

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

MODELO DIGITAL DE LA MAQUINA SINCRONICA
PARA EL ESTUDIO DE FALLAS

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO EN LA
ESPECIALIZACION DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

ALFONSO M. VASQUEZ BRITO

ABRIL, 1988

CERTIFICO QUE ESTE DESARROLLO DE
TESIS HA SIDO REALIZADO EN SU TO
TALIDAD POR EL SEÑOR ALFONSO M.
VASQUEZ B.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'M. Toapanta', is written over a horizontal line. The signature is stylized and cursive.

ING. MILTON TOAPANTA
DIRECTOR DE TESIS

A MIS PADRES

A MI ESPOSA

A MI HIJO

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

AGRADEZCO AL ING. MILTON TOAPANTA SIN CUYA AYUDA NO HUBIERA SIDO POSIBLE LA ELABORACION DEL PRESENTE TRABAJO, ASI COMO TAMBIEN AL PERSONAL DEL CENTRO DE COMPUTO POR FACILITARME SUS VALIOSOS RECURSOS.

INDICE

	<u>Pág.</u>
PROLOGO	iv
INTRODUCCION	v
 <u>CAPITULO I: MODELO MATEMATICO DE LA MAQUINA SINCRONICA</u>	
1.1 Ecuaciones de la Máquina Sincrónica en variables abc	1
1.2 Ecuaciones de la Máquina Sincrónica en el Sistema de ejes de referencia $qd0$	3
1.3 Ecuaciones de la Máquina Sincrónica en términos de concate- naciones de flujo como variables de estado	6
1.4 Ecuaciones del sistema mecánico	11
1.5 Ecuaciones de la Máquina Sincrónica en estado estable	12
 <u>CAPITULO II: MODELO MATEMATICO EN CONDICIONES DE FALLA</u>	
2.1 Desconexión de fases	17
2.1.1 Desconexión de una fase	24
2.1.2 Desconexión de dos fases	26
2.1.3 Desconexión de tres fases	29
2.1.4 Generalización	29
2.2 Cortocircuito de fases	33
2.2.1 Cortocircuito fase-tierra	34
2.2.2 Cortocircuito fase-fase	37
2.2.3 Cortocircuito dos fases-tierra	45
2.2.4 Cortocircuito de las tres fases	47
2.2.5 Generalización	48

CAPITULO III: SIMULACION DIGITAL

3.1	Método de solución de las ecuaciones diferenciales	51
3.2	Descripción del programa digital	54
3.2.1	Programa principal	54
3.2.2	Subrutina PLOT	60
3.2.3	Subrutina SATURA	61
3.2.4	Subrutina MULT	62
3.2.5	Función RUNGE	62
3.3	Diagrama de flujo	62

CAPITULO IV: ANALISIS DE RESULTADOS

4.1	Casos implementados y análisis de resultados	72
4.1.1	Desconexión de fases	72
4.1.2	Cortocircuito de fases	85
4.2	Comparación con resultados experimentales y obtenidos en tesis anteriores	99
4.2.1	Desconexión de una fase	99
4.2.2	Cortocircuito de fases	109
4.3	Comentarios, conclusiones, recomendaciones y aplicaciones.	114
4.3.1	Comentarios	114
4.3.2	Conclusiones	115
4.3.3	Recomendaciones	118
4.3.4	Aplicaciones	118

APENDICE A: Listado del programa digital

APENDICE B: Manual de uso del programa digital

APENDICE C: Resultados obtenidos

APENDICE D: Datos de la máquina sincrónica utilizados en la simu
lación

APENDICE E: Curva de saturación para la modelación digital

R E F E R E N C I A S

P R O L O G O

En trabajos anteriores se ha simulado a la máquina sincrónica para estudiar su comportamiento en condiciones de falla. Así, para cortocircuitos fase tierra, fase-fase y fase-fase-tierra, se realiza un desarrollo analítico para cada caso, para al final elaborar un programa digital. En el caso de desconexión de una fase se determina un modelo matemático que permite elaborar un programa digital para ese caso particular.

En este trabajo se desarrolla un modelo matemático que permite representar a la máquina sincrónica funcionando como motor o generador en condiciones normales de funcionamiento, desconexión y cortocircuito de fases; en base al cual se hace posible elaborar un programa digital que permite simular a la máquina sincrónica en cualquiera de los estados de funcionamiento mencionados, pudiendo de esta manera visualizar el comportamiento de las variables de la máquina.

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

El tema se desarrolla en cuatro capítulos que se describen brevemente a continuación:

En el primer capítulo se trata en forma resumida el comportamiento de la máquina en estado estable, ya que este tema se encuentra ampliamente desarrollado en trabajos anteriores, pero que sirve de punto de partida para el desarrollo del presente trabajo. En esta parte se determina el modelo matemático general de la máquina sincrónica, el cual está formado por un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden y que tienen como variables de estado a las concatenaciones de flujo por segundo.

En el segundo capítulo se realiza un análisis pormenorizado de las condiciones de falla de todos los casos de cortocircuito y desconexión de fases, obteniéndose como resultado final un algoritmo general que permite calcular los voltajes de fase de la máquina en condiciones de falla para cualquier caso y fase(s) afectadas(s), los cuales a su vez pueden ser ingresados al conjunto de ecuaciones diferenciales del modelo para simular a la máquina en la condición deseada.

En el tercer capítulo se describe primeramente el método de solución de las ecuaciones diferenciales, siendo el utilizado el de Runge-Kutta de cuarto orden, el cual se utiliza en trabajos anteriores dando buenos resultados; más adelante se describe la configuración y el funcionamiento del programa digital principal y sus subrutinas, para finalmente presentar un diagrama de flujo detallado.

En el cuarto capítulo se realiza un análisis cualitativo y cuantitativo de todos los casos estudiados y de todas y cada una de las variables de la máquina que se obtienen como resultado del programa; en una segunda parte se hace una comparación con resultados obtenidos en trabajos anteriores. En base a lo anterior se presenta un conjunto de comentarios, conclusiones, recomendaciones y aplicaciones de los resultados obtenidos y del trabajo en general.

C A P I T U L O I

MODELO MATEMATICO DE LA MAQUINA SINCRONICA

1.1 ECUACIONES DE LA MAQUINA SINCRONICA EN VARIABLES abc (11, 14)

La máquina sincrónica a modelarse es una máquina idealizada, con dos devanados amortiguadores o de damping.

Para el desarrollo de las ecuaciones se ha tomado en cuenta las siguientes restricciones y consideraciones:

- a) Entre-hierro uniforme.
- b) Distribución simétrica de los devanados, de tal manera de establecer solamente una onda giratoria de fuerza magneto-motriz sinusoidal, debido a las corrientes balanceadas del estator.
- c) Variación de las resistencias con la temperatura despreciable.
- d) Las ecuaciones se desarrollan para funcionamiento como motor y luego, se hacen los cambios para funcionamiento como generador.
- e) Se asume un comportamiento lineal del hierro magnético del núcleo y la saturación es introducida como una corrección de ese modelo lineal.

Un diagrama esquemático de la máquina sincrónica, en el cual no se muestran las inductancias mutuas, es el siguiente:

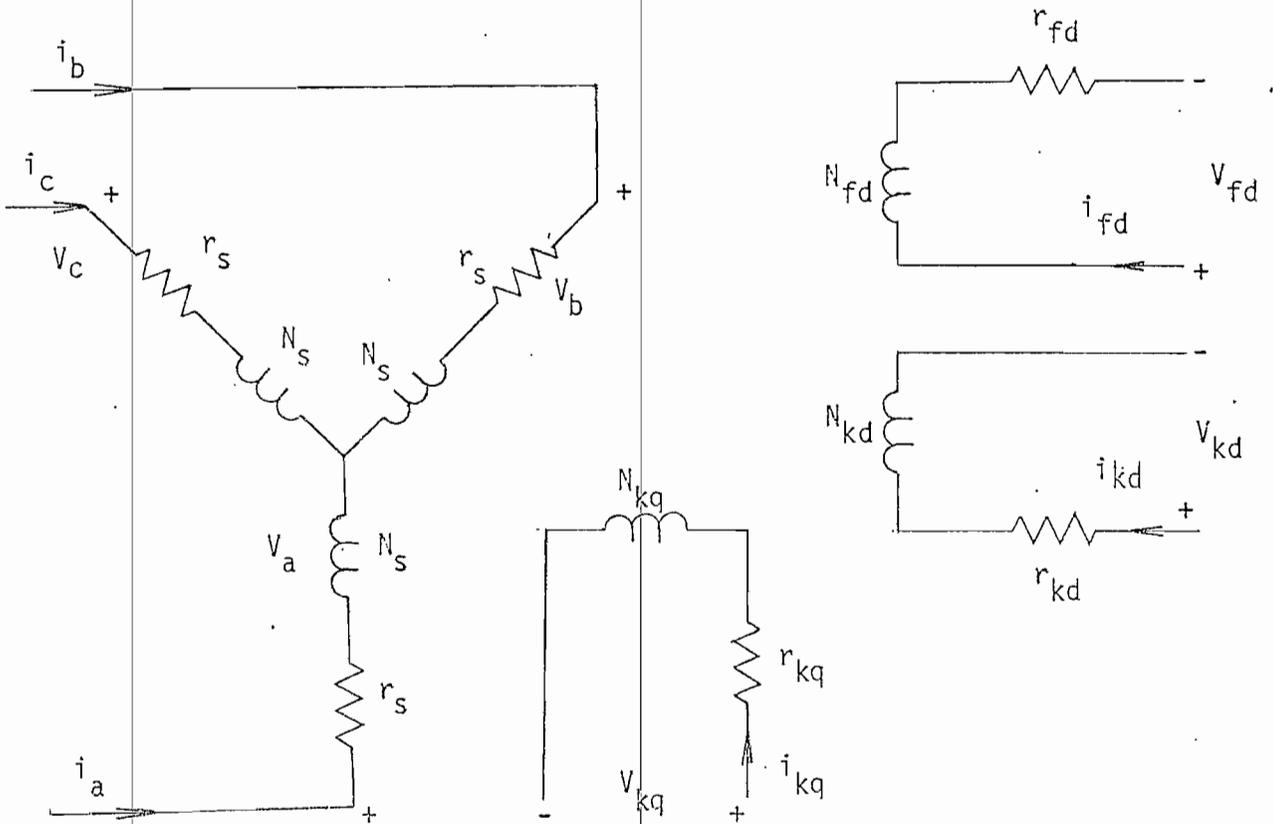


Fig. 1.1-1

Las ecuaciones de la máquina sincrónica, tomando en cuenta lo anteriormente expuesto son:

$$\begin{array}{c}
 V_{as} \\
 V_{bs} \\
 V_{cs} \\
 V_{kq} \\
 V_{kd} \\
 V_{fd}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{ccccccc}
 r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & r_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & r_{kq} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & r_{kd} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{fd} & 0
 \end{array}
 + p
 \begin{array}{c}
 i_{as} \\
 i_{bs} \\
 i_{cs} \\
 i_{kq} \\
 i_{kd} \\
 i_{fd}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \lambda_{as} \\
 \lambda_{bs} \\
 \lambda_{cs} \\
 \lambda_{kq} \\
 \lambda_{kd} \\
 \lambda_{fd}
 \end{array}$$

Ec. 1.1-1

1.2 ECUACIONES DE LA MÁQUINA SINCRÓNICA EN EL SISTEMA DE EJES DE REFERENCIA $qd0$ (11,14)

Se establece un nuevo sistema de ejes de referencia que rotan a la velocidad angular eléctrica del rotor; este cambio se lo hace por medio de las transformaciones de Park.

El siguiente diagrama esquemático muestra la disposición de este sistema de ejes de referencia.

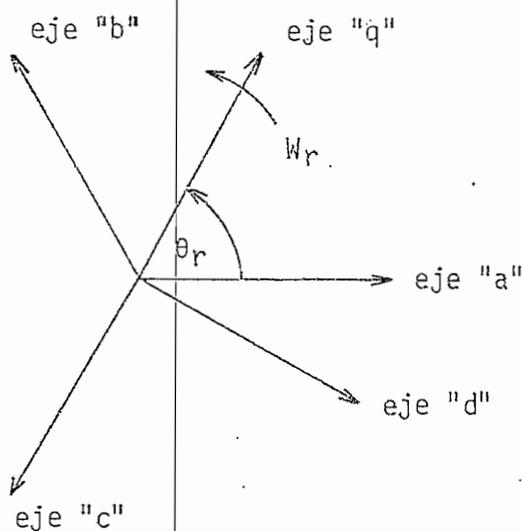


Fig. 1.2-1

Las variables del eje cero no están asociadas con la transformación y existen solamente cuando hay asimetría y en el lugar donde ésta se produce. La excitación coincide con el eje -d- y los devanados de amortiguamiento, uno con el eje -d- y el otro con el eje -q-.

