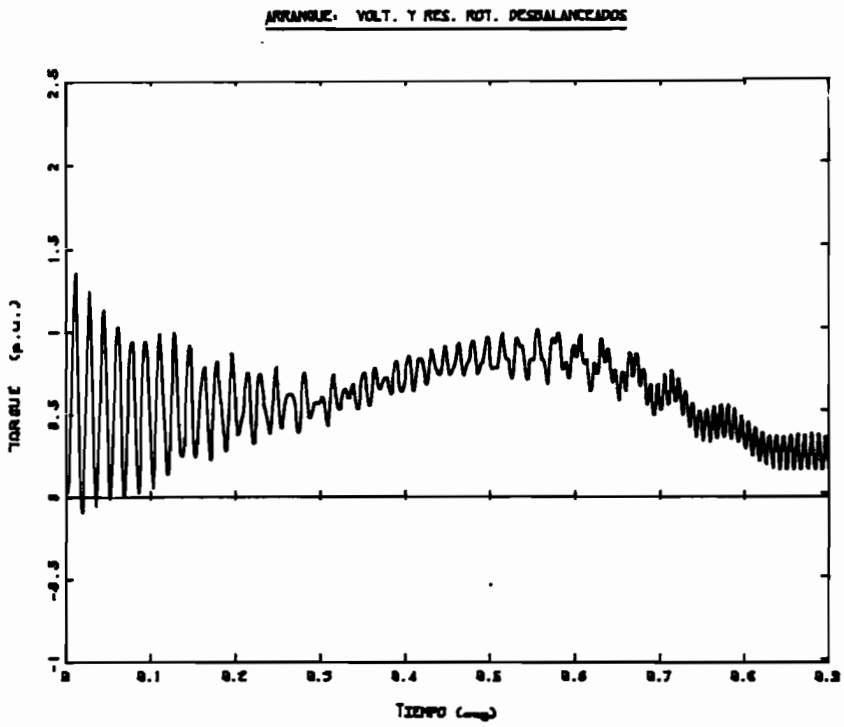


FIG. 5.5.15

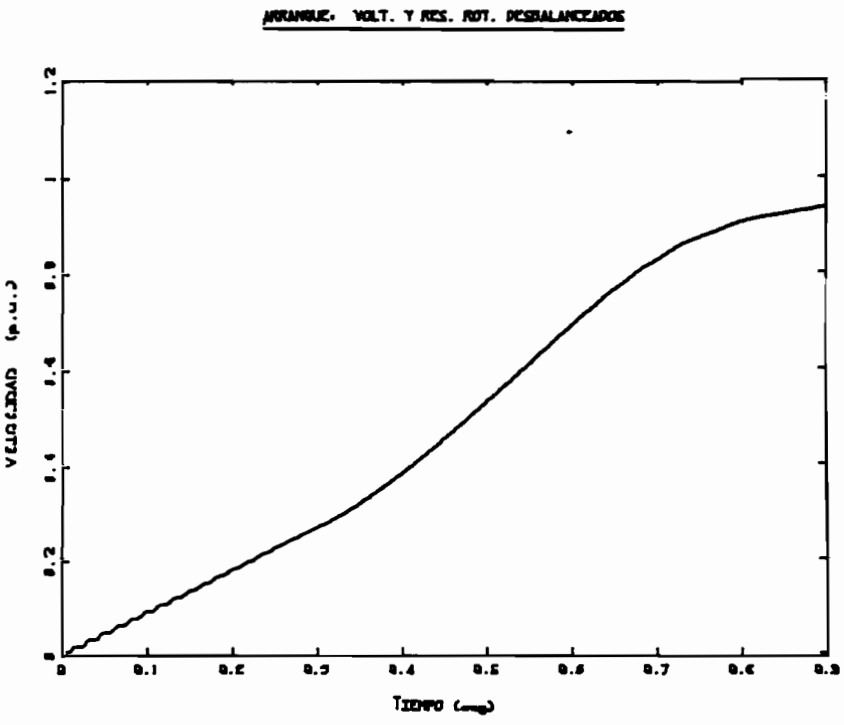
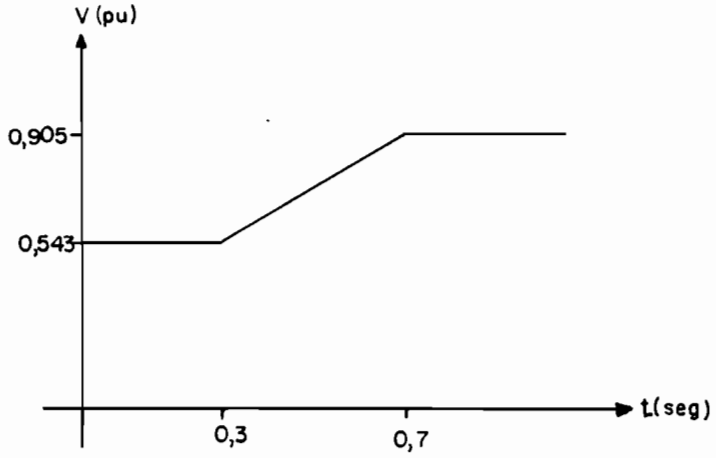


FIG. 5.5.16



el ángulo de conexión es 60° = 1.05 rad.

Las resistencias rotóricas son:

a: 1 Ω = 0.1379 p.u.

b: 0.5 Ω = 0.069 p.u.

c: 0.5 Ω = 0.069 p.u.

Tm = 0.147 p.u.

Los resultados se muestra a continuación:

En las Fig. 5.5.1 y 5.5.2 se encuentran el voltaje y la corriente de la línea "a". Se observa que el voltaje es correctamente simulado, de acuerdo a la Fotografía # 7. La corriente de línea máxima es 3.2 p.u. (18 A pico), mientras que en estado estable es 0.75 p.u. (4.3A pico). El tiempo de aceleración es de 0.85 seg. En la Fotografía # 7 se encontró los siguientes valores: Imax = 15 A pico, Iestable = 3.5 A pico y T_a = 0.8 seg., así puede verse que existe una buena aproximación en los resultados de la simulación. En este ejemplo también puede verse que las envolventes de voltaje y corriente no son exactamente iguales a los de la Fotografía # 7, debido a que el voltaje aplicado tiene pequeñas depresiones ocasionadas por la forma de conexión del circuito de fuerza de la Fig. 3.2. Puede notarse también, la existencia de picos de corriente sobre la envolvente promedio, ocasionados por las condiciones desbalanceadas, que en este caso son más críticos que en los dos anteriores.

En las Fig. 5.5.3 y 5.5.4 se hallan el voltaje y la corriente de la línea "b", y en las Fig. 5.5.5 y 5.5.6 para la línea "c". De estas figuras se puede decir que los voltajes si están bien simulados, y que las corrientes tienen similar comportamiento que en la línea "a", lógicamente teniendo diferentes magnitudes y fases. Así, en la línea "b" la corriente máxima es 3.9 p.u. (22.2 A pico) y en la línea "c" es 3.5 p.u. (20 A pico). Todas estas corrientes máximas de arranque son menores a la obtenida en el arranque balanceado, debido a que en el presente caso se arranca con voltaje reducido. En estado estable la corriente de la línea "b" es 1.1 p.u. (6.3 A pico) y en la línea "c" es 0.87 p.u. (5.0 A pico). Se puede decir que en estado estable es más fácil determinar el desbalance y que en general, las corrientes de estado estable en condiciones desbalanceadas aumentan con relación al caso balanceado. Las co

rrientes se estabilizan en un tiempo aproximado de 0.85 seg.

En las figuras 5.5.7 y 5.5.8 se tienen los gráficos del voltaje y de la corriente de la fase "a" del rotor, los dos tienen la misma forma y están invertidos, ya explicado en 5.1.4.

En la Fig. 5.5.9 y 5.5.10 se muestran las corrientes de las fases "b" y "c" del rotor, y puede decirse que estos, junto con las 2 anteriores, tienen una forma muy similar, que es común a todas las corrientes del rotor. Se observa que nuevamente los desbalances se presentan en forma de picos que sobresalen de la envolvente promedio. En la fase "c" se tiene un valor máximo de corriente de 1.8 p.u., o sea 28 A pico, que es un poco menor que el valor medido en la Fotografía # 9, que es 35 A pico, pero puede decirse que en su forma y mangitud son muy parecidos. El desbalance existente se refleja en estado estable en forma de oscilaciones sobre la componente fundamental, cuyo valor es para la fase "c" de 0.25 p.u., o sea de 3.9 A pico-pico, que es muy parecido al valor determinado de la Fotografía # 9 que es 4.5 A pico. Para las fase "a" y "b" los valores máximos son 1.6 p.u. (25 A pico) y 1.9 p.u. (29.7 A pico), en cambio las oscilaciones de estado estable son de un valor más o menos igual al de la fase "c"' Las corrientes del rotor también se puede decir que se estabilizan en 0.85 seg.

En el presente caso también se toma referencia rotórica, debido a que existen resistencias en el circuito del rotor. De esta manera, el comportamiento de las variables en ejes q y d para referencia rotórica se observa en las Fig. 5.5.11, 5.5.12 y 5.5.13, notándose que los desbalances se reflejan en estas variables.

Las Fig. 5.14, 5.15 y 5.16 corresponden a las variables mecánicas, de manera similar a los casos anteriores, estas variables presentan las siguientes características: el torque promedio de arranque está alrededor de 0.6 p.u., menor que en el arranque balanceado, pero mayor que en el caso de voltajes desbalanceados, ya que ahora existen resistencias rotóricas. El torque promedio máximo es 0.75 p.u., menor que en todos los casos, debido a que en este caso existe mayor desbalance que en cualquiera de los otros; ocurre con ω_r = 0.55 p.u. (s = 0.45). Las oscilaciones del torque, además, se mantienen durante la aceleración y permanecen en estado estable con un valor de 0.23 p.u., mayor al valor que se tenía para voltajes desbalanceados, ya que ahora el desbalance es mayor también. El valor promedio, en estado estable es de 0.147 p.u., o sea igual al torque de carga. La curva de velocidad es creciente y presente oscilaciones pequeñas en los primeros instantes, para luego amortiguarse, aunque no desaparecen, durante todo el período de aceleración. Se puede decir que la velocidad alcanza su valor permanente en un tiempo de 0.9 seg., un poco mayor al estimado para las corrientes.

Como puede verse, los resultados obtenidos son una combinación de los dos casos anteriores, y todos ellos concuerdan con la teoría; y aquellos que puedieran ser comparados con los resultados de los experimentos, han dado la validez de la modelación.

5.1.6 Falla Fase-Tierra

Todos los ejemplos en los cuales se producen fallas, tienen el siguiente proceso: se considera la máquina trabajando en estado estable, con un cierto deslizamiento dado; luego se escoge el tipo de falla y se pide al

programa que ésta se produzca en cierto tiempo dado, mediante el ingreso del ángulo al cual se produce la falla. El programa trabaja de la siguiente manera: primero considera más o menos 2 ciclos de estado estable antes de producir la falla. De esta manera, en los resultados se obtienen las señales antes y después de la falla, pudiendo compararse fácilmente los dos estados de funcionamiento.

Para el ejemplo de falla de una fase a tierra se tiene los siguientes datos:

$V_{aplicado}$: 208 V = 0.95 p.u. (voltajes balanceados)

Deslizamiento: 1,66%, s = 0.0166

Tm = 0.147 p.u.

ángulo de falla: -60° = -1.05 rad.

A continuación se presentan los resultados obtenidos:

```
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
ELECTRONICA Y CONTROL

OPERACION ASIMETRICA DE LA MAQUINA
      TRIFASICA DE INDUCCION              FECHA: 03-AUG-85 13:43:25
================================================================================

CASO SIMULADO:  FALLA  FASE-TIERRA

      ***   PARAMETROS DE LA MAQUINA   ***
                (valores en p.u.)
REACTANCIA DEL ESTATOR:                          X(1)= 0.1067
REACTANCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:        X(2)= 0.1067
REACTANCIA MUTUA:                                X(3)= 1.9242
RESISTENCIA DEL ESTATOR:                         R(1)= 0.0276
RESISTENCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:       R(2)= 0.0904
CONSTANTE DE INERCIA:                             H1= 0.2235
FRECUENCIA DE LA RED:                             F1= 60

        *  PARAMETROS DE LA CURVA DE SATURACION:  *
                     Dx  vs.  Fm (sat)
CONCATENACIONES DE FLUJO MUTUO CRITICO:           Y6= 0.95
PUNTO DE CORTE CON EL EJE VERTICAL:               S3= -5.43
PENDIENTE DE LA RECTA:                            S4= 5.72

      ***   INTERVALO DE SOLUCION   ***
                 (en ses.)
TIEMPO INICIAL:          T1= 0
TIEMPO FINAL:            T2= 0.2
PASO DE INTEGRACION:      H= 1.0E-3

Pasos  200  -  Tejec. 1400 ses.  -  Long. Arch. 44200 bytes

        *  ALIMENTACION TRIFASICA  *
VOLTAJES DE LINEA APLICADOS:
(SECUENCIA POSITIVA: V1,V2,V3)
                MODULO (p.u.)      ANGULO DE DESFASAJE (rad.)
      V1        V9(1)=0.95         Q6(1)=0
      V2        V9(2)=0.95         Q6(2)=-2.094395
      V3        V9(3)=0.95         Q6(3)=2.094395

        *  VOLTAJES DE LINEA BALANCEADOS  *

        *  CONEXION TIPO DELTA EN ESTATOR  *

      ***   SISTEMA DE EJES FIJO EN ESTATOR   ***

      ***   SISTEMA BALANCEADO   ***
```

CONTINUACION ...


```
  ***   CONDICIONES INICIALES DE ESTADO ESTABLE    ***
                *  SISTEMA BALANCEADO  *
 DESLIZAMIENTO:          S= 0.0166
 TIEMPO:                 T= 0
                          MAGNITUD              ANGULO
 CORRIENTE DE ESTATOR:   Is= 0.496576848697   A7=-1.2382791371
 CORRIENTE DE ROTOR:     Ir= 0.164399210904   A8=-3.1660307661
 CORRIENTES EN EJES q,d (s,r):
  0.16209          0.46938         -0.16435          -0.00402
 TORQUE MECANICO T8= : 0.147183728273

 *  FALLA FASE-TIERRA  *
 ANGULO DE FALLA:  A4= -1.05

 *  EC. DEL TORQUE (T8) EN FUNCION DE LA VELOC. (W6)  *
1090 T8=0.147


 NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS:  @FALLA/MONOFA
```

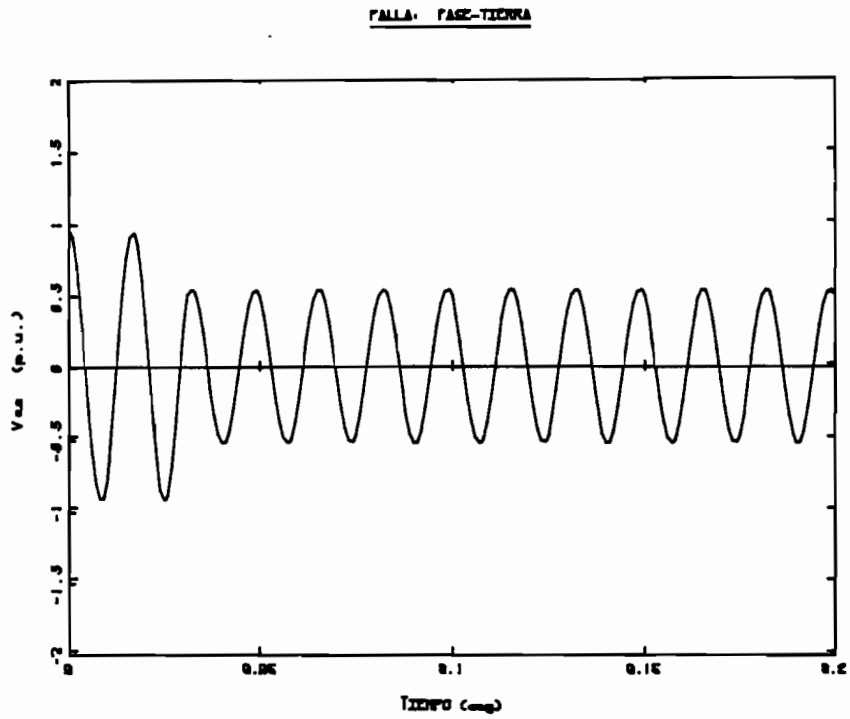


FIG. 5.6.1

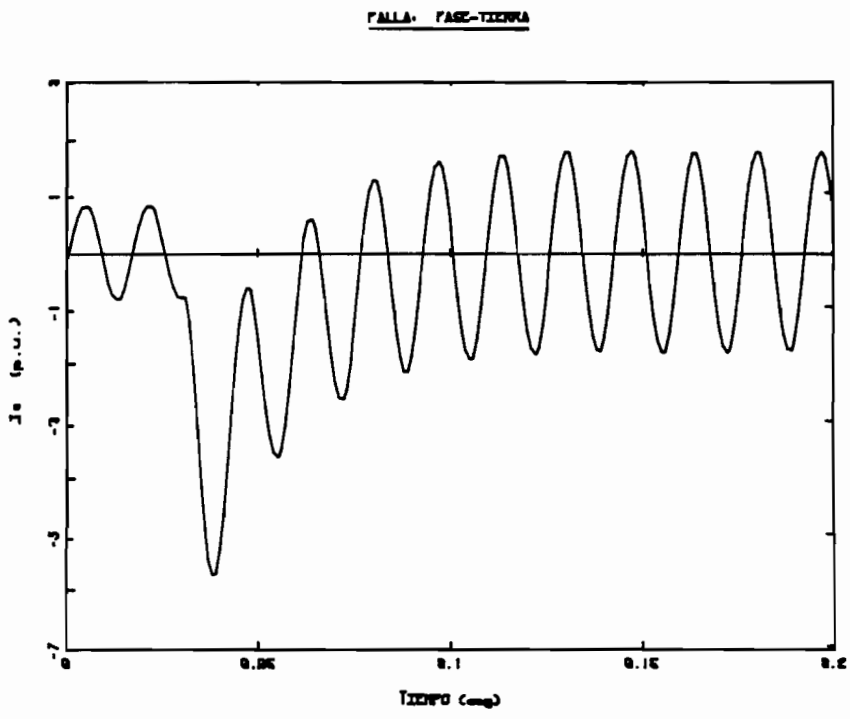


FIG. 5.6.2

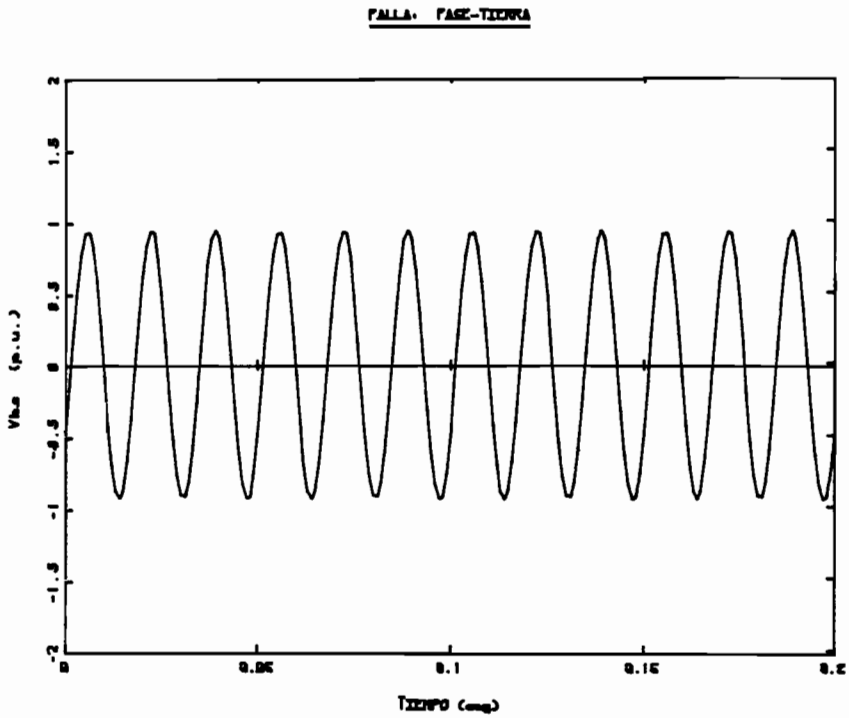


FIG. 5.6.3

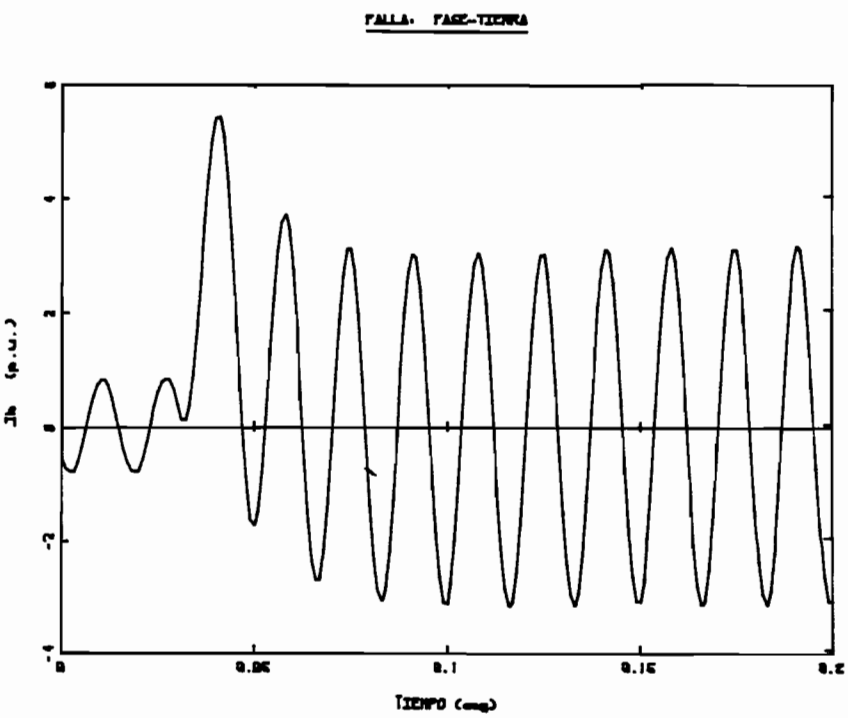


FIG. 5.6.4

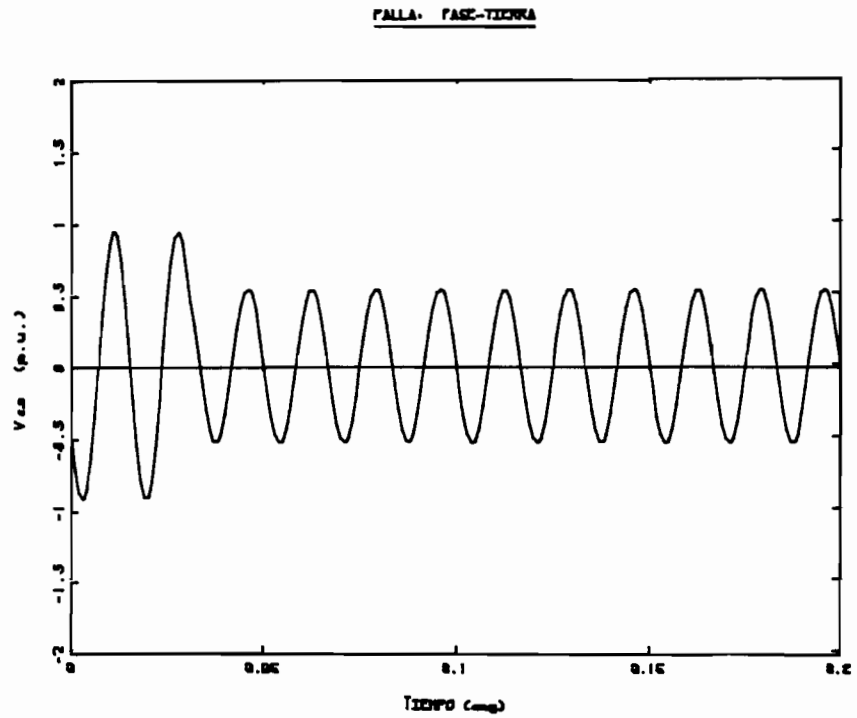


FIG. 5.6.5

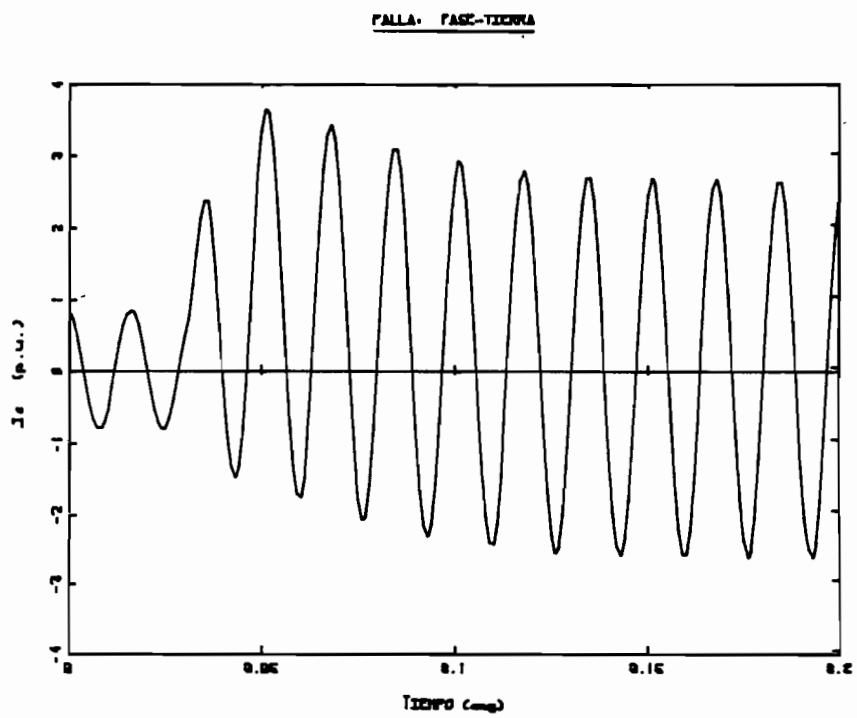


FIG. 5.6.6

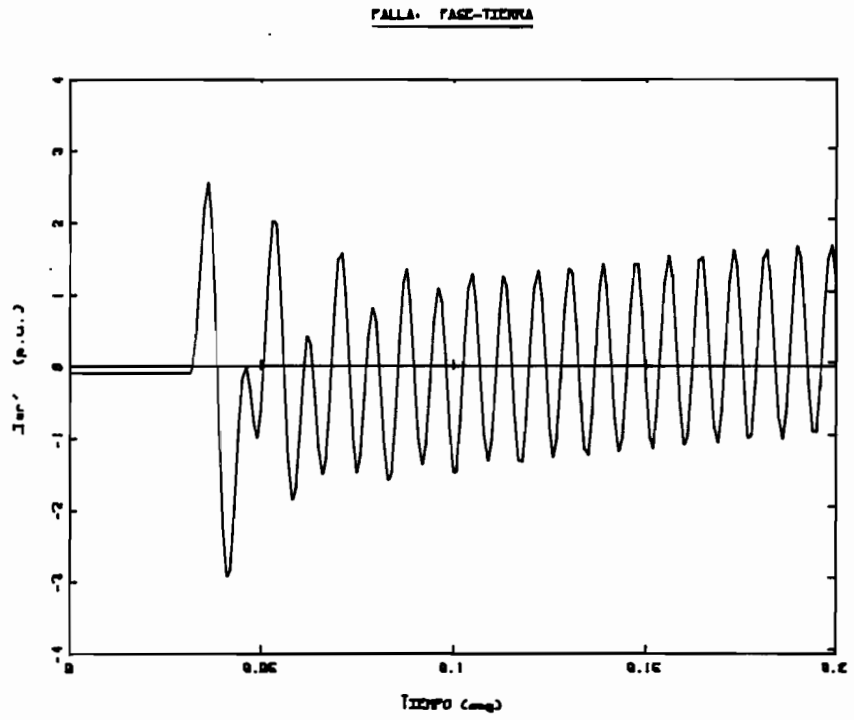


FIG. 5.6.7

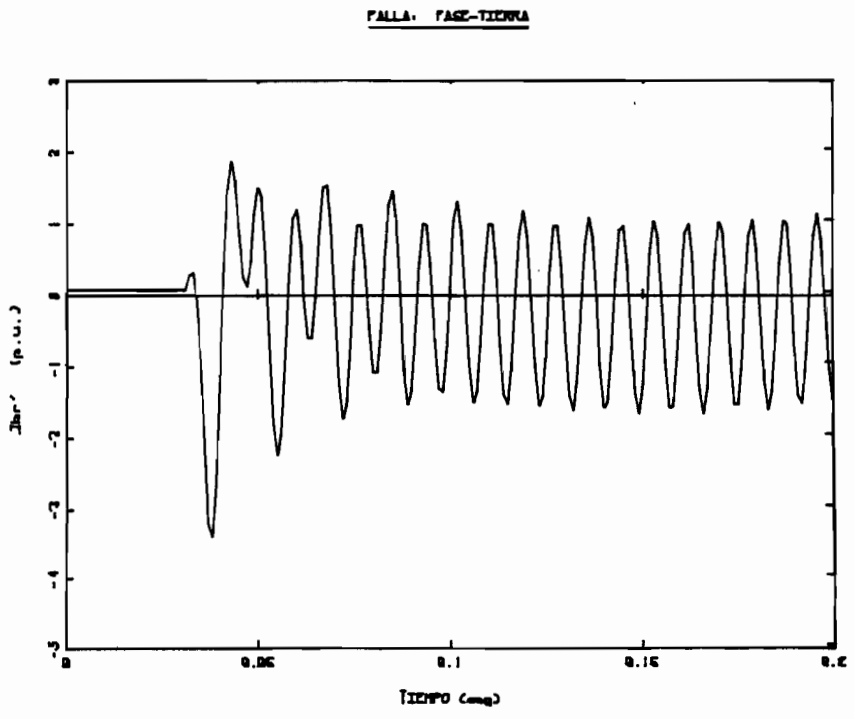


FIG. 5.6.8

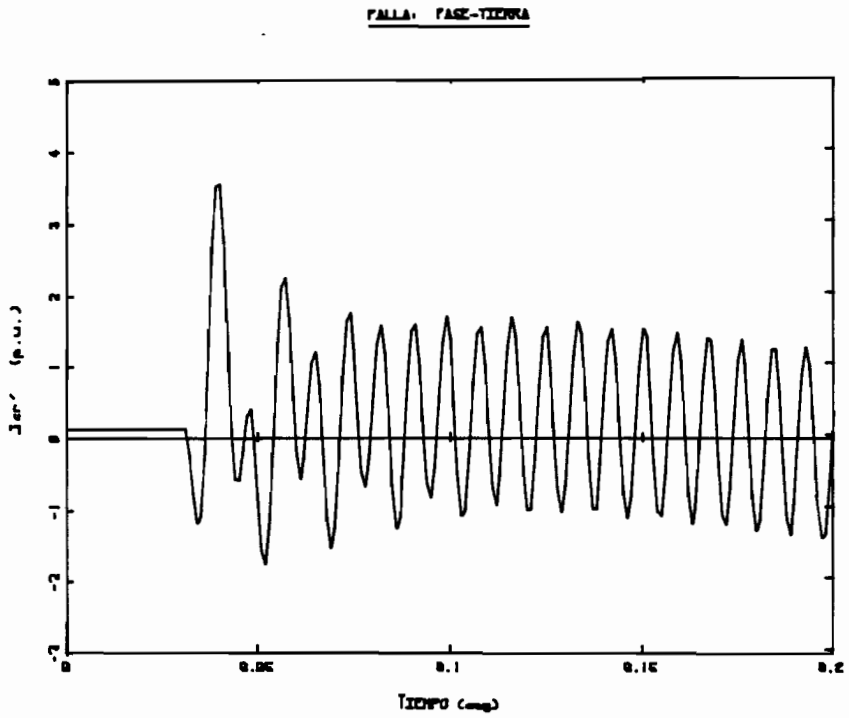


FIG. 5.6.9

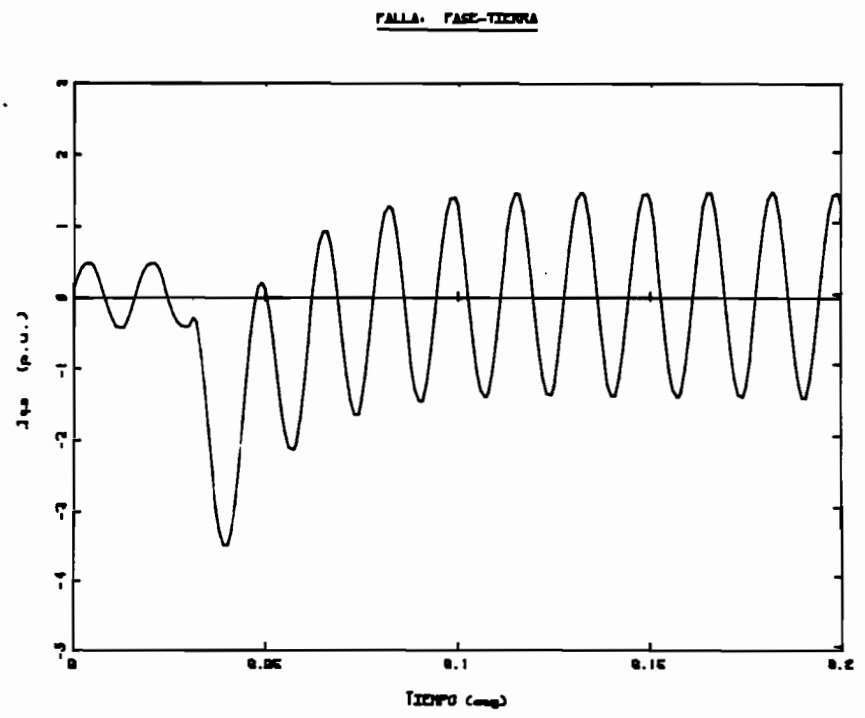


FIG. 5.6.10

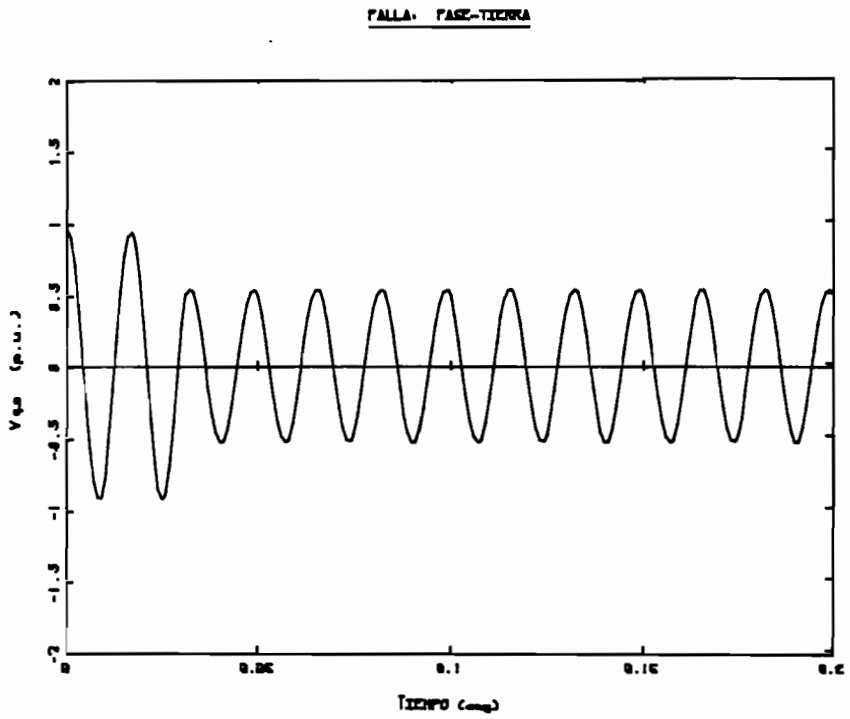


FIG. 5.6.11

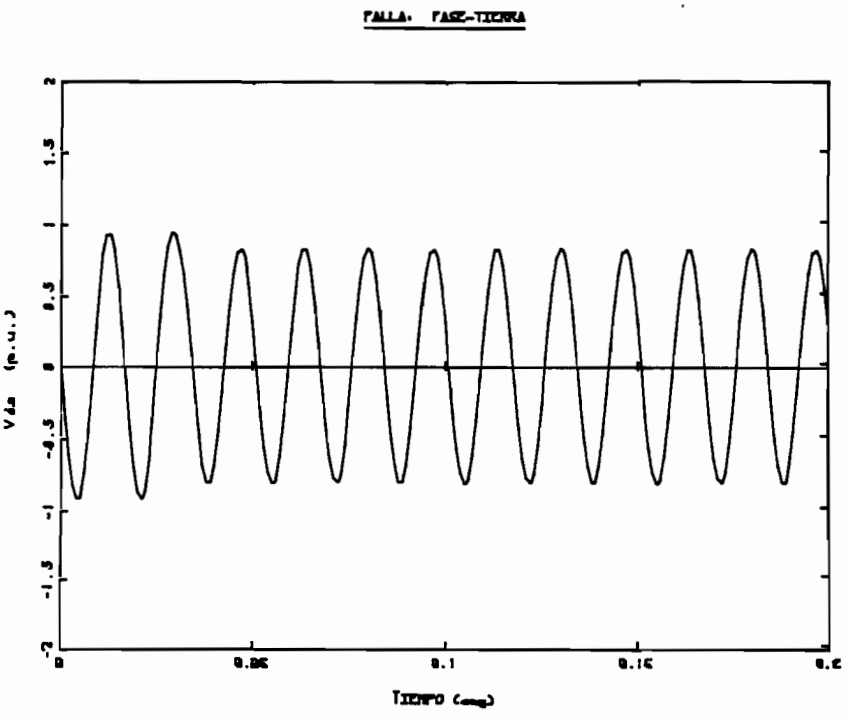


FIG. 5.6.12

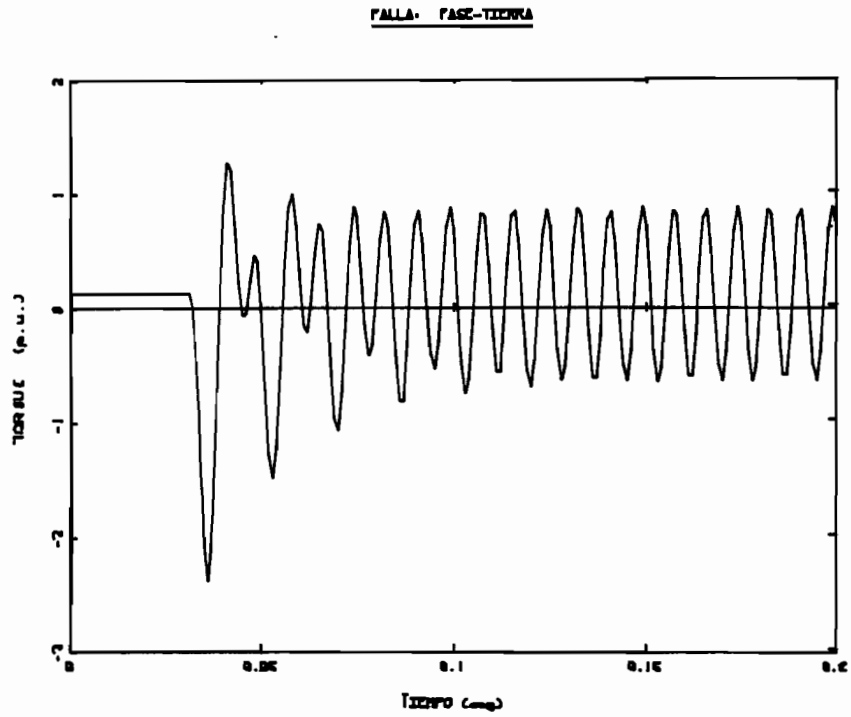


FIG. 5.6.13

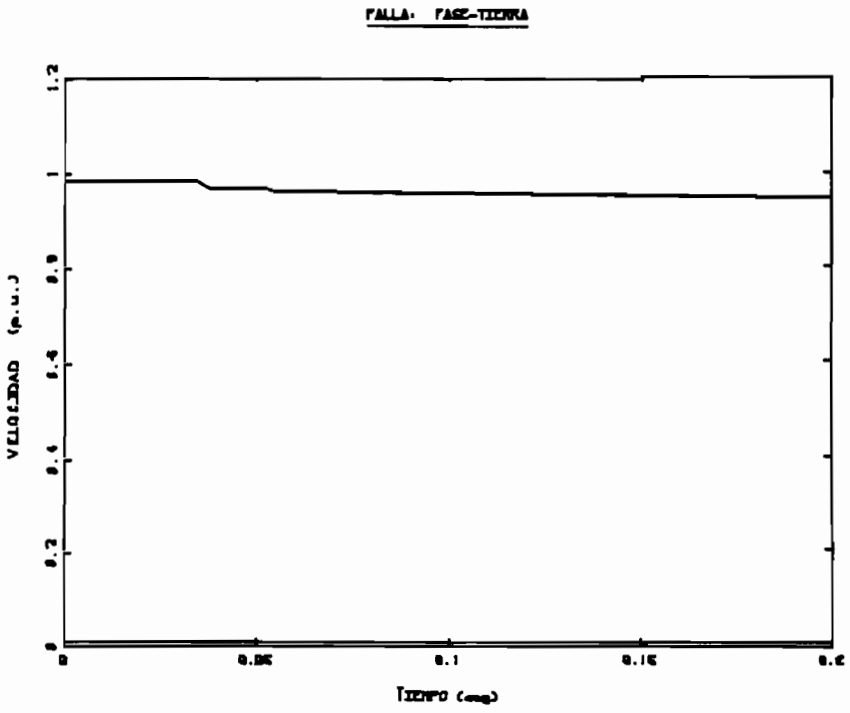


FIG. 5.6.14

En las Fig. 5.6.1 y 5.6.2 se encuentran los gráficos del voltaje y de la corriente de la línea "a". Se observa que el ángulo de falla es aproximadamente el mismo de la Fotografía # 10, luego del cual el voltaje decrece violentamente al 60% del valor de estado estable, por lo tanto puede decirse que el gráfico de la Fig. 5.6.1 si representa al voltaje apropiado V_{ab} (Fotografía # 10). La corriente de falla en la línea "a" tiene un valor máximo de 5.6 p.u., o sea 32 A pico, que es muy parecido al obtenido en la Fotografía # 10, de 30 A pico; luego de unos pocos ciclos, aproximadamente 4, la corriente se estabiliza en su valor permanente de falla que es 1.7 p.u., o sea 9.7 A pico, muy cercano a los 10 A pico, medidos en la Fotografía # 10. Comparando la figura 5.6.2 con la Fotografía # 10 puede decirse que son prácticamente los mismos, con la única diferencia que en el modelo existe un amortiguamiento más lento.