Para la transformación se tiene la siguiente relación:

$$\begin{bmatrix} f_{qd0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_{abc} \end{bmatrix} \quad T^{-1} = T1 \quad \text{Ec. 1.2-1}$$

$$\begin{bmatrix} f_{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_{qd0} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 1.2-2}$$

Las matrices de transformación son las siguientes:

$$T = 2/3 \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos(\theta_r - 2\pi/3) & \cos(\theta_r + 2\pi/3) \\ \sin\theta_r & \sin(\theta_r - 2\pi/3) & \sin(\theta_r + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 1.2-3}$$

$$T1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \sin\theta_r & 1 \\ \cos(\theta_r - 2\pi/3) & \sin(\theta_r - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta_r + 2\pi/3) & \sin(\theta_r + 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 1.2-4}$$

Los voltajes y concatenaciones de flujo en el nuevo sistema de referencia están dados por:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{c} V_q \\ V_d \\ V_0 \\ V_{kq} \\ V_{kd} \\ V_{fd} \end{array} \\
 = \\
 \begin{array}{cccccccc}
 r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & r_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & r_{kq} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & r_{kd} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{fd}
 \end{array} \\
 + \\
 \begin{array}{c} i_q \\ i_d \\ i_0 \\ i_{kq} \\ i_{kd} \\ i_{fd} \end{array}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{cccccccc}
 0 & p\theta_r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -p\theta_r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{array} \\
 + \\
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{c} \lambda_q \\ \lambda_d \\ \lambda_0 \\ \lambda_{kq} \\ \lambda_{kd} \\ \lambda_{fd} \end{array} \\
 + p \\
 \begin{array}{c} \lambda_q \\ \lambda_d \\ \lambda_0 \\ \lambda_{kq} \\ \lambda_{kd} \\ \lambda_{fd} \end{array}
 \end{array}
 \end{array}$$

Ec. 1.2-5

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{c} \lambda_q \\ \lambda_d \\ \lambda_0 \\ \lambda_{kq} \\ \lambda_{kd} \\ \lambda_{fd} \end{array} \\
 = \\
 \begin{array}{cccccccc}
 L_{I_s+L_{aq}} & 0 & 0 & L_{aq} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & L_{I_s+L_{ad}} & 0 & 0 & L_{ad} & L_{ad} & L_{ad} \\
 0 & 0 & L_{I_s} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 L_{aq} & 0 & 0 & L_{kq+L_{aq}} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & L_{ad} & 0 & 0 & L_{kd+L_{ad}} & L_{ad} & L_{ad} \\
 0 & L_{ad} & 0 & 0 & 0 & L_{fd+L_{ad}} & L_{fd}
 \end{array} \\
 + \\
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{c} i_q \\ i_d \\ i_0 \\ i_{kq} \\ i_{kd} \\ i_{fd} \end{array} \\
 + p \\
 \begin{array}{c} i_q \\ i_d \\ i_0 \\ i_{kq} \\ i_{kd} \\ i_{fd} \end{array}
 \end{array}
 \end{array}$$

La potencia instantánea está dada por:

$$P_r = (3/2) \cdot r_s \cdot (i_q^2 + i_d^2 + 2 \cdot i_0)$$

$$P_t = (3/2) \cdot p (\lambda_q \cdot i_q + \lambda_d \cdot i_d + \lambda_0 \cdot i_0)$$

$$P_v = (3/2) \cdot W_r \cdot (\lambda_d \cdot i_q - \lambda_q \cdot i_d) \quad \text{Ec. 1.2-7}$$

$$P_{qd0} = P_r + P_t + P_v \quad \text{Ec. 1.2-8}$$

En donde:

P_r = Pérdidas resistivas.

P_t = Potencia de transformación.

P_v = Potencia de velocidad o electromagnética.

El torque electromagnético viene expresado como:

$$T_e = \frac{P_v}{W_r} = (3/2) \cdot (P_o/2) \cdot (\lambda_d \cdot i_q - \lambda_q \cdot i_d) \quad \text{Ec. 1.2-9}$$

Siendo:

P_o = Número de polos.

W_r = Velocidad angular eléctrica del rotor.

1.3 ECUACIONES DE LA MAQUINA SINCRONICA EN TERMINOS DE CONCATENACIONES DE FLUJO COMO VARIABLES DE ESTADO (11, 14)

En esta parte se toma en cuenta las siguientes consideraciones:

$$\psi = W_e \cdot \lambda$$

$$p\theta_r = W_r$$

Siendo:

$$p = d/dt$$

ψ = Concatenaciones de flujo por segundo.

W_b = Velocidad angular eléctrica base.

Por tanto la nueva presentación del sistema de ecuaciones es la siguiente:

$$\psi_q = X_{1s} \cdot i_q + X_{aq} \cdot (i_q + i_{kq})$$

$$\psi_d = X_{1s} \cdot i_d + \psi_{ad}$$

$$\psi_0 = X_{1s} \cdot i_0$$

$$\psi_{kq} = X_{1kq} \cdot i_{kq} + X_{aq} \cdot (i_q + i_{kq})$$

$$\psi_{kd} = X_{1kd} \cdot i_{kd} + \psi_{ad}$$

$$\psi_{fd} = X_{1fd} \cdot i_{fd} + \psi_{ad}$$

Ec. 1.3-1

$$V_q = (p/W_b) \cdot \psi_q + (W_r/W_b) \cdot \psi_d + r_s \cdot i_q$$

$$V_d = (p/W_b) \cdot \psi_d - (W_r/W_b) \cdot \psi_q + r_s \cdot i_d$$

$$V_0 = (p/W_b) \cdot \psi_0 + r_s \cdot i_0$$

$$0 = (p/W_b) \cdot \psi_{kq} + r_{kq} \cdot i_{kq}$$

$$0 = (p/W_b) \cdot \psi_{kd} + r_{kd} \cdot i_{kd}$$

$$V_f = (p/W_b) \cdot \psi_{fd} + r_{fd} \cdot i_{fd}$$

Ec. 1.3-2

Si el sistema de ecuaciones 1.3-1 es resuelto para corrientes y los resultados substituidos en el sistema de ecuaciones 1.3-2, se obtiene:

$$(1/W_b) \cdot |pK| = |U| + |M| \cdot |K| + \text{PSIAD} \cdot |S|$$

Ec. 1.3-3

En donde:

$$|K|^T = \begin{vmatrix} \psi_q & \psi_d & \psi_0 & \psi_{kq} & \psi_{kd} & \psi_{fd} \end{vmatrix}$$

$$|U|^T = \begin{vmatrix} v_q & v_d & v_0 & 0 & 0 & v_f \end{vmatrix}$$

$$|S|^T = \begin{vmatrix} 0 & \frac{r_s}{X_{1s}} & 0 & 0 & \frac{r_{kd}}{X_{1kd}} & \frac{r_{fd}}{X_{1fd}} \end{vmatrix}$$

$$\text{PSIAD} = \psi_{ad}$$

$$|M| = \begin{vmatrix} \frac{r_s}{X_{1s}} \cdot \left(\frac{X_{mq}}{X_{1s}} - 1 \right) & -\frac{W_r}{W_b} & 0 & \frac{r_s \cdot X_{mq}}{X_{1s} \cdot X_{1kq}} & 0 & 0 \\ \frac{W_r}{W_b} & -\frac{r_s}{X_{1s}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{r_s}{X_{1s}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{r_{kq} \cdot X_{mq}}{X_{1s} \cdot X_{1kq}} & 0 & 0 & \frac{r_{kq}}{X_{1kq}} \cdot \left(\frac{X_{mq}}{X_{1kq}} - 1 \right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{r_{kd}}{X_{1kd}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{r_{fd}}{X_{1fd}} \end{vmatrix}$$

Siendo éste el sistema de ecuaciones diferenciales, que tiene como variables a las concatenaciones de flujo por segundo. Las concatenaciones de flujo mutuo por segundo del eje directo (ψ_{ad}), permiten incluir la saturación.

Las corrientes vienen dadas por:

$$|Q| = |X| \cdot |K| + \text{PSIAD} \cdot |XN| \quad \text{Ec. 1.3-4}$$

En donde:

$$|Q|^T = |i_q, \quad i_d, \quad i_0, \quad i_{kq}, \quad i_{kd}, \quad i_{fd}|$$

$$|XN|^T = \left| 0, \quad -\frac{1}{X_{1s}}, \quad 0, \quad 0, \quad -\frac{1}{X_{1kd}}, \quad -\frac{1}{X_{1fd}} \right|$$

$$|X| = \begin{vmatrix} \frac{X_{mq}}{X_{1s}} - 1 & 0 & 0 & -\frac{X_{mq}}{X_{1s} \cdot X_{1kq}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{X_{1s}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{X_{1s}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{X_{mq}}{X_{1s} \cdot X_{1kq}} & 0 & 0 & -\frac{X_{mq}}{X_{1kq}} - 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{X_{1kd}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{X_{1fd}} \end{vmatrix}$$

En las anteriores ecuaciones se tiene:

$$\psi_{ad} = X_{ad} \cdot (i_d + i_{kd} + i_{fd}) \quad \text{Ec. 1.3-5}$$

$$\psi_{ad} = X_{md} \cdot \left| \frac{\psi_d}{X_{1s}} + \frac{\psi_{kd}}{X_{1kd}} + \frac{\psi_{fd}}{X_{1fd}} \right| \quad \text{Ec. 1.3-6}$$

$$X_{mq} = \left| \frac{1}{X_{1s}} + \frac{1}{X_{1kq}} + \frac{1}{X_{aq}} \right|^{-1} \quad \text{Ec. 1.3-7}$$

$$X_{md} = \left| \frac{1}{X_{1s}} + \frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{1kd}} + \frac{1}{X_{1fd}} \right|^{-1} \quad \text{Ec. 1.3-8}$$

Para incluir la saturación en el sistema de ecuaciones diferenciales no lineales, se calcula una función de saturación para ajustar ψ_{ad} y obtener su valor saturado (ψ_{ad}^*), utilizando éste en las ecuaciones. Se tiene las siguientes ecuaciones:

$$\psi_{ad}^* = \psi_{ad} - \frac{X_{md}}{X_{ad}} \times \text{DXI} \quad \text{Ec. 1.3-9}$$

$$\psi_{ad}^* = X_{md} \cdot \left| \frac{\psi_d}{X_{1s}} + \frac{\psi_{kd}}{X_{1kd}} + \frac{\psi_{fd}}{X_{1fd}} - \frac{\text{DXI}}{X_{ad}} \right| \quad \text{Ec. 1.3-10}$$

El comportamiento no lineal del hierro, se obtiene de la curva de vacío, en la que se representa el voltaje de armadura vs. la corriente de excitación. Para la simulación digital se construye la curva DXI en función de ψ_{ad}^* .

Los parámetros usados en las anteriores ecuaciones se definen como:

- r_s = Resistencia de armadura.
- X_{1s} = Reactancia de dispersión del devanado de armadura.
- r_{fd} = Resistencia de campo.
- X_{1fd} = Reactancia de dispersión del devanado de campo.
- r_{kd} = Resistencia del devanado amortiguador del eje directo.
- X_{1kd} = Reactancia de dispersión del devanado amortiguador del eje directo.
- r_{kq} = Resistencia del devanado amortiguador del eje en cuadratura.
- X_{1kq} = Reactancia de dispersión del devanado amortiguador del eje en cuadratura.
- X_{ad} = Reactancia de magnetización del eje directo.
- X_{aq} = Reactancia de magnetización del eje en cuadratura.
- $\omega_e, r, b,$ = Velocidad angular: eléctrica, del rotor y base.
- ψ_{ad} = Concatenaciones de flujo mutuo por segundo del eje directo.

1.4 ECUACIONES DEL SISTEMA MECANICO (11)

El torque electromagnético es positivo para acción motora y está expresado por:

$$T_e = \psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d \quad \text{Ec. 1.4-1}$$

$$T_e = \psi_d \cdot \left[\left(1 - \frac{X_{mq}}{X_{1s}}\right) \cdot \frac{\psi_q}{X_{1s}} - \left(\frac{X_{mq}}{X_{1s}} \cdot \frac{1}{X_{1kq}}\right) \cdot \psi_{kq} \right] - \psi_q \cdot \left(\frac{\psi_d - \psi_{ad}^*}{X_{1s}}\right) \quad \text{Ec. 1.4-2}$$

$0.68 \times 0 \quad (5.6322 \times 0.2 + 54) - (3.1485) (0.2426)$
 $(1.5511 - 0.7638)$
 $- 0.5413 + 0.338 = -0.2020 \text{ i}$

La velocidad del rotor se halla expresada por:

$$W_r = \frac{1}{2.H.p} \cdot (T_e - T_m) \quad \text{Ec. 1.4-3}$$

En donde:

H = Constante de inercia en segundos

T_m = Torque de la máquina impulsora en p.u.

El ángulo de potencia que define la posición relativa entre el campo magnético giratorio y el campo establecido por los polos, está expresado por:

$$\delta = \frac{W_b}{p} (W_r - W_e) \quad \text{Ec. 1.4-4}$$

En donde:

W_e = Velocidad angular eléctrica en p.u.

W_r = Velocidad angular eléctrica del rotor en p.u.