En las Fig. 5.6.3 y 5.6.4 se encuentran el voltaje y la corriente de la línea "b". El voltaje es de amplitud constante y no sufre ninguna alteración, esto es lo que se esperaba teóricamente. En cambio, la corriente si se ve afectada, llegando a un máximo de 5.5 p.u. (31 A pico) y en estado permanente a 3.2 p.u. (18 A pico); se estabiliza en unos 3 ciclos más o menos.

En las Fig. 5.6.5 y 5.6.6 se tienen los gráficos del voltaje y de la corriente de la línea "c", el valor máximo es 3.5 p.u.(20 A pico) y en estado permanente es 2.7 p.u. (15 A pico), además se estabiliza en unos 7 ciclos.

Como puede notarse, esta falla asimétrica se refleja en distinta forma en cada una de las líneas, tanto en estado transitorio como en estado

permanente. Las corrientes iniciales de falla son distintas ya que cada línea tiene distinto ángulo de falla, esto ocasiona que los tiempos de estabilización de las corrientes de falla también sean diferentes.

En las Fig. 5.6.7, 5.6.8 y 5.6.9 se hallan respectivamente las corrientes de las fases "a", "b" y "c" del rotor, y se puede decir que las tres presentan un comportamiento similar: en el período anterior a la falla sus valores parecen ser constantes, pero en realidad son sinusoides de frecuencia muy baja ya que el deslizamiento es 1,66%, y no es posible distinguirlo en ese pequeño período. Luego de la falla se presentan corrientes transitorias de diferente forma y valor en cada fase, llegando a 3 p.u. (47 A pico) en la fase "a" y a 3.5 p.u. (55 A pico) en las fases "b" y "c". Por último, luego de algunos ciclos se alcanza el valor permanente de falla, y está compuesta de una señal oscilatoria, de frecuencia igual a dos veces la de la red, que se superpone a la componente fundamental del rotor en cada fase. El valor de estas oscilaciones es alrededor de 2.5 p.u. (39 A pico) para las tres fases.

Este ejemplo fue realizado con referencia estatórica, y en las Figuras 5.6.10, 5.6.11 y 5.6.12 se hallan las variables de ejes q y d, notándose que en estos ejes también se reflejan los desbalances existentes, pero hay que destacar que la frecuencia de todas estas variables es la de la red.

En las Fig. 5.6.13 y 5.6.14 se encuentran los gráficos del torque y la velocidad, respectivamente. Puede verse que el torque tiene un valor constante en estado estable, y en el instante de falla sufre una violenta variación, llegando a valer -2.4 p.u., para luego de pocos ciclos es

tabilizarse en un valor oscilante, de amplitud 1.5 p.u., sobre el valor del torque de carga, razón por la cual la máquina continua girando. Como puede verse en la Fig. 5.6.14, la máquina se frena en el momento de la falla, por causa del torque negativo producido; luego la máquina continua frenándose, hasta llegar a un valor de 0.97 p.u. en t = 0.2 seg. , que equivale a 1746 r.p.m., pero se observa que todavía está disminuyendo la velocidad, y seguramente se estabilizará en un valor cercano al medido en el laboratorio, 1730 r.p.m. Además, en el laboratorio se notó oscilación en la velocidad, pero ahora puede explicarse por qué el torque es oscilante.

5.1.7 Falla de Dos Fases-Tierra

Para este ejemplo se tiene los siguientes datos:

V aplicado: 208 V = 0.95 p.u. (voltajes balanceados).

Deslizamiento: 1.66% , s = 0.0166

Tm = 0.147 p.u.

Angulo de falla: 120° = 2.095 rad.

Los resultados se presentan a continuación:

```
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
ELECTRONICA Y CONTROL

OPERACION ASIMETRICA DE LA MAQUINA
      TRIFASICA DE INDUCCION              FECHA: 03-AUG-85 13:45:01
================================================================================

CASO SIMULADO:  FALLA  2 FASES-TIERRA

      ***   PARAMETROS DE LA MAQUINA   ***
                (valores en p.u.)
REACTANCIA DEL ESTATOR:                          X(1)= 0.1067
REACTANCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:        X(2)= 0.1067
REACTANCIA MUTUA:                                X(3)= 1.9242
RESISTENCIA DEL ESTATOR:                         R(1)= 0.0276
RESISTENCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:       R(2)= 0.0904
CONSTANTE DE INERCIA:                             H1= 0.2235
FRECUENCIA DE LA RED:                             F1= 60

        *  PARAMETROS DE LA CURVA DE SATURACION:  *
                    Dx  vs.  Fm (sat)
CONCATENACIONES DE FLUJO MUTUO CRITICO:           Y6= 0.95
PUNTO DE CORTE CON EL EJE VERTICAL:               S3= -5.43
PENDIENTE DE LA RECTA:                            S4= 5.72

      ***   INTERVALO DE SOLUCION   ***
                (en ses.)
TIEMPO INICIAL:          T1= 0
TIEMPO FINAL:            T2= 0.2
PASO DE INTEGRACION:      H= 1.0E-3

Pasos  200  -  Tejec. 1400 ses.  -  Long. Arch. 44200 bytes

        *  ALIMENTACION TRIFASICA  *
VOLTAJES DE LINEA APLICADOS:
(SECUENCIA POSITIVA: V1,V2,V3)
                MODULO (p.u.)      ANGULO DE DESFASAJE (rad.)
      V1        V9(1)=0.95         Q6(1)=0
      V2        V9(2)=0.95         Q6(2)=-2.094395
      V3        V9(3)=0.95         Q6(3)=2.094395

        *  VOLTAJES DE LINEA BALANCEADOS  *

        *  CONEXION TIPO DELTA EN ESTATOR  *

      ***   SISTEMA DE EJES FIJO EN ESTATOR   ***


      ***   SISTEMA BALANCEADO   ***
```

```
'CONTINUACION ...
```



```
  ***   CONDICIONES INICIALES DE ESTADO ESTABLE   ***
                *  SISTEMA BALANCEADO  *
 DESLIZAMIENTO:          S= 0.0166
 TIEMPO:                 T= 0
                          MAGNITUD          .    ANGULO
 CORRIENTE DE ESTATOR:   Is= 0.496576848697   A7=-1.23827913713
 CORRIENTE DE ROTOR:     Ir= 0.164399210904   A8=-3.16603076:15
 CORRIENTES EN EJES q,d (s,r):
  0.16209          0.46938         -0.16435          -0.00402
 TORQUE MECANICO T8= : 0.147183728273

 *  FALLA 2 FASES-TIERRA  *
 ANGULO DE FALLA:  A4= 2.095

 *  EC. DEL TORQUE (T8) EN FUNCION DE LA VELOC. (W6)  *
1090 T8=0.147


 NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS:  @FALLA/BIFASI
```

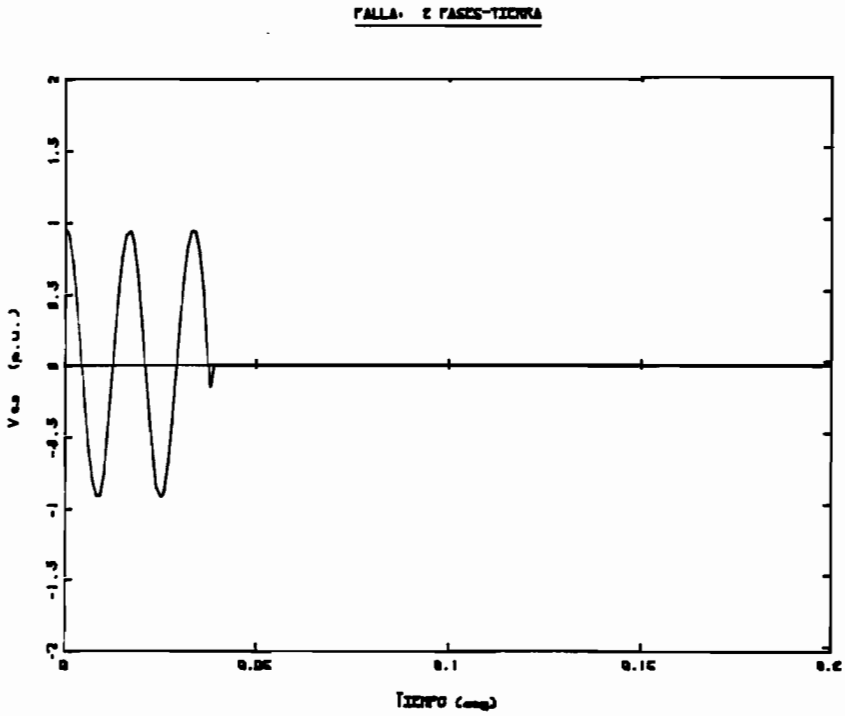


FIG. 5.7.1

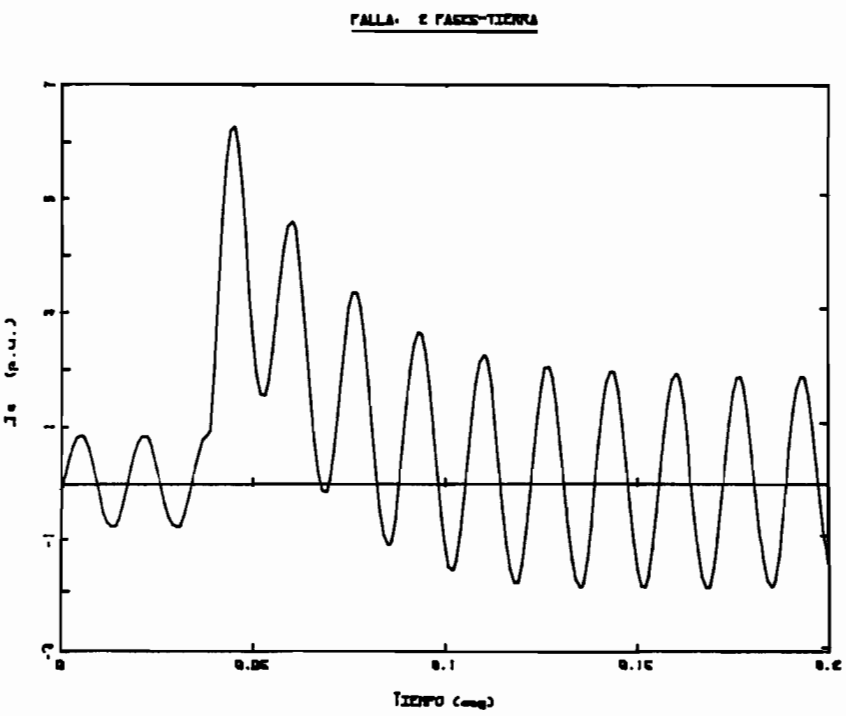


FIG. 5.7.2

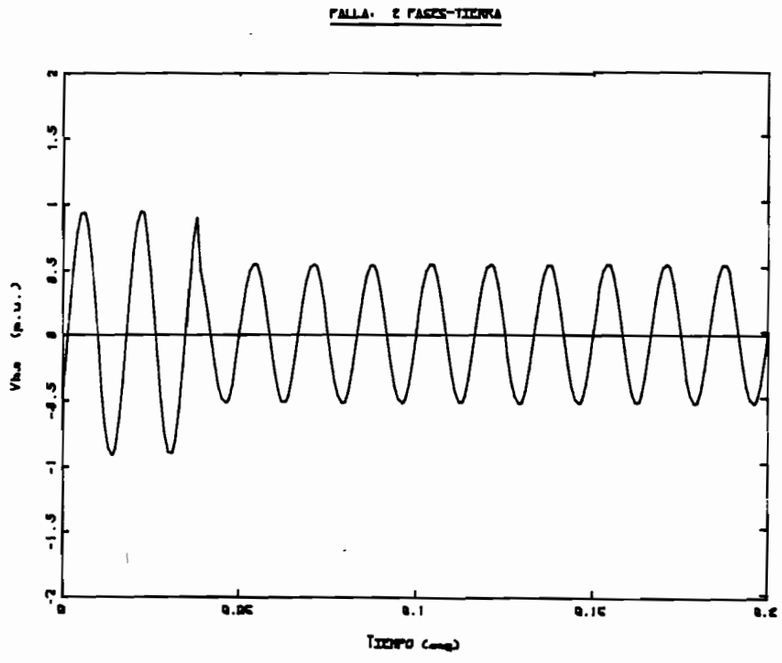


FIG. 5.7.3

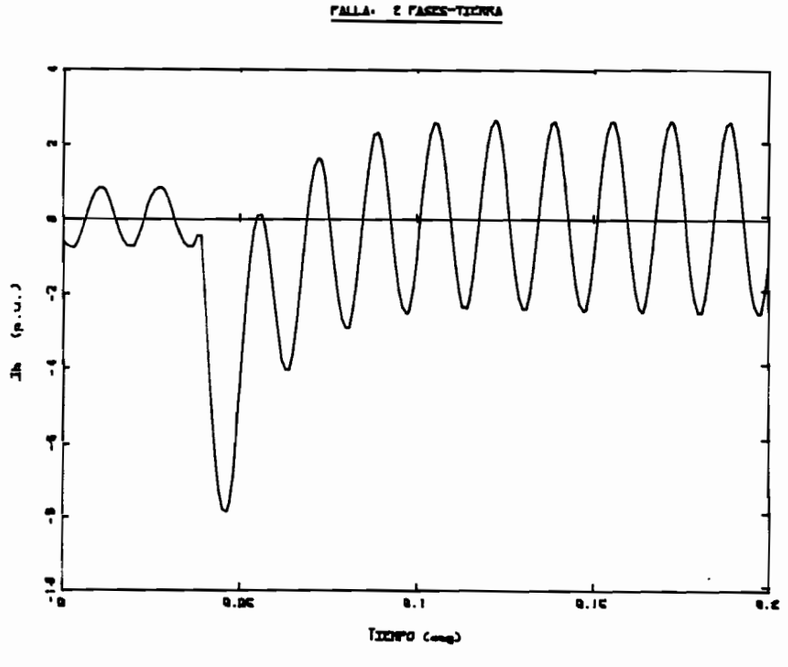
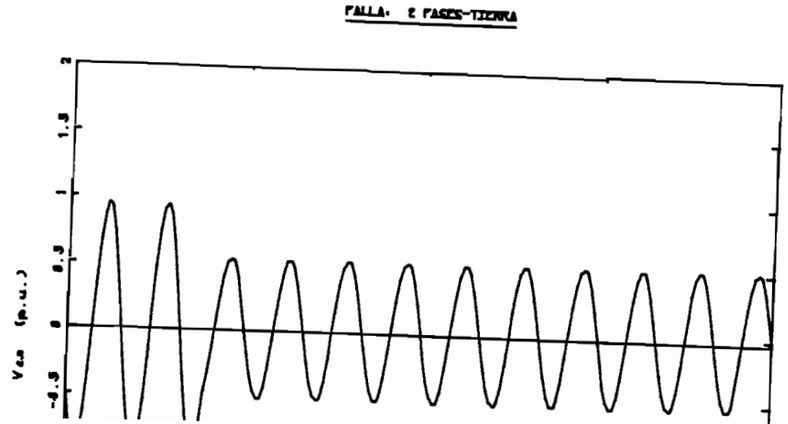


FIG. 5.7.4



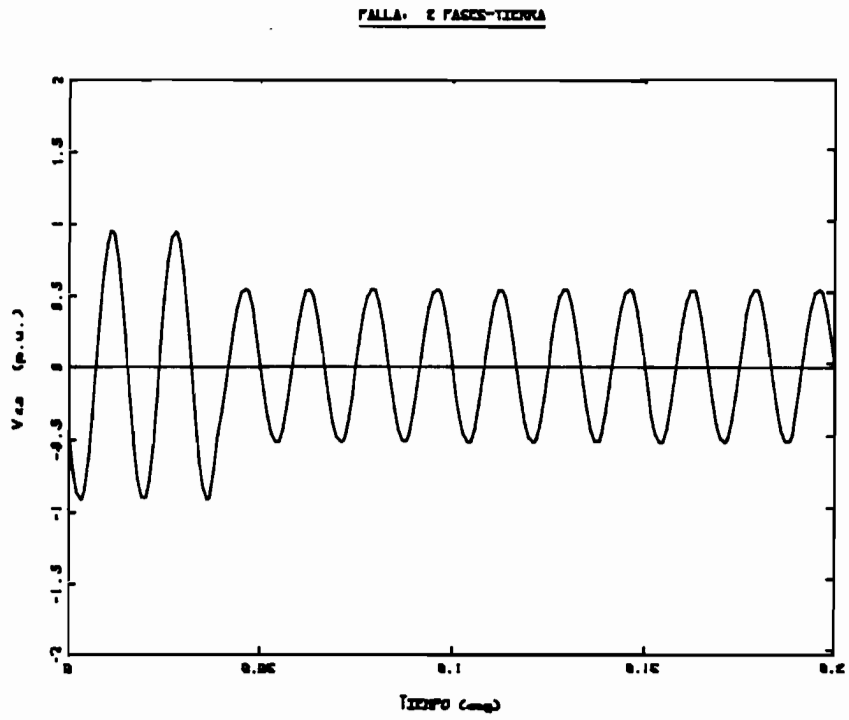


FIG. 5.7.5

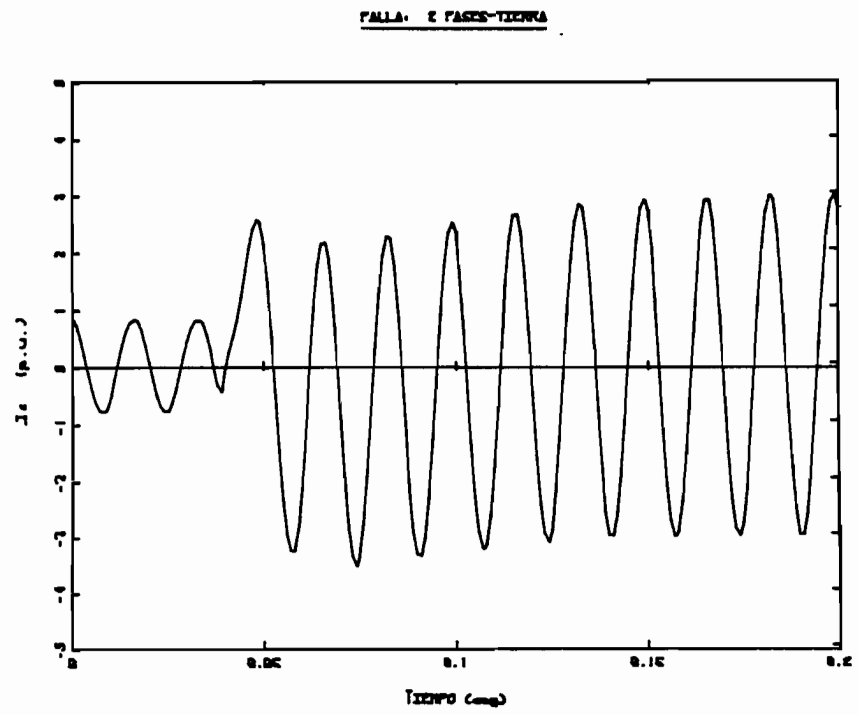


FIG. 5.7.6

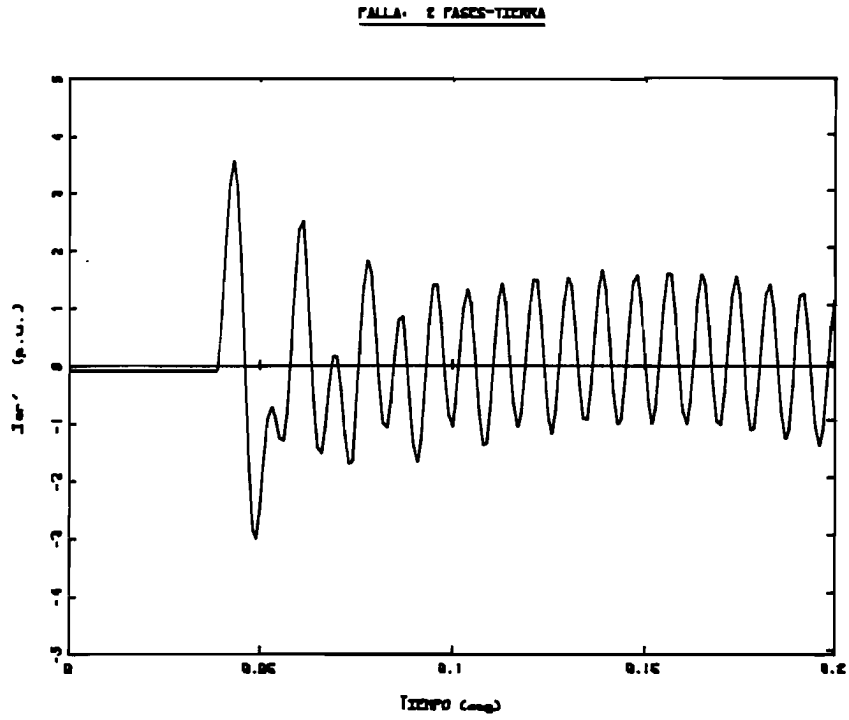


FIG. 5.7.7

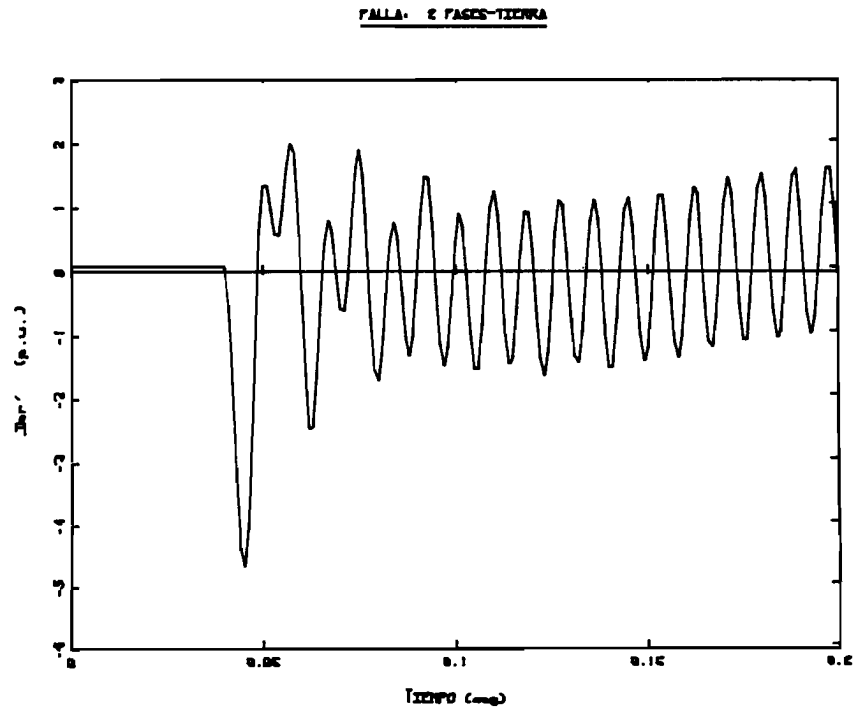


FIG. 5.7.8

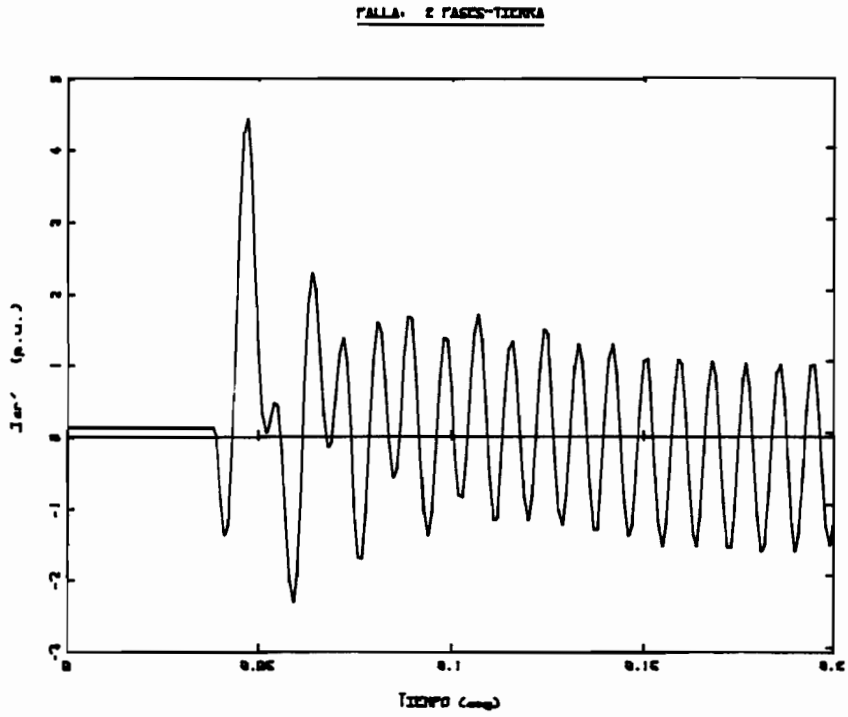


FIG. 5.7.9

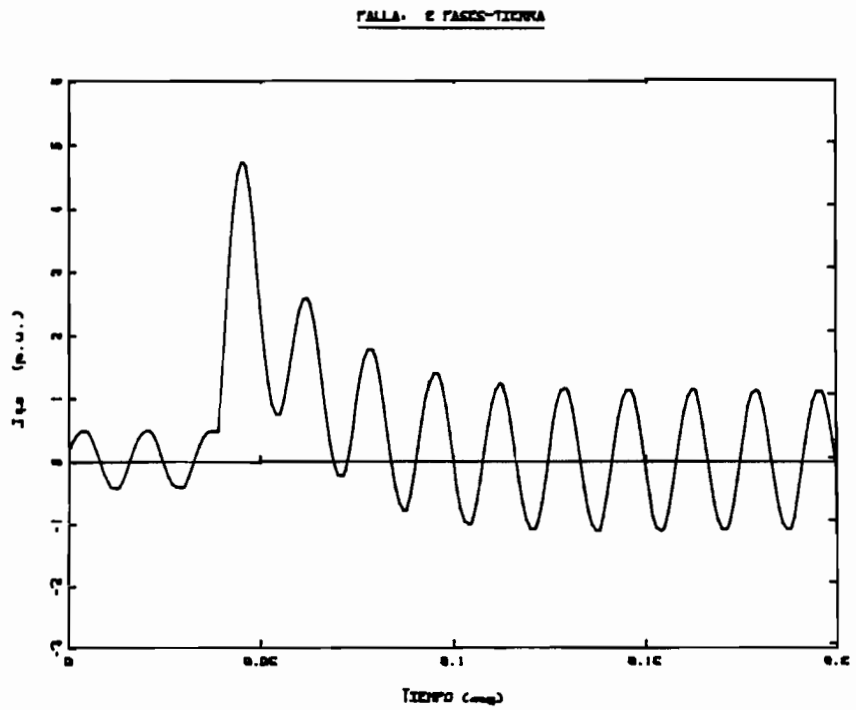


FIG. 5.7.10

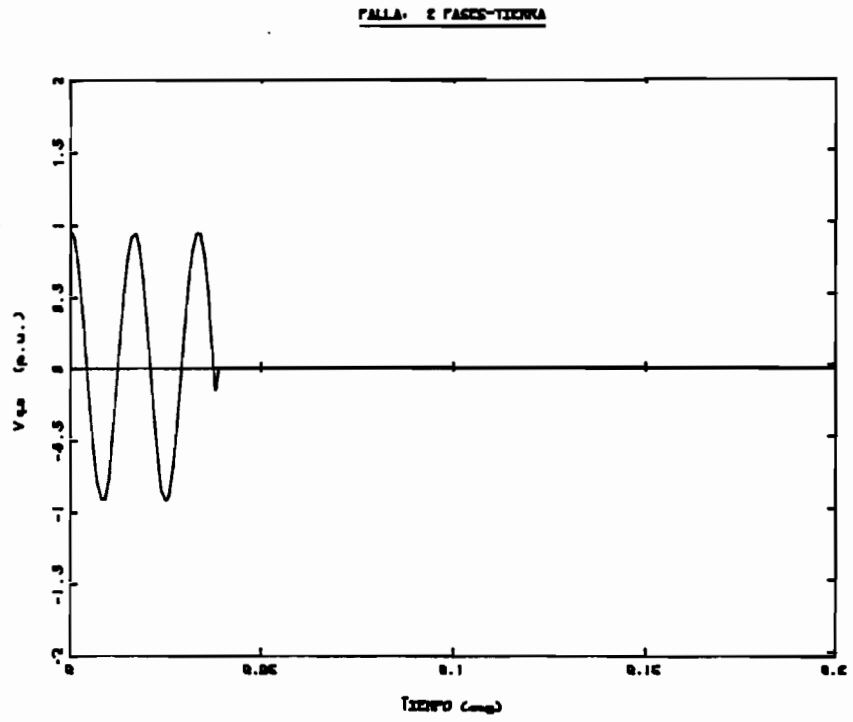


FIG. 5.7.11

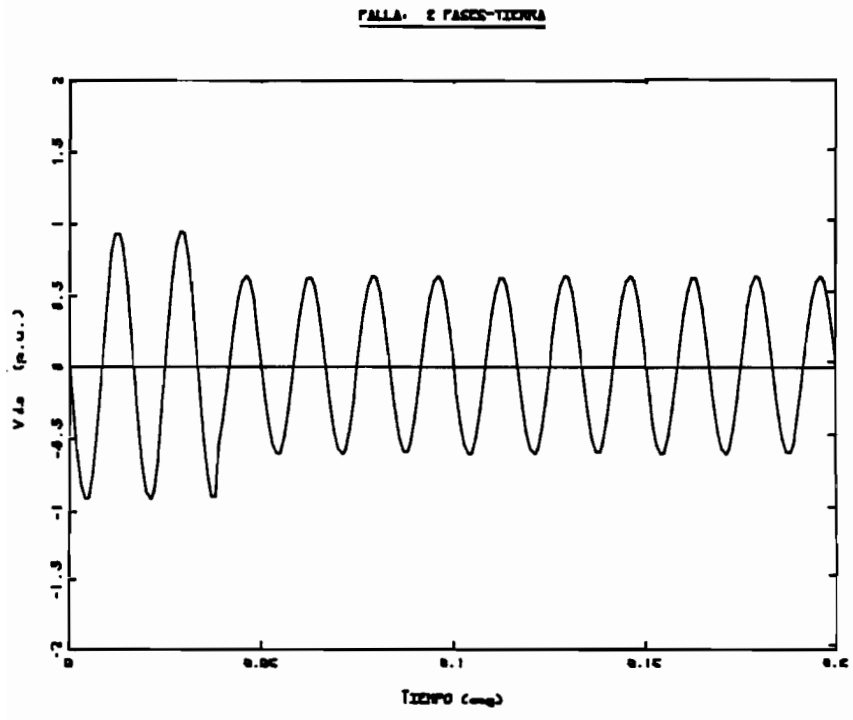


FIG. 5.7.12

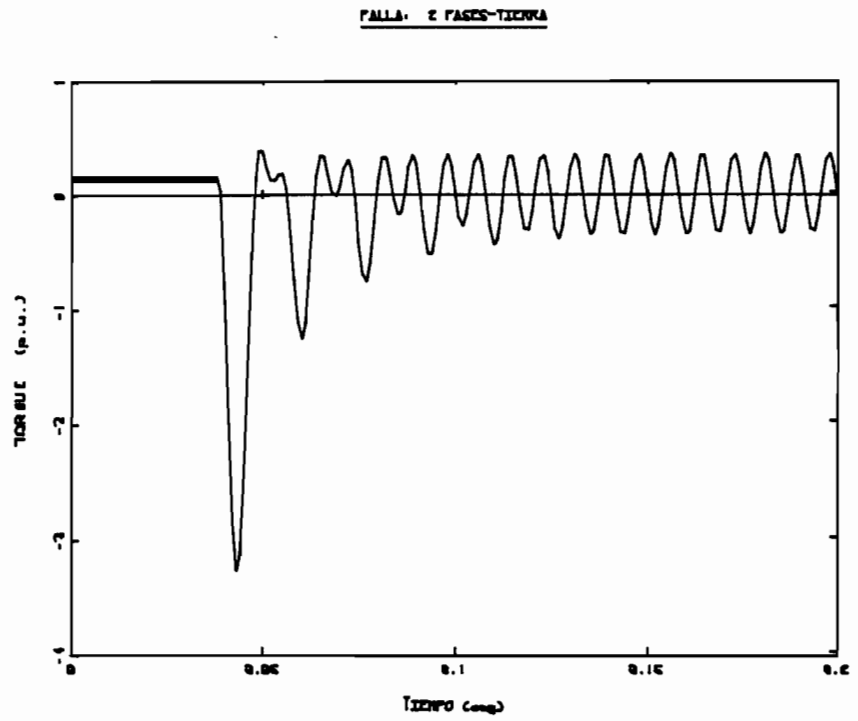


FIG. 5.7.13

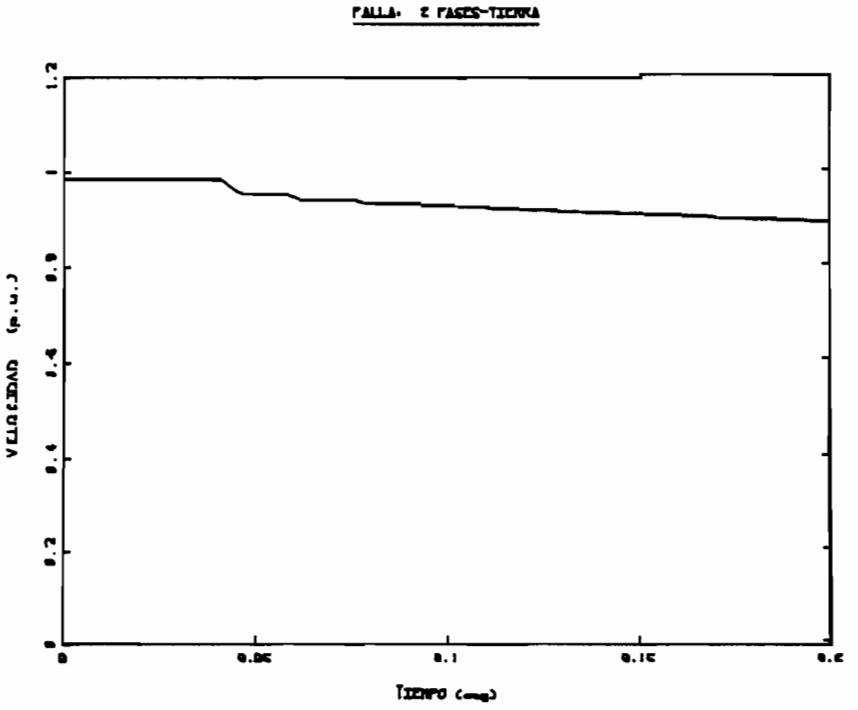


FIG. 5.7.14

En las Fig. 5.7.1 y 5.7.2 se hallan el voltaje y la corriente de la línea "a", que como pueden observarse y compararse con la Fotografía # 11, se concluye que son muy parecidas, tanto en forma como en magnitud. Así, el voltaje tiene un mismo ángulo de falla, luego de lo cual debe ser cero. La corriente alcanza un valor máximo de 6.3 p.u., o sea 36 A pico; en la Fotografía # 11 se midió 34 A pico. En estado permanente la corriente vale 1.8 p.u. (10.3 A pico), en la Fotografía se midió 11 A pico; además se estabiliza en unos 4 ciclos aproximadamente. Se nota que, en general, todos los valores son casi iguales.

En las Fig. 5.7.3 y 5.7.4 se encuentran los gráficos de voltaje y corriente de la línea "b", y en las Fig. 5.7.5 y 5.7.6 loas correspondientes a la línea "c". Los voltajes V_{bc} y V_{ca} disminuyen al 60% del valor de estado estable, lo que concuerda con la teoría. La corriente de la línea "b" llega a 8 p.u. (45.6 A pico) y en estado permanente es de 2.6 p.u. (15 A pico). En la línea "c" la corriente máxima es 3.5 p.u. (20 A pico) y en estado permanente vale 3 p.u. (17 A pico). Estas dos corrientes también se estabilizan en pocos ciclos: 4 para la primera y 7 para la segunda. Puede notarse, nuevamente, que esta falla asimétrica se refleja en diferente forma en las 3 fases en las 3 líneas.

La Fig. 5.7.7, 5.7.8 y 5.7.9 corresponde a las corrientes de las fases "a", "b" y "c" del rotor. Las formas de estas corrientes ya fueron descritas en el caso anterior, restando determinar los valores máximos; así, en la fase "b" es de 3.6 p.u. (56 A pico), en la "b" es 4.6 p.u. (72 A pico) y en la "c" es 4.4 p.u. (69 A pico). En estado permanente estas corrientes presentan oscilación sobre la componente fundamental de doble frecuencia que la red, y sus valores son: 1.5 p.u. (23 A pico), 1.3 p.u.

(20 A pico) y 1.2 p.u. (18.7 A pico), para las fases "a", "b" y "c" respectivamente.

Este ejemplo también fue simulado tomando referencia estatórica. En las Fig. 5.7.10, 5.711 y 5.7.12 puede observarse algunas de las variables de ejes q y d, notándose igualmente que los desbalances se reflejan en estos ejes, pero la frecuencia de estas componentes es la misma de la red.

En las Fig. 5.7.13 y 5.7.14 se encuentran torque y velocidad. Se observa que al producirse la falla, se desarrolla un torque negativo de amplitud igual a 3.3 p.u., ocasionando una disminución de la velocidad. Luego el torque es oscilante con amplitud de 0.7 p.u. y un valor promedio de cero, razón por la que la máquina tiene una desaceleración permanente. Para t = 0.2 la velocidad llega a 0.94 p.u o sea 1700 r.p.m. aproximadamente.

Puede concluirse, de los resultados obtenidos anterioremente, que la falla de 2 Fases-Tierra es mucho más drástica que la de 1 Fase-Tierra.

Para demostrar totalmente el modelo, se ha realizado un ejemplo demostrativo de una falla de 2 Fases-Tierra para la conexión estrella en el estator. De esta manera, los datos son los siguientes:

V aplicado: 220 V - 1 p.u. (voltajes balanceados)
Deslizamiento: 1,66% = 0.0166
Tm = 0.163 p.u.
Angulo de Falla = 0° = 0 rad.

Los resultados se presentan a continuación:

```
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
ELECTRONICA Y CONTROL

OPERACION ASIMETRICA DE LA MAQUINA
      TRIFASICA DE INDUCCION              FECHA: 03-AUG-95 13:47:48
================================================================================

CASO SIMULADO:  FALLA  2 FASES-TIERRA  (ESTRELLA)

      ***   PARAMETROS DE LA MAQUINA   ***
              (valores en p.u.)
REACTANCIA DEL ESTATOR:                          X(1)= 0.1067
REACTANCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:        X(2)= 0.1067
REACTANCIA MUTUA:                                X(3)= 1.9242
RESISTENCIA DEL ESTATOR:                         R(1)= 0.0276
RESISTENCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:       R(2)= 0.0904
CONSTANTE DE INERCIA:                             H1= 0.2235
FRECUENCIA DE LA RED:                             F1= 60

       *  PARAMETROS DE LA CURVA DE SATURACION:  *
                  Dx  vs.  Fm (wb)
CONCATENACIONES DE FLUJO MUTUO CRITICO:           Y6= 0.95
PUNTO DE CORTE CON EL EJE VERTICAL:               S3= -5.43
PENDIENTE DE LA RECTA:                            S4= 5.72

      ***   INTERVALO DE SOLUCION   ***
                (en seg.)
TIEMPO INICIAL:          T1= 0
TIEMPO FINAL:            T2= 0.2
PASO DE INTEGRACION:      H= 1.0E-3

Pasos  200  -  Tejec. 1400 seg.  -  Long. Arch. 44200 bytes

       *  ALIMENTACION TRIFASICA  *
VOLTAJES DE LINEA APLICADOS:
(SECUENCIA POSITIVA: V1,V2,V3)
                MODULO (p.u.)      ANGULO DE DESFASAJE (rad.)
      V1        V9(1)=1            Q6(1)=0
      V2        V9(2)=1            Q6(2)=-2.094395
      V3        V9(3)=1            Q6(3)=2.094395

       *  VOLTAJES DE LINEA BALANCEADOS  *

       *  CONEXION TIPO ESTRELLA EN ESTATOR  *

      ***   SISTEMA DE EJES FIJO EN ROTOR   ***


      ***   SISTEMA BALANCEADO   ***
```

```
 ***   CONDICIONES INICIALES DE ESTADO ESTABLE    ***
              *  SISTEMA BALANCEADO  *
DESLIZAMIENTO:          S= 0.0166
TIEMPO:                 T= 0
                         MAGNITUD              ANGULO
CORRIENTE DE ESTATOR:   Is= 0.522712472313   A7=-1.2382791371
CORRIENTE DE ROTOR:     Ir= 0.173051800951   A8=-3.1660307661
CORRIENTES EN EJES q,d (s,r):
 0.17063          0.49408         -0.17300         -0.00423
TORQUE MECANICO T8= : 0.1030844634 61

*  FALLA 2 FASES-TIERRA  *
ANGULO DE FALLA:  A4= 0

*  EC. DEL TORQUE (T8) EN FUNCION DE LA VELOC. (W6)  *
1090 T8=0.163


NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS:  @FALLA/ESTR/DOSFT
```

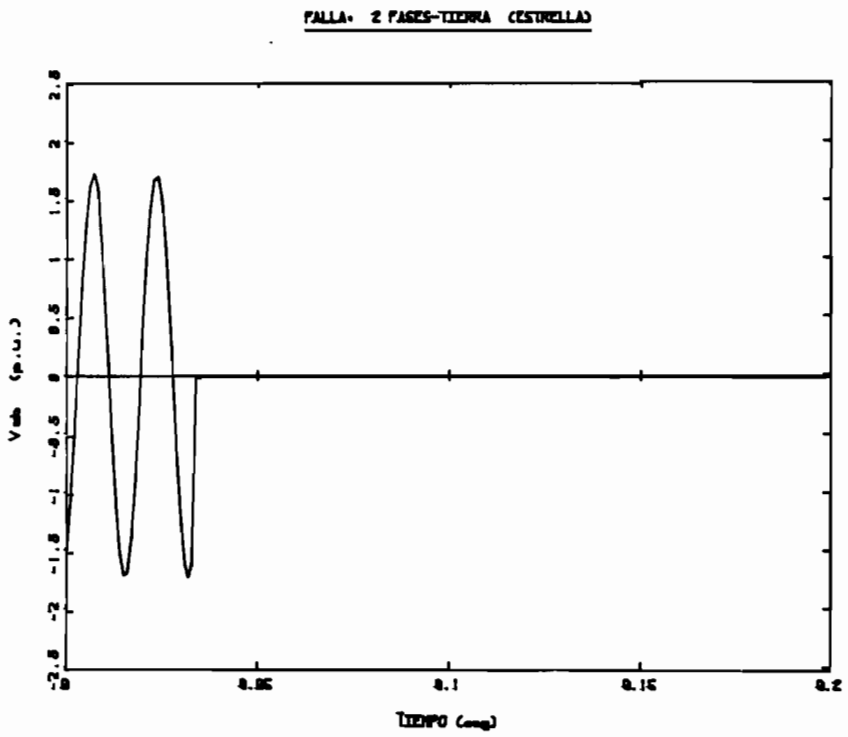


FIG. 5.7.15

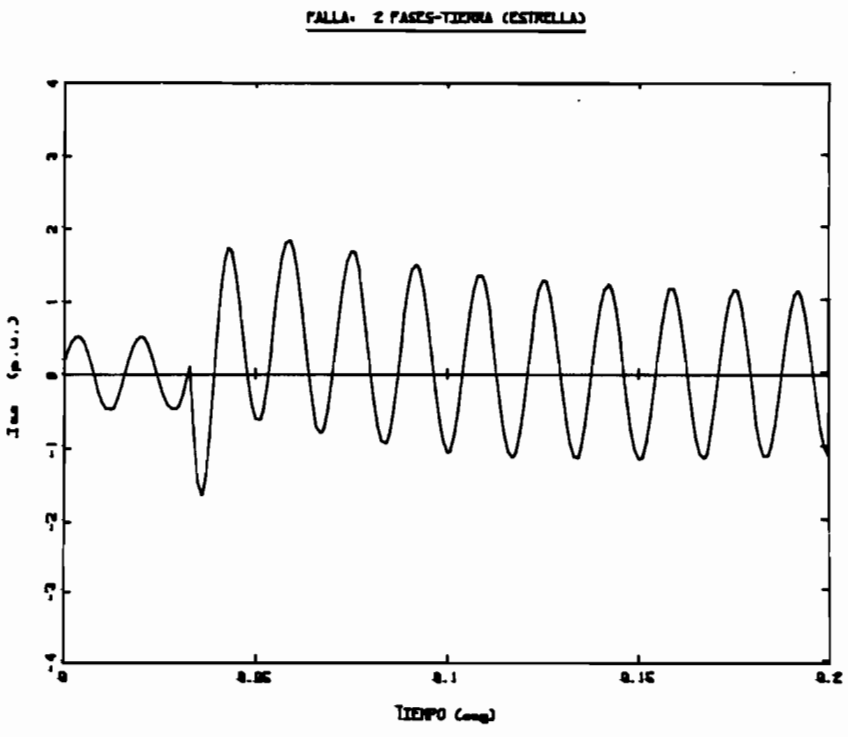


FIG. 5.7.16

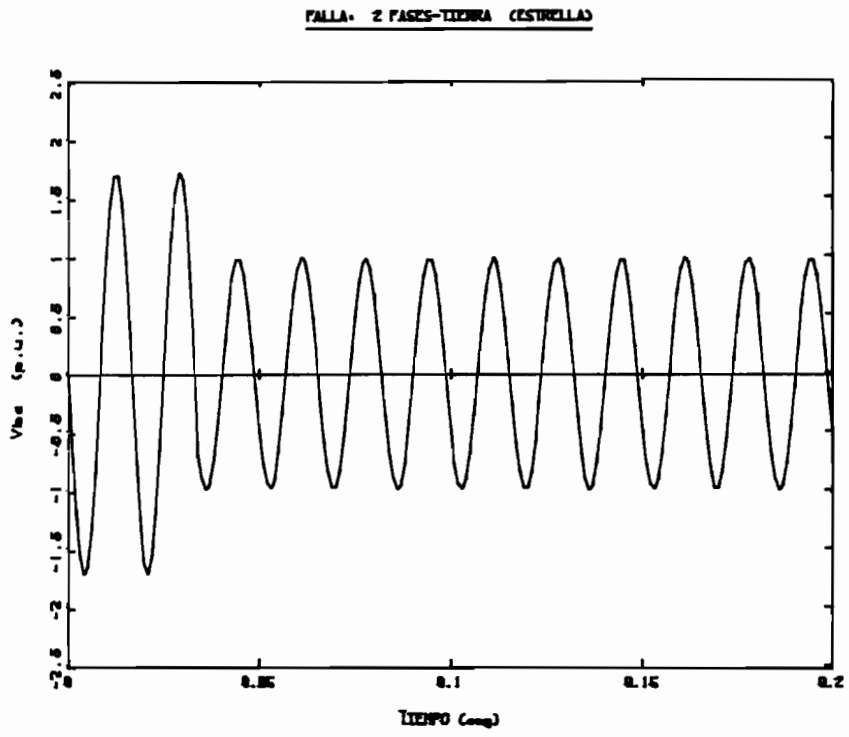


FIG. 5.7.17

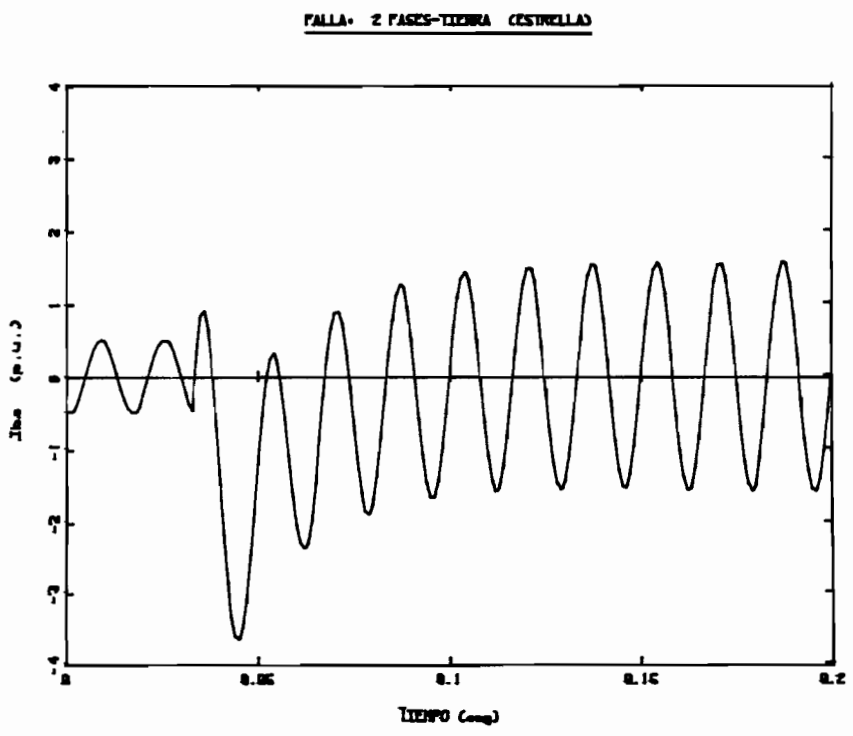


FIG. 5.7.18

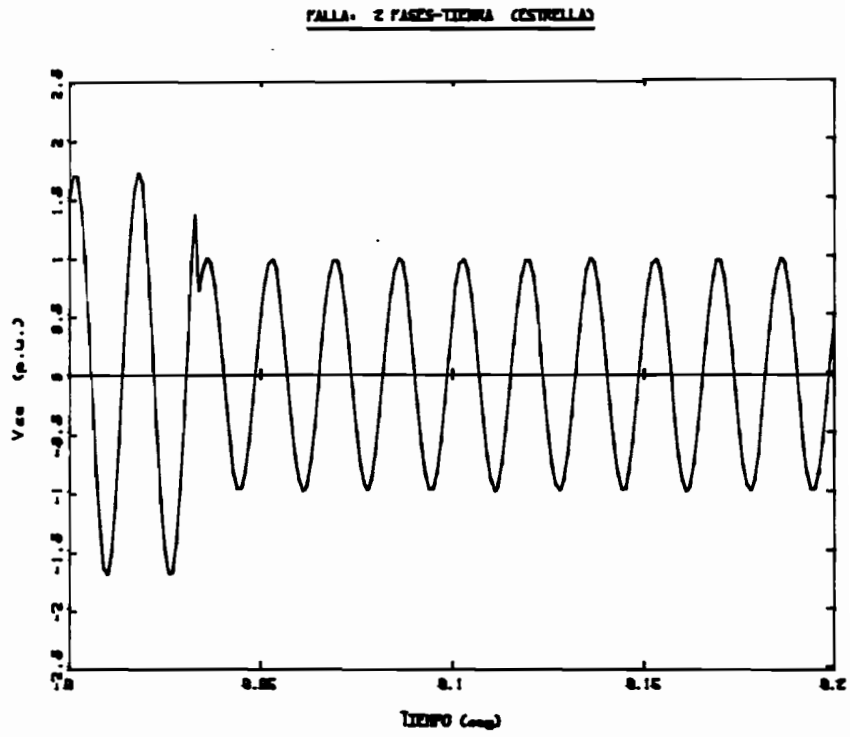


FIG. 5.7.19

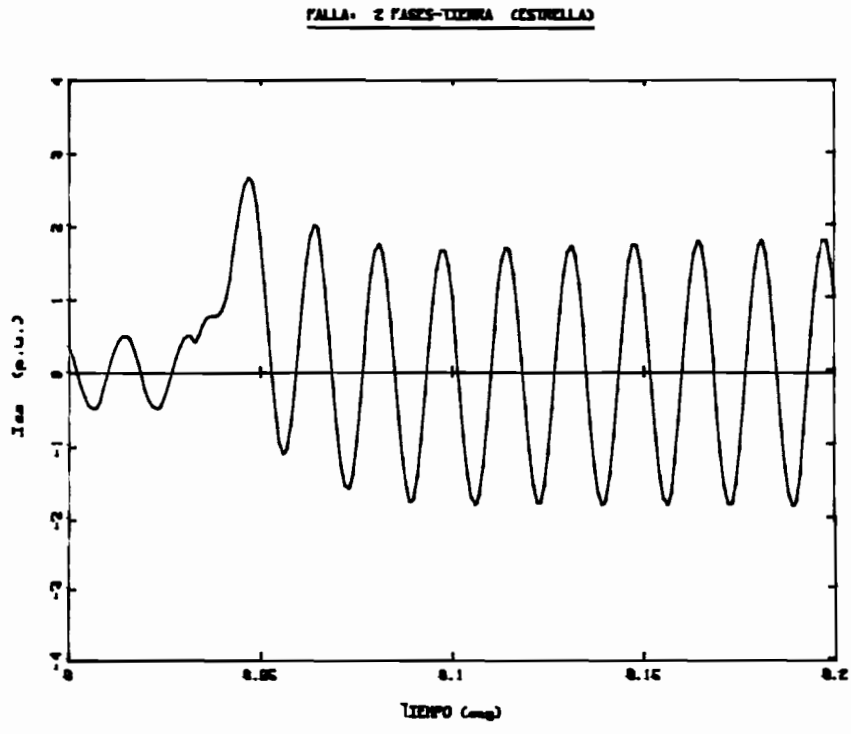


FIG. 5.7.20

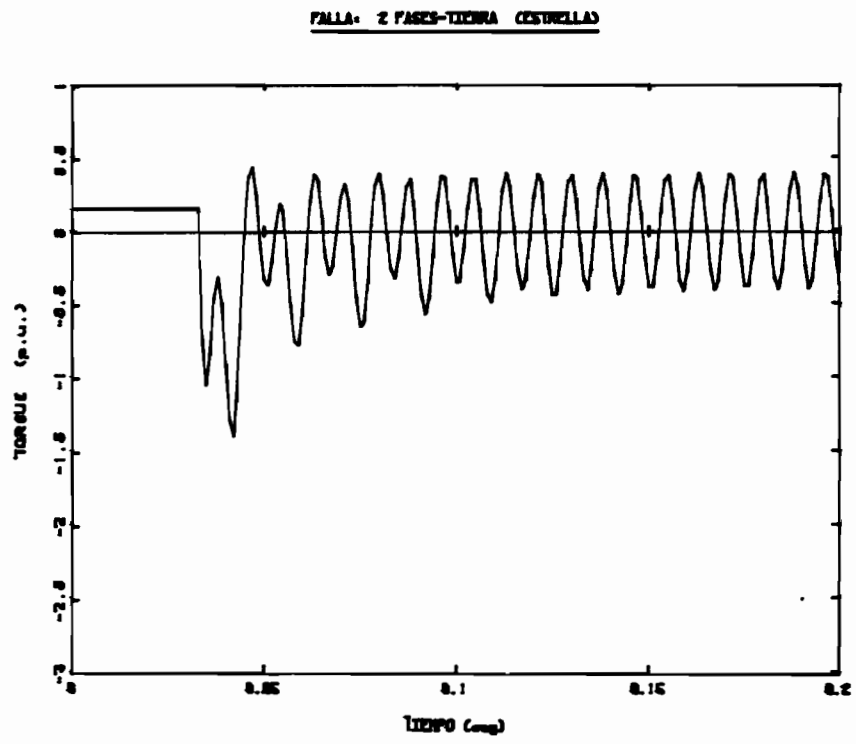


FIG. 5.7.21

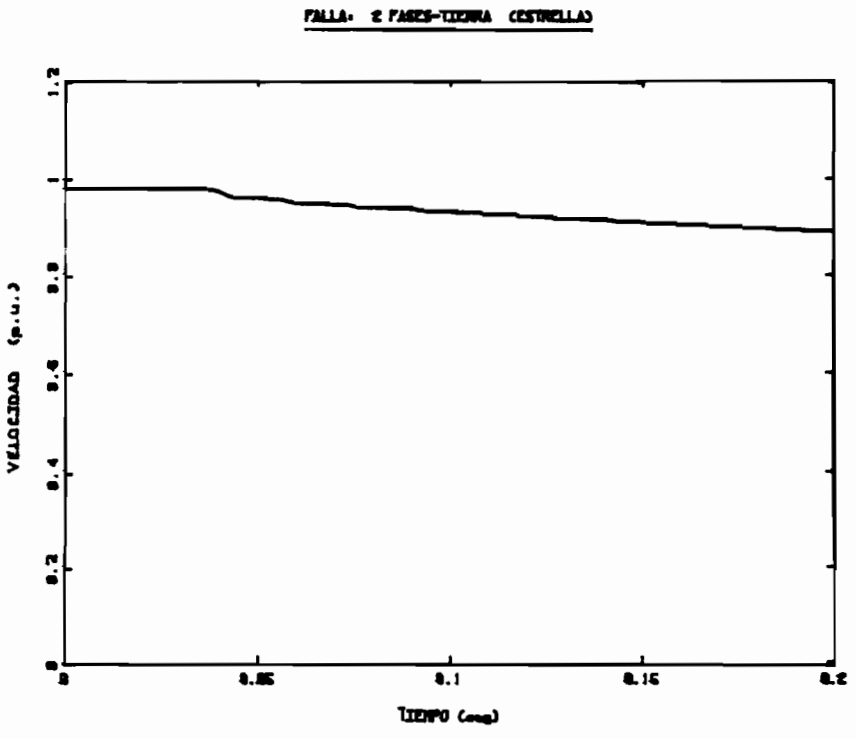


FIG. 5.7.22

En las Fig. 5.7.15 y 5.7.16 se encuentran el voltaje y la corriente de la línea "a", sólo que ahora el voltaje es V_{ab} y la corriente de línea es igual a la corriente de la fase. En forma similar se tiene para las fases "b", Fig. 5.7.17 y 5.7.18, y "c", Fig. 5.7.19 y 5.7.20. Observando estos gráficos y comparándolos respectivamente con los de las Fig. 5.7.1 a 5.7.6 se concluye que tienen el mismo comportamiento, que ya fue descrito para la conexión delta del estator, pero se diferencian en sus magnitudes y en los ángulos, ya que se trata de otras condiciones de funcionamiento.

De igual manera, comparando las Fig. 5.7.21 y 5.7.22 con las Fig. 5.7.13 y 5.7.14, respectivamente, se observa un comportamiento idéntico, tanto en el torque como en la velocidad, existiendo diferencia ya sea en magnitudes o en instantes en que se produce la falla, etc., pero no en el comportamiento en sí.

De esta forma, se puede concluir que el modelo es válido ya sea para conexión delta o estrella en el estator.

5.1.8 Falla Trifásica

Este caso fue simulado con la conexión de resistencias en el circuito de rotor. Así, los datos son los siguientes:

V aplicado: 208 V = 0.95 p.u.

Deslizamiento: 1,66%, s = 0.0166

Tm = 0.084 p.u.

Resistencias rotóricas: a: 0.5 Ω = 0.069 p.u.

b: 0.5 Ω = 0.069 p.u.

c: 0.5 Ω = 0.069 p.u.

Angulo de falla: - 65° = - 1.135 rad.

Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
ELECTRONICA Y CONTROL

OPERACION ASIMETRICA DE LA MAQUINA
TRIFASICA DE INDUCCION FECHA: 03-AUG-85 13:49:49

CASO SIMULADO: FALLA TRIFASICA CON RESISTENCIAS ROTORICAS

*** PARAMETROS DE LA MAQUINA ***
(valores en p.u.)

REACTANCIA DEL ESTATOR:	X(1)= 0.1067
REACTANCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:	X(2)= 0.1067
REACTANCIA MUTUA:	X(3)= 1.9242
RESISTENCIA DEL ESTATOR:	R(1)= 0.0276
RESISTENCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:	R(2)= 0.0904
CONSTANTE DE INERCIA:	H1= 0.2235
FRECUENCIA DE LA RED:	F1= 60

* PARAMETROS DE LA CURVA DE SATURACION: *
Dx vs. Fm (sat)

CONCATENACIONES DE FLUJO MUTUO CRITICO:	Y6= 0.95
PUNTO DE CORTE CON EL EJE VERTICAL:	S3= -5.43
PENDIENTE DE LA RECTA:	S4= 5.72

*** INTERVALO DE SOLUCION ***
(en ses.)

TIEMPO INICIAL:	T1= 0
TIEMPO FINAL:	T2= 0.2
PASO DE INTEGRACION:	H= 1.0E-3

Pasos 200 - Tejec. 1400 ses. - Long. Arch. 44200 bytes

* ALIMENTACION TRIFASICA *
VOLTAJES DE LINEA APLICADOS:
(SECUENCIA POSITIVA: V1,V2,V3)

	MODULO (p.u.)	ANGULO DE DESFASAJE (rad.)
V1	V9(1)=0.95	Q6(1)=0
V2	V9(2)=0.95	Q6(2)=-2.094395
V3	V9(3)=0.95	Q6(3)=2.094395

* VOLTAJES DE LINEA BALANCEADOS *

* CONEXION TIPO DELTA EN ESTATOR *

* RESISTENCIAS EXTERNAS CONECTADAS AL ROTOR *
(valores en p.u.)