1.5 ECUACIONES DE LA MAQUINA SINCRONICA EN ESTADO ESTABLE (11)

Para el análisis de las perturbaciones, se asume que la máquina se encuentra inicialmente en estado estable, por tanto, es importante el análisis de este estado, ya que constituye el punto de partida para el estudio en condiciones de falla. En estas condiciones se presentan algunos cambios en las ecuaciones de la máquina. Así:

$$W_r = W_e$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = W_r$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = 0$$

$$i_{kq} = i_{kd} = 0$$

Las ecuaciones de voltaje serán:

$$V_q = r_s \cdot i_q + W_r \cdot (L_{ls} \cdot i_d + L_{ad} \cdot (i_d + i_{fd}))$$

$$V_d = r_s \cdot i_d - W_r \cdot (L_{ls} \cdot i_q + L_{aq} \cdot i_q)$$

$$V_f = r_{fd} \cdot i_{fd}$$

Ec. 1.5-1

Además:

$$X_d = X_{ls} + X_{ad}$$

Ec. 1.5-2

$$X_q = X_{ls} + X_{aq}$$

Ec. 1.5-3

Por tanto:

$$V_q = r_s \cdot i_q + X_d \cdot i_d + X_{ad} \cdot i_{fd}$$

$$V_d = r_s \cdot i_d - X_q \cdot i_q$$

$$V_f = r_{fd} \cdot i_{fd}$$

Ec. 1.5-4

El ángulo de potencia será:

$$\delta = \theta_r(0) - \theta_e(0) \quad \text{Ec. 1.5-5}$$

$$\delta = \theta_r(0)$$

$$\theta_e(0) = 0 \quad \text{Ec. 1.5-6}$$

El ángulo del rotor se expresa por:

$$\theta_r = W_r \cdot dt + \theta_r(0) \quad \text{Ec. 1.5-7}$$

En estado estable:

$$\theta_r = W_r \cdot t + \theta_r(0)$$

$$\theta_r = W_e \cdot t + \theta_r(0)$$

$$\theta_r = W_e \cdot t + \delta \quad \text{Ec. 1.5-8}$$

A partir de las transformaciones de Park se tiene:

$$f_a = f_q \cdot \cos \theta_r + f_d \cdot \sin \theta_r$$

$$F_a = F_q \cdot e^{j\delta} - j \cdot F_d \cdot e^{j\delta}$$

$$F_a \cdot e^{-j\delta} = F_q - j \cdot F_d \quad \text{Ec. 1.5-9}$$

Haciendo uso de las ecuaciones 1.5-9 y 1.5-4, se tendrá:

$$V_a \cdot e^{-j\delta} = (r_s \cdot I_q + X_d \cdot I_d + X_{ad} \cdot I_{fd}) - j \cdot (r_s \cdot I_d - X_q \cdot I_q) \quad \text{Ec. 1.5-10}$$

Sumando y restando $X_q \cdot I_d$ a la ecuación anterior y considerando que:

$$j \cdot \underline{I}_a \cdot e^{-j\delta} = I_d + j \cdot I_q$$

Se tendrá:

$$\underline{V}_a = (r_s + j \cdot X_q) \cdot \underline{I}_a + ((X_d - X_q) \cdot I_d + X_{ad} \cdot I_{fd}) \cdot e^{j\delta} \quad \text{Ec. 1.5-11}$$

Esta ecuación se puede escribir de la siguiente manera:

$$\underline{V}_a = (r_s + j \cdot X_q) \cdot \underline{I}_a + \underline{E}_a \quad \text{Ec. 1.5-12}$$

Siendo:

$$\underline{E}_a = \text{Voltaje interno}$$

$$|\underline{E}_a| = (X_d - X_q) \cdot I_d + X_{ad} \cdot I_{fd} \quad \text{Ec. 1.5-13}$$

Con esta última expresión se puede establecer el circuito equivalente para la fase -a-, cuando la máquina se encuentra funcionando como motor en estado estable, según lo demuestra el siguiente gráfico.

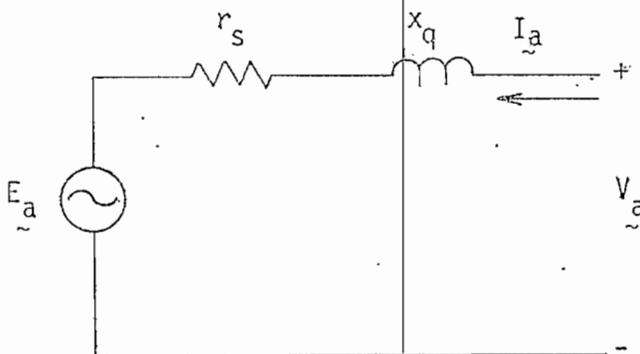


Fig. 1.5-1

Cuando la máquina se encuentra funcionando como generador, bastará con hacer el siguiente cambio:

$$\underline{E}_a = (r_s + j.X_q) \cdot \underline{I}_a + \underline{V}_a \quad \text{Ec. 1.5-14}$$

$$|E_a| = (X_q - X_d) \cdot I_d + X_{ad} \cdot I_{fd} \quad \text{Ec. 1.5-15}$$

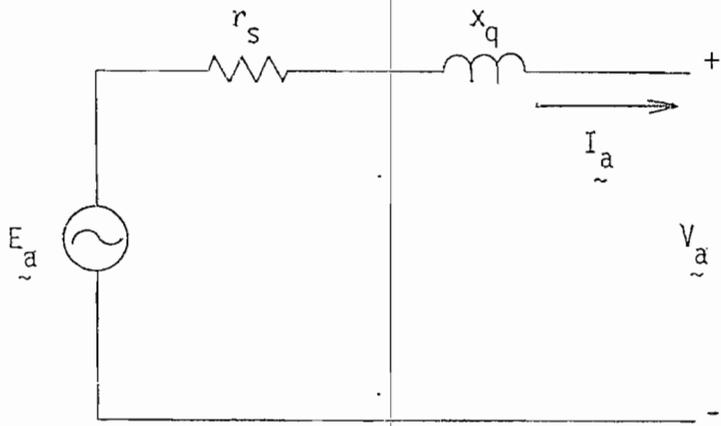


Fig. 1.5-2

El ángulo β representa el desfase de la corriente; el modelo matemático fue desarrollado para acción motora, por tanto, hay que considerar la ubicación correcta de la corriente de fase para el caso de funcionamiento de la máquina como generador, para de esta manera utilizar el mismo modelo matemático, tanto para el funcionamiento como motor, como para generador.

$$\beta = \phi(\text{fp}) \quad \text{ACCION MOTORA}$$

$$\beta = \phi + \pi \quad \text{ACCION GENERADORA}$$

C A P I T U L O I I

MODELO MATEMATICO EN CONDICIONES DE FALLA

En este capítulo se analiza a la máquina sincrónica en condiciones de falla, desconexión y cortocircuito de fases, para cada caso se determina el valor de los voltajes de falla, los cuales sirven para la resolución del sistema de ecuaciones diferenciales 1.3-3, para de esta manera poder determinar las concatenaciones de flujo por segundo y con éstas, las corrientes que circularán en condiciones de falla y todas las variables de la máquina. Al final del análisis se presenta un algoritmo general que permite simular cualquier tipo de falla.

2.1 DESCONEXION DE FASES

En esta parte, se considera a la máquina conectada a una barra infinita y funcionando en estado estable, produciéndose luego la desconexión (una, dos o tres fases), incluyendo el recierre posterior, como se indicó anteriormente, la máquina podrá trabajar como motor o generador.

En la figura 2.1-1 se muestra el sistema a considerarse para el estudio de la desconexión de fases.

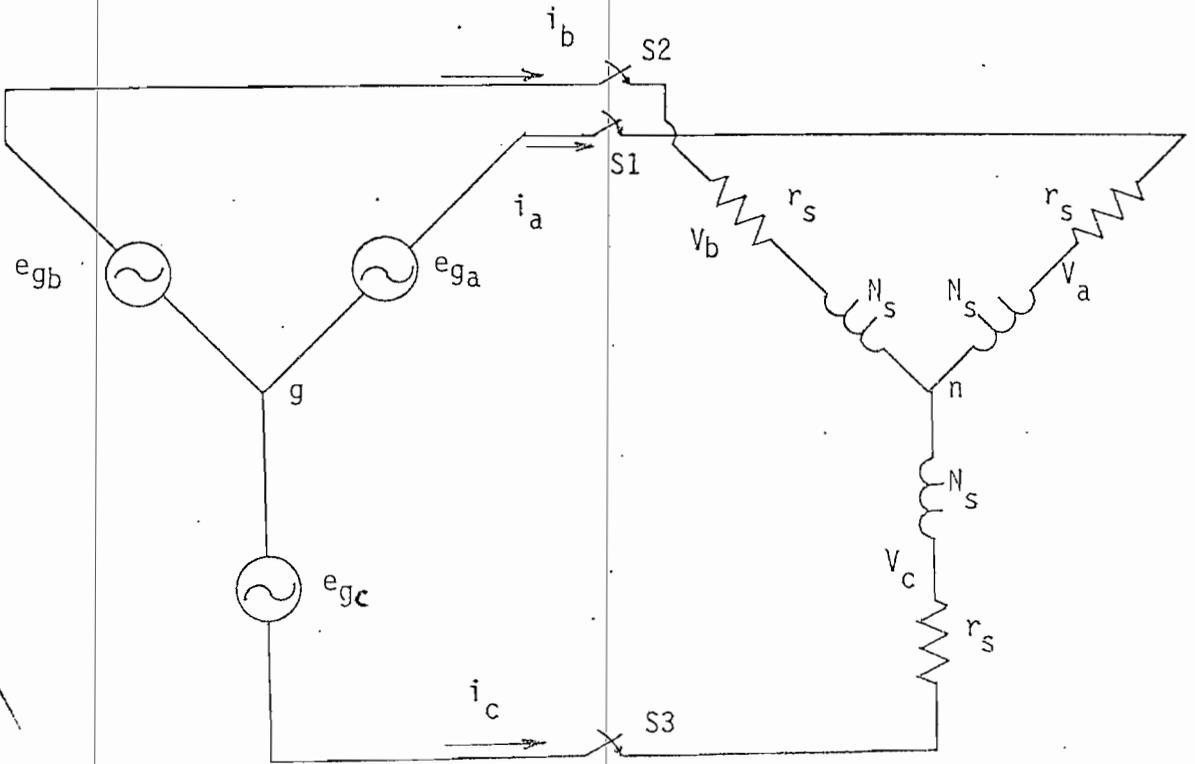


Fig. 2.1-1

En donde:

e_{g_a} , e_{g_b} y e_{g_c} = voltajes de la barra a la que está conectada la máquina.

g = neutro de la barra infinita.

n = neutro de la máquina.

S_1 , S_2 y S_3 = interruptores que indican el estado de conexión o desconexión de las fases.

V_{ng} = Voltaje del neutro de la máquina referido al neutro de la barra.

V_a , V_b y V_c = voltaje de los terminales de la máquina.

i_a , i_b e i_c = corrientes que fluyen de la barra a la máquina.

En general para la máquina funcionando como motor:

$$V_a = \frac{P\psi_a}{W_b} + r \cdot i_a$$

$$V_b = \frac{P\psi_b}{W_b} + r \cdot i_b$$

$$V_c = \frac{P\psi_c}{W_b} + r \cdot i_c$$

Ec. 2.1-1

Cuando ocurre la desconexión de cualquiera de las fases la corriente que circulará por esa fase será cero, por tanto se debe determinar el valor de los voltajes para estas condiciones.

$$V_a = \frac{P\psi_a}{W_b} ; \text{ cuando } i_a = 0$$

$$V_b = \frac{P\psi_b}{W_b} ; \text{ cuando } i_b = 0$$

$$V_c = \frac{P\psi_c}{W_b} ; \text{ cuando } i_c = 0$$

Por tanto se hace necesario determinar el valor de las concatenaciones de flujo por segundo y sus derivadas para cada caso.

Para $i_a = 0$ se tendrá:

De acuerdo a la ecuación 1.2-2

$$i_a = i_q \cdot \cos \theta_r + i_d \cdot \sin \theta_r + i_0$$

Por tanto:

$$i_q \cdot \cos \theta_r + i_d \cdot \sin \theta_r + i_0 = 0 \quad \text{Ec. 2.1-2}$$

De la ecuación 1.3-4

$$i_q = \psi_q \cdot \left(-\frac{\frac{X_{mq}}{X_{1s}} - 1}{X_{1s}} \right) - \psi_{kq} \cdot \left(\frac{X_{mq}}{X_{1s} \cdot X_{1kq}} \right)$$

$$i_d = \frac{\psi_d - \psi_{ad}}{X_{1s}}$$

$$i_0 = \frac{\psi_0}{X_{1s}}$$

Reemplazando estos valores en la ecuación 2.1-2

$$\cos \theta_r \cdot \frac{1}{X_{1s}} \cdot \left[-\psi_q \cdot \left(\frac{X_{mq}}{X_{1s}} - 1 \right) - \psi_{kq} \cdot \left(\frac{X_{mq}}{X_{1kq}} \right) \right] + \sin \theta_r \cdot \left(\frac{\psi_d - \psi_{ad}}{X_{1s}} \right) + \frac{\psi_0}{X_{1s}} = 0$$

Reordenando esta ecuación se tendrá:

$$\psi_q \cdot \cos \theta_r + \psi_d \cdot \sin \theta_r + \psi_0 = X_{mq} \cdot \left(\frac{\psi_q}{X_{ls}} + \frac{\psi_{kq}}{X_{lkq}} \right) \cdot \cos \theta_r + \psi_{ad} \cdot \sin \theta_r$$

De acuerdo a la ecuación 1.2-2

$$\psi_a = \psi_q \cdot \cos \theta_r + \psi_d \cdot \sin \theta_r + \psi_0$$

Por tanto:

$$\psi_a = X_{mq} \cdot \left(\frac{\psi_q}{X_{ls}} + \frac{\psi_{kq}}{X_{lkq}} \right) \cdot \cos \theta_r + \psi_{ad} \cdot \sin \theta_r \quad \text{Ec. 2.1-3}$$

Según la ecuación 1.3-6

$$\psi_{ad} = X_{md} \cdot \left(\frac{\psi_d}{X_{ls}} + \frac{\psi_{kd}}{X_{lkd}} + \frac{\psi_{fd}}{X_{lfd}} \right)$$

Reemplazando en la ecuación 2.1-3

$$\begin{aligned} \psi_a &= X_{mq} \cdot \left(\frac{\psi_q}{X_{ls}} + \frac{\psi_{kq}}{X_{lkq}} \right) \cdot \cos \theta_r + \\ &+ X_{md} \cdot \left(\frac{\psi_d}{X_{ls}} + \frac{\psi_{kd}}{X_{lkd}} + \frac{\psi_{fd}}{X_{lfd}} \right) \cdot \sin \theta_r \end{aligned} \quad \text{Ec. 2.1-4}$$