R1(1)= 0.06900 R1(2)= 0.06900 R1(3)= 0.06900

*** SISTEMA DE EJES FIJO EN ROTOR ***

*** SISTEMA BALANCEADO ***

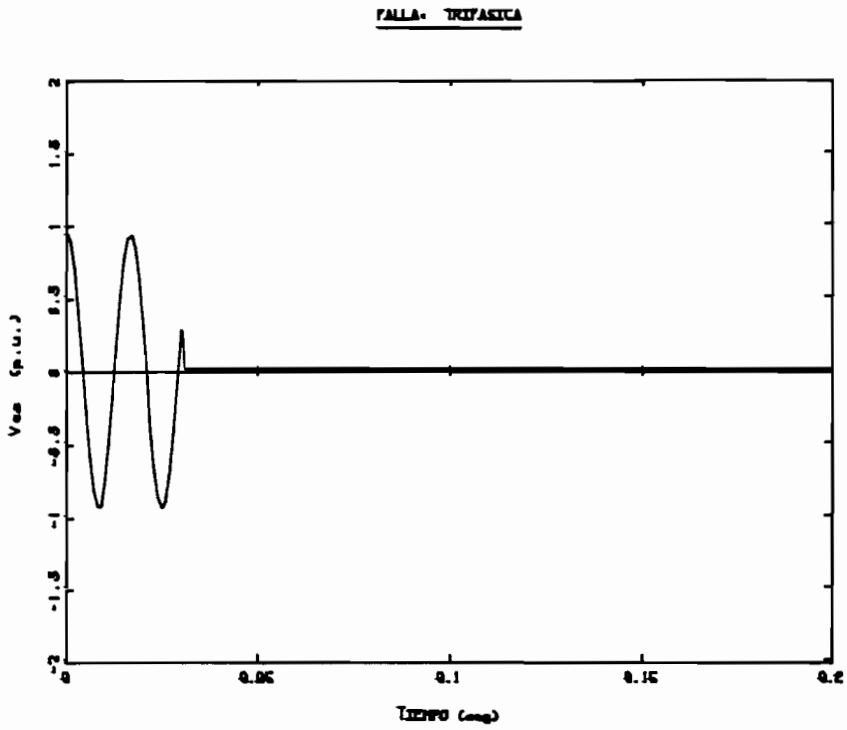


FIG. 5.8.1

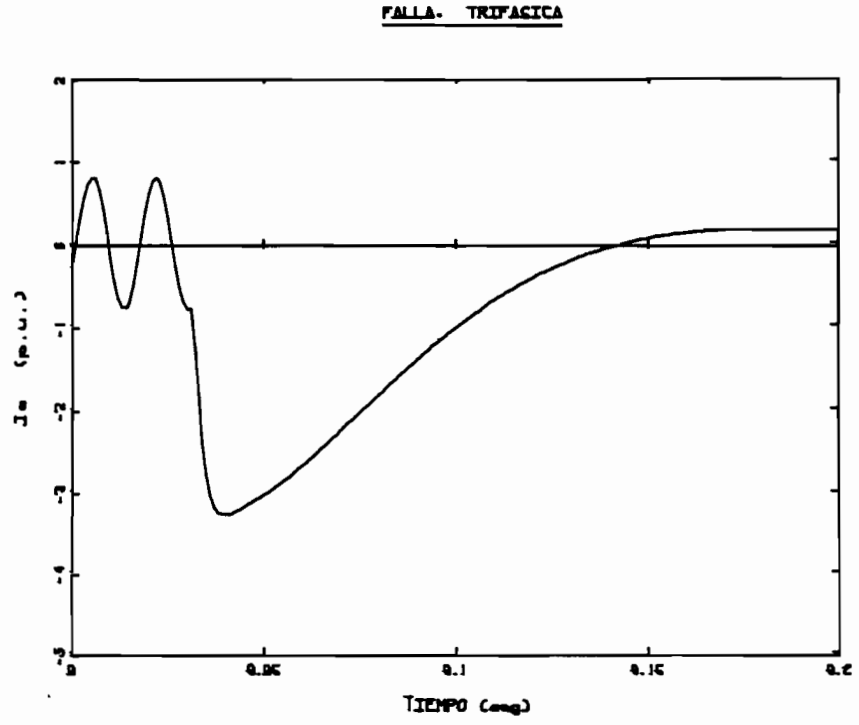


FIG. 5.8.2

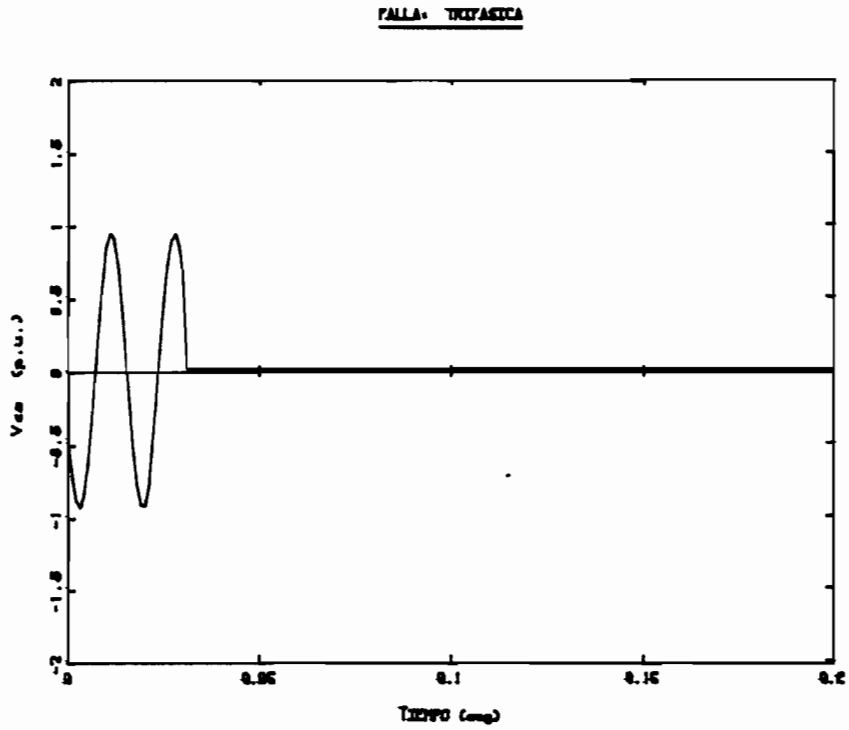


FIG. 5.8.3

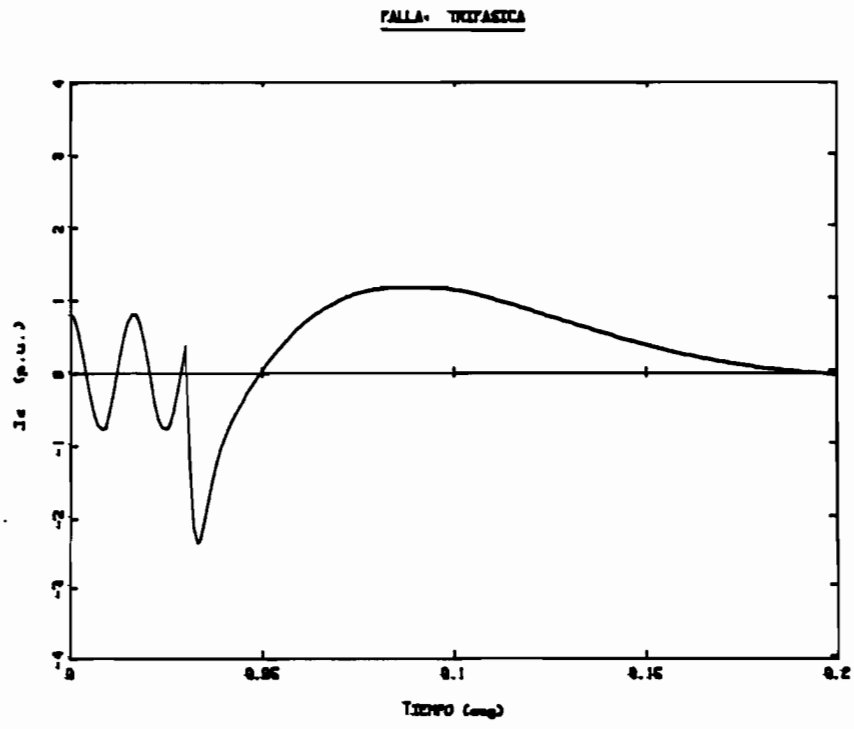


FIG. 5.8.4

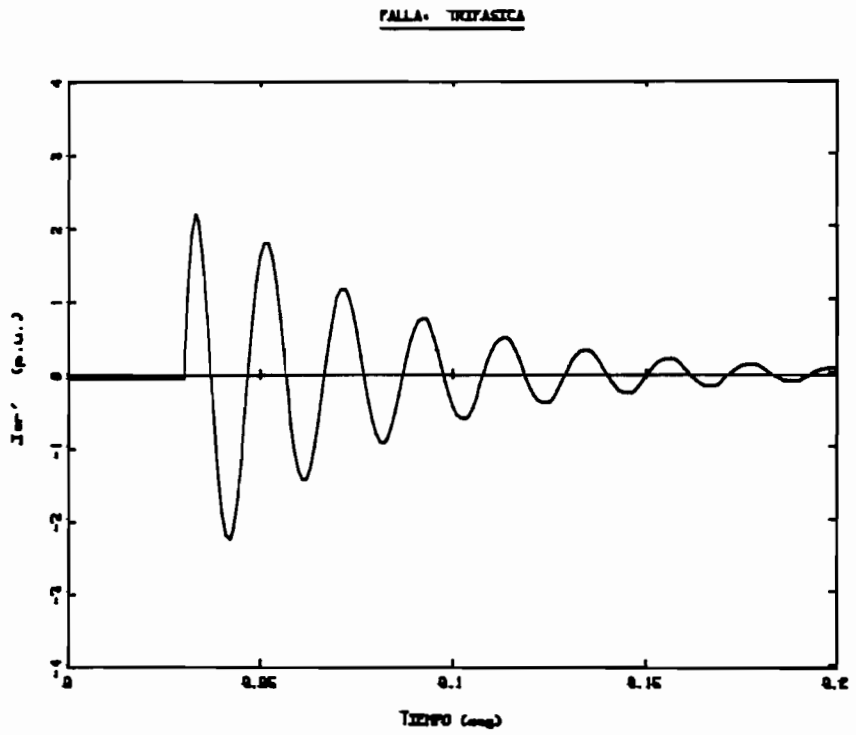


FIG. 5.8.5

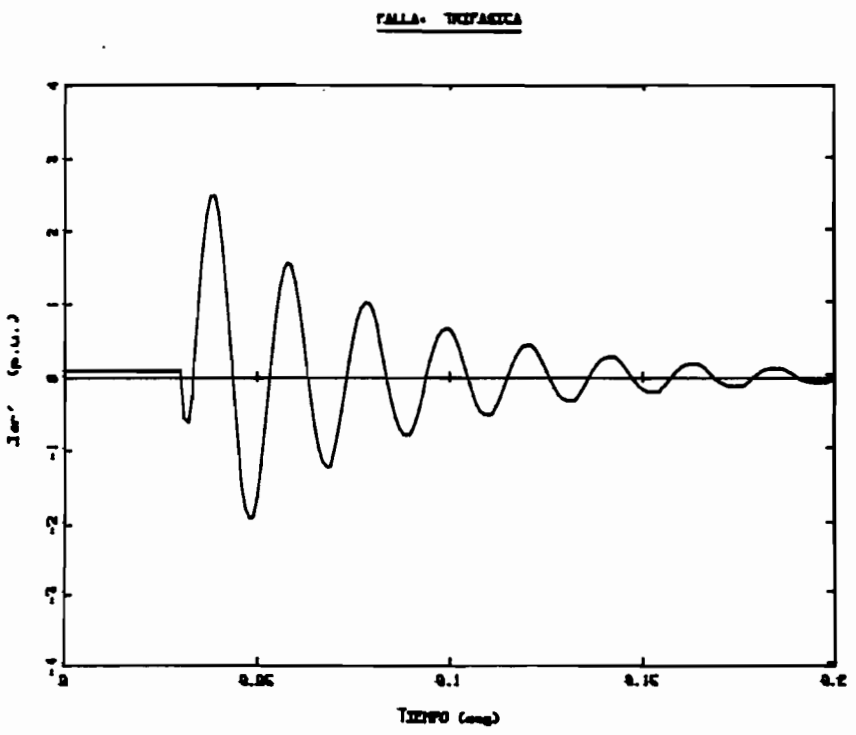


FIG. 5.8.6

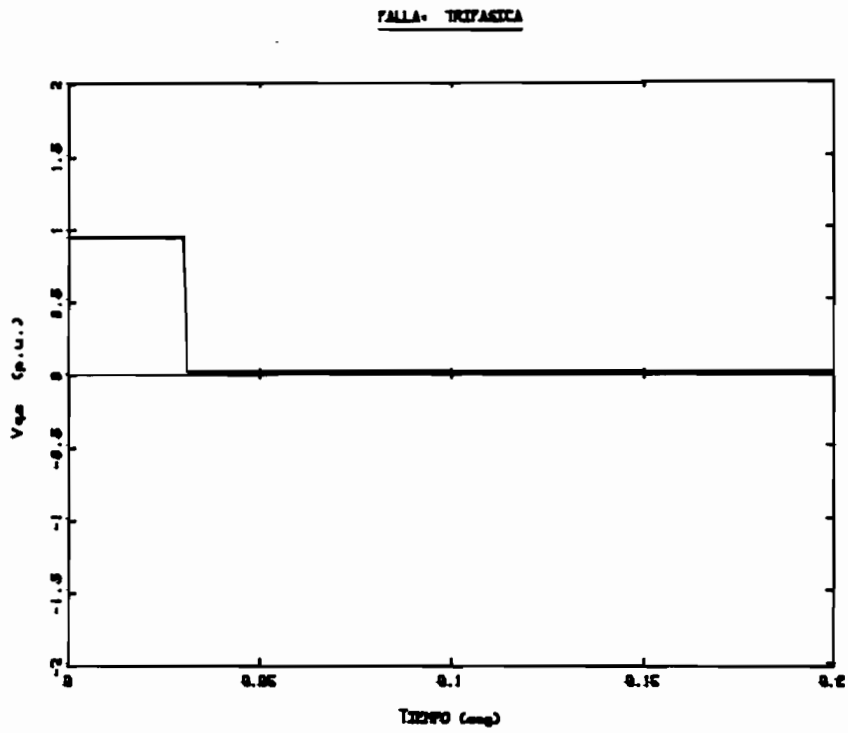


FIG. 5.8.7

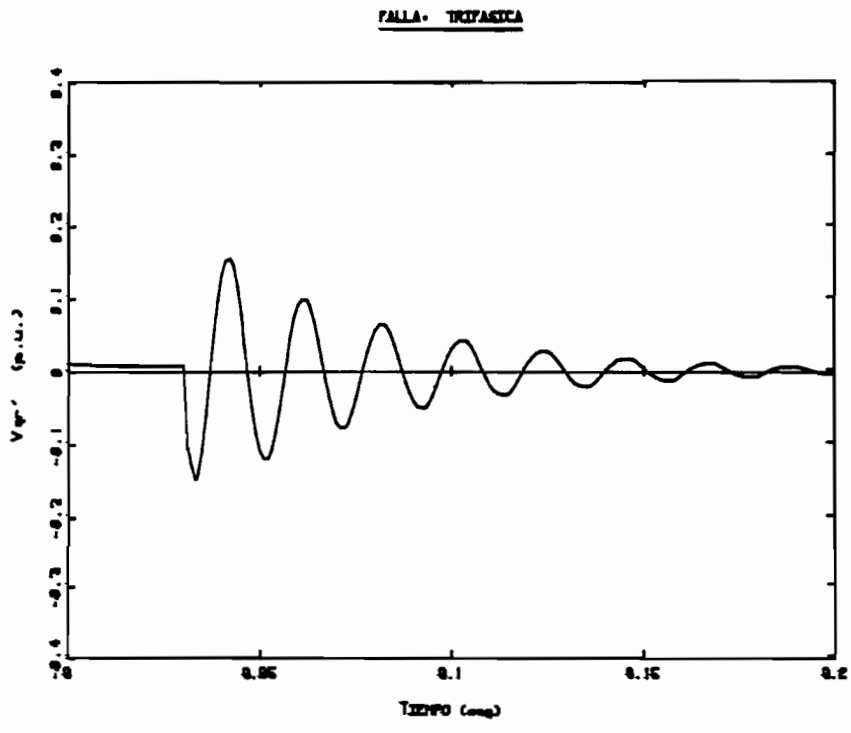


FIG. 5.8.8

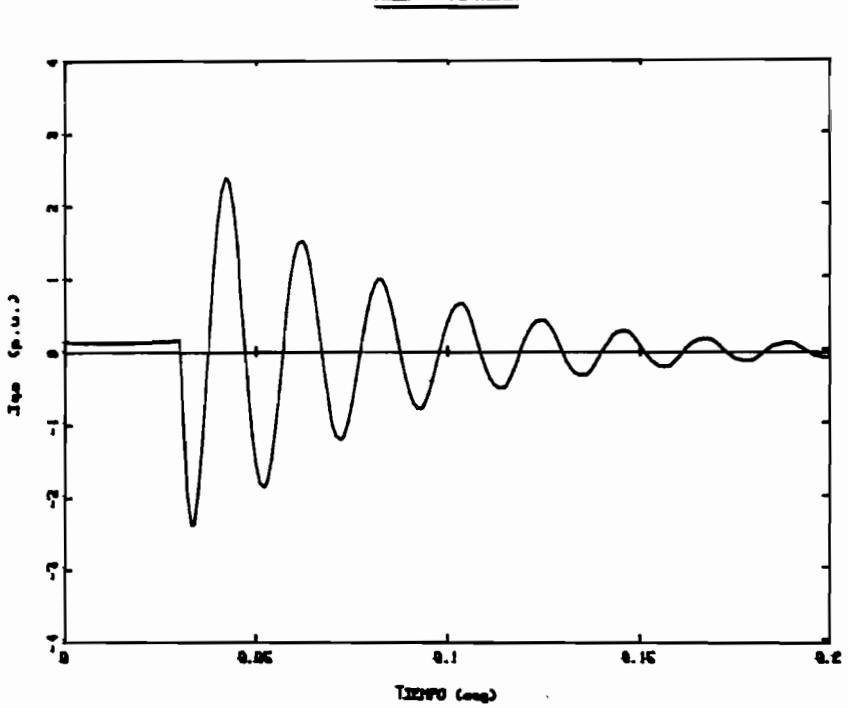


FIG. 5.8.9

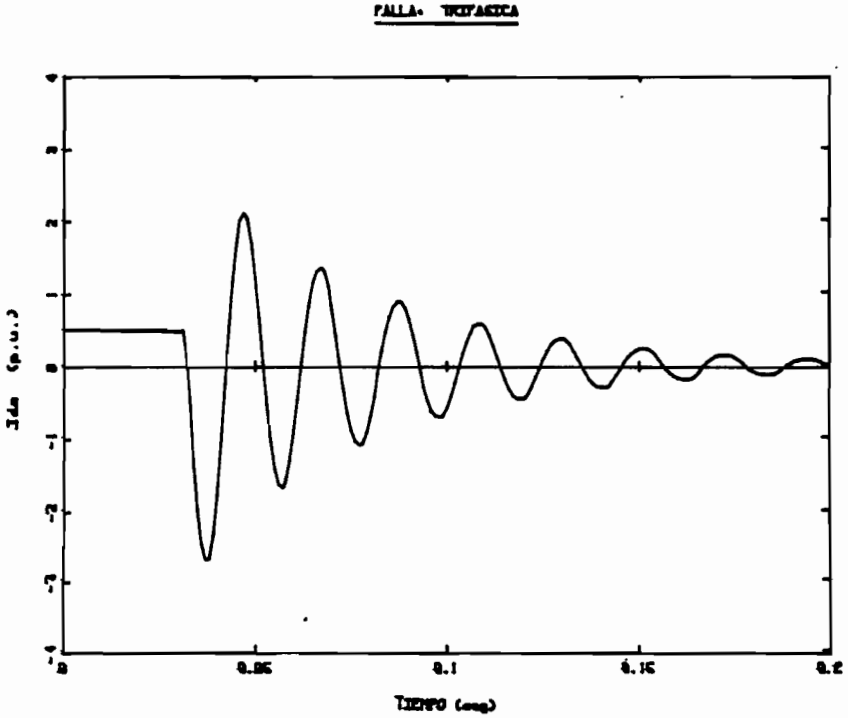


FIG. 5.8.10

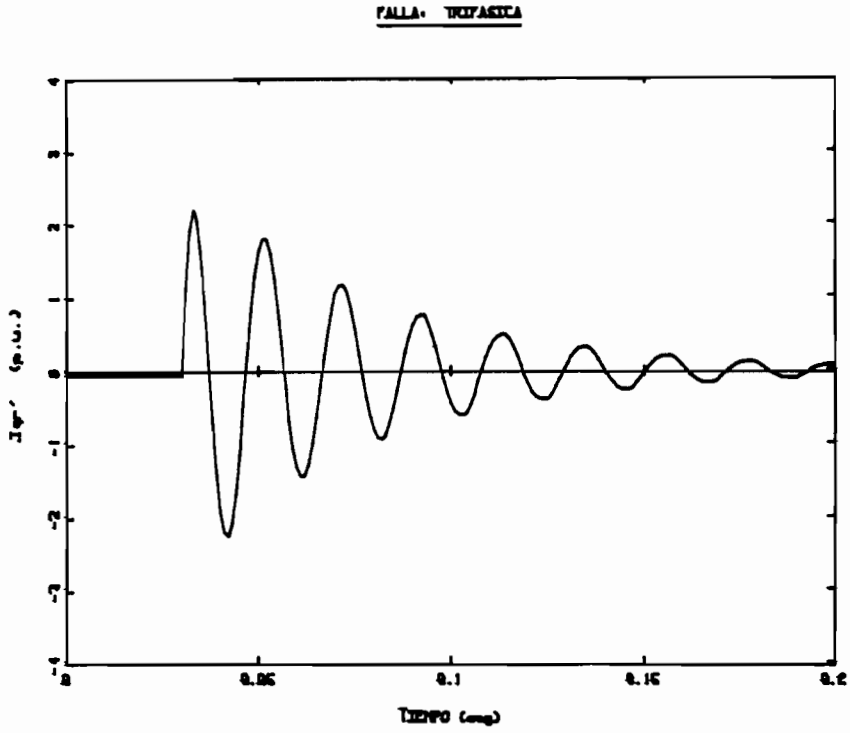


FIG. 5.8.11

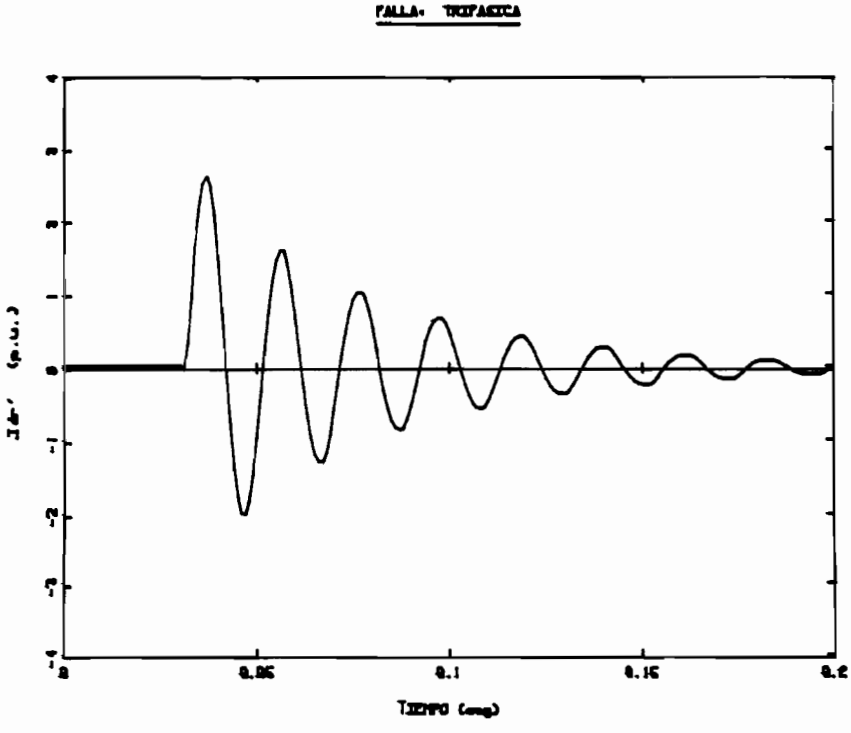


FIG. 5.8.12

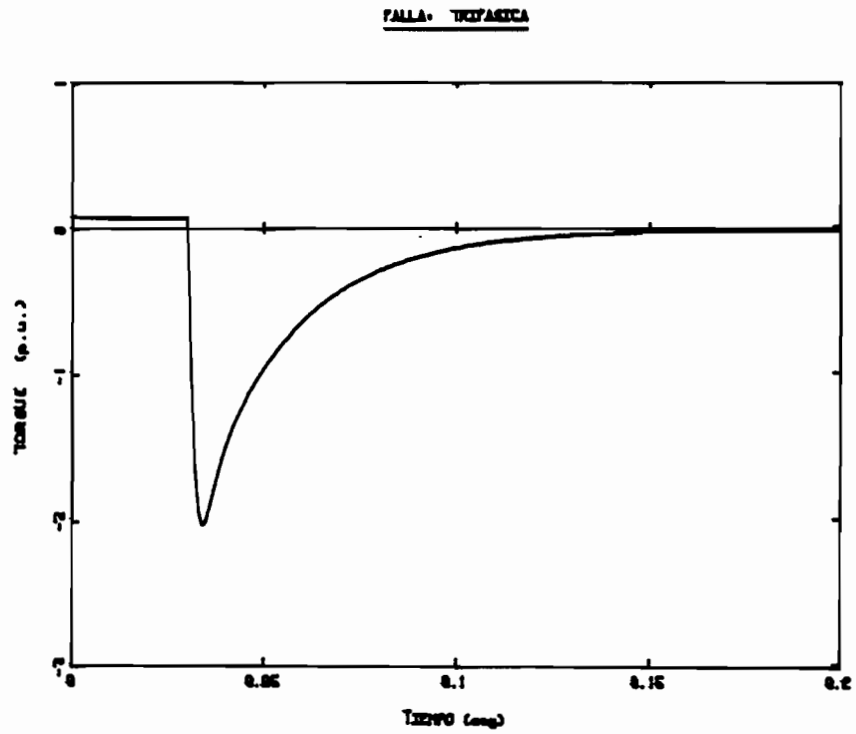


FIG. 5.8.12

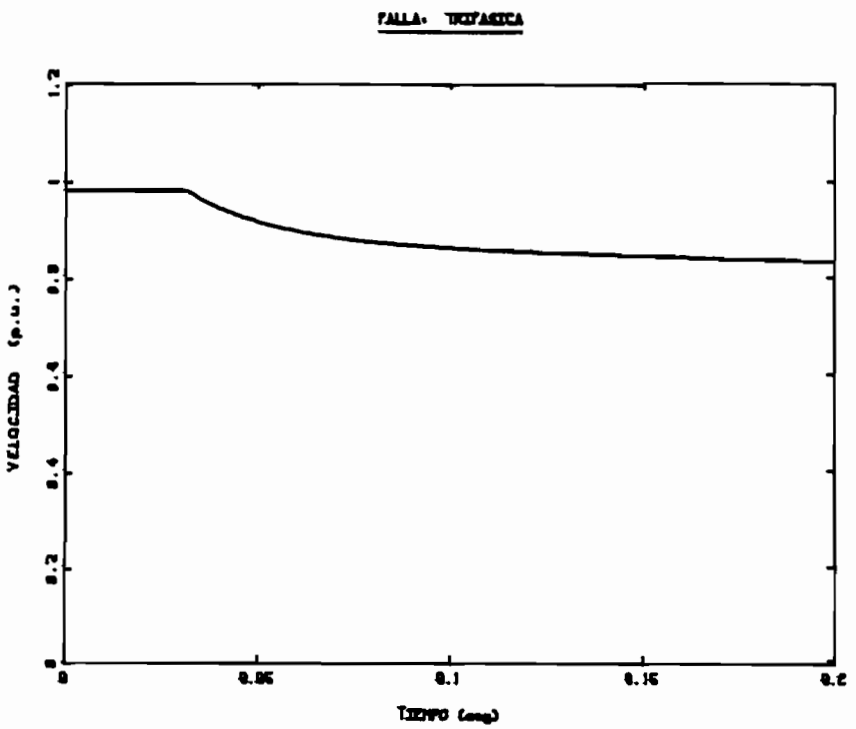


FIG. 5.8.13

En las Fig. 5.8.1 y 5.8.2 se grafican el voltaje y la corriente de la línea "a", mientras que en las Fig. 5.8.3 y 5.8.4 para la línea "c". Se observa que los voltajes se hacen cero luego de la falla para cada línea, esto ocasiona diferentes magnitudes de las corrientes de falla. En la línea "a" es de 3.2 p.u. (18 A pico) y en la "c" es de 2.4 p.u. (13.7 A pico). Estos valores se atenúan lentamente, para llegar a cero en algún instante, pero esto no se consigue observar. El valor obtenido en la Fotografía # 13, para la corriente de la línea "a" es de 17 A pico; y comparando con la Fig. 5.8.2 se observa que son muy parecidas, pero en realidad en la prueba hecha en el laboratorio primero se hizo una desconexión de las tres líneas para luego cortocircuitarlas, esta es la razón por la que se tiene una notable diferencia en el tiempo de estabilización de la corriente de falla.

En la Fig. 5.8.5 y 5.8.6 se hallan las corrientes del rotor en las fases "a" y "c" respectivamente; las dos corrientes tienen la misma forma, pero sus magnitudes son diferentes, en la fase "c" el máximo es 2.2 p.u. (34.5 A pico), mientras que en la "c" es 2.5 p.u. (39 A pico). Las dos corrientes se atenúan lentamente, más lentamente que las corrientes de estator. Comparando la Fotografía # 15 con la Fig. 5.8.6 se puede concluir que su forma es parecida, aunque sus valores no lo sean (21 A pico se midió como corriente de falla), de igual manera, la corriente fotografiada se estabiliza más rápidamente que la simulada. Estas discrepancias existentes puede explicarse fácilmente, ya que el modelo no se considera el período de desconexión previo a la falla.

Este ejemplo fue resuelto con referencia rotórica, así, en las Fig. 5.8.7 a 5.8.12 se encuentran las variables de ejes q y d para referencia rotó-

rica. Hay que notar que este caso es balanceado, razón por la que no aparece ninguna oscilación o sobrepico, teniéndose que todas las variables son de la frecuencia de la red.

En las Fig. 5.8.13 y 5.8.14 se tienen los gráficos del torque y de la velocidad. El torque en el momento de falla alcanza un valor de -2 p.u. , ocasionando un descenso de la velocidad; luego el torque permanece negativo y se anula, por lo que la máquina en adelante se frenará por acción del rozamiento y de la fricción del aire. La velocidad es decreciente y alcanza un valor de 0.92 p.u. (1650 r.p.m.) para t = 0.2 seg., existiendo la tendencia a frenarse aunque sea en un tiempo muy largo para los fines del presente ejemplo.

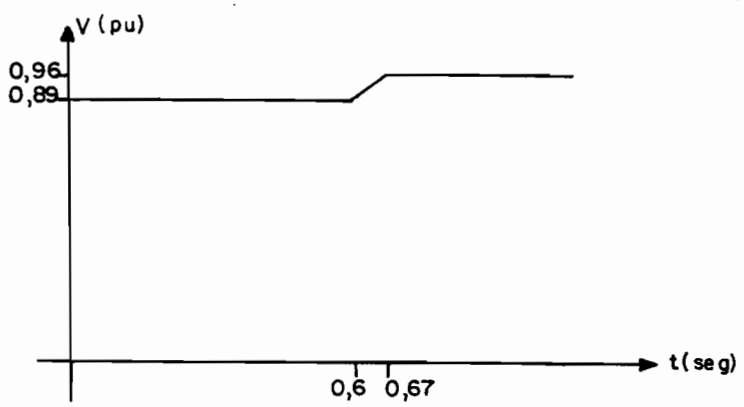
Se puede observar que los transitorios de este tipo de falla han sido menos rigurosos que para la falla de 2 Fases-Tierra.

5.1.9 Arranque con Alimentación Monofásica

Para realizar este ejemplo se tomó los siguientes datos:

$$V \text{ aplicado} = 210 \text{ V} = 0.96 \text{ p.u.}$$

la envolvente de este voltaje tiene la siguiente forma:



el ángulo de conexión es 0° = 0 rad.

Los condensadores de arranque y estado estable son:

C arranque = 287 μF o 0.17 p.u.

C estable = 20 μF o 2.435 p.u.

Hay que agregar que la conmutación de condensadores se hace cuando la velocidad ha alcanzado el 95% de la velocidad nominal.

Es necesario recalcar que los valores de los condensadores usados no son los óptimos, éstos son calculados en el Anexo # 2 y son:

Xc arranque = 0.137 p.u. y Xc estable = 1.37 p.u.

Además Tm = 0.147 p.u.

Los resultados obtenidos son:

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
ELECTRONICA Y CONTROL

OPERACION ASIMETRICA DE LA MAQUINA
TRIFASICA DE INDUCCION FECHA: 03-AUG-85 13:58:51

CASO SIMULADO: ARRANQUE - ALIMENTACION MONOFASICA

*** PARAMETROS DE LA MAQUINA ***
(valores en P.U.)

REACTANCIA DEL ESTATOR:	X(1)= 0.1067
REACTANCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:	X(2)= 0.1067
REACTANCIA MUTUA:	X(3)= 1.9242
RESISTENCIA DEL ESTATOR:	R(1)= 0.0276
RESISTENCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:	R(2)= 0.0904
CONSTANTE DE INERCIA:	H1= 0.2235
FRECUENCIA DE LA RED:	F1= 60

* PARAMETROS DE LA CURVA DE SATURACION: *
Dx vs. Fm (sat)

CONCATENACIONES DE FLUJO MUTUO CRITICO:	Y6= 0.95
PUNTO DE CORTE CON EL EJE VERTICAL:	S3= -5.43
PENDIENTE DE LA RECTA:	S4= 5.72

*** INTERVALO DE SOLUCION ***
(en seg.)

TIEMPO INICIAL:	T1= 0
TIEMPO FINAL:	T2= 0.75
PASO DE INTEGRACION:	H= 5.0E-4

Pasos 1500 - Tejec. 10500 seg. - Long. Arch. 325000 bytes

* ALIMENTACION MONOFASICA *

VOLTAJE APLICADO (en P.U.):	V9= 0.96
REACTANCIA CAPACITOR DE ARRANQ. (en P.U.):	X(7)= 0.17
REACTANCIA CAP. DE EST. ESTAB. (en P.U.):	X(8)= 2.435

* VOLTAJES DE LINEA DESBALANCEADOS *

* CONEXION TIPO DELTA EN ESTATOR *

* DATOS DE LA ENVOLVENTE:
(V en P.U. y T en seg.)

V1= 0.8930 V2= 0.9600 T1= 0.6300 T2= 0.7000

*** SISTEMA DE EJES FIJO EN ESTATOR ***

*** SISTEMA DESBALANCEADO ***

```
  CONDICIONES INICIALES PARA EL ARRANQUE SON CERO.

  ANGULO DE CONEXION PARA EL ARRANQUE:  A6=  0

  *  EC. DEL TORQUE (T8) EN FUNCION DE LA VELOC. (W6)  *
1090 T8=0.147

  NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS DE CONDICIONES FINALES

  DE ESTADO ESTABLE PARA SISTEMA DESBALANCEADO: @CFIN/ALMONF5

  NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS:  @ARRANQUE/ALMONF5
```

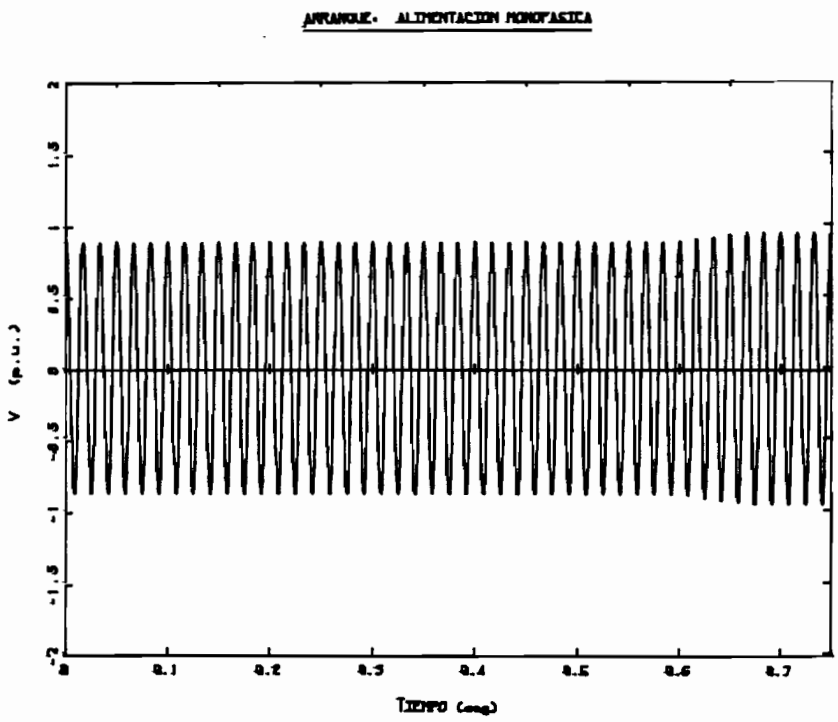


FIG. 5.9.1

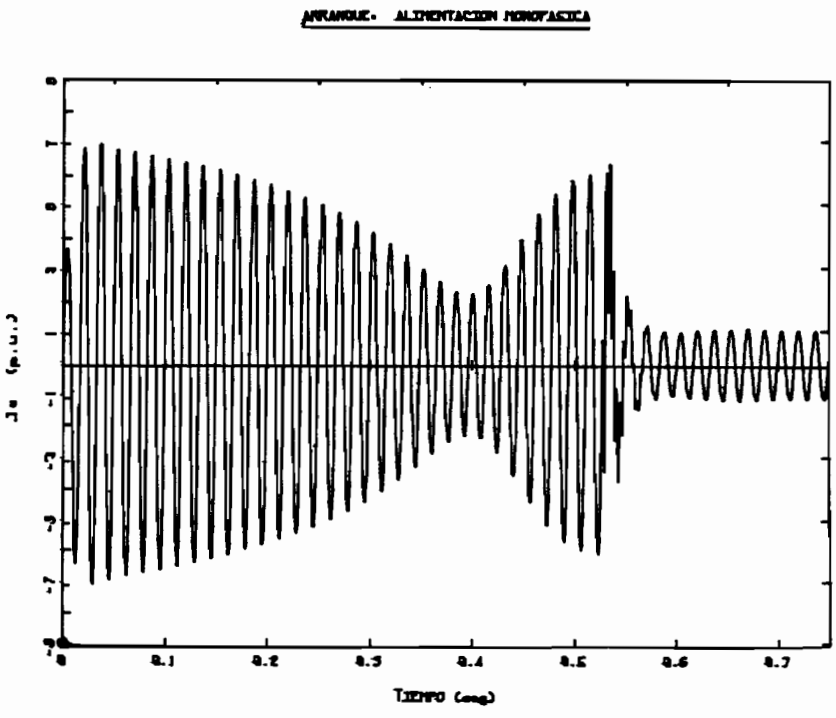


FIG. 5.9.2

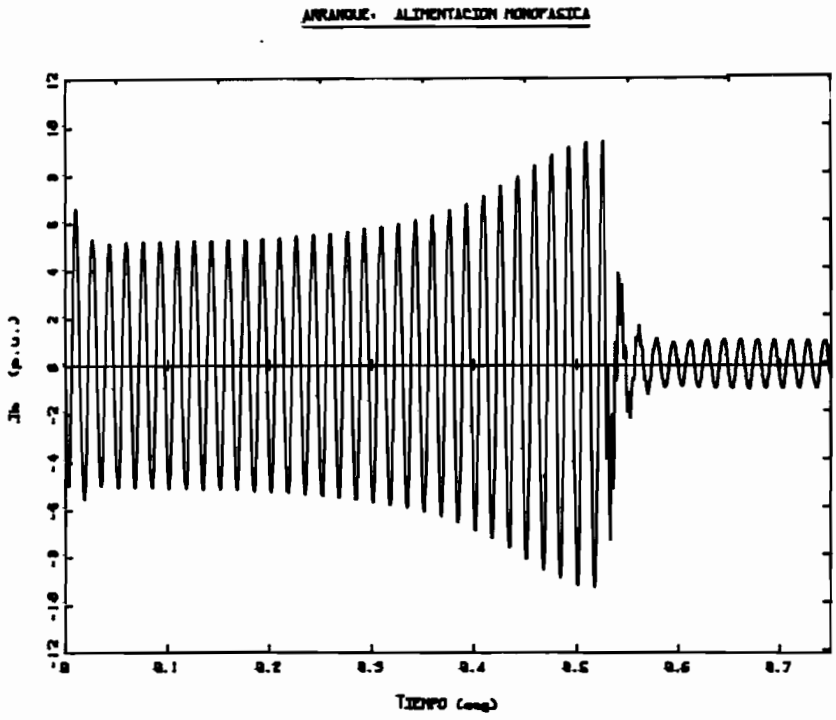


FIG. 5.9.3

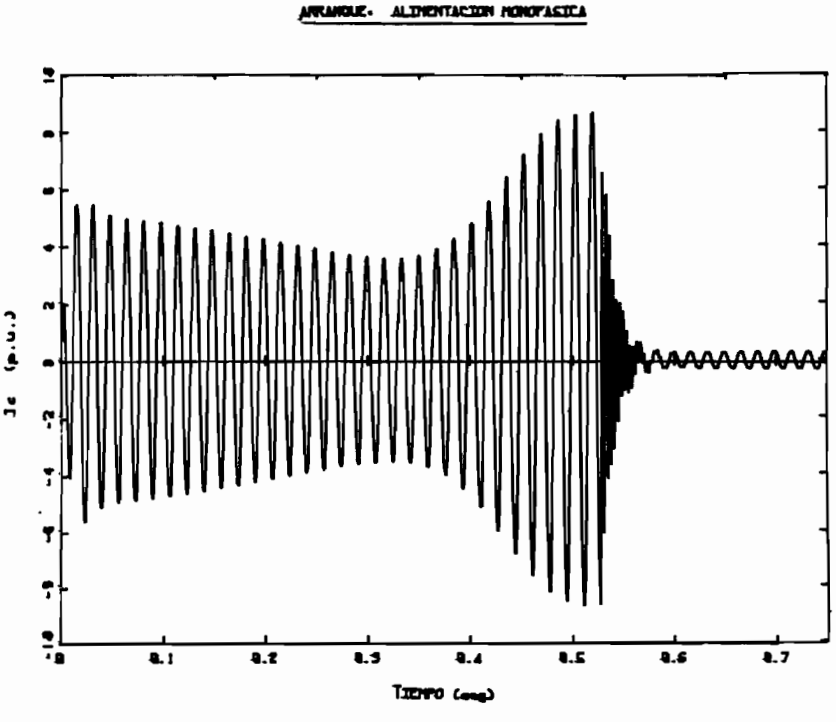


FIG. 5.9.4

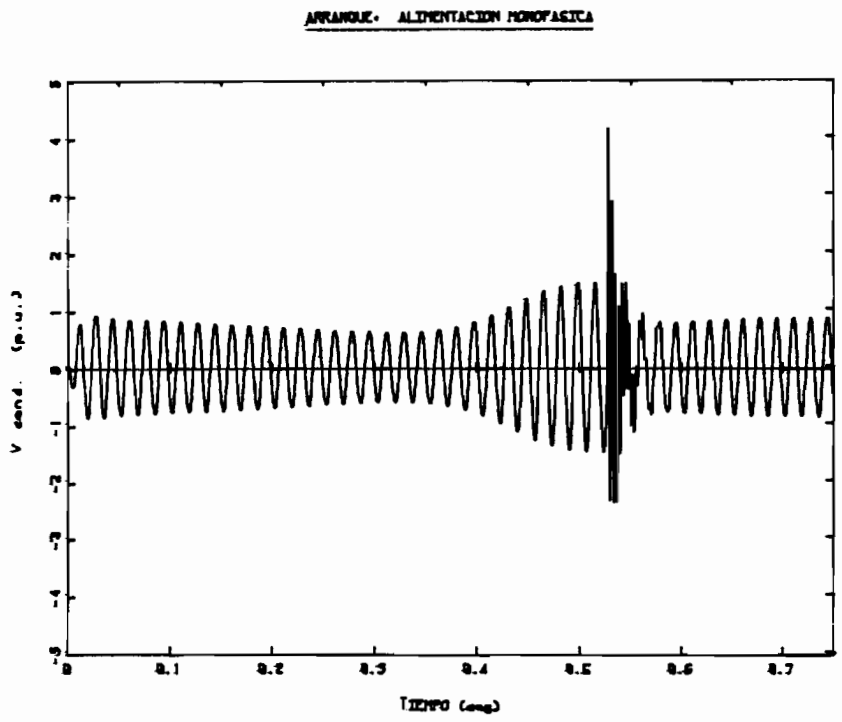


FIG. 5.9.5

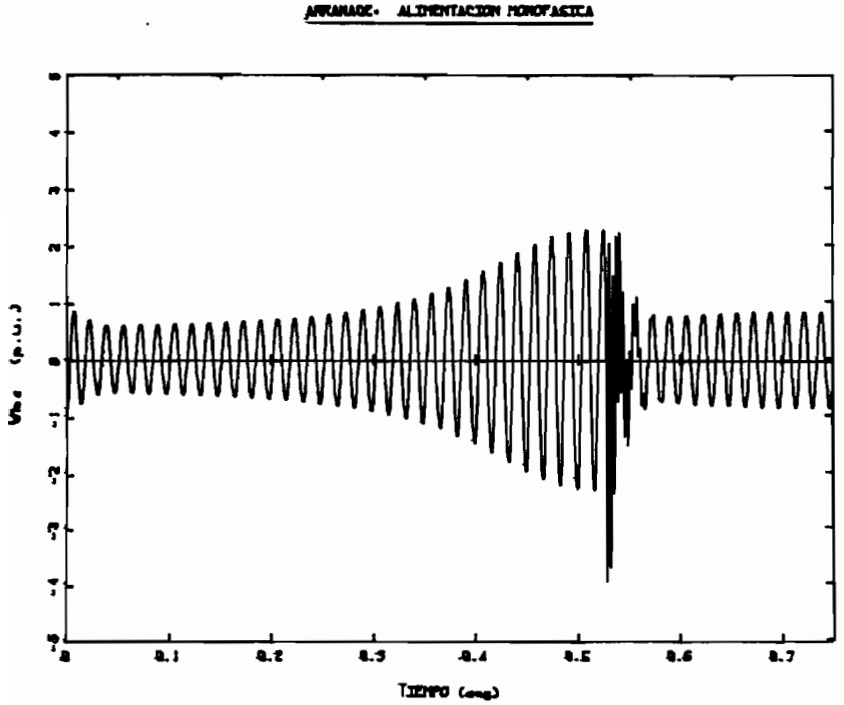


FIG. 5.9.6

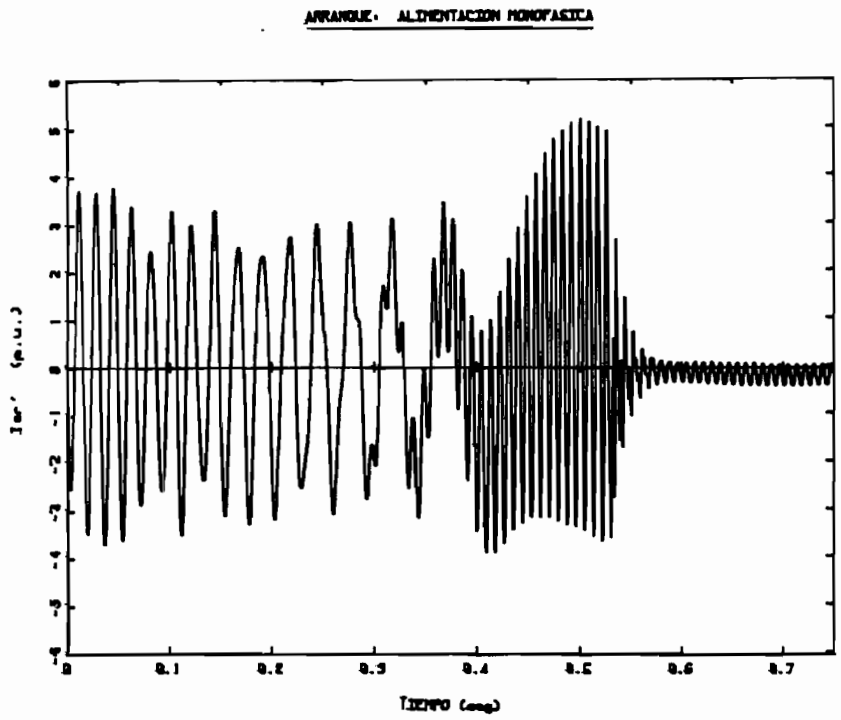


FIG. 5.9.7

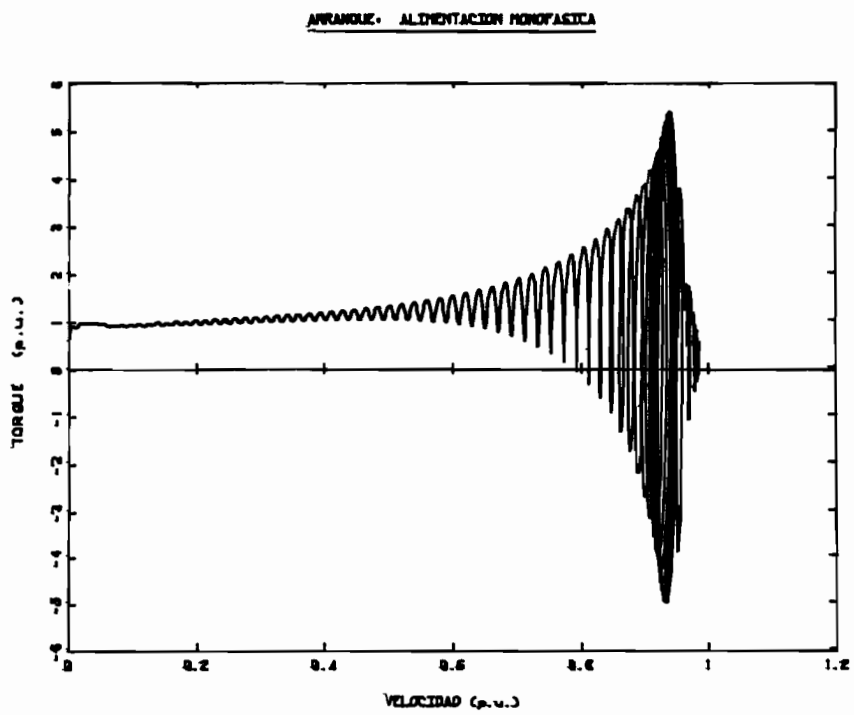


FIG. 5.9.8

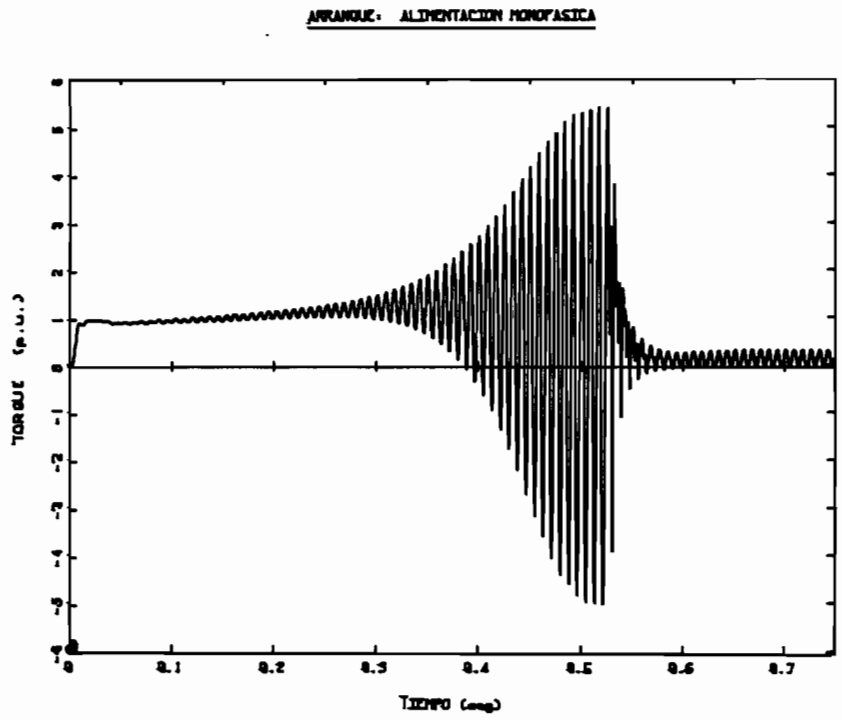


FIG. 5.9.9

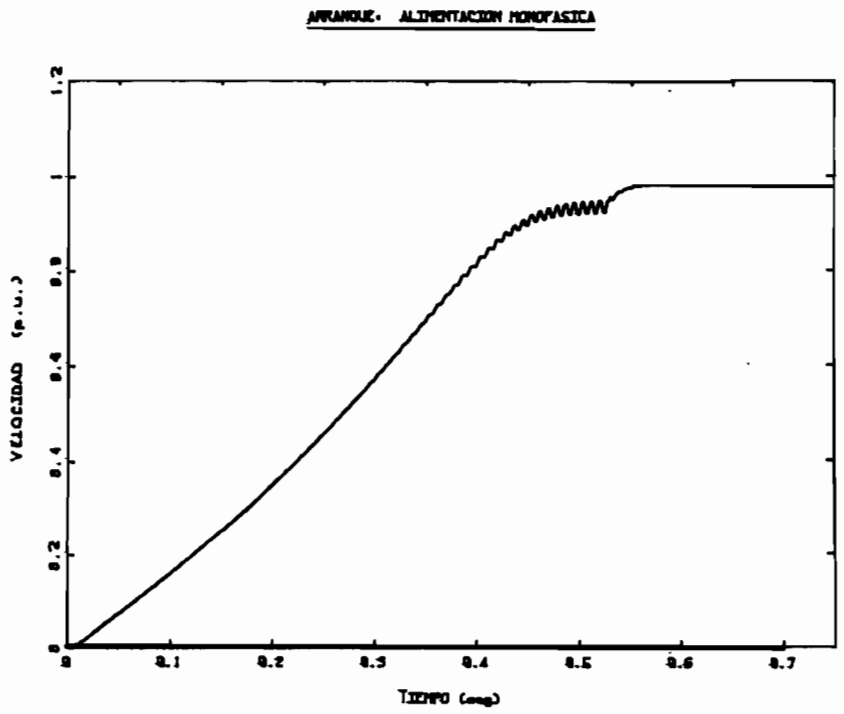


FIG. 5.9.10

En la Fig. 5.9.1 se encuentra el voltaje aplicado, se puede decir que el ángulo de conexión es 0° y que tiene la misma envolvente de la Fotografía # 16. En la Fig. 5.9.2 se presenta la corriente de la línea "a" del estator; esta corriente alcanza un valor máximo de 7 p.u., o sea de 40 A pico, y un valor en estado estable de 1 p.u., o sea 5.7 A pico. Para este caso el tiempo de aceleración es de 0.55 seg. En cambio, los valores obtenidos de la Fotografía # 16 son: Imax = 46 A pico, Iestable = 6 A pico y ta = 0.7 seg., de esta forma, se puede observar que se tiene una buena aproximación entre los respectivos valores. Comparando la forma de onda de la corriente de la Fotografía # 16 con la Fig. 5.9.2 se observa que tienen el mismo comportamiento, con ciertas diferencias; en ambos se nota la envolvente decreciente, hasta llegar a un mínimo, en t = 0.6 para la fotografía y en t = 0.4 para el dibujo, luego de lo cual comienza a crecer bruscamente ya que existe la tendencia a oscilar el sistema debido a la tardía conmutación de los condensadores, pero después de la conmutación se llega al valor permanente de estado estable; hay que anotar también que durante la conmutación se producen picos que desaparecen inmediatamente. Las diferencias que se encontraton son principalmente en el tiempo de aceleración y en el tiempo al que se produce la conmutación, pudiendo decirse que el modelo presenta una respuesta mecánica más rápida. Esto tiene su explicación: el paso de integración usado es H = 0.0005 seg., lo que no es la mejor solución, ocasionando errores, que por cierto no son mayores, y para efectos de comprobación del modelo puede darse como adecuado. Ahora bien, utilizando un menor paso de integración se tendrá una respuesta mucho más aproximada, pero a costa del tiempo de ejecución, que se haría excesivamente grande, así como la cantidad de datos a almacenarse. Además, hay que mencionar que la conmutación de los condensadores no se realiza exactamente en el mismo instante en los

dos resultados obtenidos. De todas formas, pese a las diferencias existentes, que no son mayores, puede verse la total concordancia de los resultados.

En la Fig. 5.9.3 y 5.9.4 se hallan las corrientes de las líneas "a" y "c" del estator. La corriente de la línea "b" es también la corriente que entrega el alimentador y como puede verse tiene un valor aproximado a 5 p.u. (28.5 A pico) en los primeros instantes, para luego crecer bruscamente a valores de 9 p.u. (51 A pico), ocasionado por la tardía conmutación de condensadores, y luego de ésta decrece al valor de estado estable que es aproximadamente 1 p.u. (5.7 A pico). La corriente de la línea "c" es también la corriente que pasa por el condensador y puede ser comparada su forma con la Fotografía # 18; en los primeros instantes presenta un valor aproximado de 4.5 p.u., más o menos 25 A pico, luego disminuye de valor hasta 3.7 p.u. (21 A pico), posteriormente empieza a crecer, llegando a 9 p.u. (51 A pico), por la conmutación tardía de los condensadores, y luego de ésta se estabiliza en un valor aproximado de 0.35 p.u. o sea 2.0 A pico. Comparando estos valores con los obtenidos en la Fotografía # 18 puede verse que son un poco distintos, debido a que la fotografía no es correspondiente a la simulación hecha, ya que se realizó en otras condiciones de funcionamiento y en otro instante, así, en el modelo no se considera la resistencia de 1 Ω puesta en serie con el condensador para tomar la señal de corriente, el ángulo de conexión será distinto, y el instante de la conmutación de los condensadores también, notándose mayor oscilación en los resultados de la simulación por cuanto en ésta se realiza más tardíamente la conmutación. Pese a todas estas diferencias puede decirse con toda certeza que la señal de corriente de la Fotografía # 18 y la de la Fig. 5.9.4 tienen idéntico comportamiento.

En las Fig. 5.9.5 y 5.9.6 se observa los voltajes V_{ca} y V_{bc} aplicados al estator. El voltaje V_{ca} es también el voltaje en los terminales del condensador, y puede verse que tiene idéntica forma que la señal fotografiada en el laboratorio, Fotografía # 18, su amplitud varía entre el 80% y el 55% del valor nominal, y además crece violentamente cuando el sistema empieza a oscilar, para luego de la conmutación estabilizarse en un valor cercano al 90% del nominal. El voltaje V_{bc} tiene un comportamiento muy similar al v_{ca}, pero sus magnitudes son algo distintas, puede observarse que este voltaje crece hasta valores superiores a 2 p.u. cuando existe oscilación, pero luego de la conmutación se estabiliza en un valor de 0.85 p.u. aproximadamente.

En la Fig. 5.9.7 se halla la corriente de rotor de la fase "a", puede observarse que su forma es similar a las obtenidas en otros casos desbalanceados, la corriente en el arranque alcanza 3.8. p.u. (59 A pico), notándose además que en el pequeño período en que oscila el sistema se presentan también oscilaciones en la corriente del rotor, de frecuencia doble a la de la red y de considerable amplitud, 5 p.u. (78 A pico), y luego de la conmutación las oscilaciones se mantienen, sobre la componente fundamental de la corriente del rotor, pero ya con una pequeña amplitud, 0,45 p.u. (7 A pico-pico).

En las Fig. 5.9.8, 5.9.9 y 5.9.10 se hallan las variables mecánicas. Se puede observar que el torque tiene ahora una forma muy distinta a los casos anteriores, ya que en los primeros instantes es constante y luego presenta un caracter oscilatorio, por cuanto todo el sistema tiende a oscilar, pero luego de la conmutación las oscilaciones se reducen notablemente y dan un valor promedio igual al valor de torque de carga. El

torque de arranque es ahora de 1 p.u., menor que para el caso de alimentación trifásica balanceada; el torque máximo es aproximadamente 1.4 p.u. y ocurre para ω_r = 0.7 p.u. (s = 0.3). Las oscilaciones de torque llegan a 5.5 p.u. en el período en el que oscila el sistema, y luego en estado estable se amortiguan a 0.4 p.u. La velocidad tiene un comportamiento creciente, ya no se notan como en otros casos desbalanceados, pequeñas oscilaciones en los primeros instantes, sino que éstas aparecen luego, aumentando considerablemente en el período que oscila el sistema, para desaparecer luego de la conmutación, y alcanzar un valor de estado estable que es 0.9833 p.u. (1770 r.p.m.). En la Fig. 5.9.10 se nota claramente que la conmutación de condensadores se realiza en el 95% de la velocidad nominal. Las oscilaciones de la velocidad son consecuencia de las elevadas oscilaciones del torque.

Hay que anotar que a pesar de no haber usado los valores óptimos de condensadores, los resultados obtenidos son bastante buenos, tanto en la parte experimental como en la simulación.

En las figuras anteriores se ha visto el comportamiento transitorio de la máquina trifásica con alimentación monofásica, usando un condensador convertidor de fase, y puede decirse que son similares los transitorios eléctricos con respecto a los obtenidos con alimentación trifásica balanceada, pasando por alto el período de oscilación, ya que puede evitarse conmutando los condensadores a tiempo. En cambio, los transitorios mecánicos son distintos, presentando una respuesta más lenta que con alimentación trifásica balanceada.

5.2 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.2.1 Conclusiones

De los numerosos ejemplos realizados, tanto en el laboratorio como en el computador, se pueden efectuar las siguientes conclusiones:

1.- El modelo ha sido comprobado en su totalidad, ya que en todos los casos analizados han sido verificados los resultados de la modelación, con las fotografías obtenidas de las pruebas de laboratorio, y comprenden el transitorio completo. Además, debido a la generalidad de la modelación, se obtienen las variables en las tres fases simultáneamente, lo cual no es muy fácil realizarlo en el laboratorio.

2.- Para estado estable se ha comprobado que las variables en ejes q y d tienen una frecuencia $(\omega_e - \omega)$ en cualquier sistema de referencia, excepto para referencia sincrónica, en tal caso todas las variables son cantidades constantes.

3.- En los ejemplos realizados no solamente se verificó su validez, sino que además se obtuvo una total consistencia con la teoría, brevemente expuesta en el Capítulo II. Así, en condiciones desbalanceadas: existe una mayor corriente por los devanados, que se explica por la existencia de componentes de secuencia positiva y negativa, consecuentemente se tiene un menor rendimiento. Se tiene también un torque oscilante, de frecuencia doble de la red, debido a la interacción entre los campos magnéticos giratorios positivo y

negativo, además, cuanto mayor desabalance existe, las oscilaciones son de mayor amplitud; estas oscilaciones de doble frecuencia aparecen también en el rotor.

4.- Se comprobó que el conector resistencias rotóricas, independientemente de las condiciones desbalanceadas, aumentó el torque de arranque, a pesar que los desbalances provocan una disminución del torque. Además, el torque máximo se mantiene, pero cambia el valor del deslizamiento al cual se produce éste. De forma similar, al tener voltaje reducido se redujo también el torque.

5.- Los desbalances, cualquiera que sea su origen, se reflejan tanto en rotor como en estator. Además, para referencia estatórica los desbalances se reflejan en ejes q y d, en amplitud únicamente, en cambio para referencia rotórica aparecen oscilaciones de doble frecuencia que la red.

6.- Para los casos de fallas se notó lo siguiente:

- Los transitorios eléctricos se estabilizan mucho más rápidamente que los transitorios mecánicos, y es por esta razón que se acostumbra considerar constante la velocidad.

- Los picos máximos de corriente dependen del ángulo de falla, y son diferentes para cada una de las fases. Esto ocurre también en el arranque.
- A mayor pico de corriente de falla se tiene un menor tiempo de estabilización.

- Se producen corrientes oscilatorias muy altas en rotor y torques negativos también elevados, para todos los casos de falla.

7.- Los transitorios obtenidos para alimentación monofásica son muy parecidos a los que se obtuvo con alimentación trifásica balanceada , debiendo realizarse la conmutación de condensadores en una velocidad aproximada al 80% de la nominal, ya que de otra forma se producirán corrientes y torque oscilatorios muy altos, que pueden dañar la máquina. La corriente de estado estable es mayor que para el caso de alimentación trifásica balanceada. Consecuentemente se tendrá un menor rendimiento.

8.- Es conveniente usar un paso de integración de 0.001 seg. para todos los casos planteados, excepto para el caso de alimentación monofásica, ya que el uso de condensadores implica mayores frecuencias de oscilación que la de la red. Se ha usado 0.0005 seg., pero es conveniente reducirlo para tener mejores resultados.

9.- Los múltiples errores obtenidos se deben a fenómenos no considerados, como son: histéresis, ranuras, canales de ventilación; también se deben a inexactitud en los cálculos de los parámetros de la máquina, y sobre todo a la pobre apreciación que se puede tener ya sea de los gráficos o de las fotografías.

5.2.2 Recomendaciones

El programa ha sido desarrollado en un computador Tektronix 4051, por lo tanto utiliza el lenguaje BASIC, de forma que es muy fácil adaptarlo a

cualquier computador personal; por lo tanto se recomienda utilizar un computador más moderno para disminuir el tiempo de ejecución de los programas, ya que el mencionado computador es extremadamente lento. Utilizando otro computador, más rápido, podrían hacerse los ejemplos de alimentación monofásica con un menor paso de integración y obtener resultados más exactos.

Realizar la simulación de la máquina trifásica de inducción con alimentación monofásica y conexión estrella en el estator.

Completar el presente modelo con otros casos importantes como son desconexión y reconexión de fases, así como alimentación de frecuencia variable y alimentación de voltajes no sinusoidales para que este modelo completo sea utilizado en un computador personal, por las facilidades que éste presenta.

Utilizando el presente modelo hacer un estudio estadístico de las variaciones que pueden tener los parámetros de la máquina y como afectan estas variaciones al comportamiento transitorio de la misma; pudiendo incluirse también los errores en la determinación de los parámetros de la máquina.

También se puede hacer un estudio, usando el presente modelo, del comportamiento de la máquina en condiciones balanceadas o desbalanceadas, con diferentes tipos de carga acoplada al eje, dado que se brinda la posibilidad de programar la ecuación del torque mecánico. Esto sería muy interesanto sobre todo para el caso de alimentación monofásica.

5.3 RESTRICCIONES

El programa desarrollado sirve para calcular las variables de estado transitorio, de la máquina trifásica de inducción durante operación simétrica o asimétrica y también en ciertas condiciones de falla. Para resolver esos casos se usa el sistema de ejes arbitrarios de referencia q d o. Las restricciones del programa son:

1.- Limitación del número de pasos de integración, ya que el computador usado (Tektronix 4051) es muy lento, cada paso se ejecuta en 7 seg. y además en cada paso se almacenan datos que ocupan aproximadamente 220 bytes, y cada diskette tiene una capacidad máxima de 630 kbytes.

2.- En los casos que existen resistencias rotóricas, se fija el sistema de referencia en el rotor, y para alimentación monofásica en estator.

3.- Cuando existen resistencias rotóricas estas se conectan en Y, en otro caso las bobinas de rotor está cortocircuitadas.

4.- Para alimentación monofásica sólo se considera la conexión delta en el estator.

5.- Todos los datos de entrada y salida están dados en p.u. , y los ángulos en radianes.

A N E X O # 1

PARAMETROS DE LA MAQUINA DE INDUCCION ([4], [5], [6], [9], [14])

Los parámetros del circuito equivalente de la máquina de inducción son calculados en base a los datos obtenidos de las pruebas de vacío y del rotor bloqueado; además se midieron: la resistencia por fase del estator, la relación de espiras y la constante de inercia; además se realizaron mediciones para trazar la curva de magnetización.

La resistencia por fase del estator se midió aplicando un voltaje contínuo a una fase del estator y se tomaron valores de voltaje y de corriente. Así:

$$V_{DC} = 7.5 \text{ V}$$
$$I_{DC} = 5 \text{ A}$$

de donde se obtiene un valor de resistencia por fase del estator de:
$r_s = 1.5\ \Omega$.

De la prueba de vacío se obtuvo los siguientes datos:

$$V_L = 220 \text{ V}$$
$$I_L = 3.4 \text{ A}$$
$$P_T = 210 \text{ W}$$
$$n = 1770 \text{ r.p.m.}$$

Así mismo, de la prueba de rotor bloqueado:

$$V_L = 52.5 \text{ V}$$
$$I_L = 7\text{A}$$
$$P_T = 290 \text{ W}$$
$$n = 0 \text{ r.p.m.}$$

Con estos datos se obtuvo los siguientes resultados por fase:

$$r'_r = 4.922\ \Omega$$
$$x_{ls} = x'_{ls} = 5.81\ \Omega$$
$$x_m = 104.785\ \Omega$$

Para determinar la relación de espiras se deja el rotor en circuito abierto y se aplica al estator el voltaje trifásico nominal a la frecuencia nominal. Se mide el voltaje inducido en cada fase del rotor, y la relación de espiras es:

$$a = \frac{V_1}{V_2} \qquad \text{(A1.1)}$$

donde: V_1 es el voltaje aplicado por fase del estator.

y V_2 es el voltaje inducido en cada fase del rotor. (14)

En el laboratorio se conectó el estator en delta, mientras que el rotor lo está en estrella. Se aplicó al estator el voltaje nominal, $V_s = 220\text{V}$, y se midió el voltaje inducido entre fases del rotor, $V_r = 139$ V. De esta manera, se tendrán las siguientes relaciones:

$$V_1 = V_s = 220 \text{ V}$$

$$V_2 = \frac{V_r}{\sqrt{3}} = \frac{139}{\sqrt{3}} V$$

Por lo tanto: $$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{220}{139/\sqrt{3}} = 2.74$$

Para calcular la constante de inercia primeramente se calculó el momento de inercia, para lo que se usó el método electromecánico (4). Así:

$$J\ p\ \omega_r + A\ \omega_r^2 = 0 \qquad \text{(A1-2)}$$

siendo J el momento de inercia, p ω_r la pendiente de la parte lineal de la curva de desaceleración y A ω_r^2 la fuerza de rozamiento y fricción del aire.

Despejando de la ec. A1.2:

$$J = -\frac{A\ \omega_r^2}{p\omega_r}\ [m^2Kg] \qquad \text{(A1.3)}$$

Para determinar estos últimos valores se realizan las pruebas de vacío desacoplado y de desaceleración. La prueba de vacío desacoplado dio los siguientes resultados:

V_L [V]	I_L [A]	W_1 [W]	W_2 [W]	$P_{Fe}+P_{rot}$ [W]
220	3.4	485	275	193
200	2.85	395	205	178
180	2.6	335	158	167
160	2.3	270	113	149
140	2.0	220	71	143
120	1.75	175	38	133
100	1.55	145	15	127
80	1.5	130	5	122

TABLA A1-1

Datos de la Prueba de Vacío Desacoplado

Con los datos de la Tabla A1-1 se realizó el gráfico de la Fig. A1-1 : $P_{Fe} + P_{rot}$ Vs . V_L. Al extrapolar esta curva y determinar el punto de corte con el eje Y, se tendrá que este valor corresponde a las pérdidas rotacionales ya que en este caso las pérdidas en el hierro son cero.

Del gráfico de la Fig. A1-1 se obtiene el valor P_{rot} = 115 W.

Ahora, $$A\,\omega_r^2 = \frac{P_{rot}}{\omega_r} \quad [m^2\ Kg/seg^2] \qquad (A1.4)$$

donde ω_r = 185.35 rad/seg.

entonces $A\,\omega_r^2 = 0.62045\ [m^2\ Kg/seg^2]$

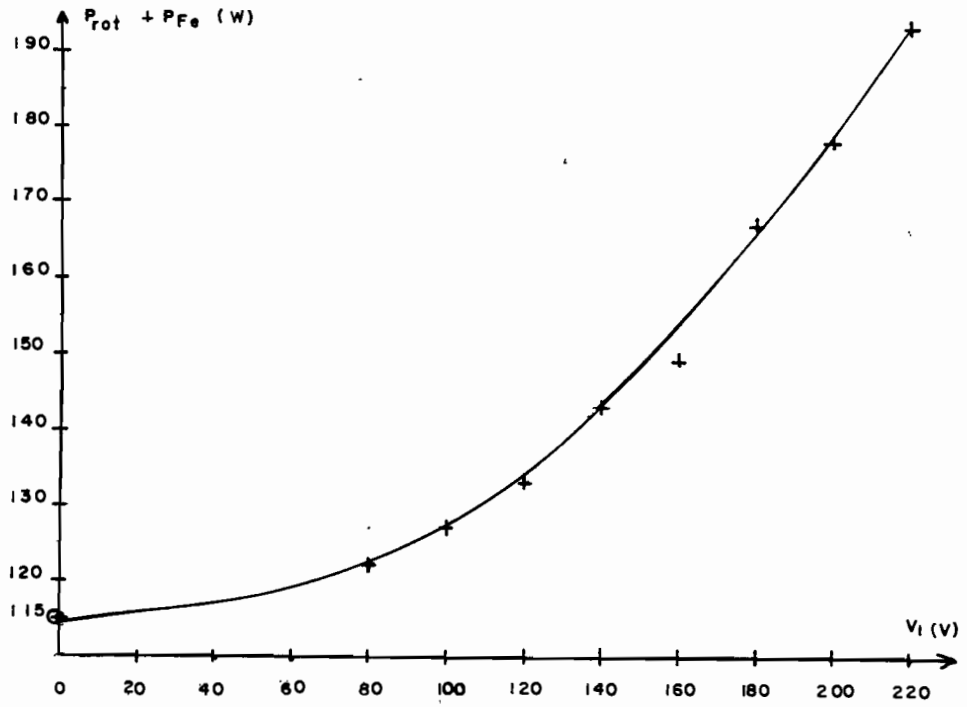


FIG. A1-1

Curva Extrapolada para Obtener las Pérdidas Rotacionales.

La prueba de desaceleración dio como resultado la Fotografía de la Fig. A1-2.

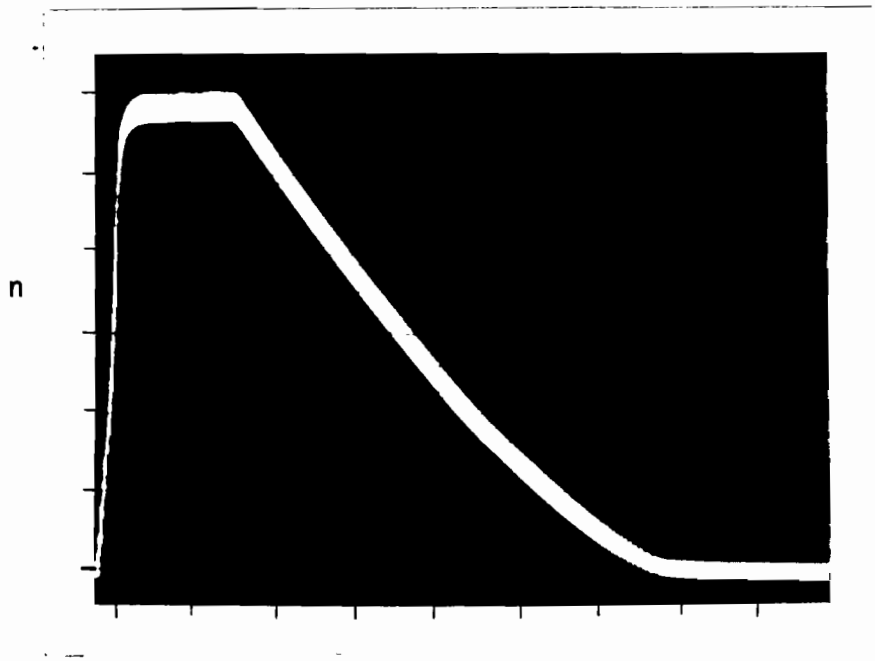


FIG. A1-2

Curva de Desaceleración.

Se obtuvo los siguientes datos, que son 2 puntos de la región lineal:

$$t_1 = 4 \text{ seg. y } \omega_1 = 154.5 \text{ rad/seg.}$$

$$t_2 = 10 \text{ seg. y } \omega_2 = 43.26 \text{ rad/seg.}$$

la pendiente de la región lineal es:

$$p\omega_r = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1} \qquad (A1.5)$$

entonces:

$$p\omega_r = -18.54 \ [\text{rad/seg}^2]$$

Ahora, de la definición del momento de inercia ec. A1-3 se obtiene:

$$J = 0.03347 \ [\text{m}^2 \text{ Kg}]$$

Finalmente, la constante de inercia se obtiene de la siguiente ecuación:

$$H = \frac{5.48 \ J \ \omega_s^2 \ 10^{-6}}{S_n} \ [\text{seg}] \qquad (A1.6)$$

donde: J: momento de inercia en Kg . m^2

ω_s: velocidad sincrónica en r.p.m.

S_n: potencia aparente nominal en KVA

siendo $S_n = 2.667$ KVA, se obtiene el valor:

$$H = 0.2235 \text{ seg.}$$

Para la determinación de la curva de magnetización se usa un procedimien

to similar al usado para medir la relación de espiras. Se toma como datos la corriente de línea del estator y el voltaje inducido entre fases del rotor, para diferentes valores de la primera. Debido a que el modelo es por fase, hay que transformar los valores medidos a valores de fase, de la siguiente manera:

$$If = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

$$Vf = \frac{Vff}{\sqrt{3}} \qquad (A1.7)$$

Seguidamente se calcula el voltaje de fase del rotor referido al estator, que se consigue multiplicando al voltaje de fase por la relación de espiras.

$$Vf' = a\ Vf \qquad (A1.8)$$

Estos resultados se encuentran en la Tabla A1-2.

I_L [A]	V_L [V]	If [A]	Vf [V]	Vf' [V]
0.2	11	0.116	6.35	17.4
0.3	15.5	0.173	8.95	24.5
0.4	20.5	0.231	11.84	32.5
0.5	26	0.289	15.0	41.1
0.6	31	0.347	17.9	49.1
0.8	41	0.462	23.7	65.0
1.0	51	0.577	29.5	80.8
1.2	58.5	0.693	33.8	92.6
1.4	66	0.808	38.1	104.4
1.6	75.5	0.924	43.6	119.5
1.8	85	1.04	49.1	134.5
2.0	93.5	1.16	54.0	148.0
2.4	110	1.39	63.5	174
2.8	125	1.62	72.2	198
3.4	140	1.96	80.8	221.4
3.8	152	2.19	87.8	240.6
4.6	160	2.66	92.4	253.2
5.4	172	3.12	99.3	272
6.2	180	3.58	103.9	284.7
7.0	186	4.04	107.4	294.3
8.0	196	4.62	113.2	310.2
9.0	203	5.2	117.2	321
10.0	207	5.8	119.5	327.5

TABLA A1-2

Curva de Magnetización

Ahora, en base a la Tabla A1-2 se calculan las concatenaciones de flujo: sin saturación y con saturación, de la siguiente forma:

$$\psi_m = If \cdot x_m \qquad (A1.9)$$

$$\psi_m^* = K \cdot Vf' \qquad (A1.10)$$

siendo x_m = 104.785 Ω y K = 0.81, que es tomado de la región lineal, en la cual se cumple que $\psi_m = \psi_m^*$.

Por último se determina Δx mediante la ec. A1.11:

$$\Delta x = \psi_m - \psi_m^* \qquad \text{(A1-11)}$$

y se presentan los resultados en p.u.

Todos estos valores mencionados se presentan en la Tabla A2-3.

ψ_m [V]	ψ_m^* [V]	Δx [V]	ψ_m^* [p.u.]	Δx [p.u.]
12.1	14.1	-	0.064	-
18.2	19.9	-	0.091	-
24.2	26.3	-	0.119	-
30.3	33.3	-	0.152	-
36.3	39.8	-	0.181	-
48.4	52.7	-	0.239	-
60.5	65.5	-	0.298	-
72.6	75.0	-	0.341	-
84.7	84.6	-	0.385	-
96.8	96.8	-	0.44	-
108.9	108.9	-	0.495	-
121.0	120	1.0	0.545	0.004545
145.2	140.9	4.3	0.641	0.0195
169.4	160.4	9.0	0.729	0.041
205.7	179.3	26.4	0.815	0.12
229.9	194.9	35.0	0.886	0.159
278.3	205.1	73.2	0.932	0.333
326.7	220.3	106.4	1.001	0.484
375.1	230.6	144.5	1.048	0.657
423.5	238.4	185.1	1.084	0.841
484.0	251.3	232.7	1.142	1.058
544.5	260	284.5	1.182	1.293
605.0	265.3	339.7	1.206	1.544

TABLA A1-3

Datos de la Curva de Magnetización.

En base a la Tabla A1-3 se obtiene la curva $\Delta x = f(\psi_m^*)$ que se encuentra en la Fig. A1-3.

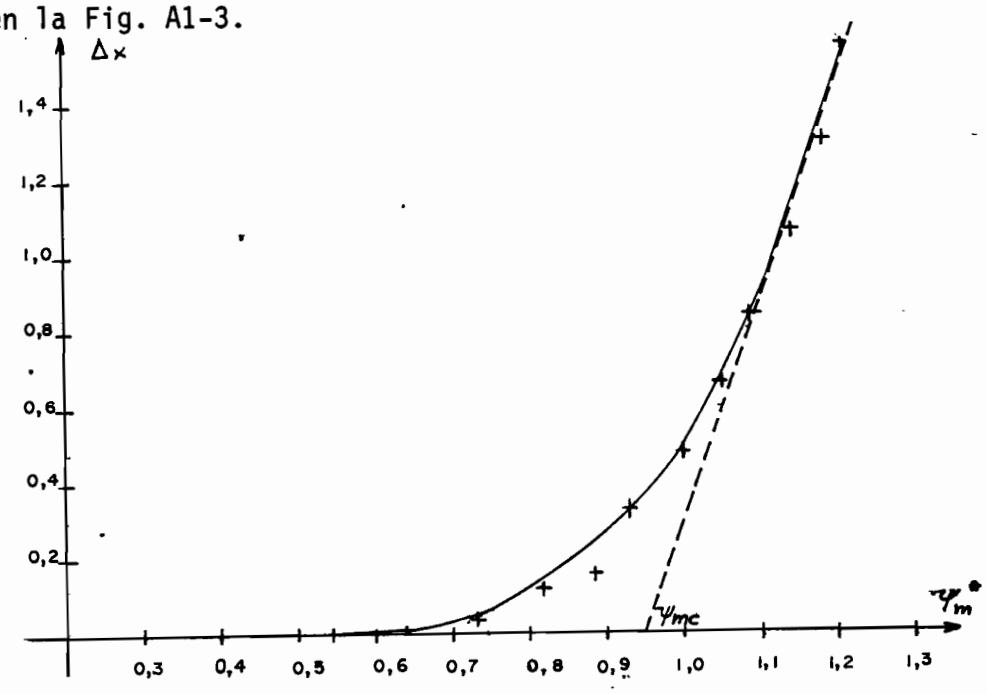


FIG. A1-3 Curva: Δx vs ψ_m^*

Aproximando la curva de la Fig. A1-3 a una recta se obtiene la función lineal:

$$\Delta x = -5.43 + 5.72 \ \psi_m^*$$

y se determina también el valor de $\psi_{mc} = 0.95$, todos estos valores en p.u.

Todos los parámetros y valores anteriormente calculados se usan como datos en la simulación digital.

A N E X O # 2

CALCULO DEL CONDENSADOR OPTIMO PARA ALIMENTACION MONOFASICA

El presente desarrollo matemático es tomado de la referencia bibliográfica # 2, pero se indican únicamente los puntos de interés para la presente modelación.

Como ya se mencionó en el Capítulo II es necesario escoger adecuadamente los condensadores para reducir al mínimo los componentes de secuencia negativa. Así, definiendo como factor de desbalance a la relación entre el módulo del voltaje de secuencia negativa y el módulo del voltaje de secuencia positiva, se tendrá que minimizar este factor para tener el mínimo desbalance. Entonces,

$$U = \frac{|V_2|}{|V_1|} \qquad \text{(A2.1)}$$

donde: U: factor de desbalance.

V_2: voltaje de secuencia negativa.

V_1: voltaje de secuencia positiva.

Recordando algunos conceptos como son: el circuito equivalente de la máquina de inducción para estado estable es el siguiente, para secuencia positiva.

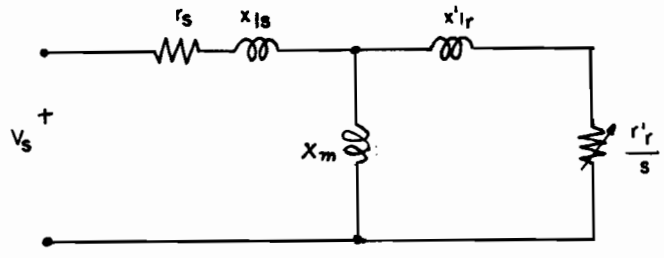


FIG. A2-1 Circuito Equivalente de Estado Estable para Secuencia Positiva.

Para secuencia negativa se tiene el mismo circuito equivalente, pero cambiando S por (2-S).

De esta forma, para un deslizamiento dado, se pueden encontrar las impedancias de secuencia positiva y negativa.

Los voltajes de secuencia están definidos de la siguiente forma:

$$\begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_0 \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{vmatrix} \qquad \text{(A2.2)}$$

donde: V_1, V_2 y V_0 son los fasores de secuencia +, - y 0.

V_{as}, V_{bs} y V_{cs} son los fasores de voltaje del estator, en estado estable.

y

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} .$$

De igual forma se cumple para las corriente. Además la relación entre

el voltaje con su correspondiente corriente está dada por:

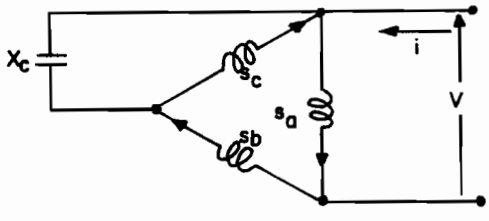
$$V_1 = Z_1 I_1$$
$$V_2 = Z_2 I_2 \qquad \text{(A2-3)}$$

Donde Z_1 y Z_2 son las impedancias de secuencia (+) y (-), calculadas del circuito equivalente para la respectiva secuencia.

Las admitancias de secuencia (+) y (-) serán:

$$Y_1 = 1/Z_1$$
$$Y_2 = 1/Z_2 \qquad \text{(A2-4)}$$

Para el caso del estator conectado en delta se tiene el siguiente diagrama de conexión:



V: voltaje aplicado

FIG. A2-2

Alimentación Monofásica: Estator en Delta.

De la Fig. A2-2 se obtienen las siguientes relaciones:

$$V_{as} - V = 0$$
$$V_{cs} - j X_c (I_{cs} - I_{bs}) = 0$$
$$V_{as} + V_{bs} + V_{cs} = 0 \qquad \text{(A2-5)}$$

Utilizando adecuadamente las ec. A2-2, A2-3, A2-4 y A2-5 se llega a las siguientes ecuaciones para los voltajes de secuencia:

$$V_1 = \frac{V(a^2 - \sqrt{3}\, X_c\, Y_2)}{-\sqrt{3}\, j - \sqrt{3}\, X_c\, (Y_1 + Y_2)} \qquad \text{(A2-6)}$$

$$V_2 = \frac{-V(a + \sqrt{3}\, X_c\, Y_1)}{-\sqrt{3}\, j - \sqrt{3}\, X_c\, (Y_1 + Y_2)} \qquad \text{(A2-7)}$$

Ahora, reemplazando en la ec. A2-1 se obtiene:

$$U = \frac{|a + \sqrt{3}\, X_c\, Y_1|}{|a^2 - \sqrt{3}\, X_c\, Y_2|} \qquad \text{(A2-8)}$$

simplificando:

$$U = \left| \frac{1 + 3X_c^2\, Y_1^2 - X_c\, Y_1\, K_1}{1 + 3X_c^2\, Y_2^2 + X_c\, Y_2\, K_2} \right|^{1/2} \qquad \text{(A2-9)}$$

donde:

$$K_1 = \sqrt{3} \cos \phi_1 + 3 \operatorname{sen} \phi_1$$
$$K_2 = \sqrt{3} \cos \phi_2 - 3 \operatorname{sen} \phi_2 \qquad \text{(A2-10)}$$

siendo ϕ_1 y ϕ_2 los argumentos de las impedancia Z_1 y Z_2.

Para el mínimo desbalance:

$$\frac{\partial U}{\partial X_c} = 0 \qquad \text{(A2-11)}$$

llegándose a la ecuación $C_1 X_c^2 + C_2 X_c + C_3 = 0$ (A2-12)

donde

$$C_1 = 3Y_1 Y_2 (Y_1K_2 + Y_2K_1)$$

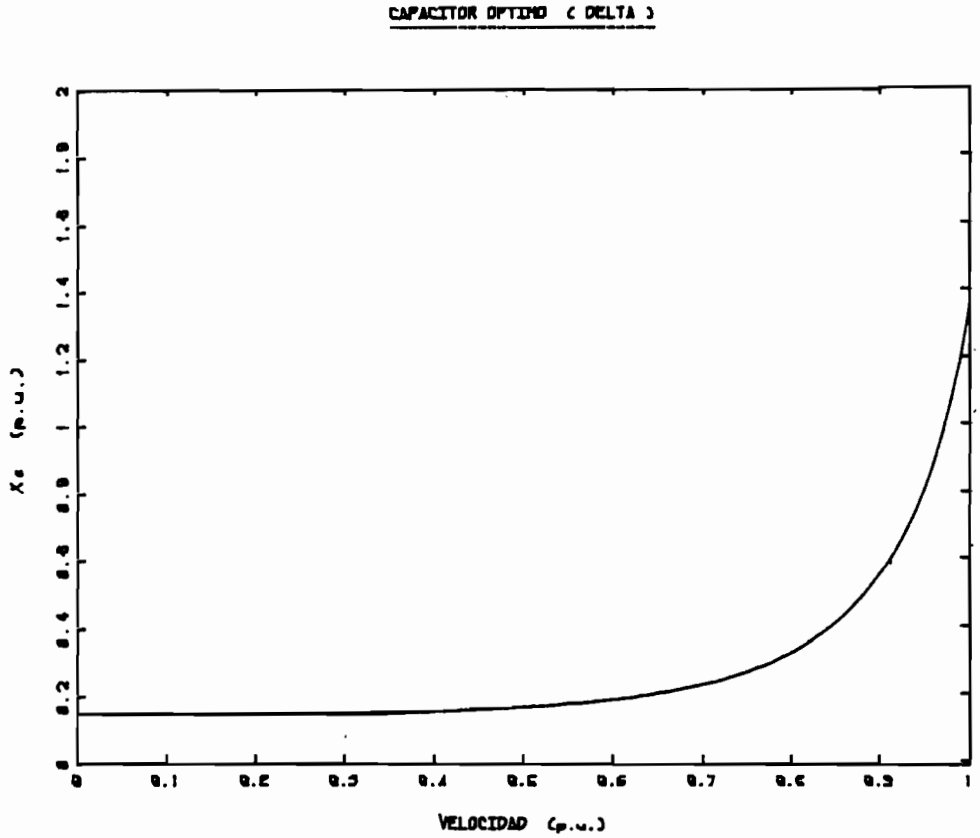
$$C_2 = 6(Y_1^2 - Y_2^2)$$

$$C_3 = - (Y_1K_1 + Y_2K_2) \qquad \text{(A2-13)}$$

Para una velocidad dada, primero se calculan las impedancias de secuencia y luego se resuelve la ec. A2-12, obteniéndose el valor de X_c para tener mínimo desbalance a esa velocidad.

Usando este procedimiento se elaboró un subprograma que calcula los valores de X_c óptimo para diferentes valores de velocidad.

Ingresando a este subprograma los parámetros de la máquina considerada, se obtuvo el siguiente resultado, graficado en la Fig. A2-3.



X_c mín = 0.157 p.u. - X_c máx = 1.57 p.u.