Por consiguiente la derivada será:

$$\begin{aligned}
 P\psi_a &= X_{mq} \cdot \cos \theta_r \cdot \left(\frac{P\psi_q}{X_{1s}} + \frac{P\psi_{kq}}{X_{1kq}} \right) - X_{mq} \cdot \sin \theta_r \cdot W_r \cdot \left(\frac{\psi_q}{X_{1s}} + \frac{\psi_{kq}}{X_{1kq}} \right) + \\
 &+ X_{md} \cdot \sin \theta_r \cdot \left(\frac{P\psi_d}{X_{1s}} + \frac{P\psi_{kd}}{X_{1kd}} + \frac{P\psi_{fd}}{X_{1fd}} \right) + \\
 &+ X_{md} \cdot \cos \theta_r \cdot W_r \cdot \left(\frac{\psi_d}{X_{1s}} + \frac{\psi_{kd}}{X_{1kd}} + \frac{\psi_{fd}}{X_{1fd}} \right)
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 2.1-5}$$

De igual manera se puede determinar los valores de las concatenaciones de flujo por segundo y sus derivadas cuando sucede la desconexión de las otras fases, así:

Para $i_b = 0$

$$\begin{aligned}
 \psi_b &= X_{mq} \cdot \left(\frac{\psi_q}{X_{1s}} + \frac{\psi_{kq}}{X_{1kq}} \right) \cdot \cos (\theta_r - 2\pi/3) + \\
 &+ X_{md} \cdot \left(\frac{\psi_d}{X_{1s}} + \frac{\psi_{kd}}{X_{1kd}} + \frac{\psi_{fd}}{X_{1fd}} \right) \cdot \sin (\theta_r - 2\pi/3)
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 2.1-6}$$

Su derivada será:

$$P\psi_b = X_{mq} \cdot \cos(\theta_r - 2\pi/3) \cdot \left(\frac{P\psi_q}{X_{1s}} + \frac{P\psi_{kq}}{X_{1kq}} \right) - X_{mq} \cdot \sin(\theta_r - 2\pi/3) \cdot W_r \cdot \left(\frac{\psi_q}{X_{1s}} + \frac{\psi_{kq}}{X_{1kq}} \right) +$$

$$\begin{aligned}
 &+ X_{md} \cdot \sin(\theta_r - 2\pi/3) \cdot \left(\frac{P\psi_d}{X_{1s}} + \frac{P\psi_{kd}}{X_{1kd}} + \frac{P\psi_{fd}}{X_{1fd}} \right) + \\
 &+ X_{md} \cdot \cos(\theta_r - 2\pi/3) \cdot W_r \cdot \left(\frac{\psi_d}{X_{1s}} + \frac{\psi_{kd}}{X_{1kd}} + \frac{\psi_{fd}}{X_{1fd}} \right)
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 2.1-7}$$

Para $i_c = 0$

$$\begin{aligned}
 \psi_c &= X_{mq} \cdot \cos(\theta_r + 2\pi/3) \cdot \left(\frac{\psi_q}{X_{1s}} + \frac{\psi_{kq}}{X_{1kq}} \right) + \\
 &+ X_{md} \cdot \sin(\theta_r + 2\pi/3) \cdot \left(\frac{\psi_d}{X_{1s}} + \frac{\psi_{kd}}{X_{1kd}} + \frac{\psi_{fd}}{X_{1fd}} \right)
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 2.1-8}$$

Su derivada será:

$$\begin{aligned}
 P\psi_c &= X_{mq} \cdot \cos(\theta_r + 2\pi/3) \cdot \left(\frac{P\psi_q}{X_{1s}} + \frac{P\psi_{kq}}{X_{1kq}} \right) - X_{mq} \cdot \sin(\theta_r + 2\pi/3) \cdot W_r \cdot \left(\frac{\psi_q}{X_{1s}} + \frac{\psi_{kq}}{X_{1kq}} \right) + \\
 &+ X_{md} \cdot \sin(\theta_r + 2\pi/3) \cdot \left(\frac{P\psi_d}{X_{1s}} + \frac{P\psi_{kd}}{X_{1kd}} + \frac{P\psi_{fd}}{X_{1fd}} \right) + \\
 &+ X_{md} \cdot \cos(\theta_r + 2\pi/3) \cdot W_r \cdot \left(\frac{\psi_d}{X_{1s}} + \frac{\psi_{kd}}{X_{1kd}} + \frac{\psi_{fd}}{X_{1fd}} \right)
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 2.1-9}$$

Las relaciones encontradas en esta parte servirán en el análisis de desconexión de fases y más adelante para el estudio de cortocircuitos.

2.1.1 DESCONEXION DE UNA FASE

En esta parte se analiza las condiciones para la desconexión de una fase, teniéndose que determinar los valores de voltaje de falla para cada una de las fases de la máquina, lo cual se hace en base a la figura 2.1-1.

a. Desconexión de la Fase a

En estas condiciones S_1 estaría abierto, S_2 y S_3 cerrados:

$$i_a = 0$$

Por tanto los voltajes de la máquina serán:

$$V_a = \frac{P\psi_a}{W_b} \quad ; \quad V_a = -V_b - V_c$$

$$V_b = e_{gb} - V_{ng}$$

$$V_c = e_{gc} - V_{ng}$$

Ec. 2.1-10

Además:

$$V_a = 2.V_{ng} - e_{gb} - e_{gc}$$

En consecuencia:

$$V_{ng} = \frac{1}{2} \cdot (V_a + e_{gb} + e_{gc})$$

Ec. 2.1-11

b. Desconexión de la fase b

En estas condiciones S_2 estaría abierto, S_1 y S_3 cerrados.

$$i_b = 0$$

Los voltajes de la máquina serán:

$$V_b = \frac{P\psi_b}{W_b} ; \quad V_b = -V_a - V_c$$

$$V_a = e_{ga} - V_{ng}$$

$$V_c = e_{gc} - V_{ng}$$

Ec. 2.1-12

Además:

$$V_b = 2.V_{ng} - e_{ga} - e_{gc}$$

Por tanto:

$$V_{ng} = \frac{1}{2} \cdot (V_b + e_{ga} + e_{gc})$$

Ec. 2.1-13

c. Desconexión de la fase c

Para este caso S_3 estaría abierto, S_1 y S_2 cerrados:

$$i_c = 0$$



Los voltajes de la máquina serán:

$$V_c = \frac{P\psi_c}{W_b} ; \quad V_c = -V_a - V_b$$

$$V_a = e_{ga} - V_{ng}$$

$$V_b = e_{gb} - V_{ng}$$

Ec. 2.1-14

Además:

$$V_c = 2 \cdot V_{ng} - e_{ga} - e_{gb}$$

Por tanto:

$$V_{ng} = \frac{1}{2} \cdot (V_c + e_{ga} + e_{gb})$$

Ec. 2.1-15

2.1.2 DESCONEXION DE DOS FASES

En esta parte se analiza las condiciones para la desconexión de dos fases de la máquina, para de esta manera obtener los voltajes de falla que son necesarios para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales planteado. El análisis se lo hace en base a la figura 2.1-1.

a. Desconexión de las fases a y b

Para esta condición S_1 y S_2 estarían abiertos y S_3 cerrado.

$$i_a = i_b = 0$$

Los voltajes de la máquina serán:

$$V_a = \frac{P\psi_a}{W_b}$$

$$V_b = \frac{P\psi_b}{W_b}$$

$$V_c = e_{gc} - V_{ng} \quad ; \quad V_c = -V_a - V_b$$

$$V_{ng} = e_{gc} + V_a + V_b \quad \text{Ec. 2.1-16}$$

b. Desconexión de las fases a y c

En estas condiciones S_1 y S_3 estarían abiertos y S_2 cerrado.

$$i_a = i_c = 0$$

Por tanto los voltajes serán:

$$V_a = \frac{P\psi_a}{W_b}$$

$$V_c = \frac{P\psi_c}{W_b}$$

$$V_b = e_{gb} - V_{ng} \quad ; \quad V_b = -V_a - V_c$$

$$V_{ng} = e_{gb} + V_a + V_c \quad \text{Ec. 2.1-17}$$

c. Desconexión de las fases b y c

Para este caso S_2 y S_3 estarían abiertos y S_1 cerrado.

$$i_b = i_c = 0$$

Por tanto los voltajes serán:

$$V_b = \frac{P\psi_b}{W_b}$$

$$V_c = \frac{P\psi_c}{W_b}$$

$$V_a = e_{ga} - V_{ng} \quad ; \quad V_a = -V_b - V_c$$

$$V_{ng} = e_{ga} + V_b + V_c \quad \text{Ec. 2.1-18}$$

2.1.3 DESCONEXION DE TRES FASES

Aquí se analiza el efecto de desconectar las tres fases e igual que en los casos anteriores se determina los valores de los voltajes de falla. El análisis se lo hace en base a la figura 2.1-1.

Para este caso S_1 , S_2 y S_3 estarían abiertos.

$$i_a = i_b = i_c = 0$$

Por consiguiente los voltajes de fase serán:

$$V_a = \frac{P\psi_a}{W_b}$$

$$V_b = \frac{P\psi_b}{W_b}$$

$$V_c = \frac{P\psi_c}{W_b}$$

Ec. 2.1-19

2.1.4 GENERALIZACION (.12)

El objeto de este trabajo es encontrar un algoritmo matemático que permita simular cualquier caso de los analizados, por tanto se realiza el siguiente análisis tendiente a determinar el algoritmo mencionado, para lo cual se plantean las siguientes relaciones.

$$V_0 = G5 \cdot \frac{G2}{2} \cdot |V_0(J1) + G0 \cdot V_0(J2) + G1 \cdot V(J2) + V(J3)|$$

$$V_N(J1) = V_0(J1)$$

$$V_N(J2) = G1 \cdot |V(J2) - V_0| + G0 \cdot V_0(J2)$$

$$V_N(J3) = G3 \cdot |V(J3) - V_0| + G4 \cdot V_0(J3) \quad \text{Ec. 2.1-20}$$

En donde:

- V_0 = Voltaje del neutro de la máquina
- $V_N(Ji)$ = Voltajes después de la perturbación
- $V(Ji)$ = Voltajes de la barra infinita
- $V_0(Ji)$ = Voltajes cuando las fases están abiertas

G_i y J_i son una función de G y J respectivamente, los cuales a su vez indican el caso particular a analizarse, siendo G el indicador del número de fases a desconectarse y J indica cuál o cuáles fases se desconectan.

De acuerdo al análisis de desconexión de fases realizado en los numerales anteriores, se puede elaborar un cuadro de los valores que toman los G_i y J_i para cumplir con el sistema de ecuaciones 2.1-20.

	G	DESCONEXION DE UNA FASE			DESCONEXION DE DOS FASES			DESCONEXION DE TRES FASES
		Fase a	Fase b	Fase c	Fases a y b	Fases b y c	Fases a y c	
	G	1				2		3
	G0	0				1		1
	G1	1				0		0
	G2	1				2		0
	G3	1				1		0
	G4	0				0		1
	J	1	2	3	1	2	3	1
	J1	1	2	3	1	2	3	1
	J2	2	3	1	2	3	1	2
	J3	3	1	2	3	1	2	3

Como se observa, G y J pueden tomar hasta tres valores y para cada uno de ellos los Gi y Ji tienen un valor determinado, pudiendo ser expresados como funciones cuadráticas de G y J respectivamente, lo cual se lo puede realizar de la siguiente manera:

$$G_i = a.G^2 + b.G + C$$

$$J_i = a.J^2 + b.J + C$$

Ec. 2.1-21

Siendo las incógnitas a, b y c para cada G_i y J_i .

En base al cuadro anterior, se puede reemplazar los valores de los G_i y J_i para cada valor de G y J, con lo cual se obtiene un conjunto de tres ecuaciones con tres incógnitas para cada G_i y J_i , las cuales al ser resueltas dan como resultado las siguientes relaciones:

$$G_0 = -\frac{1}{2} \cdot G^2 + \frac{5}{2} \cdot G - 2$$

$$G_1 = \frac{1}{2} \cdot G^2 - \frac{5}{2} \cdot G + 3 = 1 - G_0$$

$$G_2 = -\frac{3}{2} \cdot G^2 + \frac{11}{2} \cdot G - 3$$

$$G_3 = -\frac{1}{2} \cdot G^2 + \frac{3}{2} \cdot G$$

$$G_4 = \frac{1}{2} \cdot G^2 - \frac{3}{2} \cdot G + 1 = 1 - G_3$$

$$J_1 = J$$

$$J_2 = -\frac{3}{2} \cdot J^2 + \frac{11}{2} \cdot J - 2$$

$$J_3 = \frac{3}{2} \cdot J^2 - \frac{13}{2} \cdot J + 8$$

$$G_5 = 1 \text{ si el neutro está desconectado}$$

$$G_5 = 0 \text{ si el neutro está conectado}$$

Ec. 2.1-22

2.2 CORTOCIRCUITO DE FASES

En esta parte se considera a la máquina funcionando en vacío o conectada a una barra infinita y con carga en estado estable, produciéndose luego la falla. Se analiza todos los casos posibles de cortocircuito: fase-tierra, fase-fase, fase-fase-tierra y trifásico; igual que en el análisis de desconexión de fases, el objetivo es encontrar los voltajes de fase para las condiciones de falla.

En forma similar a los casos de desconexión de fases, cuando las corrientes tienen un valor de cero, los voltajes toman los siguientes valores:

$$V_a = \frac{P\psi_a}{W_b} ; \text{ cuando } i_a = 0$$

$$V_b = \frac{P\psi_b}{W_b} ; \text{ cuando } i_b = 0$$

$$V_c = \frac{P\psi_c}{W_b} ; \text{ cuando } i_c = 0$$

Los valores de $P\psi_a$, $P\psi_b$ y $P\psi_c$ son los dados por las ecuaciones 2.1-5, 2.1-7 y 2.1-9.

A continuación en la figura 2.2-1 se muestra el sistema a considerarse para el estudio de cortocircuitos.

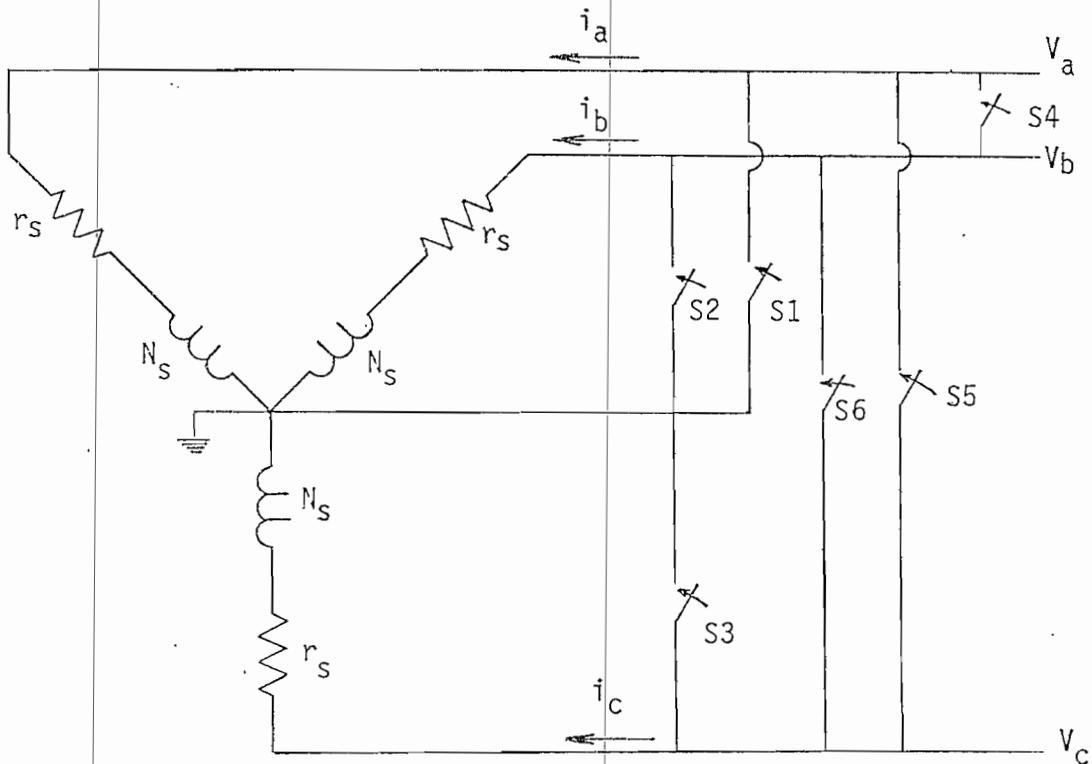


Fig. 2.2-1

Siendo:

- V_a, V_b y V_c = Voltaje a los terminales de la máquina.
- i_a, i_b e i_c = Corrientes de fase que fluyen hacia la máquina.
- e_{ga}, e_{gb} y e_{gc} = Voltajes de fase de la barra infinita.
- S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 y S_6 = Interruptores que indican el tipo de falla a analizarse.

2.2.1 CORTOCIRCUITO FASE-TIERRA

Se analiza el cortocircuito de cada una de las fases de la máquina con tierra, para el análisis se toma como referencia la figura 2.2-1, obteniéndose como resultado los voltajes de fase en condiciones de falla.

a. Cortocircuito de la fase a

Para este caso S_1 estaría cerrado y los restantes abiertos, por tanto el voltaje de la fase a será cero y los voltajes de las fases b y c se analizan a continuación.

$$\begin{aligned} V_a &= 0 \\ V_b &= V_{b0} \\ V_c &= V_{c0} \end{aligned} \qquad \text{Ec. 2.2-1}$$

En donde V_{b0} y V_{c0} son:

Cuando la máquina está funcionando en vacío:

$$\begin{aligned} V_{b0} &= \frac{P\psi_b}{W_b} \\ V_{c0} &= \frac{P\psi_c}{W_b} \end{aligned}$$

Cuando la máquina se encuentra conectada a una barra infinita:

$$\begin{aligned} V_{b0} &= e_{gb} \\ V_{c0} &= e_{gc} \end{aligned}$$

b. Cortocircuito de la fase b

En este caso S_2 estará cerrado y los restantes abiertos, por tanto los voltajes de fase tomarán los siguientes valores:

$$y_b = 0$$

$$V_a = V_{a0}$$

$$V_c = V_{c0}$$

Ec. 2.2-2

En donde V_{a0} y V_{c0} son:

Cuando la máquina está funcionando en vacío:

$$V_{a0} = \frac{P\psi_a}{W_b}$$

$$V_{c0} = \frac{P\psi_c}{W_b}$$

Cuando la máquina se encuentra conectada a una barra infinita:

$$V_{a0} = e_{ga}$$

$$V_{c0} = e_{gc}$$

c. Cortocircuito de la fase c

Para este caso S3 estará cerrado y los restantes abiertos, por consiguiente los voltajes de fase de la máquina serán:

$$V_c = 0$$

$$V_a = V_{a0}$$

$$V_b = V_{b0}$$

Ec. 2.2-3

En donde V_{a0} y V_{b0} son:

Cuando la máquina se encuentra funcionando en vacío:

$$V_{a0} = \frac{P\psi_a}{W_b}$$

$$V_{b0} = \frac{P\psi_b}{W_b}$$

Cuando la máquina se encuentra conectada a una barra infinita:

$$V_{a0} = e_{ga}$$

$$V_{b0} = e_{gb}$$

2.2.2 CORTOCIRCUITO FASE-FASE

En esta parte se analiza las condiciones para un cortocircuito entre dos fases, en base a lo cual se determina los voltajes de fase en condiciones de falla. El análisis se lo realiza en base a la figura 2.2-1.

a. Cortocircuito fase a-fase b

Para este caso S4 estará cerrado y los restantes abiertos, por tanto se

tendrá:

$$V_a = V_b \quad \text{Ec. 2.2-4}$$

$$i_a = -i_b \quad \text{Ec. 2.2-5}$$

$$V_c = V_{c0} \quad \text{Ec. 2.2-6}$$

Tomando los valores de V_a y V_b del conjunto de ecuaciones 2.1-1 y reemplazándolos en la ecuación 2.2-4 y a su vez utilizando la ecuación 2.2-5, se obtiene:

$$\frac{P\psi_a}{W_b} + r \cdot i_a = \frac{P\psi_b}{W_b} - r \cdot i_a$$

Por tanto:

$$\frac{P\psi_a}{W_b} - \frac{P\psi_b}{W_b} + 2 \cdot r \cdot i_a = 0 \quad \text{Ec. 2.2-7}$$

De acuerdo a la ecuación 1.2-2:

$$\psi_a = \psi_q \cdot \cos \theta_r + \psi_d \cdot \sin \theta_r + \psi_0$$

$$\psi_b = \psi_q \cdot \cos(\theta_r - 2\pi/3) + \psi_d \cdot \sin(\theta_r - 2\pi/3) + \psi_0$$

Reemplazando estos valores en la ecuación 2.2-7 se tendrá:

$$\begin{aligned} & P\psi_q \cdot \cos\theta_r - \psi_q \cdot \sin\theta_r \cdot W_r + P\psi_d \cdot \sin\theta_r + \psi_d \cdot \cos\theta_r \cdot W_r + \\ & -P\psi_q \cdot \cos(\theta_r - 2\pi/3) + \psi_q \cdot \sin(\theta_r - 2\pi/3) \cdot W_r - P\psi_d \cdot \sin(\theta_r - 2\pi/3) + \\ & -\psi_d \cdot \cos(\theta_r - 2\pi/3) \cdot W_r + 2 \cdot r \cdot i_a \cdot W_b = 0 \end{aligned}$$

Reordenando se obtiene:

$$\begin{aligned} & P\psi_q \cdot |\cos\theta_r - \cos(\theta_r - 2\pi/3)| + \psi_q \cdot W_r \cdot |\sin(\theta_r - 2\pi/3) - \sin\theta_r| + \\ & + P\psi_d \cdot |\sin\theta_r - \sin(\theta_r - 2\pi/3)| + \psi_d \cdot W_r \cdot |\cos\theta_r - \cos(\theta_r - 2\pi/3)| + \\ & + 2 \cdot r \cdot i_a \cdot W_b = 0 \\ & |\cos\theta_r - \cos(\theta_r - 2\pi/3)| \cdot (P\psi_q + \psi_d \cdot W_r) + \\ & + |\sin\theta_r - \sin(\theta_r - 2\pi/3)| \cdot (P\psi_d - \psi_q \cdot W_r) + 2 \cdot r \cdot i_a \cdot W_b = 0 \end{aligned}$$

La corriente de la fase a será:

$$i_a = \frac{1}{2 \cdot r \cdot W_b} \cdot \{ |\cos(\theta_r - 2\pi/3) - \cos\theta_r| \cdot (P\psi_q + \psi_d \cdot W_r) +$$

$$|\sin(\theta_r - 2\pi/3) - \sin\theta_r| \cdot (P\psi_d - \psi_q \cdot W_r) \}$$

Ec. 2.2-8

Por tanto el voltaje de la fase a será:

$$V_a = \frac{1}{W_b} \cdot \{P\psi_q \cdot \cos\theta_r - \psi_q \cdot \sin\theta_r \cdot W_r + P\psi_d \cdot \sin\theta_r + \psi_d \cdot \cos\theta_r \cdot W_r + \\ + \frac{1}{2} \cdot |(\cos(\theta_r - 2\pi/3) - \cos\theta_r) \cdot (P\psi_q + \psi_d \cdot W_r) + \\ + (\sin(\theta_r - 2\pi/3) - \sin\theta_r) \cdot (P\psi_d - \psi_q \cdot W_r)|\}$$

Reordenando se obtiene:

$$V_a = \frac{1}{2 \cdot W_b} \cdot \{(P\psi_q + \psi_d \cdot W_r) \cdot |\cos(\theta_r - 2\pi/3) + \cos\theta_r| + \\ + (P\psi_d - \psi_q \cdot W_r) \cdot |\sin(\theta_r - 2\pi/3) + \sin\theta_r|\} \quad \text{Ec. 2.2-9}$$

El valor de V_{CO} será:

Si la máquina se encuentra funcionando en vacío:

$$V_{CO} = \frac{P\psi_c}{W_b}$$

Cuando la máquina se encuentra conectada a una barra infinita:

$$V_{CO} = e_{gc}$$

b. Cortocircuito fase a-fase c

Para este caso S5 estará cerrado y los restantes abiertos, por tanto:

$$V_a = V_c \quad \text{Ec. 2.2-10}$$

$$i_a = -i_c \quad \text{Ec. 2.2-11}$$

$$V_b = V_{b0} \quad \text{Ec. 2.2-12}$$

Tomando los valores de V_a y V_c dados por el conjunto de ecuaciones 2.1-1 y reemplazándolos en la ecuación 2.2-10 y a su vez utilizando la ecuación 2.2-11 se obtiene:

$$\frac{P\psi_a}{W_b} + r \cdot i_a = \frac{P\psi_c}{W_b} - r \cdot i_a$$

Por tanto:

$$\frac{P\psi_a}{W_b} - \frac{P\psi_c}{W_b} + 2 \cdot r \cdot i_a = 0 \quad \text{Ec. 2.2-13}$$

De acuerdo a la ecuación 1.2-2

$$\psi_c = \psi_q \cdot \cos(\theta_r + 2\pi/3) + \psi_d \cdot \sin(\theta_r + 2\pi/3) + \psi_0$$

Reemplazando en la ecuación 2.2-13

$$P\psi_q \cdot \cos\theta_r - \psi_q \cdot \sin\theta_r \cdot W_r + P\psi_d \cdot \sin\theta_r + \psi_d \cdot \cos\theta_r \cdot W_r + \\ - P\psi_q \cdot \cos(\theta_r + 2\pi/3) + \psi_q \cdot \sin(\theta_r + 2\pi/3) \cdot W_r +$$

$$- P\psi_d \cdot \sin(\theta_r + 2\pi/3) - \psi_d \cdot \cos(\theta_r + 2\pi/3) \cdot W_r + 2 \cdot r \cdot i_a \cdot W_b = 0$$

Por tanto la corriente de la fase a será:

$$i_a = -\frac{1}{2 \cdot r \cdot W_b} \cdot \{ (P\psi_q + \psi_d \cdot W_r) \cdot |\cos\theta_r - \cos(\theta_r + 2\pi/3)| + \\ + (P\psi_d - \psi_q \cdot W_r) \cdot |\sin\theta_r - \sin(\theta_r + 2\pi/3)| \} \quad \text{Ec. 2.2-14}$$