FIG. A2-3. CAPACITOR OPTIMO vs. VELOCIDAD (Conexión Delta)

Del gráfico de la Fig. A2-3 puede decirse que para tener mínimo desbalance todo el tiempo, es necesario un condensador variable, ajustado adecuadamente para cada valor de velocidad. Observando detenidamente esta curva, puede decirse que un mismo valor de condensador puede usarse para velocidades comprendidas entre 0 y el 80% de la nominal, luego se necesita, para valores mayores de velocidad, un mayor valor de X_C que dependerá de la velocidad requerida. Por lo tanto se puede trabajar perfectamente con 2 condensadores: uno que sirva para el arranque (bajas velocidades) y otro para estado estable (velocidades cercanas a la nominal); hay que recordar que la máquina de inducción trabaja con velocidades muy cercanas a la nominal

Para la máquina usada en las pruebas se obtiene los siguientes valores de condensadores para funcionamiento óptimo:

X_C (Arranque) = 0.137 p.u. o 355 μF

X_C (estable) = 1.37 p.u. o 35.6 μF

A N E X O # 3

EQUIPO UTILIZADO

Motor de Inducción:

Marca: CETEL BRUXELLES

Voltaje: 220/380 V — Corriente: 7/4.04 A

Conexión: Δ/Y — Frecuencia: 60 Hz

Velocidad: 1800 r.p.m. — Fases: 3

Potencia: 2 C.V. — Rotor: Bobinado

Banco Trifásico de Condensadores:

Marca: CETEL BRUXELLES

Voltaje: 220/380 V — Corriente: 5.8/3.35 A

Conexión: Δ/Y — Frecuencia: 60 Hz

Capacidad total: 117 μF

1 Banco de Condensadores: Voltaje: 220 V Capacidad: 50 μF

2 Bancos de Condensadores: Voltaje: 220 V Capacidad: 60 μF

2 Bancos de Condensadores: Voltaje: 150 V Capacidad: 40 μF

1 Autotransformador trifásico: V_{in} 240 V V_{out} 0-280V 22A

1 Equipo de Control: 2 Contactores Principales

2 Pulsantes

1 Selector

1 Relé de Tiempo

2 Resistencias 10 Ω; 5A (Desbalance de Voltajes)

3 Resistencias 3.3 Ω; 9A (Rotor)

1 Resistencia 3.3 Ω; 9A (Señal de corriente)

1 Resistencia 570 Ω; 0.9 A (Señal de velocidad)

1 Puente rectificador: 5 A (tacómetro)

1 Condensador de 250 μF; 15 V_{DC} (tacómetro)

1 Osciloscopio Teltronix 5111 con memoria

1 Osciloscopio Tektronix 564 B con memoria

1 Cámara Polaroid Teltronix C-5A para osciloscopio

1 Película Plaroid 667

1 Puente de Wheatstone LEADS and NORTHRUP # 4735

1 Tacómetro YOKOGAWA Tipo 2611

1 Multímetro Digital KEITHLEY 169

1 Voltímetro AC, clase 0.5, escalas 65, 135, 260 V

1 Amperímetro AC, clase 0.5, escalas 12, 24 A

1 Amperímetro AC, clase 0.5, escalas 0.6, 1.2, 3, 6 A

1 Voltímetro AC, clase 0.5, escalas 300, 750 V.

2 Vatímetros monofásicos: 5, 25 A; 120, 240 V; cos ϕ 0.2

A N E X O # 4

MANUAL DE USO DE LOS PROGRAMAS

1.- OBJETIVO: El programa desarrolado tiene por objeto resover las ecuaciones que rigen el comportamiento transitorio de la máquina de inducción en diferentes condiciones simétricas o asimétricas, pudiéndose estudiar el comportamiento de la máquina sin necesidad de someterla a condiciones drásticas de trabajo.

2.- METODO DE SOLUCION: Por mayor facilidad se ha representado las ecuaciones de la máquina en el sistema de coordenadas arbitrarias de referencia. Como se trata de un sistema de ecuaciones diferenciales, el método usado es el de integración numérica de Runge-Kutta de 4º Orden. Así, se resuelve las ecuaciones diferenciales en eje q d 0 y luego se transforman esos resultados a variables de fase. Los distintos casos considerados son simulados mediante la adecuada representación de los voltajes aplicados.

3.- DESCRIPCION DE LOS PROGRAMAS: Los programas han sido desarrollados en lenguaje BASIC, utilizando el minicomputador Tektronix 4051, y los resultados se grafican en el grafizador Tektronix 4662 anexo al primero.

El programa digital consta de un programa maestro que maneja a varios subprogramas que cumplen las distintas funciones: a) ingreso de datos y selección de opciones de funcionamiento, b) integración numérica, c) gráficos y d) cálculo de los condensadores óptimos para el funcionamien

to con alimentación monofásica.

Los diferentes programas están grabados en disco con las siguientes identificaciones:

Programa maestro: @NRPC/MAESTRO

Ingreso de datos y selección de opciones de funcionamiento: @NRPC/INGDAT

Integración Numérica: @ NRPC/INTNUM

Gráficos: @ NRPC/GRAFICO

Capacitor Optimo: @ NRPC/CAPOPTI

Programa Maestro.- Como ya se dijo tiene por objeto comandar a todos los subprogramas. Se hace necesario este programa por la limitada capacidad de memoria del computador usado, 32 Kbytes, entonces el programa maestro cargará en la memoria únicamente el subprograma de inmediata ocupación, y luego lo borrará. De esta manera, se tendrá la siguiente biblioteca de programas.

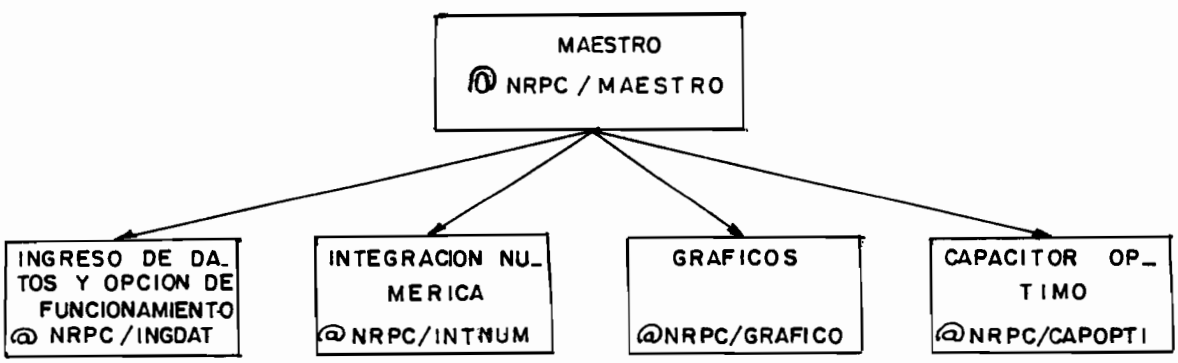


FIG. A4-1

Biblioteca de Programas

Ingreso de Datos.- En este programa se realiza el ingreso de datos, la escritura de los mismos y la selección de las opciones de funcionamiento.

Detallando las funciones:

- ingreso de parámetros de la máquina,
- del intervalo de solución,
- selección de condiciones de funcionamiento: alimentación trifásica o monofásica con o sin resitencias en el rotor.
- ingreso de X_c o de resistencia rotórica,
- selección de conexión en estator Delta / Estrella
- forma de la envolvente del $V_{aplicado}$,
- selección del sistema de referencia - estator / - rotor / - girando a ω_e
- selección de estado de funcionamiento Estado Estable / Arranque
- selección de Fallas Fase-Tierra / 2 Fases-Tierra / 3 Fases / Funcionamiento normal
- cálculo de condiciones iniciales para comenzar la integración

  Arranque / Estado Estable → Sistema Balanceado (Circuito equivalente) / Sistema Desbalanceado (Archivo de Datos)

- saturación inicial.

Integración Numérica.- Este subprograma tiene como función realizar la integración numérica de las ec. diferenciales en variables q d o, luego las transforma a valores de fase y almacena los resultados finales.

En este programa también se calculan los voltajes aplicados en cada paso de integración, se calcula voltajes y corrientes en ejes q d o y luego se transforman a variables de fase. Además se calculan torque y velocidad. Dentro de este subprograma se encuentra la subrutina que sirve para introducir la saturación.

Gráficos.- La función de este subprograma es realizar los gráficos de los datos que fueron calculados y almacenados en archivos, en el proceso de integración.

Los gráficos se realizan, como ya se dijo, en el grafizador anexo al computador o en la pantalla del mismo, y pueden ser: voltajes y corrientes de las 3 fases tanto del estator como del rotor; voltajes y corrientes en ejes q d o tanto para estator como para el rotor, además las curvas del torque y velocidad en función del tiempo y la curva torque vs. velocidad.

Capacitor Optimo.- Este subprograma calcula los valores de los condensadores apropiados para tener el mínimo desbalance de secuencia, cuando la máquina trifásica trabaja con alimentación monofásica. Los resultados se guardan en archivos y luego se grafican, usando

el mismo programa anterior pero con algunas modificaciones.

4.- NOMENCLATURA: Las variables de entrada son:

X(1) = x_{ls}

X(2) = x_{lr}

X(3) = x_m

R(1) = r_s

R(2) = r'_r

H1 = Constante de inercia.

F1 = Frecuencia de la red.

S3 = Punto de corte con el eje vertical de $\Delta x = f(\psi_m^*)$

S4 = Pendiente de la recta $\Delta x = f(\psi_m^*)$

T1 = Tiempo inicial

T2 = Tiempo final

H = Paso de integración

V9 = Voltajes aplicados

Q6 = Angulos de desfasaje de los voltajes aplicados

X(7) = Reactancia del condensador de arranque

X(8) = Reactancia del condensador de estado estable

U1, J1 = 1er. punto de la envolvente del voltaje aplicado.

U2, J2 = 2do. punto de la envolvente del voltaje aplicado.

W6 = Velocidad angular del rotor

W7 = Velocidad angular eléctrica

W8 = Velocidad angular del sistema de referencia

S = Deslizamiento

D6 = Desplazamiento angular del rotor

T = Tiempo

Y9 = Concatenaciones de flujo mutuo crítico

KO = Factor que modifica la envolvente del voltaje aplicado.

N = Número de ecuaciones diferenciales.

N1 = Número de variables de salida.

H6 = Unidad de impresión de resultados.

T7 = Tiempo de falla.

A4 = Angulo de falla.

A6 = Angulo de conexión en el arranque.

T8 = Torque mecánico.

D$ = Nombre del archivo de condiciones finales.

O$ = Nombre del archivo de datos.

Las variables de salida se encuentran en un vector W y son respectivamente:

W (1, 2, 3) = Corrientes a b c del estator.

W (4, 5, 6) = Voltajes a b c del estator.

W (7, 8, 9) = Corrientes a b c del rotor referidas al estator.

W (10,11,12) = Voltajes a b c del rotor referidos al estator.

W (13) = Torque electromagnético.

W (14) = Velocidad.

W (15, 16) = Corrientes q d del estator.

W (17, 18) = Corrientes q d del rotor referidas al estator.

W (19, 20) = Voltajes q d del estator.

W (21,22) = Voltajes q d del rotor referidas al estator.

W (23) = Torque mecánico

RO = Número de puntos para el gráfico.

W1 = Vector que contiene los valores mínimos de todas

las variables

W2 = Vector que contiene los valores máximos de todas las variables.

T = Tiempo

T1 = Tiempo mínimo

T2 = Tiempo máximo

U3 = Unidad para gráficos de resultados.

Otras Variables:

Y = Concatenaciones de flujo

D = Derivadas de las concatenaciones de flujo

Y7 = Concatenaciones de flujo mutuo en eje q

Y8 = Concatenaciones de flujo mutuo en eje d

W4 = Corrientes en ejes q d, tanto de estator como de rotor

H7 = Unidad donde está el disco de datos

H8 = Unidad donde está el disco de programas

Indicadores:

M7	1	alimentación trifásica
	2	alimentación monofásica
M6	1	estator conectado en Delta
	2	estator conectado en Estrella
I9	1	sin resistencias rotóricas
	2	con resistencias rotóricas

I8	1	Sistema de referencia fijo en estator
	2	Sistema de referencia fijo en rotor
	3	Sistema de referencia girando a la velocidad sincrónica
E5	1	Arranque
	2	Estado estable
I7	1	Falla fase-tierra
	2	Falla 2 fases-tierra
	3	Falla trifásica

5.- FORMA DE PROPORCIONAR LOS DATOS AL PROGRAMA: Debido a que el programa está desarrollado en BASIC, no se tiene ninguna modalidad especial para el ingreso de datos, respectando por supuesto los protocolos de este lenguaje.

El programa es de tipo interactivo, por lo tanto, el usuario deberá, proporcionar los datos cuando se indique en la pantalla. Todos los datos deben estar en p.u., y los ángulos en radianes.

6.- FORMA DE UTILIZAR EL PROGRAMA:

6.1.- Encienda el equipo, de acuerdo a los procedimientos establecidos para el efecto.

6.2.- Coloque el disco en cualquiera de las unidades.

6.3.- Cargue el disco en el sistema con las siguientes instrucciones:

a) CALL "UNIT", U presione RETURN

b) CALL "MOUNT", U, X$ presione RETURN

Siendo U el número de la unidad donde colocó el disco.

6.4.- Cargue a la memoria del computado el program maestro, mediante la instrucción:

OLD "@NRPC/MAESTRO" presione RETURN

6.5.- Ejecute el programa con la instrucción:

RUN presione RETURN

6.6.- Siga las instrucciones que aparecen en la pantalla.

6.7.- Para obtener los datos en papel deberá encender previamente el impresor.

6.8.- Para realizar los gráficos en papel, deberá encender el grafizador, colocar papel y pluma, luego debe fijar los límites del tamaño del gráfico con las teclas SET, y por último debe efectuar las operaciones que se indique en la pantalla.

7.- RESTRICCIONES: El programa presenta las siguientes restricciones:

- limitado número de pasos de integración, ya que en cada paso se demora 7 seg., y además almacena datos que ocupan 220 bytes aproximadamente (capacidad del disco es 630 kbytes).
- para alimentación monofásica se fija el sistema de referencia en el estator.

- cuando existen resistencias rotóricas se fija el sistema en rotor.
- para alimentación monofásica el estator se conecta en delta.
- todos los datos de entrada y salida están en p.u.
- todos los ángulos están en radianes.

8.- EJEMPLO: Se modela una falla Fase-Tierra, utilizando el modelo no saturado. El proceso seguido es así:

- de acuerdo a las instrucciones dadas en el numeral 6, se carga el programa maestro.
- se escoge el programa de ingreso de datos, tecla 2.
- se ingresan los parámetros de la máquina (en p.u.) y los datos de la curva de saturación (en p.u.), para el modelo no saturado se hacen cero estos valores.
- se ingresa el intervalo de solución (en seg.).
- se escoge como condiciones de funcionamiento, alimentación trifásica (opción 1).
- se ingresan los voltajes aplicados, módulos en p.u. y ángulos en rad.
- se ensoge el tipo de conexión delta en estator(opción 1).
- se responde que la envolvente del voltaje aplicado no es de la forma indicada en la pantalla.
- se responde que no existen resistencias rotóricas.
- se escoge el sistema de referencia girando a la velocidad sincrónica ω_s (opción 3).
- se parte de estado estable por lo que se escoge la opción 2.
- se ingresa el valor del deslizamiento.
- se obtienen los valores del estado estable y debe decidirse si el torque es el adecuado o no, se contesta "si".

- se responde que si existe pertubación.
- se selecciona la falla Fase-Tierra (opción 1).
- se selecciona el ingreso del ángulo de falla como dato (opción 2).
- se ingresa el valor del ángulo de falla (en rad.).
- una vez concluido el ingreso de datos se presiona la tecla 3, para continuar con la integración numérica.
- se escoge la unidad donde se encuentra el disco de datos.
- se programa la línea 1090 que es la ecuación del torque mecánico en función de la velocidad. Para continuar se debe presionar la tecla 9.
- se ingresa el nombre del archivo en el que se almacenarán los datos.
- una vez concluido el proceso de integración y almacenamiento se presiona la tecla 4 para realizar los gráficos.
- se presiona la techa 20 para ingresar el nombre del archivo de datos.
- se ingresa la unidad donde está el disco de datos.
- se ingresa el nombre del archivo de datos.
- se selecciona la curva requerida, para este ejemplo se ha tomado la opción 1.
- se ingresa los límites del gráfico, la separación entre marcas en los ejes, el título del gráfico, la variable en el eje vertical.
- se desea gráfico en papel?, se responde "si" y aparece la leyenda "ALISTE EL GRAFIZADOR"; es necesario prenderlo, luego fijar los límites del gráfico con las teclas SET, poner pluma y papel.
- se presiona la tecla "RETURN" para ejecutar el gráfico. Una vez concluido el gráfico se ingresa, si se desea, leyendas, o si se quiere también puede repetirse el gráfico. Para realizar otro gráfico se presiona la tecla 10.

En las siguientes páginas se encuentran las hojas de datos y los gráficos obtenidos para el presente ejemplo. Los gráficos de las Fig. A4 - 2 y A4-3 representan las corrientes de las líneas "a" y "b" del estator.

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
ELECTRONICA Y CONTROL

OPERACION ASIMETRICA DE LA MAQUINA
TRIFASICA DE INDUCCION FECHA: 03-AUG-95 13:53:34

CASO SIMULADO: FALLA FASE-TIERRA MODELO NO SATURADO

*** PARAMETROS DE LA MAQUINA ***
(valores en p.u.)

REACTANCIA DEL ESTATOR:	X(1)= 0.1067
REACTANCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:	X(2)= 0.1067
REACTANCIA MUTUA:	X(3)= 1.9242
RESISTENCIA DEL ESTATOR:	R(1)= 0.0276
RESISTENCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:	R(2)= 0.0904
CONSTANTE DE INERCIA:	H1= 0.2235
FRECUENCIA DE LA RED:	F1= 60

* PARAMETROS DE LA CURVA DE SATURACION: *
Dx vs. Fm (sat)

CONCATENACIONES DE FLUJO MUTUO CRITICO:	Y6= 0
PUNTO DE CORTE CON EL EJE VERTICAL:	S3= 0
PENDIENTE DE LA RECTA:	S4= 0

*** INTERVALO DE SOLUCION ***
(en ses.)

TIEMPO INICIAL:	T1= 0
TIEMPO FINAL:	T2= 0.2
PASO DE INTEGRACION:	H= 1.0E-3

Pasos 200 - Tejec. 1400 ses. - Long. Arch. 44200 bytes

* ALIMENTACION TRIFASICA *
VOLTAJES DE LINEA APLICADOS:
(SECUENCIA POSITIVA: V1,V2,V3)

	MODULO (p.u.)	ANGULO DE DESFASAJE (rad.)
V1	V9(1)=0.95	Q6(1)=0
V2	V9(2)=0.95	Q6(2)=-2.094395
V3	V9(3)=0.95	Q6(3)=2.094395

* VOLTAJES DE LINEA BALANCEADOS *

* CONEXION TIPO DELTA EN ESTATOR *

*** SISTEMA DE EJES GIRANDO A ws ***

*** SISTEMA BALANCEADO ***

```
  ***   CONDICIONES INICIALES DE ESTADO ESTABLE    ***
                *  SISTEMA BALANCEADO  *
 DESLIZAMIENTO:          S= 0.016
 TIEMPO:                 T= 0
                          MAGNITUD            ANGULO
 CORRIENTE DE ESTATOR:   Is= 0.49657e848e97   a7=-1.23827913713
 CORRIENTE DE ROTOR:     Ir= 0.1e4399210904   A8=-3.1660307ec15
 CORRIENTES EN EJES q,d (s,r):
  0.16209          0.46938         -0.16435         -0.00402
 TORQUE MECANICO T8= : 0.14718372S273

 *  FALLA FASE-TIERRA  *
 ANGULO DE FALLA:  A4= -1.047

 *  EC. DEL TORQUE (T8) EN FUNCION DE LA VELOC. (We)  *
1090 T8=0.147


 NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS:  @FALLA/MCNNOSAT
```