Reemplazando este valor en la expresión de voltaje:

$$V_a = \frac{1}{W_b} \cdot \{ P\psi_q \cdot \cos\theta_r - \psi_q \cdot \sin\theta_r \cdot W_r + P\psi_d \cdot \sin\theta_r + \psi_d \cdot \cos\theta_r \cdot W_r + \\ - \frac{1}{2} \cdot (P\psi_q + \psi_d \cdot W_r) \cdot (\cos\theta_r - \cos(\theta_r + 2\pi/3)) + \\ + (P\psi_d - \psi_q \cdot W_r) \cdot (\sin\theta_r - \sin(\theta_r + 2\pi/3)) \} \}$$

Reordenando se obtiene:

$$V_a = \frac{1}{2 \cdot W_b} \cdot \{ (P\psi_q + \psi_d \cdot W_r) \cdot |\cos(\theta_r + 2\pi/3) + \cos\theta_r| + \\ + (P\psi_d - \psi_q \cdot W_r) \cdot |\sin(\theta_r + 2\pi/3) + \sin\theta_r| \} \quad \text{Ec. 2.2-15}$$

El valor de V_{b0} será:

Si la máquina está en vacío:

$$V_{b0} = \frac{P\psi_b}{W_b}$$

Si la máquina se encuentra conectada a una barra infinita:

$$V_{b0} = e_{gb}$$

c. Cortocircuito faseb-fase c

Para este caso S6 estará cerrado y los restantes abiertos, por tanto se tendrá:

$$V_b = V_c \quad \text{Ec. 2.2-16}$$

$$i_b = -i_c \quad \text{Ec. 2.2-17}$$

$$V_a = V_{a0} \quad \text{Ec. 2.2-18}$$

Tomando los valores de V_b y V_c dados por la ecuación 2.1-1 y reemplazando en la ecuación 2.2-16 y utilizando la relación 2.2-17 se obtiene:

$$\frac{P\psi_b}{W_b} + r \cdot i_b = \frac{P\psi_c}{W_b} - r \cdot i_b$$

Por tanto:

$$\frac{P\psi_b}{W_b} - \frac{P\psi_c}{W_b} + 2 \cdot r \cdot i_b = 0 \quad \text{Ec. 2.2-19}$$

Desarrollando se tendrá:

$$\begin{aligned}
 & P\psi_q \cdot \cos(\theta_r - 2\pi/3) - \psi_q \cdot \sin(\theta_r - 2\pi/3) \cdot W_r + P\psi_d \cdot \sin(\theta_r - 2\pi/3) + \\
 & + \psi_d \cdot \cos(\theta_r - 2\pi/3) \cdot W_r - P\psi_q \cdot \cos(\theta_r + 2\pi/3) + \psi_q \cdot \sin(\theta_r + 2\pi/3) \cdot W_r + \\
 & - P\psi_d \cdot \sin(\theta_r + 2\pi/3) - \psi_d \cdot \cos(\theta_r + 2\pi/3) \cdot W_r + 2 \cdot r \cdot i_b \cdot W_b = 0
 \end{aligned}$$

Reordenando se obtendrá:

$$\begin{aligned}
 & P\psi_q \cdot |\cos(\theta_r - 2\pi/3) - \cos(\theta_r + 2\pi/3)| + \psi_q \cdot W_r \cdot |\sin(\theta_r + 2\pi/3) - \sin(\theta_r - 2\pi/3)| + \\
 & + P\psi_d \cdot |\sin(\theta_r - 2\pi/3) - \sin(\theta_r + 2\pi/3)| + \psi_d \cdot W_r \cdot |\cos(\theta_r - 2\pi/3) - \cos(\theta_r + 2\pi/3)| + \\
 & + 2 \cdot r \cdot i_b \cdot W_b = 0
 \end{aligned}$$

Por tanto i_b será:

$$\begin{aligned}
 i_b = & \frac{1}{2 \cdot r \cdot W_b} \cdot \{ P\psi_q \cdot |\cos(\theta_r - 2\pi/3) - \cos(\theta_r + 2\pi/3)| + \psi_q \cdot W_r \cdot |\sin(\theta_r + 2\pi/3) + \\
 & - \sin(\theta_r - 2\pi/3)| + P\psi_d \cdot |\sin(\theta_r - 2\pi/3) - \sin(\theta_r + 2\pi/3)| + \\
 & + \psi_d \cdot W_r \cdot |\cos(\theta_r - 2\pi/3) - \cos(\theta_r + 2\pi/3)| \}
 \end{aligned}$$

Ec. 2.2-20

El voltaje de la fase b será:

$$V_b = \frac{1}{W_b} \cdot \{P\psi_q \cdot \cos(\theta_r - 2\pi/3) - \psi_q \cdot \sin(\theta_r - 2\pi/3) \cdot W_r + P\psi_d \cdot \sin(\theta_r - 2\pi/3) + \psi_d \cdot \cos(\theta_r - 2\pi/3) \cdot W_r - \frac{1}{2} \cdot |P\psi_q \cdot (\cos(\theta_r - 2\pi/3) - \cos(\theta_r + 2\pi/3)) + \psi_q \cdot W_r \cdot (\sin(\theta_r + 2\pi/3) - \sin(\theta_r - 2\pi/3)) + P\psi_d \cdot (\sin(\theta_r - 2\pi/3) + \sin(\theta_r + 2\pi/3)) + \psi_d \cdot W_r \cdot (\cos(\theta_r - 2\pi/3) - \cos(\theta_r + 2\pi/3))|\}$$

Reordenando se obtiene:

$$V_b = \frac{1}{2 \cdot W_b} \cdot \{(P\psi_q + \psi_d \cdot W_r) \cdot |\cos(\theta_r - 2\pi/3) + \cos(\theta_r + 2\pi/3)| + (P\psi_d - \psi_q \cdot W_r) \cdot |\sin(\theta_r + 2\pi/3) + \sin(\theta_r - 2\pi/3)|\}$$

Realizando las operaciones trigonométricas se obtiene:

$$V_b = \frac{1}{W_b} \cdot |(P\psi_q + \psi_d \cdot W_r) \cdot (\cos\theta_r \cdot \cos 2\pi/3) + (P\psi_d - \psi_q \cdot W_r) \cdot (\sin\theta_r \cdot \cos 2\pi/3)|$$

Ec. 2.2-21

V_{a0} será:

Cuando la máquina está en vacío:

$$V_{a0} = \frac{P\psi_a}{W_b}$$

Cuando la máquina está conectada a una barra infinita:

$$V_{a0} = e_{ga}$$

2.2.3 CORTOCIRCUITO DOS FASES-TIERRA

En esta parte se analiza las condiciones para el cortocircuito de dos fases con tierra, para luego determinar los voltajes de fase en estas condi

ciones, para el desarrollo se basa en la figura 2.2-1

a. Cortocircuito de las fases a y b

Para este caso los interruptores S1 y S4 estarán cerrados y los restantes abiertos, siendo los voltajes de fase:

$$V_a = V_b = 0$$

$$V_c = V_{c0} \quad \text{Ec. 2.2-22}$$

Cuando la máquina está en vacío:

$$V_{c0} = \frac{D\psi_c}{W_b}$$

Cuando la máquina está conectada a una barra infinita:

$$V_{c0} = e_{gc}$$

b. Cortocircuito de las fases a y c

Para esta condición los interruptores S1 y S5 estarán cerrados y los restantes abiertos, siendo los voltajes de fase:

$$V_a = V_c = 0$$

$$V_b = V_{b0} \quad \text{Ec. 2.2-23}$$

Cuando la máquina está en vacío:

$$V_{b0} = \frac{P\psi_b}{W_b}$$

Si la máquina está conectada a una barra infinita:

$$V_{b0} = e_{gb}$$

c. Cortocircuito de las fases b y c

Los interruptores S2 y S3 estarán cerrados y los restantes abiertos, los voltajes de fase serán:

$$V_b = V_c = 0$$

$$V_a = V_{a0} \quad \text{Ec. 2.2-24}$$

Cuando la máquina está en vacío:

$$V_{a0} = \frac{P\psi_a}{W_b}$$

Cuando la máquina está conectada a una barra infinita:

$$V_{a0} = e_{ga}$$

2.2.4 CORTOCIRCUITO DE LAS TRES FASES

Para este caso, los voltajes de las tres fases serán cero y todos los inte

Interruptores estarán cerrados.

$$V_a = V_b = V_c = 0 \quad \text{Ec. 2.2-25}$$

2.2.5 GENERALIZACIÓN (12)

Igual que en el caso de desconexión de fases, para el cortocircuito de fa ses se puede generalizar utilizando un algoritmo matemático, para lo cual se plantean las siguientes expresiones:

$$V_N(J1) = G_F \cdot V1(J1)$$

$$V_N(J2) = G1 \cdot V(J2) + V_N(J1)$$

$$V_N(J3) = G3 \cdot V(J3) \quad \text{Ec. 2.2-26}$$

En donde:

$V_N(Ji)$ = Voltajes después de la perturbación.

$V(Ji) = \frac{P\psi_i}{W_D}$ Cuando la máquina está en vacío

$V(ji) = e_{gi}$ Cuando la máquina está conectada a una barra infinita

$V1(J1)$ = Voltaje de la fase cortocircuitada para el caso de falla fase-fase

De acuerdo al análisis de los distintos casos de cortocircuito realizado

en los numerales anteriores, se elabora un cuadro de los valores que pueden tomar los G_i y J_i para cumplir con las expresiones planteadas en 2.2-26

	CORTOCIRCUITO FASE-TIERRA			CORTOCIRCUITO FASE-FASE		CORTOCIRCUITO FASE-FASE-TIERRA		CORTOCIRCUITO TRIFASICO
G	1			2		2		3
G1	1			0		0		0
G3	1			1		1		0
GF	0			1		0		0
	Fase a	Fase b	Fase c	Fases a y b	Fases b y c	Fases a y c		
J	1	2	3	1	2	3	1	
J1	1	2	3	1	2	3	1	
J2	2	3	1	2	3	1	2	
J3	3	1	2	3	1	2	3	

Expresando los G_i y J_i como funciones cuadráticas de G y J , en igual forma que en la ecuación 2.1-21 y reemplazando los valores determinados en el cuadro anterior, se llega a determinar un conjunto de tres ecuaciones con tres incógnitas para cada G_i y J_i , al resolver las cuales se determina lo siguiente:

Para diferenciar entre cortocircuito fase-fase y fase-fase tierra, se considera el valor de $G = 0$ para el caso de cortocircuito fase-fase, para luego dentro del programa retomar el valor de $G = 2$ y $G_F = 1$, de la siguiente manera:

Si $G = 0$, entonces $G_F = 1$ y:

$$G = G + 2, \text{ por tanto } G = 2$$

$$G1 = \frac{1}{2} G^2 - \frac{5}{2} G + 3$$

$$G3 = -\frac{1}{2} G^2 + \frac{3}{2} G$$

$$G_F = 1 \text{ Si } G \text{ ingresa como cero}$$

$$G_F = 0 \text{ Si } G \text{ ingresa con un valor distinto de}$$

cero

$$J1 = J$$

$$J2 = -\frac{3}{2} J^2 + \frac{11}{2} J - 2$$

$$J3 = \frac{3}{2} J^2 - \frac{13}{2} J + 8$$

Ec. 2.2-27

C A P I T U L O I I I

SIMULACION DIGITAL

3.1 METODO DE SOLUCION DE LAS ECUACIONES DIFERENCIALES (11)

Como resultado del desarrollo de los capítulos anteriores, se determinó el sistema de ecuaciones diferenciales 1.3-3, así como también los valores de voltaje de fase en condiciones de falla determinados en el segundo capítulo, por lo cual se puede proceder a utilizar un método iterativo de solución que sea adecuado para elaborar un programa digital.

El método de solución que se utiliza es el de RUNGE-KUTTA, el cual se ha utilizado en algunos trabajos de Tesis de Grado dando buenos resultados.

Para el análisis primeramente se considera la solución de dos ecuaciones diferenciales de primer orden, con lo que se puede generalizar para cualquier número de ecuaciones.

$$\frac{dY}{dX} = f [X, Y(X), u(X)] \quad \text{Ec. 3.1-1}$$

$$\frac{du}{dX} = F [X, Y(X), u(X)] \quad \text{Ec. 3.1-2}$$

Siendo los valores iniciales:

$$Y = Y_0 \quad , \quad u = u_0 \quad \text{para} \quad X = X_0$$

Para la resolución se utiliza el proceso de RUNGE-KUTTA de cuarto orden, para lo cual:

$$Y_{i+1} = Y_i + \frac{1}{6} \cdot (K_1 + 2 \cdot K_2 + 2 \cdot K_3 + K_4) \quad \text{Ec. 3.1-3}$$

Siendo:

$$K_1 = (h) \cdot f(X_i, Y_i, u_i)$$

$$K_2 = (h) \cdot f\left(X_i + \frac{h}{2}, Y_i + \frac{K_1}{2}, u_i + \frac{q_1}{2}\right)$$

$$K_3 = (h) \cdot f\left(X_i + \frac{h}{2}, Y_i + \frac{K_2}{2}, u_i + \frac{q_2}{2}\right)$$

$$K_4 = (h) \cdot f(X_i + h, Y_i + K_3, u_i + q_3) \quad \text{Ec. 3.1-4}$$

Además:

$$u_{i+1} = u_i + \frac{1}{6} \cdot (q_1 + 2 \cdot q_2 + 2 \cdot q_3 + q_4) \quad \text{Ec. 3.1-5}$$

Siendo:

$$q_1 = (h) \cdot F(X_i, Y_i, u_i)$$

$$q_2 = (h) \cdot F\left(X_i + \frac{h}{2}, Y_i + \frac{K_1}{2}, u_i + \frac{q_1}{2}\right)$$

$$q_3 = (h) \cdot F\left(X_i + \frac{h}{2}, Y_i + \frac{K_2}{2}, u_i + \frac{q_2}{2}\right)$$

$$q_4 = (h) \cdot F(X_i + h, Y_i + K_3, u_i + q_3) \quad \text{Ec. 3.1-6}$$

Como se puede ver los valores de "K" son utilizados para calcular el valor de " Y_{i+1} ", de igual manera, los valores de "q" son utilizados para calcular el valor de " u_{i+1} ", siendo " Y_i " y " u_i " los valores anteriores al calculado y para el inicio del proceso los valores iniciales.

En el presente trabajo las variables de estado son las concatenaciones de flujo por segundo, por tanto un paso previo a la solución por el método iterativo analizado, será el cálculo de todas las variables de la máquina en condiciones iniciales, las cuales sirven como punto de partida, pudiendo más adelante introducir valores de voltaje de fase para cualquier condición de funcionamiento, siendo posible posteriormente retomar los valores para condiciones normales de funcionamiento.

El método de solución descrito es adecuado para realizar un programa digital que resuelva las ecuaciones diferenciales en forma discreta en el tiempo, por tanto es muy importante la utilización de valores incrementales de tiempo (Δt) adecuados, que den como resultado valores calculados con una buena aproximación, pero además de esto se debe tomar en cuenta el tiempo de computación, el cual se incrementa demasiado si se disminuye demasiado el valor de Δt . En este trabajo, para facilitar la comparación de resultados con los obtenidos en trabajos anteriores y por considerar que dan una buena aproximación, se ha utilizado los valores incrementales de tiempo de 0.0005 y 0.00042 segundos para el análisis de desconexión y cortocircuito de fases respectivamente, cabe anotar que los resultados mejoran para intervalos menores a los mencionados.

3.2 DESCRIPCION DEL PROGRAMA DIGITAL

El programa desarrollado consta de un programa principal y un conjunto de subprogramas que permiten simular a la máquina sincrónica en cualquiera de los estados analizados. A continuación se analiza en detalle las principales características del programa.

3.2.1 PROGRAMA PRINCIPAL

Realiza las principales acciones en el proceso de cálculo, las mismas que se describen a continuación.

- Lee los factores de multiplicación y valores de las escalas superiores de los gráficos, los cuales serán utilizados para la graficación de resultados utilizando la subrutina correspondiente:
- Lee e imprime: el número de pasos de integración requerido, el paso en el que se inicia y finaliza la perturbación y el valor del intervalo de tiempo escogido para la integración numérica.
- Lee e imprime: el tipo de falla a considerarse (desconexión o cortocircuito de fases), fases afectadas por la falla (a, b, c, ab, ac, bc, abc) y la condición de conexión o desconexión del neutro de la máquina.
- Lee e imprime los parámetros de la máquina: resistencias, impedancias, constante de inercia y velocidad angular eléctrica.
- Lee e imprime: las condiciones de funcionamiento en estado estable (vol

taje de fase, factor de potencia y potencia aparente) y el índice que indica el tipo de funcionamiento de la máquina (motor o generador).

- Calcula los elementos constantes que son necesarios a lo largo del programa y forma las matrices a utilizarse (elementos constantes y variables).
- Calcula las condiciones iniciales, como se dijo anteriormente el proceso iterativo toma como punto de partida las condiciones iniciales que reflejan el estado estable de la máquina, a continuación se indica brevemente los valores de las variables de la máquina para estas condiciones.

$$i_{kq} = i_{kd} = 0 \quad \text{Ec. 3.2-1}$$

Por tanto las concatenaciones de flujo serán:

$$\psi_q = (X_{ls} + X_{aq}) \cdot i_q$$

$$\psi_{kq} = X_{aq} \cdot i_q$$

$$\psi_{ad} = X_{ad} \cdot (i_d + i_{fd})$$

$$\psi_d = X_{ls} \cdot i_d + \psi_{ad}$$

$$\psi_{kd} = X_{ad} \cdot (i_d + i_{fd})$$

$$\psi_{fd} = X_{lfd} \cdot i_{fd} + \psi_{ad} \quad \text{Ec. 3.2-2}$$

El voltaje de excitación será:

$$V_f = r_{fd} \cdot i_{fd} \quad \text{Ec. 3.2-3}$$

El ángulo de la corriente respecto al voltaje estará dado por:

$$\begin{aligned} \beta &= \phi && \text{(factor de potencia) ; para motor} \\ \beta &= \phi + \pi && \text{; para generador} \end{aligned}$$

Ec. 3.2-4

La corriente en la fase "a" del estator:

$$I_{ax} = \frac{KVA}{|VA|} \cdot \cos \beta$$

$$I_{ay} = \frac{KVA}{|VA|} \cdot \sin \beta$$

$$I_a = I_{ax} + j I_{ay} \quad \text{Ec. 3.2-5}$$

El voltaje interno de la máquina será:

$$\tilde{E}_a = \tilde{V}_a - Z \cdot \tilde{I}_a \quad \text{Ec. 3.2-6}$$

Siendo:

$$Z = r_s + j(X_{ls} + X_{aq}) \quad \text{Ec. 3.2-7}$$

El ángulo de potencia estará dado por:

$$\delta = \text{arc tang} \left| \frac{\text{Im} (EA)}{\text{Re} (EA)} \right| \quad \text{Ec. 3.2-8}$$

Las corrientes en los ejes q, d, 0, de acuerdo con la ecuación 1.2-1 serán:

$$i_q = |I_a| \cdot \text{Sin} \left(\beta - \delta + \frac{\pi}{2} \right)$$

$$i_d = |I_a| \cdot \text{Cos} \left(\beta - \delta + \frac{\pi}{2} \right)$$

$$i_0 = 0 \quad \text{Ec. 3.2-9}$$

Tomando la ecuación 1.5-13

$$\tilde{E}_a = |(X_d - X_q) \cdot i_d + X_{ad} \cdot i_{fd}| \cdot e^{j\delta}$$

$$\tilde{E}_a = |\tilde{E}_a| \angle \delta$$

Por tanto la corriente de excitación será:

$$i_{fd} = \frac{|\tilde{E}_a| - (X_d - X_q) \cdot i_d}{X_{ad}} \quad \text{Ec. 3.2-10}$$

Si se desea incluir el comportamiento no lineal del hierro, se deberá corre

gir la ecuación anterior utilizando la subrutina SATURA y calculando de la siguiente manera:

$$i_{fd} = \frac{\psi_{ad} + D_{XI}}{X_{ad}} - i_d \quad \text{Ec. 3.2-11}$$

Los voltajes en los ejes q, d, 0 de acuerdo con la ecuación 1.2-1 serán:

$$V_q = |V_a| \cdot \text{Cos}(\theta - \theta_e)$$

$$V_d = |V_a| \cdot \text{Sin}(\theta - \theta_e)$$

$$V_0 = 0$$

Ec. 3.2-12

Siendo:

$$\theta = \theta_r = \int W_r \cdot dt + \theta_r(0)$$

$$\theta_e = \int W_e \cdot dt + \theta_e(0)$$

Además:

$$\theta_e(0) = 0$$

$$W_e = \text{cte.}$$

$$\theta_r(0) = \delta$$

Por tanto:

$$\theta_r = \int W_r \cdot dt + \delta$$

$$\theta_e = W_e \cdot t \quad \text{Ec. 3.2-13}$$

En cuanto al sistema mecánico se tendrá:

$$T_m = T_e \quad \text{Ec. 3.2-14}$$

Siendo:

$$T_m = \psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d$$

Reemplazando los valores de i_q e i_d dados por la ecuación 1.3-4 se tendrá:

$$T_m = \psi_d \cdot \left[\left(1 - \frac{X_{mq}}{X_{1s}}\right) \cdot \frac{\psi_q}{X_{1s}} - \left(\frac{X_{mq}}{X_{1s} \cdot X_{1kq}}\right) \cdot \psi_{kq} \right] - \psi_q \cdot \left(\frac{\psi_d - \psi_{ad}}{X_{1s}}\right)$$

Ec. 3.2-15

Procede a la integración numérica mediante el subprograma RUNGE, incluyendo dentro de este proceso la saturación mediante la subrutina SATURA, para todo el proceso se tomará los valores de concatenaciones de flujo por segundo del paso anterior y los voltajes de fase en estado estable para condiciones normales de funcionamiento, para el análisis de fallas estos valores serán los determinados para el caso específico a analizarse, con lo cual se podrá determinar una matriz de derivadas de:

concatenaciones de flujo por segundo, velocidad del rotor y ángulo de potencia, la cual será integrada numéricamente, con este resultado se puede determinar el vector de corrientes de la máquina y el valor del torque electromagnético, finalmente, se procede a guardar los datos obtenidos para su posterior graficación. Se realiza todo el proceso anterior para cada intervalo de tiempo, hasta llegar al número de pasos requerido de acuerdo al tiempo que se desee analizar.

-) Imprime resultados de corriente de las tres fases, voltaje entre las fases a y c, torque electromagnético, ángulo de potencia, corriente de excitación y variación de la velocidad rotórica, cabe anotar que todas las variables están disponibles para ser graficadas y se requeriría un pequeño cambio en el programa para cambiar las variables a graficarse; las mismas que son afectadas para la impresión utilizando factores de multiplicación, para de esta manera obtener resultados adecuados para su graficación.

3.2.2 SUBROUTINA PLOT (11)

Se encarga de graficar todas las variables de salida que son requeridas en este programa, está diseñada para graficar datos almacenados en un arreglo de dos dimensiones, es decir el valor de la variable en función del tiempo, las características de esta subrutina son las siguientes.

- El número de datos a graficar puede ser escogido de acuerdo a las necesidades, en este trabajo se realiza la impresión de un valor por cada tres de los calculados y guardados en el vector correspondiente.

- Se puede graficar de una a cinco variables simultáneamente, siendo representadas por letras para poder diferenciar los valores en la grafica ción, en este trabajo se ha graficado solamente una variable cada vez para poder apreciar en mejor forma los resultados y para facilitar la comparación con trabajos anteriores, para lo cual se grafica los puntos discretos utilizando "*", además se acompaña con los valores numéricos de cada punto graficado.
- La escala de las ordenadas acepta cualquier rango de 100 unidades, para escoger este rango se debe especificar la escala de la abscisa, tomando en cuenta que el dato que se ingresa define el límite superior del ran go, por ejemplo si una especificación de la escala superior del gráfico es 20, entonces el límite inferior será -80 para formar el rango de 100 unidades.
- Los valores pueden ser afectados por factores de multiplicación para ob tener un gráfico comprensible, es decir los valores muy pequeños se- rán multiplicados por un factor adecuado y valores grandes serán divi dos. Si un dato a ser graficado excede los límites superior o inferior de la escala de las ordenadas seleccionada, aparecerá el símbolo "\$", el cual se imprimirá en el límite superior o inferior del gráfico, lo cual indica que el valor está fuera de rango.

3.2.3 SUBROUTINA SATURA (11)

Permite obtener el valor de DXI en función de ψ_{ad}^* por medio de una linea lización de la curva de saturación de la máquina, la cual se la hace por medio de dos segmentos de recta y se indica más adelante en el apéndice co

rrespondiente.

3.2.4 SUBROUTINA MULT

Permite obtener el resultado de la multiplicación de dos matrices.

3.2.5 FUNCION RUNGE (11)

Emplea el método de Runge-Kutta de cuarto orden para resolver ecuaciones diferenciales simultáneas de primer orden:

$$f(j) = dY(j)/dx, \quad (j = 1, 2, \dots, n), \text{ en este caso } n = 8,$$

utilizando un paso de longitud H en la variable independiente X , sujeta a condiciones iniciales $Y(j)$, ($J = 1, 2, \dots, n$). Cada $f(j)$, la derivada $Y(j)$, debe ser calculada cuatro veces por paso de integración, por el programa principal. La función debe ser llamada cinco veces por paso, de manera que el valor de (X) y los de la solución $Y(1), Y(2), \dots, Y(n)$ pueden ser actualizados utilizando el algoritmo Runge-Kutta.