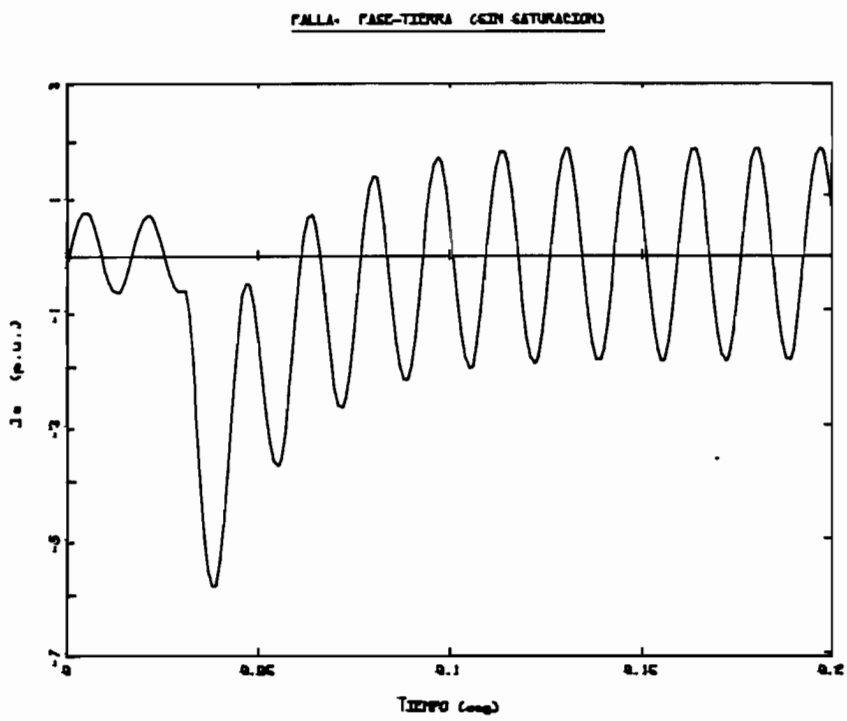


FIG. A4-2

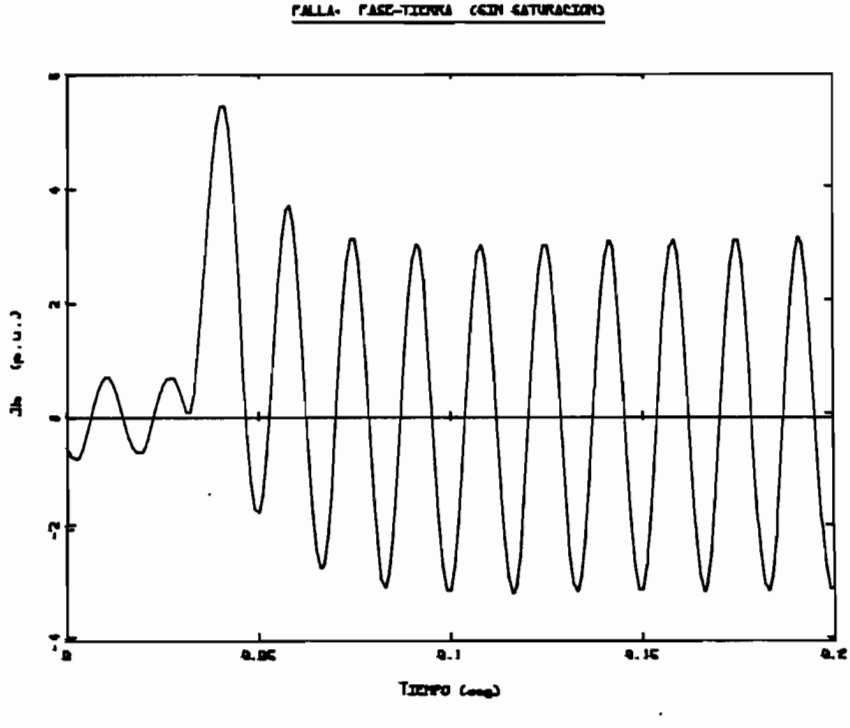


FIG. A4-3

```
2 H8=-1
3 S2=0
4 GO TO 100
8 IF S2=1 THEN 1000
9 S1=1
10 GO TO 570
12 IF S2=2 THEN 1000
13 S1=2
14 GO TO 570
16 IF S2=3 THEN 1000
17 S1=3
18 GO TO 570
20 IF S2=4 THEN 1000
21 S1=4
22 GO TO 570
24 GO TO 1290
28 IF M7=1 THEN 2680
29 GO TO 2160
32 GO TO 3730
36 GO TO 1110
40 GO TO 1190
44 GO TO 1090
48 GO TO 2350
52 GO TO 1260
80 GO TO 1060
100 REM
110 REM      *****      PROGRAMA MAESTRO:  @NRPC/MAESTRO       *****
120 REM
130 REM                    ESCUELA  POLITECNICA  NACIONAL
140 REM                FACULTAD  DE  INGENIERIA  ELECTRICA
150 REM                      ELECTRONICA  Y  CONTROL
160 REM
170 REM                OPERACION ASIMETRICA DE LA MAQUINA
180 REM                      TRIFASICA DE INDUCCION
190 REM                ------------------------------------
200 REM
210 REM                          TESIS  DE  GRADO
220 REM
230 REM                       NELSON RUBEN PONCE CARRERA
240 REM
250 REM                              JULIO - 1985
260 REM
270 REM           ********************************************
280 REM
290 REM      *****      CARGA DE DISCO DE PROGRAMAS      *****
300 IF H8<>-1 THEN 360
310 PRINT "LUG  UNIDAD DONDE ESTA EL DISCO DE PROGRAMAS:  ";
320 INPUT H8
330 IF H8=0 OR H8=1 OR H8=2 THEN 350
340 GO TO 310
350 CALL "UNIT",H8
360 REM
```

```
470 REM      *****      INDICE DE PROGRAMAS      *****
480 CALL "TIME",H$
490 PRINT "L  ESCUELA POLITECNICA NACIONAL'
500 PRINT '  FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA"
510 PRINT "  ELECTRONICA Y CONTROL"
520 PRINT "J  OPERACION ASIMETRICA DE LA MAQUINA'
530 PRINT '          TRIFASICA DE INDUCCION';"              FECHA: ";H$
540 PRINT "  ==========================================================$"
550 PRINT "============"
560 PRINT "JJJ  TECLA 1  ----->  INDICE DE PROGRAMAS"
570 PRINT "  TECLA 2  ----->  INGRESO DE DATOS"
580 PRINT "  TECLA 3  ----->  INTEGRACION NUMERICA"
590 PRINT "  TECLA 4  ----->  GRAFICOS"
600 PRINT "  TECLA 5  ----->  CAPACITOR OPTIMO     (Alim. monofásica)"
610 PRINT "                   (cálculos y gráficos)"
620 PRINT "JJJGI Seleccione opción."
630 END
640 REM      *****      SELECCION DE PROGRAMAS      *****
650 PAGE
660 DATA "@NRPC/INGDAT","@NRPC/INTNUM","@NRPC/GRAFICO",'@NRPC/CAPOPTI"
665 DATA "@PONCE/CAPOPTI"
670 RESTORE 660
680 FOR J=1 TO S1
690 READ X$
700 NEXT J
710 S2=S1
720 DELETE 1001-10000
730 J=MEMORY
740 APPEND X$,1000
750 GO TO 1000
800 REM      *****      CARGA DE DISCO DE DATOS      *****
810 PRINT "LJJS  UNIDAD DONDE ESTA EL DISCO DE DATOS:  ";
820 INPUT H7
830 IF H7=0 OR H7=1 OR H7=2 THEN 850
840 GO TO 810
850 CALL "MOUNT",H7,X$
860 CALL "UNIT",H7
870 RETURN
900 REM      *****      CARGA DEL PROGRAMA      *****
```

```
1000 REM      *****      INGRESO DE DATOS:  "@NRPC/INGDAT"      *****
1010 PRINT "LJ  INGRESE TITULO DEL CASO SIMULADO:  G"
1020 INPUT T$
1030 DELETE X,R
1040 DIM X(8),R(6)
1050 PRINT "J  INGRESO DE PARAMETROS DE LA MAQUINA:"
1060 PRINT "J   (valores en p.u.)  GG"
1070 PRINT "  REACTANCIA DEL ESTATOR:  X(1)=";
1080 INPUT X(1)
1090 PRINT "  REACTANCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:  X(2)=";
1100 INPUT X(2)
1110 PRINT "  REACTANCIA MUTUA:  X(3)=";
1120 INPUT X(3)
1130 PRINT "  RESISTENCIA DEL ESTATOR:  R(1)=";
1140 INPUT R(1)
1150 PRINT "  RESISTENCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:  R(2)=";
1160 INPUT R(2)
1170 PRINT "  CONSTANTE DE INERCIA:  H1=";
1180 INPUT H1
1190 PRINT "  FRECUENCIA DE LA RED:  F1=";
1200 INPUT F1
1210 PRINT "J  PARAMETROS DE LA CURVA DE SATURACION:"
1220 PRINT "              Dx  vs.  Fm (sat)"
1230 PRINT "  CONCATENACIONES DE FLUJO MUTUO CRITICO:  Y6= ";
1240 INPUT Y6
1250 PRINT "  PUNTO DE CORTE CON EL EJE VERTICAL:      S3= ";
1260 INPUT S3
1270 PRINT "  PENDIENTE DE LA RECTA:                   S4= ";
1280 INPUT S4
1290 PAGE
1300 H6=32
1310 GOSUB 1520
1320 PRINT "JJI Son los datos correctos?  (si/no)  G";
1330 INPUT X$
1340 IF X$="S" OR X$="SI" THEN 1380
1350 PRINT "J  ====>   INGRESE LA VARIABLE CON EL DATO CORRECTO,  G"
1360 PRINT "J1 PARA CONTINUAR, PRESIONE TECLA 6.   G"
1370 END
1380 REM      IMPRESION DE PARAMETROS EN PRINTER
1390 H6=51
1400 CALL "TIME",H$
1410 GOSUB 1430
1420 GO TO 1670
1430 REM      IMPRESION DE PARAMETROS DE LA MAQUINA
1440 PRINT @H6:"LJJ  ESCUELA POLITECNICA NACIONAL"
1450 PRINT @H6:"  FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA"
1460 PRINT @H6:"  ELECTRONICA Y CONTROL "
1470 PRINT @H6:"J  OPERACION ASIMETRICA DE LA MAQUINA"
1480 PRINT @H6:"         TRIFASICA DE INDUCCION";"              FECHA: ";H$
1490 PRINT @H6:"  ==========================================================";
1500 PRINT @H6:"=============="
1510 PRINT @H6:"J  CASO SIMULADO:  ";T$
1520 PRINT @H6:"J         ***   PARAMETROS DE LA MAQUINA   ***"
1530 PRINT @H6:"                    (valores en p.u.)"
```

```
1540 PRI @H6:"  REACTANCIA DEL ESTATOR:                          X(1)= ";X(1)
1550 PRI @H6:"  REACTANCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:        X(2)= ";X(2)
1560 PRI @H6:"  REACTANCIA MUTUA:                               X(3)= ";X(3)
1570 PRI @H6:"  RESISTENCIA DEL ESTATOR:                        R(1)= ";R(1)
1580 PRI @H6:"  RESISTENCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:      R(2)= ";R(2)
1590 PRINT @H6:"  CONSTANTE DE INERCIA:                             H1= ";H1
1600 PRINT @H6:"  FRECUENCIA DE LA RED:                             F1= ";F1
1610 PRINT @H6:"J          *  PARAMETROS DE LA CURVA DE SATURACION:  * "
1620 PRINT @H6:"                        Dx  vs.  Fm (set)"
1630 PRINT @H6:"  CONCATENACIONES DE FLUJO MUTUO CRITICO:          Y6= ";Y6
1640 PRINT @H6:"  PUNTO DE CORTE CON EL EJE VERTICAL:              S3= ";S3
1650 PRINT @H6:"  PENDIENTE DE LA RECTA:                           S4= ";S4
1660 RETURN
1670 REM
1680 PRINT "LJJ  ***  INTERVALO DE SOLUCION  ***"
1690 PRINT "             (en ses.)"
1700 T1=0
1710 PRINT "J  TIEMPO INICIAL:  T1=";T1
1720 PRINT "J  TIEMPO FINAL:  T2=";
1730 INPUT T2
1740 PRINT "J  PASO DE INTEGRACION:  H=";
1750 INPUT H
1760 PRINT "JJI Existen ";T2/H;" pasos de integración.  G"
1770 PRINT "JI T ejecución =";7*T2/H;" ses."
1780 PRINT "JI Longitud del archivo de datos = ";T2/H*216+1000;" bytes"
1790 PRINT "JJI Son los datos correctos?  (si/no)  G";
1800 INPUT X$
1810 IF X$="S" OR X$="SI" THEN 1830
1820 GO TO 1680
1830 PAGE
1840 REM      IMPRESION DE DATOS EN EL PRINTER
1850 PRINT @H6:"J         ***   INTERVALO DE SOLUCION   ***"
1860 PRINT @H6:"                      (en ses.)"
1870 PRINT @H6:"  TIEMPO INICIAL:          T1= ";T1
1880 PRINT @H6:"  TIEMPO FINAL:            T2= ";T2
1890 PRINT @H6:"  PASO DE INTEGRACION:      H= ";H
1900 PRI @H6:"J  Pasos  ";T2/H;"  -  ";"Tejec. ";T2/H*7;" ses.  -  Lon";
1910 PRINT @H6:"s. Arch. ";216*T2/H+1000;" bytes"
1920 REM
1930 P6=2*PI/3
1940 W7=2*PI*F1
1950 H2=H/(2*H1)
1960 REM      SELECCION DE CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO
1970 PRINT "JJ  ***  CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO  ***"
1980 PRINT "JJ  ALIMENTACION TRIFASICA ----  1"
1990 PRINT "JJ  ALIMENTACION MONOFASICA ---  2"
2000 PRINT "JJI Seleccione opción:  G";
2010 INPUT M7
2020 IF M7=1 THEN 2560
2030 IF M7=2 THEN 2050
2040 GO TO 1960
2050 PRINT "JJ  *  ALIMENTACION MONOFASICA  *  "
2060 PRINT "JJ  VOLTAJE APLICADO:  (valor en p.u.) "
2070 DELETE 99
```

```
080 PRINT "JJI V9= ";
090 INPUT V9
100 M$="DESBALANCEADOS"
110 N$="DESBALANCEADO"
120 PRINT "J  REACTANCIA DEL CAPACITOR DE ARRANQUE (en p.u.):  X(7)= ";
130 INPUT X(7)
140 PRINT "J  REACTANCIA CAPACITOR DE EST. ESTABLE (en p.u.):  X(8)= ";
150 INPUT X(8)
160 PAGE
170 H6=32
180 GOSUB 2290
190 PRINT "JJI Son los datos correctos?  (si/no)  G";
200 INPUT X$
210 IF X$="S" OR X$="SI" THEN 2250
220 PRINT "J  ====>   INGRESE LA VARIABLE CON EL DATO CORRECTO.  G"
230 PRINT "JI PARA CONTINUAR, PRESIONE TECLA 7.   G"
240 END
250 REM     IMPRESION DE DATOS EN EL PRINTER
260 H6=51
270 GOSUB 2290
280 GO TO 2340
290 PRINT @H6:"J          *  ALIMENTACION MONOFASICA  *  "
300 PRINT @H6:"J  VOLTAJE APLICADO (en p.u.):  V9= ";V9
310 PRI @H6:"  REACTANCIA CAPACITOR DE ARRANQ. (en p.u.):  X(7)= ";X(7)
320 PRI @H6:"  REACTANCIA CAP. DE EST. ESTAB. (en p.u.):  X(8)= ";X(8)
330 RETURN
340 M6=1
350 I8=1
360 I9=1
370 GOSUB 2480
380 GO TO 3000
390 REM     SELECCION DE TIPO DE CONEXION DEL ESTATOR
400 PRINT "JJ  *  TIPO DE CONEXION DEL ESTATOR  *"
410 PRINT "J  DELTA ------- (1)"
420 PRINT "J  ESTRELLA --- (2)"
430 PRINT "JJI SELECCIONE OPCION:  G";
440 INPUT M6
450 PAGE
460 IF M6=1 OR M6=2 THEN 2480
470 GO TO 2400
480 PRINT @H6:"J          *  VOLTAJES DE LINEA ";M$;"  *  "
490 GO TO M6 OF 2500,2530
500 PRINT "J  *  CONEXION TIPO DELTA EN ESTATOR  *"
510 PRINT @H6:"J          *  CONEXION TIPO DELTA EN ESTATOR  *"
520 GO TO 2550
530 PRINT "J  *  CONEXION TIPO ESTRELLA EN ESTATOR  *"
540 PRINT @H6:"J          *  CONEXION TIPO ESTRELLA EN ESTATOR  *"
550 RETURN
560 PRINT "LJJ  *  ALIMENTACION TRIFASICA  *"
570 PRINT "J  VOLTAJES DE LINEA APLICADOS: "
580 PRINT "J  (SECUENCIA POSITIVA: V1,V2,V3)"
590 PRINT "JI MODULO (p.u.)","  ANGULO DE DESFASAJE (rad.)"
600 DELETE V9,Q6
610 DIM V9(3),Q6(3)
```

```
2620 FOR I=1 TO 3
2630 PRINT "J          V";I;"I V9(";I;")=";
2640 INPUT V9(I)
2650 PRINT "KII Q6(";I;")=";
2660 INPUT Q6(I)
2670 NEXT I
2680 PAGE
2690 H6=32
2700 GOSUB 2780
2710 PRINT "JJ  Son los datos correctos?  (si/no)   G";
2720 INPUT X$
2730 IF X$="S" OR X$="SI" THEN 2870
2740 PRINT "I INGRESE LOS DATOS CORRECTOS.  GG"
2750 PRINT "I PARA CONTINUAR, TECLA 7. "
2760 END
2770 REM      IMPRESION DE DATOS EN EL PRINTER
2780 PRINT @H6:"J           *  ALIMENTACION TRIFASICA  *"
2790 PRINT @H6:"  VOLTAJES DE LINEA APLICADOS: "
2800 PRINT @H6:"  (SECUENCIA POSITIVA: V1,V2,V3)"
2810 PRINT @H6: USING 2820:
2820 IMAGE18X"MODULO (p.u.)"5X"ANGULO DE DESFASAJE (rad.)"
2830 FOR I=1 TO 3
2840 PRINT @H6:"          V";I,"V9(";I;")=";V9(I),"Q6(";I;")=";Q6(I)
2850 NEXT I
2860 RETURN
2870 H6=51
2880 GOSUB 2780
2890 IF ABS(V9(1)-V9(2))<=1.0E-3 AND ABS(V9(1)-V9(3))<=1.0E-3 THEN 2930
2900 M$="DESBALANCEADOS"
2910 N$="DESBALANCEADO"
2920 GO TO 2990
2930 IF ABS(Q6(1))<=1.0E-3 AND ABS(Q6(2)+P6)<=1.0E-3 THEN 2950
2940 GO TO 2900
2950 IF ABS(Q6(3)-P6)<=1.0E-3 THEN 2970
2960 GO TO 2900
2970 M$="BALANCEADOS"
2980 N$="BALANCEADO"
2990 GOSUB 2400
3000 REM      ENVOLVENTE DEL VOLTAJE APLICADO
3010 PAGE
3020 VIEWPORT 40,100,65,100
3030 WINDOW 0,8,0,6
3040 AXIS 9,9,0,0
3050 MOVE 0,3
3060 DRAW 3,3
3070 DRAW 5,5
3080 DRAW 7,5
3090 MOVE 8,-0.22
3100 PRINT ">"
3110 MOVE -0.08,6
3120 PRINT "^"
3130 MOVE -1.8,6
3140 PRINT "V(p.u.)"
3150 MOVE 7.3,-0.6
```

```
3160 PRINT "T (seg.)"
3170 MOVE -0.6,2.75
3180 PRINT "V1"
3190 MOVE 0,5
3200 DRAW 0.15,5
3210 MOVE -0.6,4.75
3220 PRINT "V2"
3230 MOVE 3,0
3240 DRAW 3,0.25
3250 MOVE 2.8,-0.7
3260 PRINT "T1"
3270 MOVE 5,0
3280 DRAW 5,0.25
3290 MOVE 4.8,-0.7
3300 PRINT "T2"
3310 PRINT "JJG  ES LA ENVOLVENTE DEL VOLTAJE DE ESA FORMA? (S/N) ";
3320 INPUT X$
3330 IF X$="S" OR X$="SI" THEN 3350
3340 GO TO 3530
3350 PRINT "J  INGRESE LOS VALORES:  V1, V2, T1 y T2"
3360 PRINT "J V1=";
3370 INPUT U1
3380 PRINT "KI V2=";
3390 INPUT U2
3400 PRINT "KII T1=";
3410 INPUT J1
3420 PRINT "KIII T2=";
3430 INPUT J2
3440 PRINT "JG  SON LOS DATOS CORRECTOS?  (S/N) ";
3450 INPUT X$
3460 IF X$="S" OR X$="SI" THEN 3480
3470 GO TO 3350
3480 REM      ENVOLVENTE SI ES DE ESA FORMA
3490 PRINT @H6:"J           *  DATOS DE LA ENVOLVENTE:   "
3500 PRINT @H6:"              (V en p.u. y T en seg.)"
3510 PRINT @H6: USING 3520:U1,U2,J1,J2
3520 IMAGE2X"V1="2D.4D6X"V2="2D.4D6X"T1="2D.4D5X"T2="2D.4D
3530 REM      ENVOLVENTE NO ES DE ESA FORMA
3540 U1=1
3550 U2=1
3560 J1=0
3570 J2=1
3580 GO TO M7 OF 3590,4100
3590 PAGE
3600 PRI "JJJ  ESTAN CONECTADAS RESISTENCIAS EXTERNAS AL ROTOR? (si/no)"
3610 INPUT X$
3620 IF X$="SI" OR X$="S" THEN 3640
3630 GO TO 3980
3640 DELETE R1,R2
3650 DIM R1(3),R2(3)
3660 I9=2
3670 PRINT "JJ  *  RESISTENCIAS EXTERNAS CONECTADAS AL ROTOR  *"
3680 PRINT "  VALORES DE LAS RESISTENCIAS (en p.u.):"
3690 FOR J=1 TO 3
```

```
3700 PRINT "J    R1("#J#")= "#
3710 INPUT R1(J)
3720 NEXT J
3730 PAGE
3740 H6=32
3750 GOSUB 3820
3760 PRINT "JJI Son los datos correctos?  (si/no)  G"#
3770 INPUT X$
3780 IF X$="S" OR X$="SI" THEN 3870
3790 PRINT "J  ====>   INGRESE LA VARIABLE CON EL DATO CORRECTO.  G"
3800 PRINT "JI PARA CONTINUAR, PRESIONE TECLA 8.   G"
3810 END
3820 PRI @H6;"J          * RESISTENCIAS EXTERNAS CONECTADAS AL ROTOR *"
3830 PRINT @H6;"                        (valores en P.U.)"
3840 PRINT @H6; USING 3850;R1
3850 IMAGE 2X"R1(1)="2D.5D5X"R1(2)="2D.5D5X"R1(3)="2D.5D
3860 RETURN
3870 H6=51
3880 GOSUB 3820
3890 IF R1(1)=R1(2) AND R1(1)=R1(3) AND N$="BALANCEADO" THEN 3920
3900 N$="DESBALANCEADO"
3910 GO TO 3930
3920 N$="BALANCEADO"
3930 I8=2
3940 R2(1)=(4*R1(1)+R1(2)+R1(3))/6
3950 R2(2)=0.5*(R1(2)-R1(3))/SQR(3)
3960 R2(3)=0.5*(R1(2)+R1(3))
3970 GO TO 4140
3980 I9=1
3990 REM      SELECCION DE REFERENCIA DEL SISTEMA DE EJES
4000 PRINT "JJ  SELECCIONE REFERENCIA DEL SISTEMA DE EJES"
4010 PRINT "J  SISTEMA DE EJES FIJO EN ESTATOR  (1)"
4020 PRINT "J  SISTEMA DE EJES FIJO EN ROTOR    (2)"
4030 PRINT "J  SISTEMA DE EJES GIRANDO A Ws     (3)"
4040 PRINT "JJI Seleccione opción;  G"#
4050 INPUT I8
4060 IF I8=1 THEN 4100
4070 IF I8=2 THEN 4140
4080 IF I8=3 THEN 4170
4090 GO TO 3990
4100 W8=0
4110 PRINT @H6;"J        ***   SISTEMA DE EJES FIJO EN ESTATOR   ***"
4120 PRINT "J  ***  SISTEMA DE EJES FIJO EN ESTATOR  ***"
4130 GO TO 4200
4140 PRINT @H6;"J        ***   SISTEMA DE EJES FIJO EN ROTOR   ***"
4150 PRINT "J  ***  SISTEMA DE EJES FIJO EN ROTOR  ***"
4160 GO TO 4200
4170 W8=W7
4180 PRINT @H6;"J        ***  SISTEMA DE EJES GIRANDO A Ws   ***"
4190 PRINT "J  ***  SISTEMA DE EJES GIRANDO A Ws  ***"
4200 IF M7=1 THEN 4230
4210 N=5
4220 GO TO 4240
4230 N=4
```

```
4240 N1=23
4250 DELETE W,W1,W2,W4,D,Y,Z,F
4260 DIM W(N1),W1(N1),W2(N1),W4(4),D(N),Y(N),Z(N),F(N)
4270 PRINT "JJ  ***  SISTEMA ";N$;"  ***"
4280 PRINT @H6;"JJ        ***   SISTEMA ";N$;"    ***"
4290 REM     ESTADO DE FUNCIONAMIENTO
4300 PRINT "LJJ   ESTADO DE FUNCIONAMIENTO"
4310 PRINT "J   ARRANQUE -------- (1)"
4320 PRINT "J   ESTADO ESTABLE -- (2)"
4330 PRINT "JJI Seleccione opción:  G";
4340 INPUT E5
4350 IF E5=1 OR E5=2 THEN 4370
4360 GO TO 4330
4370 IF E5=2 THEN 4400
4380 GOSUB 4880
4390 GO TO 4410
4400 GOSUB 5120
4410 IF M$="DESBALANCEADOS" THEN 4820
4420 PRINT "JJ   EXISTE PERTURBACION?  (si/no)"
4430 INPUT X$
4440 IF X$="SI" OR X$="S" THEN 4460
4450 GO TO 4820
4460 REM     SELECCION DE PERTURBACION
4470 PRINT "LJJ   SELECCION DE PERTURBACION"
4480 PRINT "J  FALLA FASE-TIERRA     (1)"
4490 PRINT "J  FALLA 2 FASES-TIERRA   (2)"
4500 PRINT "J  FALLA TRIFASICA        (3)"
4510 PRINT "JJI Seleccione opción:  G";
4520 INPUT I7
4530 IF I7=1 OR I7=2 OR I7=3 THEN 4550
4540 GO TO 4470
4550 PRINT "JJ  DATOS:   TIEMPO DE FALLA   (1)"
4560 PRINT "J           ANGULO DE FALLA   (2)"
4570 PRINT "JJI Seleccione opción:  G";
4580 INPUT F7
4590 GO TO F7 OF 4600,4630
4600 PRINT "JJ  TIEMPO DE FALLA:  T7= ";
4610 INPUT T7
4620 GO TO 4660
4630 PRINT "J  ANGULO DE FALLA:  A4=";
4640 INPUT A4
4650 T7=1/30+A4/(120*PI)
4660 PRINT "JJ  Es correcto el dato?  (si/no)  G";
4670 INPUT X$
4680 IF X$="S" OR X$="SI" THEN 4700
4690 GO TO 4550
4700 H6=51
4710 GO TO I7 OF 4720,4740,4760
4720 PRINT @H6;"J  *  FALLA FASE-TIERRA  *"
4730 GO TO 4770
4740 PRINT @H6;"J  *  FALLA 2 FASES-TIERRA  *"
4750 GO TO 4770
4760 PRINT @H6;"J  *  FALLA TRIFASICA  *"
4770 GO TO F7 OF 4780,4800
```

```
4750 PRINT @H6;"  TIEMPO DE FALLA:  T7= ";T7
4790 GO TO 4810
4800 PRINT @H6;"  ANGULO DE FALLA:  A4= ";A4
4810 GO TO 4830
4820 T7=T2+2*M
4830 PRINT "LJJG  FIN DE INGRESO DE DATOS.  "
4840 PRINT "JG  PARA CONTINUAR CON INTEGRACION NUMERICA:  TECLA 3.  "
4850 PRINT "JG  PARA REGRESAR AL PROGRAMA MAESTRO:  TECLA 1.  "
4860 END
4870 REM
4880 REM     CALCULO DE CONDICIONES INICIALES PARA EL ARRANQUE
4890 Y=0
4900 Y7=0
4910 Y8=0
4920 W6=0
4930 D6=0
4940 D9=D6
4950 W9=W6
4960 T8=0
4970 T=T1
4980 PRINT "LJ  CONDICIONES INICIALES PARA EL ARRANQUE SON CERO.  "
4990 PRINT "J  ANGULO DE CONEXION PARA EL ARRANQUE:  A6=";
5000 INPUT A6
5010 H6=32
5020 GOSUB 5100
5030 PRINT "JJ  Es correcto el dato?  (si/no)  G";
5040 INPUT X$
5050 IF X$="S" OR X$="SI" THEN 5070
5060 GO TO 4990
5070 F6=51
5080 PRINT @H6;"LJJ    CONTINUACION ...  JJ"
5090 PRINT @H6;"J  CONDICIONES INICIALES PARA EL ARRANQUE SON CERO.  "
5100 PRINT @H6;"J  ANGULO DE CONEXION PARA EL ARRANQUE:  A6=  ";A6;"J"
5110 RETURN
5120 REM     CALCULO DE CONDICIONES PARA ESTADO ESTABLE
5130 IF N$="BALANCEADO" THEN 5150
5140 GO TO 5860
5150 PRINT "J  DESLIZAMIENTO:  S=";
5160 INPUT S
5170 PAGE
5180 W6=1-S
5190 W9=W6
5200 A6=0
5210 T=T1
5220 DELETE I1,I2
5230 DIM I1(4),I2(6)
5240 IF I9=1 THEN 5260
5250 R(2)=R(2)+R1(1)
5260 R(4)=R(2)/S
5270 R(5)=R(1)*R(4)-X(1)*X(2)-X(1)*X(3)-X(2)*X(3)
5280 X(5)=X(2)+X(3)
5290 X(6)=R(2)*R(1)+X(1)*R(4)+R(1)*X(3)+R(4)*X(3)
5300 I1(1)=V9(1)*SQR((R(4)*R(4)+X(5)*X(5))/(R(5)*R(5)+X(6)*X(6)))
5310 K7=ATN(X(5)/R(4))
```

```
5320 IF R(4)>0 THEN 5340
5330 K7=K7+PI
5340 K6=ATN(X(6)/R(5))
5350 IF R(5)>0 THEN 5370
5360 K6=K6+PI
5370 A7=K7-K6
5380 I1(2)=I1(1)*X(3)/SQR(R(4)*R(4)+X(5)*X(5))
5390 A8=A7-PI/2-K7
5400 D6=0
5410 D9=D6
5420 A3=0
5430 W4(1)=I1(1)*COS(A7)
5440 W4(2)=I1(1)*COS(A7+PI/2)
5450 W4(3)=I1(2)*COS(A8)
5460 W4(4)=I1(2)*COS(A8+PI/2)
5470 REM      SATURACION INICIAL
5480 Y7=(W4(1)+W4(3))*X(3)
5490 Y8=(W4(2)+W4(4))*X(3)
5500 GOSUB 6130
5510 Y(1)=X(1)*W4(1)+Y7
5520 Y(2)=X(1)*W4(2)+Y8
5530 Y(3)=X(2)*W4(3)+Y7
5540 Y(4)=X(2)*W4(4)+Y8
5550 W4(1)=(Y(1)-Y7)/X(1)
5560 W4(2)=(Y(2)-Y8)/X(1)
5570 W4(3)=(Y(3)-Y7)/X(2)
5580 W4(4)=(Y(4)-Y8)/X(2)
5590 IF ABS(ABS(Y7)-S7)<=1.0E-3 AND ABS(ABS(Y8)-S8)<=1.0E-3 THEN 5610
5600 GO TO 5470
5610 T8=Y(3)*W4(4)-Y(4)*W4(3)
5620 L6=32
5630 GOSUB 5700
5640 PRINT "JJ  EL VALOR DEL TORQUE ES CORRECTO?  (si/no)  GG";
5650 INPUT X$
5660 IF X$="S" OR X$="SI" THEN 5830
5670 PRINT "JJ CAMBIE ADECUADAMENTE EL VALOR DEL DESLIZAMIENTO.  GG"
5680 GO TO 5150
5690 REM
5700 PRINT @L6;"LJJ    CONTINUACION ...  JJ"
5710 PRINT @L6;"J   ***   CONDICIONES INICIALES DE ESTADO ESTABLE   ***"
5720 PRINT @L6;"                    *  SISTEMA BALANCEADO  *"
5730 PRINT @L6;"  DESLIZAMIENTO:          S= ";S
5740 PRINT @L6;"  TIEMPO:                 T= ";T
5750 PRINT @L6;"                          MAGNITUD          ANGULO"
5760 PRINT @L6;"  CORRIENTE DE ESTATOR:  Is= ";I1(1);"  A7=";A7
5770 PRINT @L6;"  CORRIENTE DE ROTOR:    Ir= ";I1(2);"  A8=";A8
5780 PRINT @L6;"  CORRIENTES EN EJES q,d (s,r):"
5790 PRINT @L6; USING 5800;W4
5800 IMAGE 2X2D,5D8X2D,5D8X2D,5D8X2D,5D
5810 PRINT @L6;"  TORQUE MECANICO T8= ; ";T8
5820 RETURN
5830 L6=H6
5840 GOSUB 5700
5850 RETURN
```

```
60 REM    CONDICIONES INICIALES DE ESTADO ESTABLE PARA SISTEMA DESBAL.
70 GOSUB 800
80 PRINT "JJ  NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS DE CONDICIONES INICIALES"
90 PRINT "J  PARA SISTEMA DESBALANCEADO:  ";
00 INPUT D$
10 CALL "FILE",M/,D$,X$
20 IF X$<>"" THEN 5950
30 PRINT "J  ERROR, NO EXISTE ARCHIVO:  ";D$;"J  REPITA.  GGG"
40 GO TO 5880
50 OPEN D$,2,"R",X$
60 READ #2;Y,Y7,Y8,W6,D6,T8,T,A6,W4
70 CLOSE 2
80 CALL "UNIT",M8
90 W9=W6
00 S=1-W6
10 D9=D6
20 PRINT @M6;"LJJ    CONTINUACION ...  JJ"
30 PRINT @M6;"J   ***   CONDICIONES INICIALES DE ESTADO ESTABLE   ***"
40 PRINT @M6;"                  *  SISTEMA DESBALANCEADO  *"
50 PRINT @M6;"  DESLIZAMIENTO:          S= ";S
60 PRINT @M6;"  TIEMPO:                 T= ";T
70 L6=M6
80 GOSUB 5780
90 RETURN
00 REM     SATURACION
10 Y7=X(4)*(Y(1)/X(1)+Y(3)/X(2))
20 Y8=X(4)*(Y(2)/X(1)+Y(4)/X(2))
30 S7=ABS(Y7)
40 S8=ABS(Y8)
50 IF S7<=Y6 THEN 6210
60 D7=S3+S4*S7
70 Y7=Y7-C(7)*D7*SGN(Y7)
80 IF S8<=Y6 THEN 6210
90 D7=S3+S4*S8
00 Y8=Y8-C(7)*D7*SGN(Y8)
10 RETURN
```

```
1000 REM      *****      INTEGRACION NUMERICA:  "@NRPC/INTNUM"      *****
1010 GOSUB 800
1020 REM      PROGRAMACION DE LAS ECUACIONES DEL TORQUE MECANICO
1030 PRINT "LJJ PROGRAME LAS ECUACIONES DEL TORQUE MECANICO (T8)"
1040 PRINT "J  EN FUNCION DE LA VELOCIDAD (W6).  GG JJJ"
1050 LIST 1090
1060 PRINT "JJ  PARA CONTINUAR PRESIONE TECLA 9.  GG"
1070 END
1080 REM      SUBRUTINA DE EVALUACION DEL TORQUE MECANICO
1090 T8=0.147
1100 RETURN
1110 PRINT "J  *  EC. DEL TORQUE (T8) EN FUNCION DE LA VELOC. (W6)  *"
1120 PRI @H6:"J  *  EC. DEL TORQUE (T8) EN FUNCION DE LA VELOC. (W6)  *"
1130 SAVE @H6:1090
1140 LIST 1090
1150 REM      CALCULO DE COEFICIENTES PARA ECUACIONES DIFERENCIALES
1160 DELETE C,V,B
1170 DIM C(10),V(4),B(2)
1180 C(2)=R(1)/X(1)
1190 C(4)=R(2)/X(2)
1200 X(4)=1/(1/X(1)+1/X(2)+1/X(3))
1210 C(7)=X(4)/X(3)
1220 REM      CALCULO DE VALORES INICIALES DE CORRIENTE,VOLTAJE Y TORQUE
1230 D6=D6-W7*W6*H/2
1240 GOSUB 2790
1250 D9=D9-W6*W7*H
1260 GOSUB 2260
1270 REM      ARCHIVO DE DATOS PARA CONDICIONES FINALES
1280 IF N$="BALANCEADO" THEN 1420
1290 PRINT "JJ  NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS DE CONDICIONES FINALES"
1300 PRINT "J  DE ESTADO ESTABLE PARA SISTEMA DESBALANCEADO: ";
1310 INPUT D$
1320 CALL 'FILE",H7,D$,X$
1330 IF X$="" THEN 1390
1340 PRINT "J  YA EXISTE ARCHIVO: ";D$
1350 PRINT "J  DESEA DESTRUIR SU CONTENIDO?  (si/no):  GGG";
1360 INPUT X$
1370 IF X$="NO" OR X$="N" THEN 1290
1380 KILL D$
1390 CREATE D$;1000,0
1400 PRINT @H6:"J  NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS DE CONDICIONES FINALES"
1410 PRINT @H6:"J  DE ESTADO ESTABLE PARA SISTEMA DESBALANCEADO: ";D$
1420 REM      ALMACENAMIENTO DE VALORES INICIALES
1430 PAGE
1440 PRINT "JJ  NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS:  GGG";
1450 INPUT O$
1460 CALL "FILE",H7,O$,X$
1470 IF X$="" THEN 1530
1480 PRINT "J  YA EXISTE EL ARCHIVO: ";O$
1490 PRINT "J  DESEA DESTRUIR SU CONTENIDO?  (SI o NO):  GGG";
1500 INPUT X$
1510 IF X$="NO" OR X$="N" THEN 1440
1520 KILL O$
1530 CREATE O$;(T2-T1)/H*216+1000,0
1540 PAGE
```

```
1550 PRINT @Pe "]  NUMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS:  ")D$
1560 W1=1.08+300
1570 W2=-W1
1580 NO=0
1590 OPEN D$+1,"U",X$
1600 CALL "REWIND",1
1610 WRITE #1,Y1,T1,T2,W1,W2,NO
1620 GOSUB 2150
1630 REM      METODO DE INTEGRACION DE RUNGE-KUTTA DE 4to. ORDEN
1640 GOSUB 3320
1650 GOSUB 3500
1660 FOR J=1 TO N
1670 Z(J)=U(J)
1680 F(J)=Y(J)
1690 Y(J)=F(J)+0.5*D(J)*H
1700 NEXT J
1710 REM      PRIMER PASO
1720 T=T+0.5*H
1730 H2=0.5*H2
1740 GOSUB 2290
1750 GOSUB 3500
1760 FOR J=1 TO N
1770 Z(J)=Z(J)+2*D(J)
1780 Y(J)=F(J)+0.5*D(J)*H
1790 NEXT J
1800 REM      SEGUNDO PASO
1810 GOSUB 3420
1820 GOSUB 3500
1830 FOR J=1 TO N
1840 Z(J)=Z(J)+2*D(J)
1850 Y(J)=F(J)+D(J)*H
1860 NEXT J
1870 REM      TERCER PASO
1880 T=T+0.5*H
1890 H2=2*H2
1900 GOSUB 2290
1910 GOSUB 3500
1920 FOR J=1 TO N
1930 Y(J)=F(J)+H*(Z(J)+D(J))/6
1940 NEXT J
1950 REM      CUARTO PASO
1960 GOSUB 2250
1970 REM      TRANSFORMACION A VALORES DE FASE
1980 GOSUB 2150
1990 REM      ALMACENAMIENTO DE RESULTADOS
2000 IF  T<=T2 THEN 1650
2010 REM      ACTUALIZACION DE VALORES MAXIMOS / MINIMOS
2020 CALL "REWIND",1
2030 WRITE #1,W1,I,I,W1,W2,R0
2040 IF X$="BALANCEADO" THEN 2090
2050 REM      ALMACENAMIENTO DE LOS ULTIMOS VALORES
2060 OPEN D$+2,"U",X$
2070 CALL "REWIND",2
2080 WRITE #2,Y,Y7,T8,W6,D6,T8,I,A5,W4
2090 CLOSE
```

```
2100 CALL 'UNIT',N8
2110 PRINT 'JJJJ   ***   FIN DE ALMACENAMIENTO   ***        GGG G'
2120 PRINT 'JJJI GRAFICOS          ------ TECLA 4'
2130 PRINT 'JJI PROGRAMA MAES KO  ------ TECLA 1         G'
2140 END
2150 REM      ALMACENAMIENTO DE VALORES
2160 R0=R0+1
2170 WRITE #1:T,W
2180 FOR J=1 TO N1
2190 W1(J)=W1(J) MIN W(J)
2200 W2(J)=W2(J) MAX W(J)
2210 NEXT J
2220 RETURN
2230 REM    CALCULO DE CORRIENTES (edo)
2240 H2=H/(2*H1)
2250 GOSUB 3590
2260 W4(1)=(Y(1)-Y7)/X(1)
2270 W4(2)=(Y(2)-Y8)/X(1)
2280 W4(3)=(Y(3)-Y7)/X(2)
2290 W4(4)=(Y(4)-Y8)/X(2)
2300 W(13)=Y(3)*W4(4)-Y(4)*W4(3)
2310 REM      INTEGRACION DE LA VELOCIDAD ANGULAR DEL ROTOR
2320 W6=W9+(W(13)-T8)*H2
2330 W9=W6
2340 REM      INTEGRACION DEL DESPLAZAMIENTO ANGULAR DEL ROTOR
2350 D6=D9+W6*W7*H
2360 D9=D6
2370 W(14)=W6
2380 GOSUB 1090
2390 W(23)=T8
2400 IF M7=1 THEN 2450
2410 REM .   CONMUTACION DEL CONDESADOR USADO EL ALIM. MONOF.
2420 IF W6=>0.8 THEN 2440
2430 GO TO 2450
2440 X(7)=X(8)
2450 D7=W8*T
2460 IF I8=1 OR I8=3 THEN 2480
2470 D7=D6
2480 REM      TRANSFORMACION INVERSA A VALORES DE FASE
2490 W(1)=W4(1)*COS(D7)+W4(2)*SIN(D7)
2500 W(2)=W4(1)*COS(D7-P6)+W4(2)*SIN(D7-P6)
2510 W(3)=W4(1)*COS(D7+P6)+W4(2)*SIN(D7+P6)
2520 W(4)=V(1)*COS(D7)+V(2)*SIN(D7)
2530 W(5)=V(1)*COS(D7-P6)+V(2)*SIN(D7-P6)
2540 W(6)=V(1)*COS(D7+P6)+V(2)*SIN(D7+P6)
2550 W(7)=W4(3)*COS(D7-D6)+W4(4)*SIN(D7-D6)
2560 W(8)=W4(3)*COS(D7-D6-P6)+W4(4)*SIN(D7-D6-P6)
2570 W(9)=W4(3)*COS(D7-D6+P6)+W4(4)*SIN(D7-D6+P6)
2580 W(10)=V(3)*COS(D7-D6)+V(4)*SIN(D7-D6)
2590 W(11)=V(3)*COS(D7-D6-P6)+V(4)*SIN(D7-D6-P6)
2600 W(12)=V(3)*COS(D7-D6+P6)+V(4)*SIN(D7-D6+P6)
2610 W(15)=W4(1)
2620 W(16)=W4(2)
2630 W(17)=W4(3)
2640 W(18)=W4(4)
```

```
2650 W(7)=V(1)
2660 W(8)=V(2)
2670 W(9)=V(3)
2680 W(10)=V(4)
2690 REM      M6=1  (DELTA)  Y  M6=2  (ESTRELLA )
2700 ON M6 OF 2710,2720
2710 W(3)=W(3)-W(2)
2720 W(2)=W(2)-W(1)
2730 W(1)=-W(3)-W(2)
2740 GO TO 2780
2750 W(4)=W(5)-W(4)
2760 W(5)=W(6)-W(5)
2770 W(6)=-W(4)-W(5)
2780 RETURN
2790 REM      CALCULO DE VOLTAJES APLICADOS SEGUN FUNCIONAMIENTO
2800 A3=W7*T+A6
2810 D6=D6+W7*W6*H/2
2820 REM      CALCULO DE K0
2830 K0=U1/U2
2840 IF T<J1 THEN 2890
2850 IF T=>J2 THEN 2880
2860 K0=((1-U1/U2)*T+(U1/U2*J2-J1))/(J2-J1)
2870 GO TO 2890
2880 K0=1
2890 IF M7=1 THEN 2950
2900 REM      ALIMENTACION MONOFASICA
2910 V1=V9*COS(A3)*K0
2920 V3=Y(5)
2930 V2=-V1-V3
2940 GO TO 3180
2950 IF T7>T THEN 3080
2960 GO TO M6 OF 2970,3080
2970 GO TO I7 OF 2990,3040,3140
2980 REM      FALLA FASE-TIERRA : ESTATOR EN DELTA
2990 V1=V9(1)/SQR(3)*COS(A3+Q6(1)+PI/6)
3000 V2=V9(2)*COS(A3+Q6(2))
3010 V3=V9(3)/SQR(3)*COS(A3+Q6(3)-PI/6)
3020 GO TO 3180
3030 REM      FALLA 2 FASES-TIERRA : ESTATOR EN DELTA
3040 V1=0
3050 V2=V9(2)/SQR(3)*COS(A3+Q6(2)+PI/6)
3060 V3=V9(3)/SQR(3)*COS(A3+Q6(3)-PI/6)
3070 GO TO 3180
3080 V1=V9(1)*COS(A3+Q6(1))*K0
3090 V2=V9(2)*COS(A3+Q6(2))*K0
3100 V3=V9(3)*COS(A3+Q6(3))*K0
3110 IF T7>T THEN 3180
3120 GO TO I7 OF 3160,3150,3140
3130 REM      FALLAS PARA EL ESTATOR EN ESTRELLA
3140 V3=0
3150 V2=0
3160 V1=0
3170 REM      VOLTAJES DE ESTATOR EN EJES α Y σ
3180 V(1)=2*(V1-0.5*V2-0.5*V3)/3
3190 V(2)=(V3-V2)/SQR(3)
```

```
3200 B(1)=V(1)
3210 B(2)=V(2)
3220 GO TO I8 OF 3300,3240,3280
3230 REM     VOLTAJES DE ESTATOR PARA REFERENCIA ROTORICA
3240 V(1)=B(1)*COS(D6)-B(2)*SIN(D6)
3250 V(2)=B(1)*SIN(D6)+B(2)*COS(D6)
3260 GO TO 3300
3270 REM     VOLTAJES DE ESTATOR PARA REFERENCIA SINCRONICA
3280 V(1)=B(1)*COS(A3)-B(2)*SIN(A3)
3290 V(2)=B(1)*SIN(A3)+B(2)*COS(A3)
3300 REM     CALCULO DE VOLTAJES DE ROTOR
3310 GOSUB 3590
3320 GO TO I9 OF 3400,3340
3330 REM     EXISTEN RESISTENCIAS EN EL ROTOR
3340 W4(3)=(Y(3)-Y7)/X(2)
3350 W4(4)=(Y(4)-Y8)/X(2)
3360 V(3)=-R2(1)*W4(3)-R2(2)*W4(4)
3370 V(4)=-R2(2)*W4(3)-R2(3)*W4(4)
3380 GO TO 3420
3390 REM     DEVANADOS DEL ROTOR CORTOCIRCUITADOS
3400 V(3)=0
3410 V(4)=0
3420 REM     CALCULO DE VELOCIDAD Y COEFICIENTES DE EC. DIFERENCIALES
3430 W6=W9+(Y(3)*(Y(4)-Y8)/X(2)-Y(4)*(Y(3)-Y7)/X(2)-T8)*H2
3440 GOSUB 1090
3450 IF I8=1 OR I8=3 THEN 3470
3460 W8=W6*W7
3470 C(1)=W8/W7
3480 C(6)=W6-W8/W7
3490 RETURN
3500 REM     EVALUACION DE DERIVADAS
3510 D(1)=W7*(V(1)-C(1)*Y(2)+C(2)*(Y7-Y(1)))
3520 D(2)=W7*(V(2)+C(1)*Y(1)+C(2)*(Y8-Y(2)))
3530 D(3)=W7*(V(3)+C(3)*Y(4)+C(4)*(Y7-Y(3)))
3540 D(4)=W7*(V(4)-C(3)*Y(3)+C(4)*(Y8-Y(4)))
3550 GO TO M7 OF 3580,3560
3560 GOSUB 3590
3570 D(5)=W7*SQR(3)*X(7)/X(1)*(Y8-Y(2))
3580 RETURN
3590 REM     SATURACION
3600 Y7=X(4)*(Y(1)/X(1)+Y(3)/X(2))
3610 Y8=X(4)*(Y(2)/X(1)+Y(4)/X(2))
3620 S7=ABS(Y7)
3630 S8=ABS(Y8)
3640 IF S7<=Y6 THEN 3700
3650 D7=S3+S4*S7
3660 Y7=Y7-C(7)*D7*SGN(Y7)
3670 IF S8<=Y6 THEN 3700
3680 D7=S3+S4*S8
3690 Y8=Y8-C(7)*D7*SGN(Y8)
3700 RETURN
```

```
1000 REM      *****     PROGRAMA DE GRAFICOS.  'GRAPH/GRAFICO'      *****
1010 REM      REALIZACION DE GRAFICOS UTILIZANDO ARCHIVO DE DATOS
1020 PRINT "LJJI ***  PROGRAMA DE GRAFICOS  ***"
1030 PRINT "JJI "TECLA 20 ------  INGRESO DEL ARCHIVO DE DATOS "
1040 PRINT "JJI TECLA 10 ------  SELECCION DE GRAFICO "
1050 END
1060 P"=0
1070 GOSUB 800
1080 PRINT "LJJ  NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS:  GGG";
1090 INPUT J$
1100 CALL "FILE",N7,O$,X$
1110 IF X$<>"" THEN 1140
1120 PRINT "J  ERROR, NO EXISTE ARCHIVO:  ";O$;"J  REPITA,  GGG"
1130 GO TO 1080
1140 OPEN O$,1,"R",X$
1150 DELETE W,W1,W2
1160 READ #1,N
1170 DIM W(N),W1(N),W2(N)
1180 READ #1,T1,T2,W1,W2,RO
1190 CLOSE
1200 PRINT "LJJI ***  CURVAS A REALIZARSE  ***"
1210 PRINT "J  CORRIENTES DE ESTATOR:  (a,b,c)  --------  (1,2,3)"
1220 PRINT "J  VOLTAJES DE ESTATOR:    (a,b,c)  --------  (4,5,6)"
1230 PRINT "J  CORRIENTES DE ROTOR:    (a,b,c)  --------  (7,8,9)"
1240 PRINT "J  VOLTAJES DE ROTOR:      (a,b,c)  --------  (10,11,12)"
1250 PRINT "J  TORQUE ELECTROMAGNETICO:          --------  (13)"
1260 PRINT "J  VELOCIDAD:                        --------  (14)"
1270 PRINT "J  CORRIENTES (a,d)  estator:        --------  (15,16)"
1280 PRINT "J                    rotor:          --------  (17,18)"
1290 PRINT "J  VOLTAJES  (a,d)   estator:        --------  (19,20)"
1300 PRINT "J                    rotor:          --------  (21,22)"
1310 PRINT "J  TORQUE MECANICO:                  --------  (23)"
1320 PRINT "J  TORQUE - VELOCIDAD:               --------  (24)"
1330 PRINT "LJIESCOJA OPCION DE ACUERDO AL NUMERO CORRESPONDIENTE: GG";
1340 INPUT NO
1350 IF NO=24 THEN 2750
1360 IF NO<24 THEN 1380
1370 GO TO 1200
1380 R$="TIEMPO (seg)"
1390 PRINT "LJJI CURVA # ";NO
1400 PRINT "I ----------"
1410 PRINT "J  TIEMPO min: ";T1;"II TIEMPO max: ";T2
1420 PRINT "J       (existen ";RO;" puntos para el grafico)"
1430 PRINT "J  DATO min: ";W1(NO);"I DATO max: ";W2(NO)
1440 PRINT "JJI **  INGRESE LIMITES DEL GRAFICO A REALIZARSE  **"
1450 PRINT "J  TIEMPO (min,max):  G";
1460 INPUT G1,G2
1470 PRINT "J  DATOS (min,max): G";
1480 INPUT G3,G4
1490 PRINT "J  **  INGRESE SEPARACION ENTRE MARCAS  **"
1500 PRINT "J  EN EL EJE DE TIEMPO: G";
1510 INPUT M1
1520 PRINT "J  EN EL EJE Y: G";
1530 INPUT M2
```

```
1540 PRINT "JJ  **  TITULO DEL GRAFICO:  GG";
1550 INPUT A$
1560 PRINT "JJ  **  VARIABLE DEL EJE Y.  GG";
1570 INPUT B$
1580 PRINT "LJJ  DESEA GRAFICO EN PAPEL?  (si/no): GG";
1590 INPUT X$
1600 IF X$="SI" OR X$="S" THEN 1650
1610 U3=32
1620 X9=0.8*2.328
1630 Y9=0.8*6.072
1640 GO TO 1700
1650 U3=1
1660 PRINT "JJ  ALISTE GRAFIZADOR.  (RETURN PARA CONTINUAR) GG"
1670 INPUT X$
1680 X9=0.8*1.792
1690 Y9=0.9*2.816
1700 PRINT @U3,17:X9,Y9
1710 A5=(G2-G1)/M1+1
1720 A6=(G4-G3)/M2+1
1730 PAGE
1740 GOSUB 2680
1750 MOVE @U3:G1,G3
1760 FOR J=1 TO A5
1770 DRAW @U3:G1+(J-1)*M1,G3
1780 SCALE 1,1
1790 RDRAW @U3:0,1
1800 Y$=STR(G1+(J-1)*M1)
1810 Y$=REP("",1,1)
1820 RMOVE @U3:-LEN(Y$)/2*X9,-1.5*Y9
1830 PRINT @U3:Y$;
1840 GOSUB 2680
1850 MOVE @U3:G1+(J-1)*M1,G3
1860 NEXT J
1870 MOVE @U3:G1,G3
1880 FOR J=1 TO A6
1890 DRAW @U3:G1,G3+(J-1)*M2
1900 SCALE 1,1
1910 RDRAW @U3:1,0
1920 IF ABS(G3+(J-1)*M2)>1.0E-4 THEN 1950
1930 Y$=STR(0)
1940 GO TO 1960
1950 Y$=STR(G3+(J-1)*M2)
1960 Y$=REP("",1,1)
1970 RMOVE @U3:-Y9,-LEN(Y$)/2*X9
1980 PRINT @U3,25:90
1990 PRINT @U3:Y$;
2000 PRINT @U3,25:0
2010 GOSUB 2680
2020 MOVE @U3:G1,G3+(J-1)*M2
2030 NEXT J
2040 AXIS @U3:M1,M2,G2,G4
2050 AXIS @U3:M1,M2,0,0
2060 A9=LEN(A$)
2070 MOVE @U3:(G1+G2)/2,G4
```

```
2080 SCALE 1,1
2090 RMOVE @U3;-A9/2*X9,3*Y9
2100 PRINT @U3;A$;
2110 RMOVE @U3;0,-0.7*Y9
2120 FOR J=1 TO A9
2130 PRINT @U3;"-";
2140 NEXT J
2150 GOSUB 2680
2160 MOVE @U3;(G1+G2)/2,G3
2170 SCALE 1,1
2180 RMOVE @U3;-LEN(R$)/2*X9,-3*Y9
2190 PRINT @U3;R$;
2200 GOSUB 2680
2210 MOVE @U3;G1,(G3+G4)/2
2220 SCALE 1,1
2230 RMOVE @U3;-3.2*Y9,-LEN(S$)/2*X9
2240 PRINT @U3,25;90
2250 PRINT @U3;S$;
2260 PRINT @U3,25;0
2270 GOSUB 2680
2280 IF P7=0 THEN 2370
2290 OPEN 0$;1,"R",X$
2300 READ #1;X(1),X(2),X(3),R(1),R(2),W1,W2,RO,M$,X1,W6
2310 MOVE @U3;W6,X1
2320 FOR J=2 TO RO
2330 READ #1;X1,W6
2340 DRAW @U3;W6,X1
2350 NEXT J
2360 GO TO 2460
2370 OPEN 0$;1,"R",X$
2380 READ #1;N1,T1,T2,W1,W2,RO
2390 READ #1;T,W
2400 IF NO=24 THEN 2910
2410 MOVE @U3;T,W(NO)
2420 FOR J=2 TO RO
2430 READ #1;T,W
2440 DRAW @U3;T,W(NO)
2450 NEXT J
2460 CLOSE
2470 HOME @U3;
2480 PRINT "DESEA LEYENDAS? (si/no)G ";
2490 INPUT X$
2500 IF X$="SI" OR X$="S" THEN 2570
2510 PRINT "DESEA REPETIR EL GRAFICO? (si/no) G ";
2520 INPUT X$
2530 IF X$="SI" OR X$="S" THEN 1580
2540 PRINT "OTRO ARCHIVO -- TECLA 20"
2550 PRINT "OTRO GRAFICO -- TECLA 10"
2560 END
2570 PRINT "TITULO DE LA LEYENDA: G";
2580 INPUT L$
2590 MOVE @U3;(G1+G2)/2,G3
2600 SCALE 1,1
2610 RMOVE @U3;-LEN(L$)/2*X9,-6*Y9
```

```
620 PRINT @U3:L$;
630 GOSUB 2680
640 HOME @U3:
650 PRINT
660 PRINT
670 GO TO 2510
680 REM   ***  SUBRUTINA DE WINDOW Y VIEWPORT  ***
690 IF U3=32 THEN 2720
700 VIEWPORT 10,140,15,90
710 GO TO 2730
720 VIEWPORT 10,120,20,90
730 WINDOW G1,G2,G3,G4
740 RETURN
750 R$="VELOCIDAD (r.u.)"
760 PRINT "LJI CURVA # 24   (TORQUE-VELOCIDAD)"
770 PRINT "I ----------------------------------"
780 PRINT "J  VELOCIDAD min= ";W1(14);"  VELOCIDAD max= ";W2(14)
790 PRINT "J       (existen ";R0;" puntos para el gráfico)"
800 PRINT "J  TORQUE min= ";W1(13);"  TORQUE max= ";W2(13)
810 PRINT "JJI **  INGRESE LIMITES DEL GRAFICO A REALIZARSE  **"
820 PRINT "J  VELOCIDAD (min,max):  G";
830 INPUT G1,G2
840 PRINT "J  TORQUE (min,max): G";
850 INPUT G3,G4
860 PRINT "JI **  INGRESE SEPARACION ENTRE MARCAS  **"
870 PRINT "J  EN EL EJE DE VELOCIDAD: G";
880 INPUT M1
890 PRINT "J  EN EL EJE TORQUE: G";
900 GO TO 1530
910 MOVE @U3:W(14),W(13)
920 FOR J=2 TO R0
930 READ #1:T,W
940 DRAW @U3:W(14),W(13)
950 NEXT J
960 GO TO 2460
```

```
000 REM      ****      CALCULO DEL CAPACITOR OPTIMO PARA      ****
010 REM       ***  ALIMENTACION MONOFASICA:  "@NARC/CAPOPTI"   ***
020 P7=0
030 PRINT "LJJ  PROGRAMA PARA CALCULAR EL CAPACITOR OPTIMO"
040 PRINT "J  PARA ALIMENTACION MONOFASICA"
050 PRINT "JJ TECLA 11 -----  CALCULOS"
060 PRINT "J  TECLA 12 -----  GRAFICOS"
070 PRINT "JI Escoja opcion."
080 END
090 REM      INGRESO DE DATOS
100 GOSUB 800
110 PAGE
120 DELETE X,R,Y,P
130 DIM X(6),R(6),Y(2),P(5)
140 PRINT "J  INGRESO DE PARAMETROS DE LA MAQUINA:"
150 PRINT "J   (valores en p.u.)  GG"
160 PRINT "  REACTANCIA DEL ESTATOR:  X(1)=";
170 INPUT X(1)
180 PRINT "  REACTANCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:  X(2)=";
190 INPUT X(2)
200 PRINT "  REACTANCIA MUTUA:  X(3)=";
210 INPUT X(3)
220 PRINT "  RESISTENCIA DEL ESTATOR:  R(1)=";
230 INPUT R(1)
240 PRINT "  RESISTENCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:  R(2)=";
250 INPUT R(2)
260 H6=32
270 GOSUB 1380
280 PRINT "JJI ESTAN CORRECTOS LOS DATOS?  (si/no) GG";
290 INPUT X$
300 IF X$="S" OR X$="SI" THEN 1340
310 PRINT "J  ====>   INGRESE LA VARIABLE CON EL DATO CORRECTO.  G"
320 PRINT "JI PARA CONTINUAR, PRESIONE TECLA 13.  G"
330 END
340 REM      IMPRESION DE PARAMETROS EN PRINTER
350 H6=51
360 GOSUB 1380
370 GO TO 1470
380 REM      IMPRESION DE PARAMETROS DE LA MAQUINA
390 PRINT @H6;"LJJ          ***   PARAMETROS DE LA MAQUINA   ***"
400 PRINT @H6;"                     (valores en p.u.)"
410 PRI @H6;"  REACTANCIA DEL ESTATOR:                    X(1)= ";X(1)
420 PRI @H6;"  REACTANCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR:  X(2)= ";X(2)
430 PRI @H6;"  REACTANCIA MUTUA:                          X(3)= ";X(3)
440 PRI @H6;"  RESISTENCIA DEL ESTATOR:                   R(1)= ";R(1)
450 PRI @H6;"  RESISTENCIA DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR: R(2)= ";R(2)
460 RETURN
470 REM      ESTATOR CONECTADO EN DELTA
480 PRINT @H6;"J  * CONEXION DELTA EN ESTATOR *  JJ"
490 M$="DELTA"
```

```
1500 REM      ALMACENAMIENTO DE DATOS
1510 PAGE
1520 PRINT "JJ  NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS:  GGG";
1530 INPUT O$
1540 CALL "FILE",-7,O$,X%
1550 IF X%="" THEN 1610
1560 PRINT "J  YA EXISTE EL ARCHIVO: ";O$
1570 PRINT "J  DESEA DESTRUIR SU CONTENIDO?  (SI o NO):  GGG";
1580 INPUT X$
1590 IF X$="NO" OR X$="N" THEN 1520
1600 KILL O$
1610 CREATE O$,2500,0
1620 PAGE
1630 PRINT @H6;"J  NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS:  ";O$
1640 W1=1.0E+300
1650 W2=-W1
1660 R0=0
1670 OPEN O$,1,"U",X%
1680 CALL "REWIND",1
1690 WRITE #1,X(1),X(2),X(3),R(1),R(2),W1,W2,R0,M$
1700 W6=0
1710 IF W6>1 THEN 2260
1720 REM      SE CALCULA LA IMPEDANCIA Y LA ADMITANCIA DE SEC. (+)
1730 R(4)=R(2)/(1-W6)
1740 GOSUB 1760
1750 GO TO 1800
1760 R(5)=R(1)*R(4)-X(1)*X(2)-X(1)*X(3)-X(2)*X(3)
1770 X(5)=X(2)+X(3)
1780 X(6)=X(2)*R(1)+X(1)*R(4)+R(1)*X(3)+R(4)*X(3)
1790 RETURN
1800 Y(1)=SQR((R(4)*R(4)+X(5)*X(5))/(R(5)*R(5)+X(6)*X(6)))
1810 K7=ATN(X(5)/R(4))
1820 IF R(4)>0 THEN 1840
1830 K7=K7+PI
1840 K5=ATN(X(6)/R(5))
1850 IF R(5)>0 THEN 1870
1860 K5=K5+PI
1870 K7=K7-K5
1880 REM      SE CALCULA LA IMPEDANCIA Y LA ADMITANCIA DE SEC. (-)
1890 R(4)=R(2)/(1+W6)
1900 GOSUB 1760
1910 Y(2)=SQR((R(4)*R(4)+X(5)*X(5))/(R(5)*R(5)+X(6)*X(6)))
1920 K8=ATN(X(5)/R(4))
1930 IF R(4)>0 THEN 1950
1940 K8=K8+PI
1950 K6=ATN(X(6)/R(5))
1960 IF R(5)>0 THEN 1980
1970 K6=K6+PI
1980 K8=K8-K6
1990 K7=-K7
```

```
2000 W8=-^3
2010 REM      SE CALCULA LOS COEFICIENTES DE LA ECUACION
2020 K1=SQR(3)*COS(K7)+3*SIN(K7)
2030 K2=SQR(3)*COS(K8)-3*SIN(K8)
2040 C1=3*Y(1)*Y(2)*(Y(1)+Y(2)+1)
2050 C2=3*(Y(1)*Y(2)+Y(1)+Y(2))+1
2060 C3=-(Y(1)+Y(2)+K2)
2070 REM      SE RESUELVE LA ECUACION
2080 D=C2*C2-4*C1*C3
2090 IF D=>0 THEN 2170
2100 PRINT "J   DISCRIMINANTE MENOR A CERO.  SOL"
2110 PRINT "J  PARAMETROS NO SON DATOS PRACTICOS.  SOL"
2120 PRINT #H6;"J   DISCRIMINANTE MENOR A CERO,  SOL"
2130 PRINT #H6;"J  PARAMETROS NO SON DATOS PRACTICOS.  SOL"
2140 PRINT C1,C2,C3,D,W6
2150 END
2160 REM      LA RAIZ POSITIVA ES LA RESPUESTA VALIDA
2170 X1=0.5*(-C2+SQR(D))/C1
2180 REM      SE ALMACENA LOS RESULTADOS
2190 WRITE #1;X1,W6
2200 RO=RO+1
2210 W1=W1 MIN X1
2220 W2=W2 MAX X1
2230 W6=W6+0.01
2240 GO TO 1710
2250 Rem      SE ACTUALIZAN LOS VALORES MAXIMOS Y MINIMOS
2260 CALL "REWIND",1
2270 READ #1;X(1),X(2),X(3),R(1),R(2)
2280 WRITE #1;W1,W2,RO
2290 CLOSE
2300 PRINT "J.J  FIN DE ALMACENAMIENTO."
2310 PRINT "J  GRAFICOS ---- TECLA 12"
2320 PRINT "J  PROGRAMA MAESTRO --- TECLA 1"
2330 PRINT "JI Escoja opcion."
2340 END
2350 REM      GRAFICO DE Xc vs. W6
2360 IF F7=1 THEN 2440
2370 CALL "unit",W6
2380 J=MEMORY
2390 APPEND "@NRFU/GRAFICO";30.0
2400 DELETE 3101-3230
2410 DELETE 2340,2450
2420 DELETE 2/2,3000
2430 F7=1
2440 GOSUB 30
2450 DELETE 3,0
2460 DIM X(2),Y(2)
2470 N6=II
2480 PRINT "LJ  *F   GRAFICO DE Xc -s. We   *F"
2490 PRINT "JJ  NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS:  DUO"
```

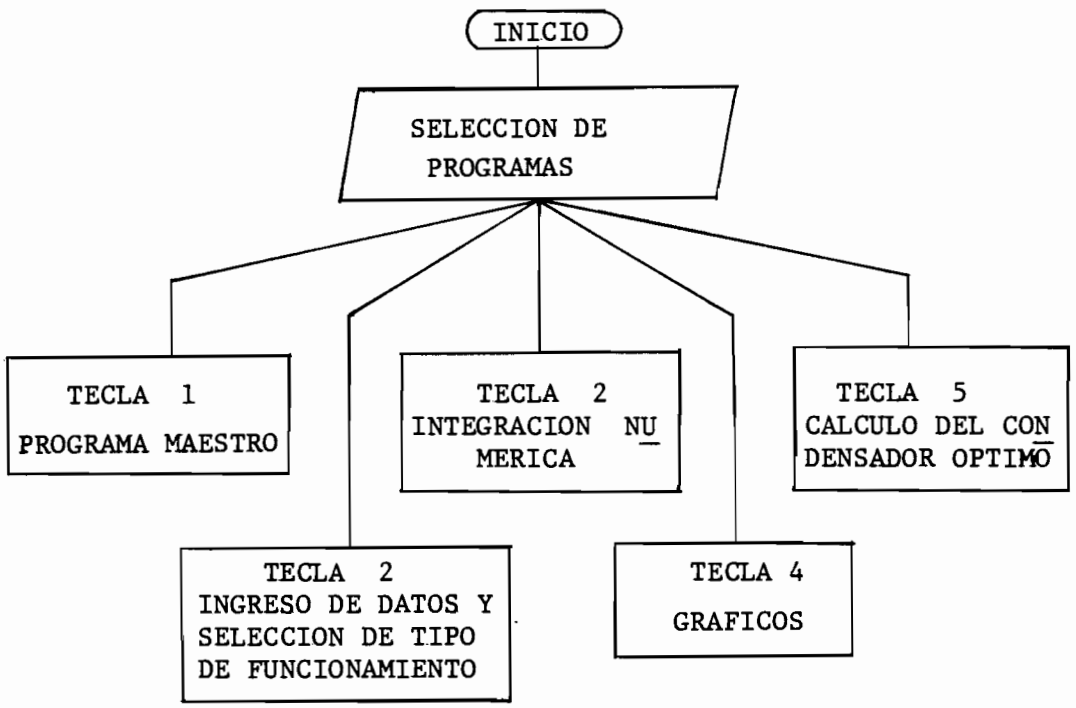
```
2500 INPUT O$
2510 CALL "FILE",H7,O$,X$
2520 IF X$<>"" THEN 2550
2530 PRINT "J  ERROR, NO EXISTE ARCHIVO:  ";O$;"J  REPITA,  GCO'
2540 GO TO 2490
2550 OPEN O$;1,"R",X$
2560 READ #1;X(1),X(2),X(3),R(1),R(2),W1,W2,RO,M$
2570 CLOSE
2580 GOSUB 1380
2590 PRINT @H6;"  *  CONEXION ";M$;" EN ESTATOR  *"
2600 PRINT "JJI PARA CONTINUAR, PRESIUNE RETURN,  GG"
2610 INPUT X$
2620 R$="VELOCIDAD  (p.u.)"
2630 PRINT "LJI CURVA:  CAPACITOR OPTIMO  vs.  VELOCIDAD"
2640 PRINT "I ----------------------------------------"
2650 PRINT "J  VELOCIDAD min: ";O;"I VELOCIDAD max: ";1
2660 PRINT "J       (existen ";RO;" puntos para el grafico)"
2670 PRINT "J  Xc min: ";W1;"I Xc max: ";W2
2680 PRINT "JJI **  INGRESE LIMITES DEL GRAFICO A REALIZARSE  **"
2690 PRINT "J  VELOCIDAD (min,max):  G";
2700 INPUT G1,G2
2710 PRINT "J  DATOS:  Xc (min,max): G";
2720 INPUT G3,G4
2730 PRINT "JI **  INGRESE SEPARACION ENTRE MARCAS  **"
2740 PRINT "J  EN EL EJE DE VELOCIDAD: G";
2750 INPUT M1
2760 PRINT "J  EN EL EJE Xc: G";
2770 INPUT M2
3000 REM       PROGRAMA DE GRAFICOS
```

A N E X O # 6

DIAGRAMAS DE FLUJO

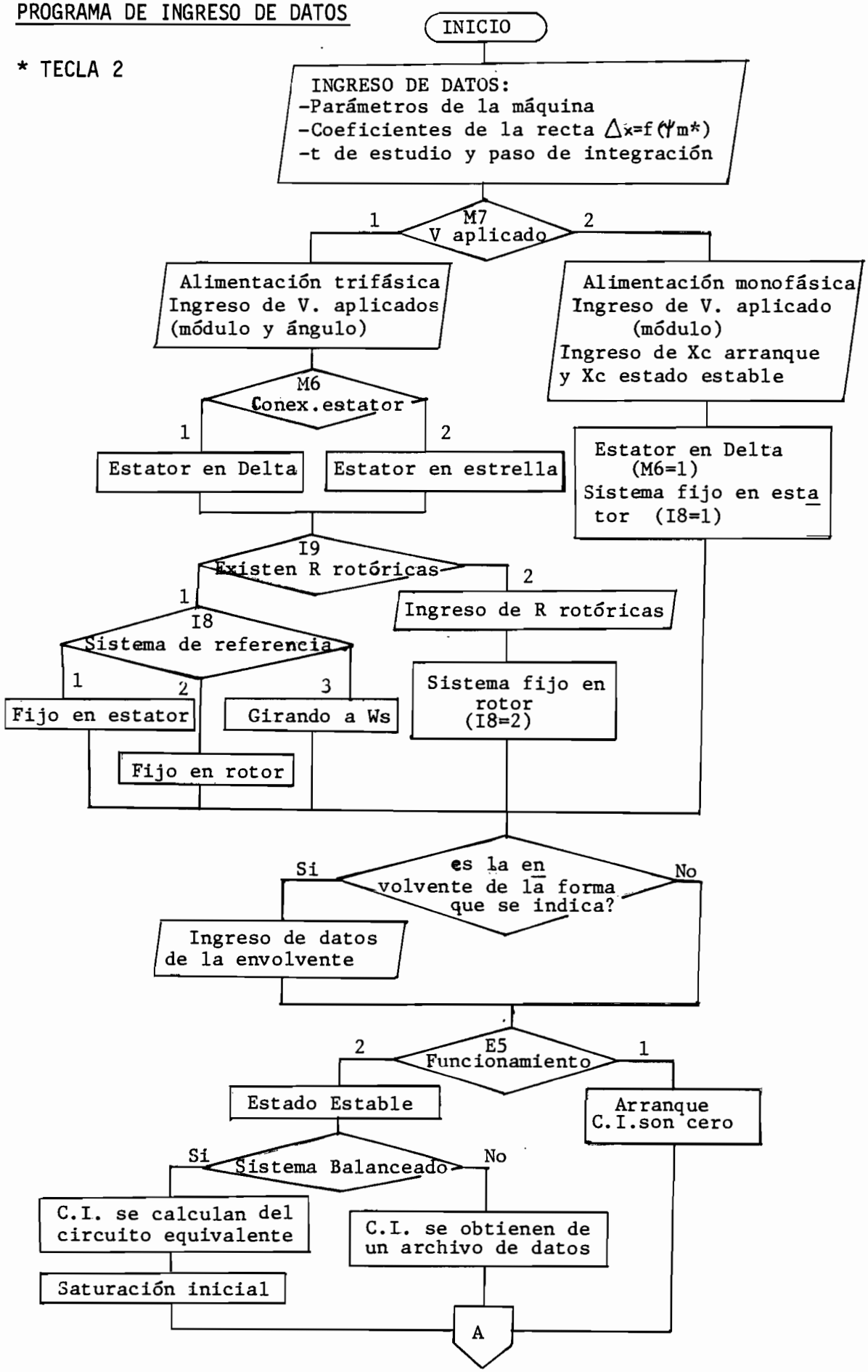
PROGRAMA MAESTRO

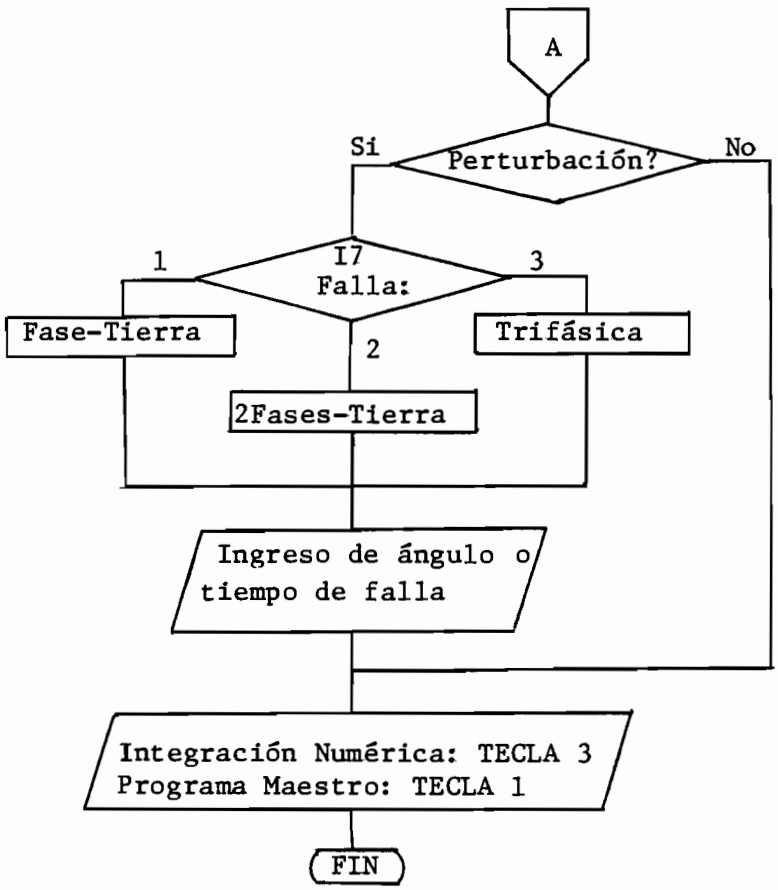
* TECLA 1



PROGRAMA DE INGRESO DE DATOS

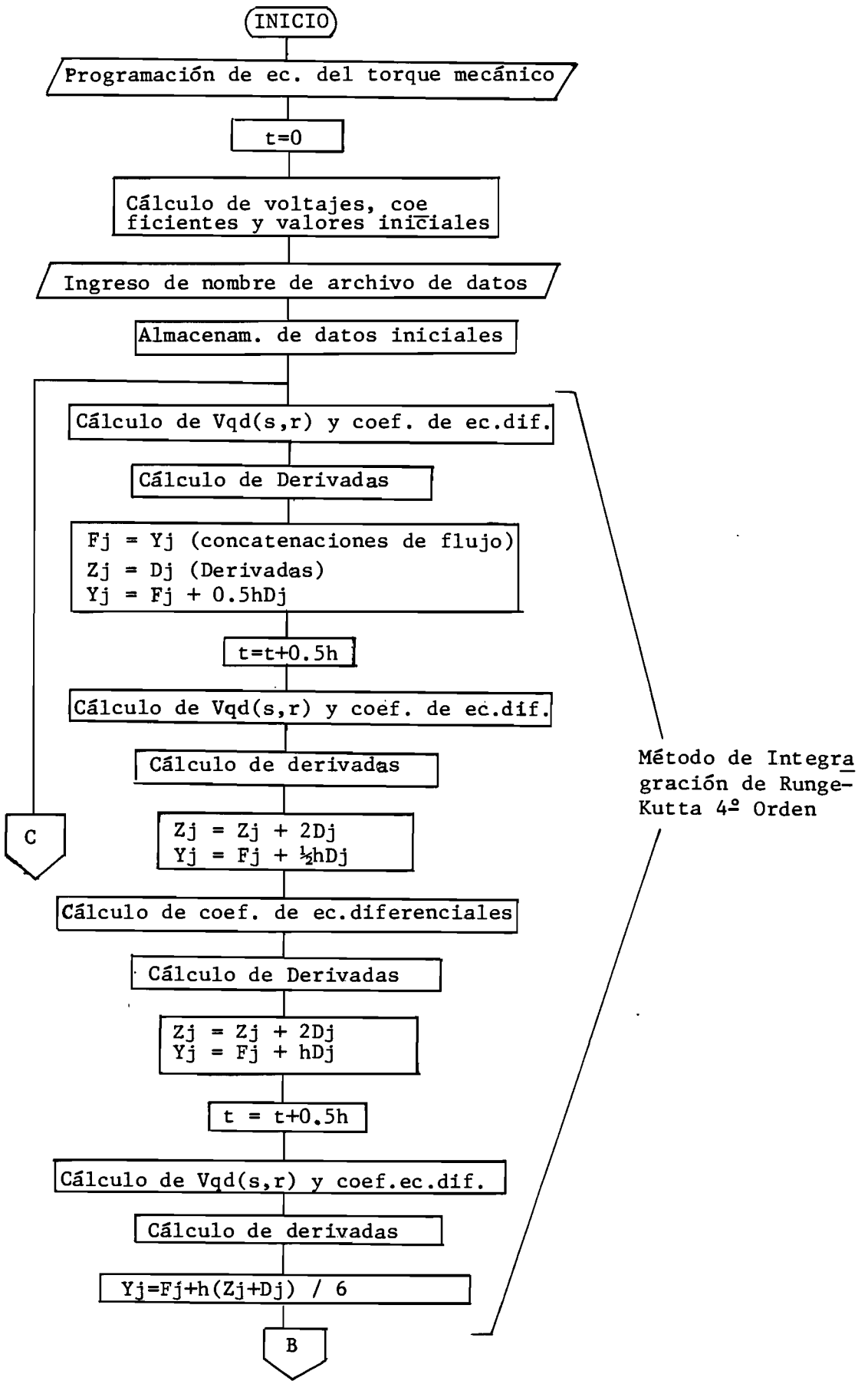
* TECLA 2

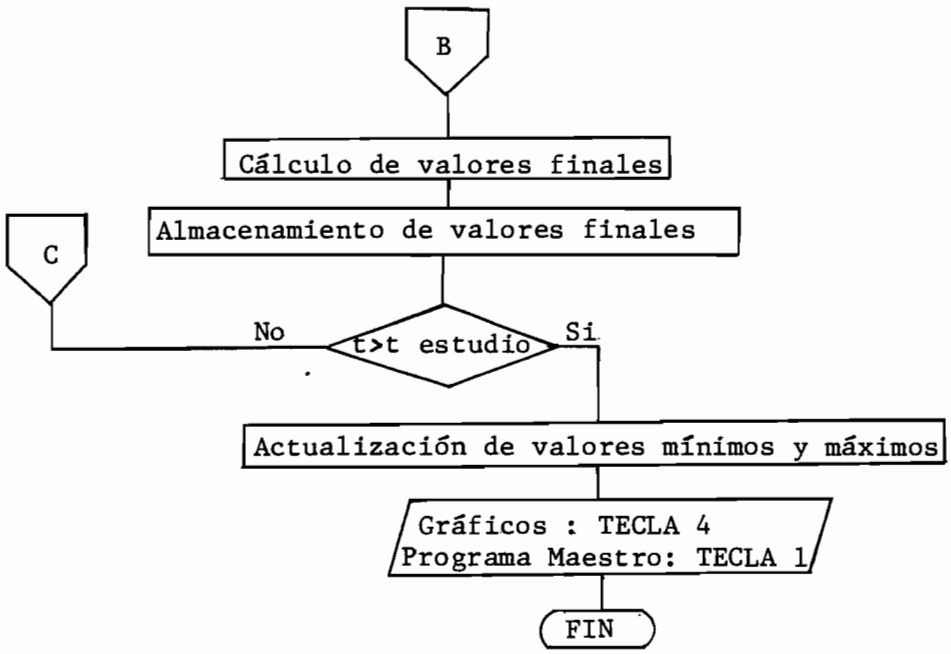



A
Si
Perturbación?
No
1
I7
Falla:
3
Fase-Tierra
2
Trifásica
2Fases-Tierra
Ingreso de ángulo o
tiempo de falla
Integración Numérica: TECLA 3
Programa Maestro: TECLA 1
FIN

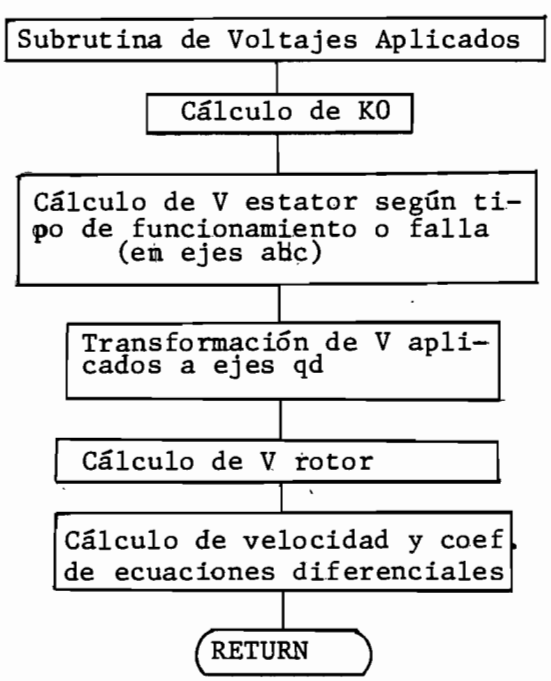
PROGRAMA DE INTEGRACION NUMERICA

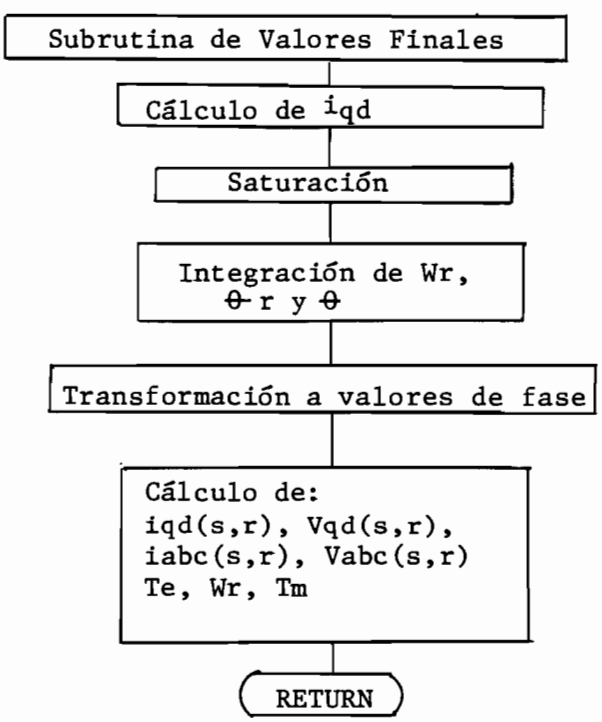
* TECLA 3

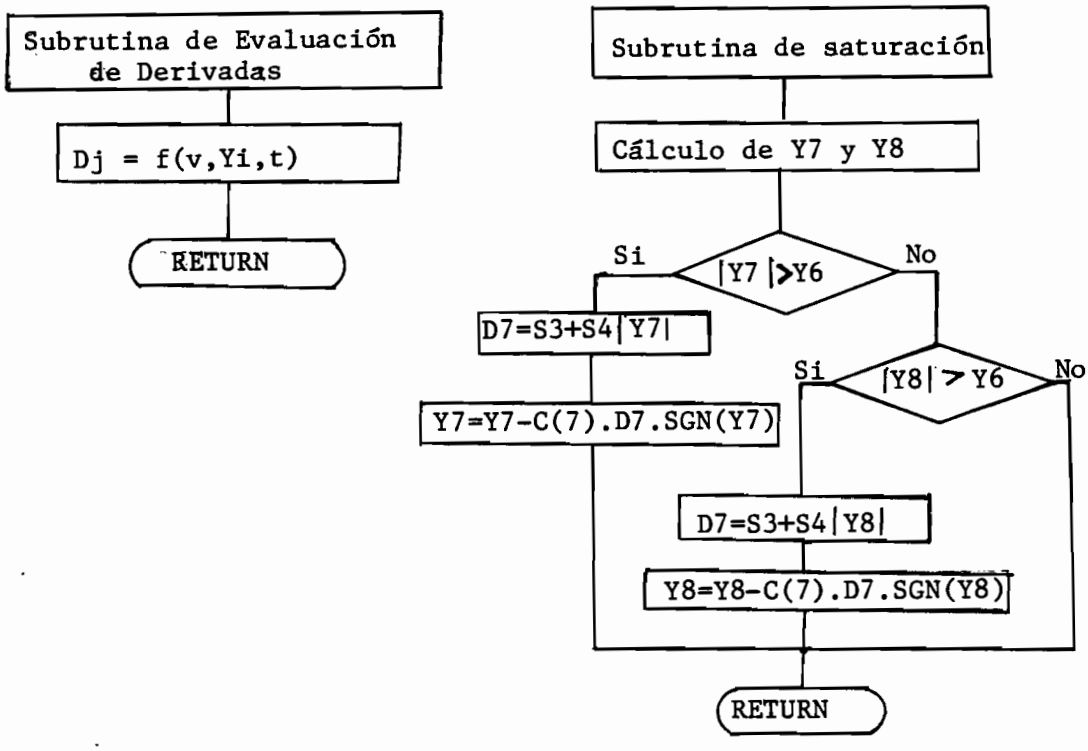



B
Cálculo de valores finales
Almacenamiento de valores finales
C
No
t>t estudio
Si
Actualización de valores mínimos y máximos
Gráficos : TECLA 4
Programa Maestro: TECLA 1
FIN

SUBRUTINAS:

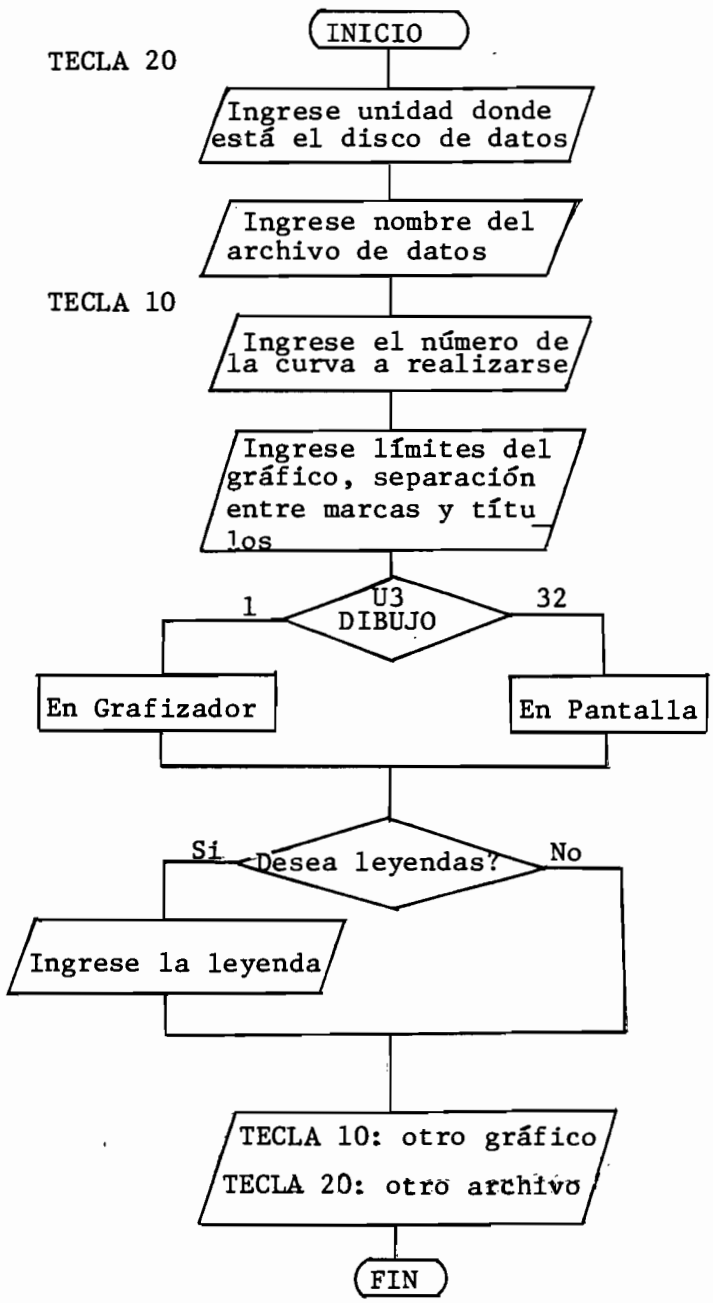

Subrutina de Voltajes Aplicados
Cálculo de KO
Cálculo de V estator según tipo de funcionamiento o falla (en ejes abc)
Transformación de V aplicados a ejes qd
Cálculo de V rotor
Cálculo de velocidad y coef. de ecuaciones diferenciales
RETURN


Subrutina de Valores Finales
Cálculo de iqd
Saturación
Integración de Wr, θr y θ
Transformación a valores de fase
Cálculo de:
iqd(s,r), Vqd(s,r),
iabc(s,r), Vabc(s,r)
Te, Wr, Tm
RETURN


Subrutina de Evaluación de Derivadas
Dj = f(v,Yi,t)
RETURN
Subrutina de saturación
Cálculo de Y7 y Y8
Si
|Y7| > Y6
No
D7=S3+S4|Y7|
Y7=Y7-C(7).D7.SGN(Y7)
Si
|Y8| > Y6
No
D7=S3+S4|Y8|
Y8=Y8-C(7).D7.SGN(Y8)
RETURN

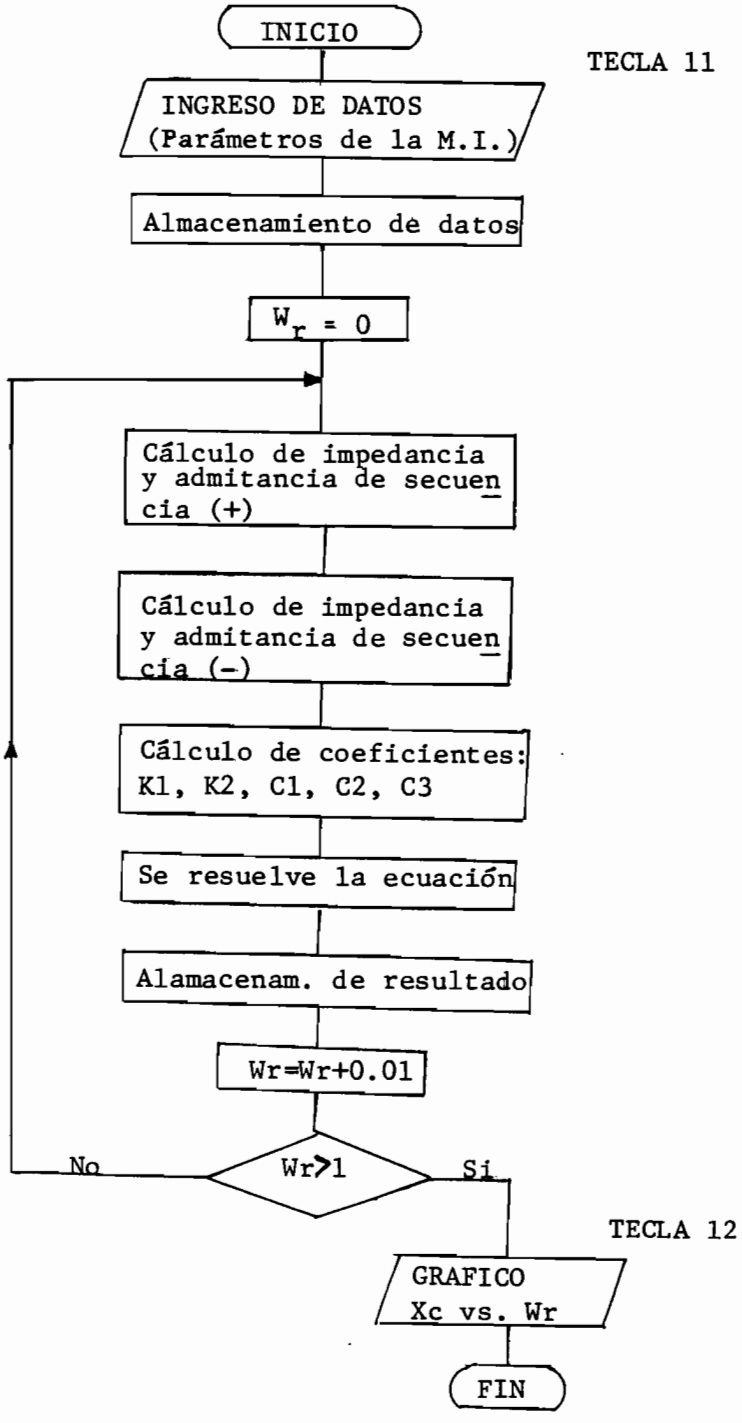
PROGRAMA DE GRAFICOS

* TECLA 4



PROGRAMA PARA CALCULAR EL CONDENSADOR OPTIMO

* TECLA 5



B I B L I O G R A F I A

1.- KRAUSE P.C. and THOMAS C.H., "Simulation of Symetrical Induction Machinary", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-84, pp. 1038-1053, Nov. 1965.

2.- MURTHY SS an BERG G.J., SINGH B., JHA C.S., SINGH P, "Transient Analysis of a three phase induction motor with single phase supply", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, Nº 1, Jan 1983, pp. 28-37.

3.- TOAPANTA MILTON, "Estado Transitorio del Motor de Inducción", EPN, Quito, 1977.

4.- BONILLA ANGEL, "Transitorios en la Reconexión de Motores de Inducción", EPN, Quito 1981.

5.- MANCERO FERNANDO. "Conportamiento Dinámico de Motores de Inducción con Capacitores Serie y Paralelo", EPN, Quito 1983.

6.- THALER G. y WILCOX M., "Máquinas Eléctricas", Ed. Limusa, México, 1974.

7.- FITZGERALD A.E., KINGSLEY, KUSKO, "Electric Machinery" Ed. McGraw-Hill Book Comapny, 3ra. Ed., Tokyo 1971.

8.- VICKERS H., "The Induction Motor", Ed. PITMAN, 2da. Ed. Gran Bretana, 1953.

9.- ALMEIDA JULIO, "Métodos para Determinar los Parámetros del Circuito Equivalente de la Máquina de Inducción", EPN, Quito, 1980.

10.- KRAUSE P.C., "Simulation of Unsymetrical 2-Phase Induction Machines", IEEE, Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-84, No. 11, pp. 1025-1037, Nov. 1965.

11.- POVEDA MENTOR, "Apuntes de Dinámica de Máquinas Eléctricas", EPN 1984.

12.- TOAPANTA MILTON, "Apuntes de Máquinas Eléctricas III", EPN 1984.

13.- CARNAHAN, LUTHER y WILKES, "Applied Numerical Methods", John Wiley Sons, N.Y. 1969.

14.- GOURISHANKAR V., LAMBERT R., "Conversión de Energía Electromecánica", International Textbook Company, México 1969.

15.- Kosow I.L., "Máquinas Eléctricas y Transformadores, Ed. Reverté Barcelona, 1980.

16.- STEVENSON W, "Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia", McGraw-Hill, Bogotá 1975.