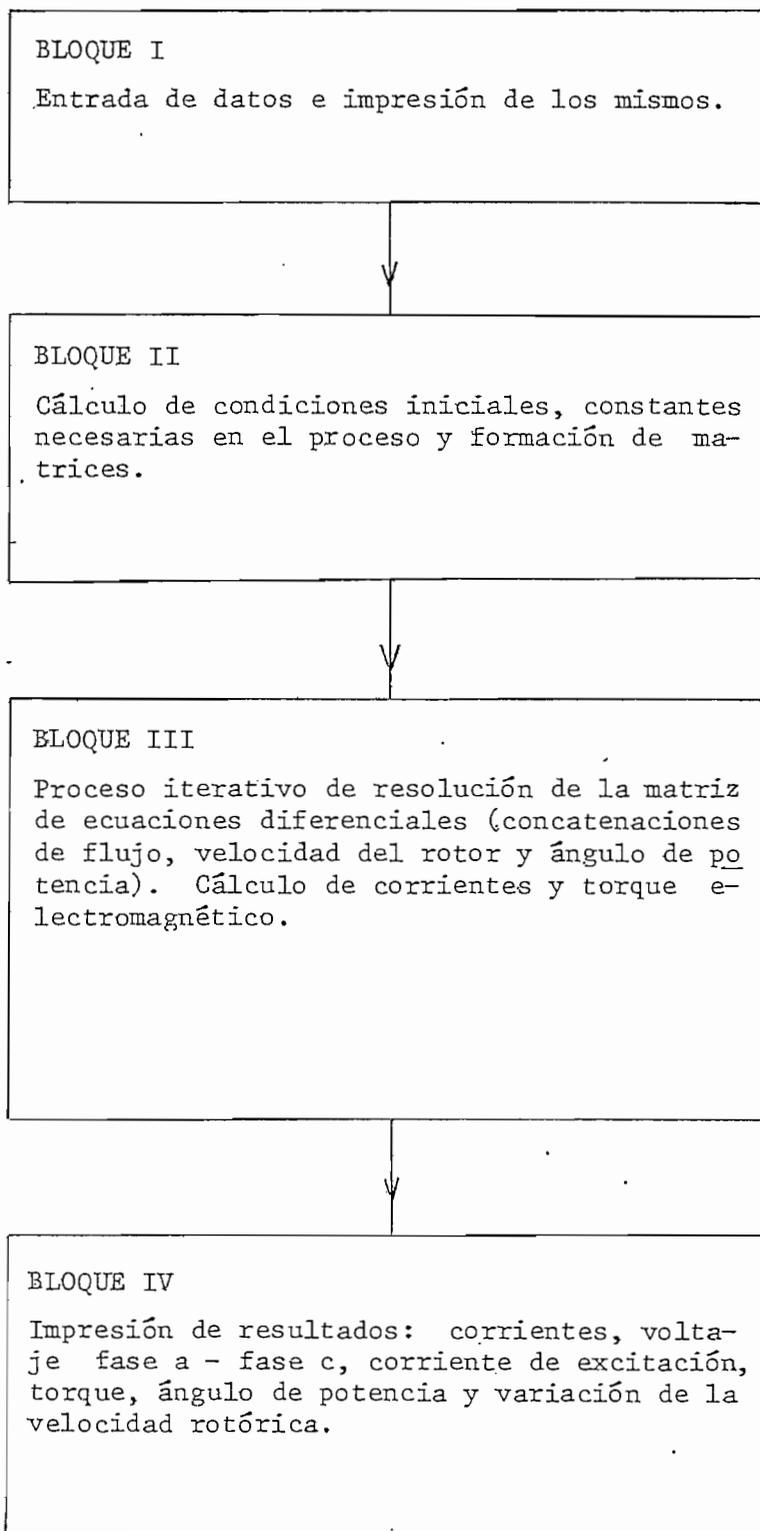
3.3 DIAGRAMA DE FLUJO

De acuerdo a lo descrito en el numeral anterior, se presenta un diagrama de flujo del programa principal ya que, la subrutina de graficación PLOT, la subrutina para introducir la saturación SATURA y la función para la integración RUNGE, se encuentran detallados en tesis anteriores.

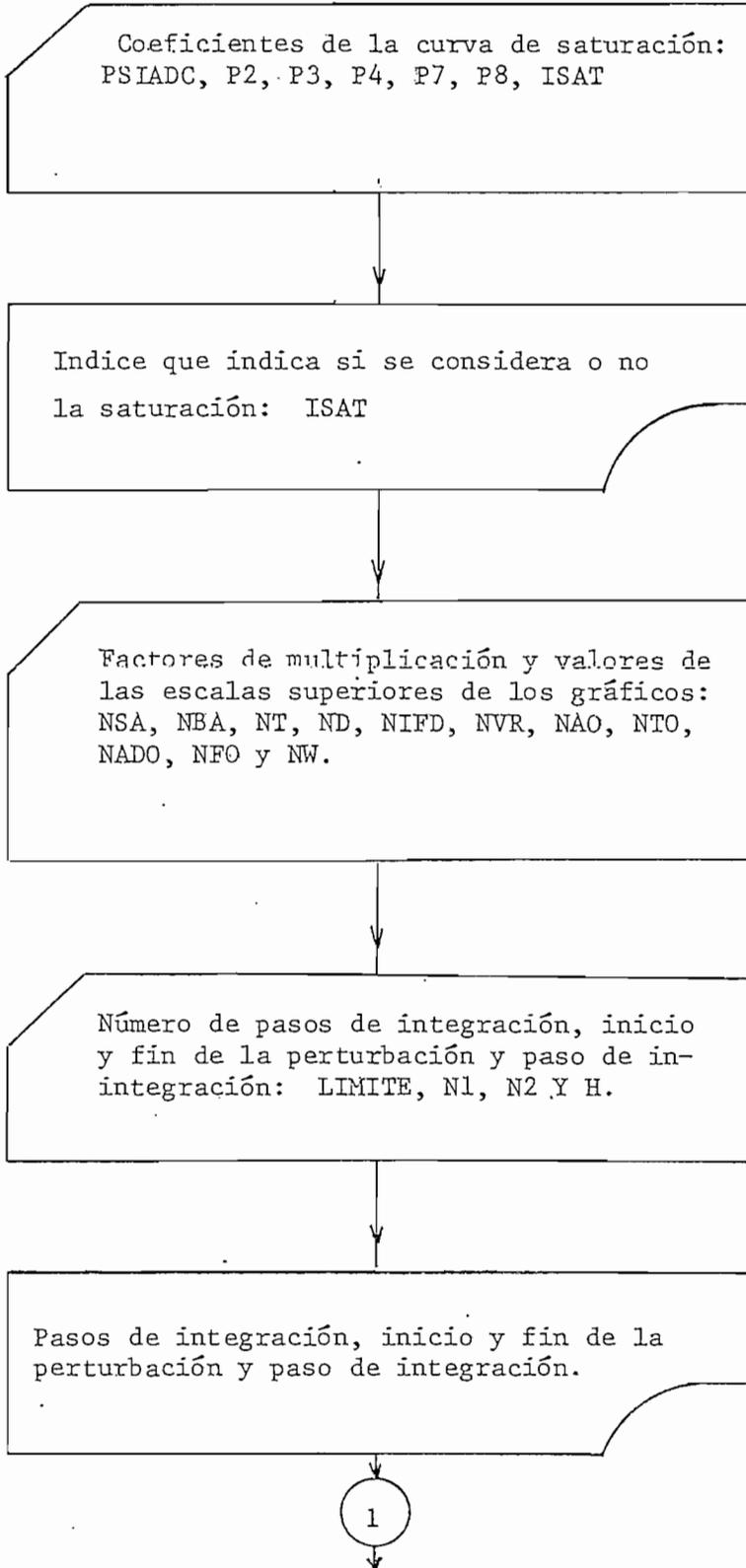
Para mayor comprensión se realiza primeramente: un diagrama de bloques, para

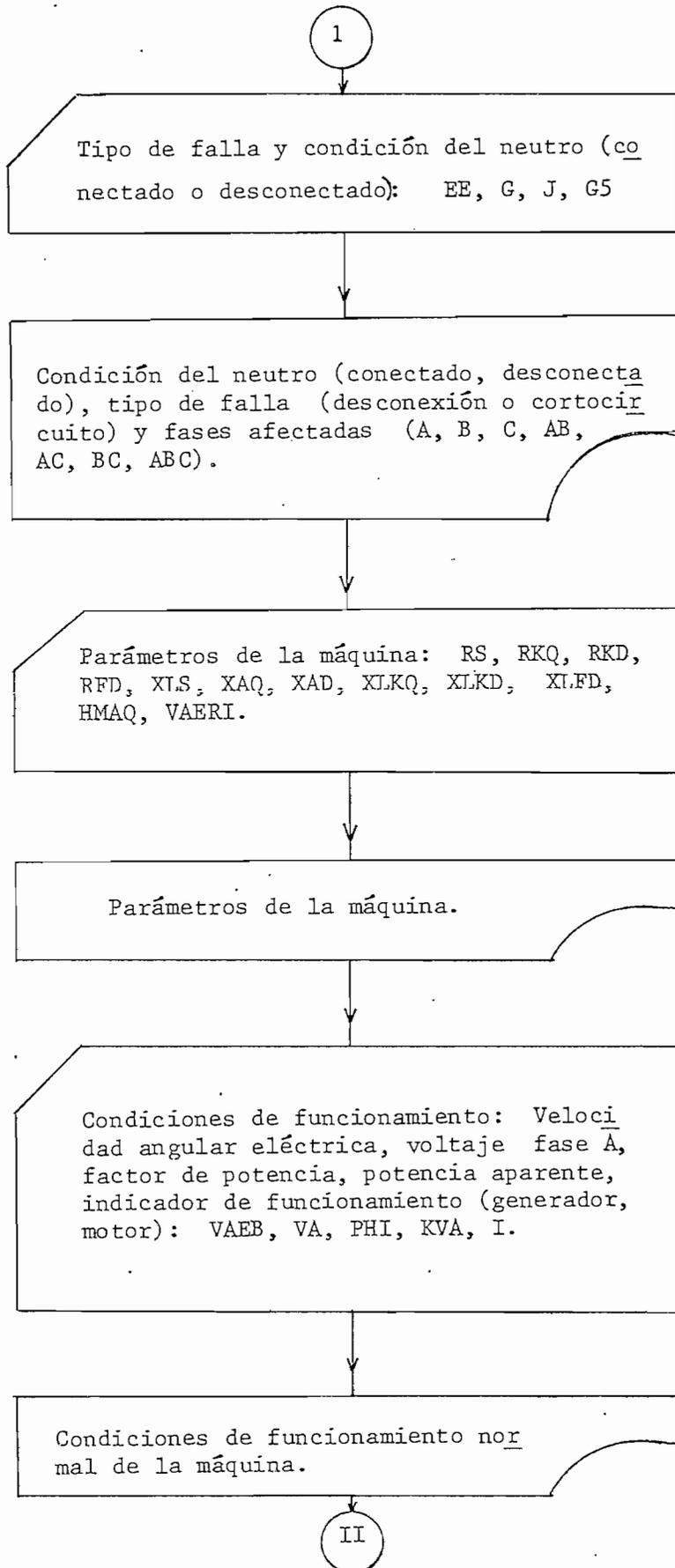
luego realizar un diagrama de flujo para cada bloque.

DIAGRAMA DE BLOQUES

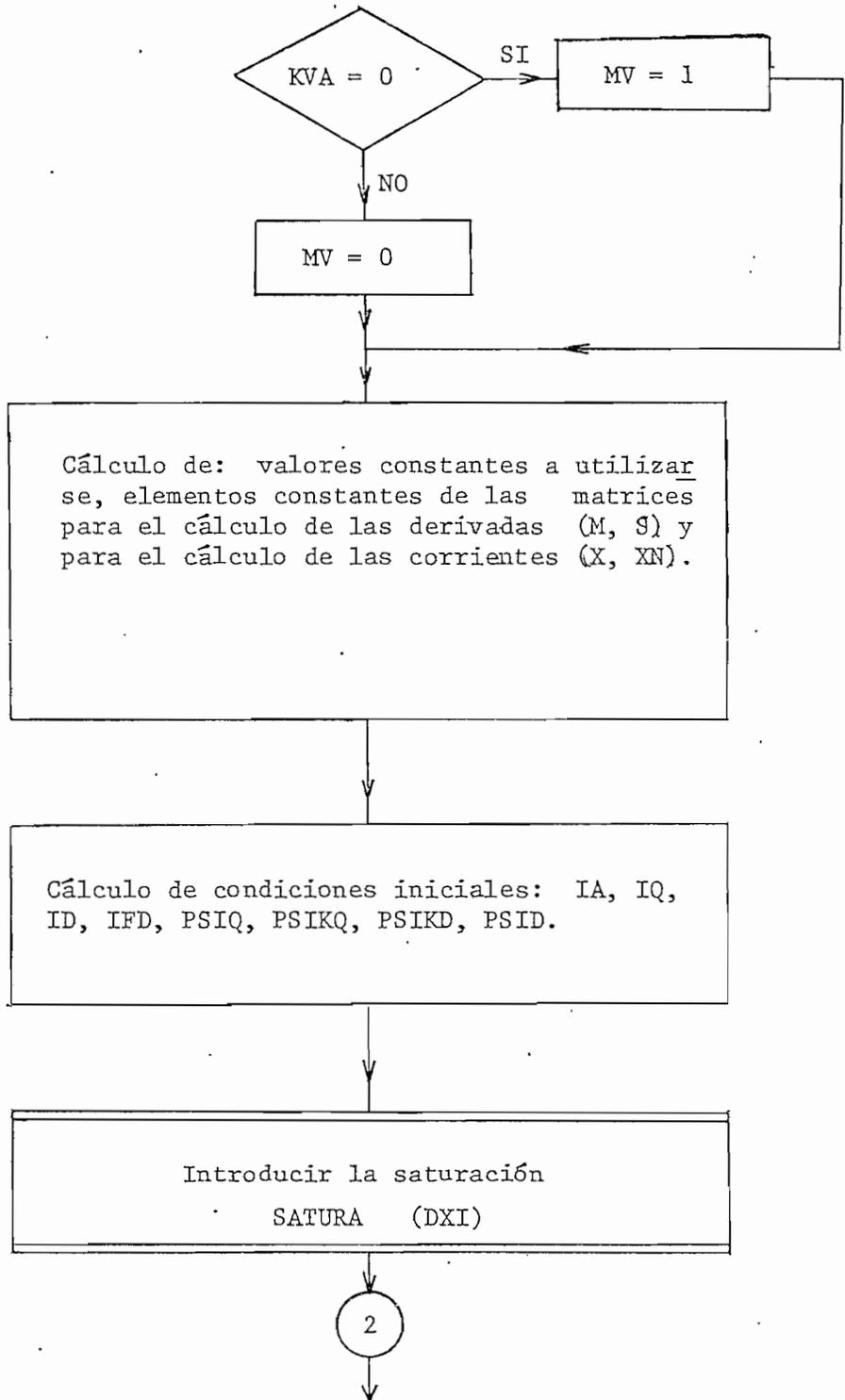


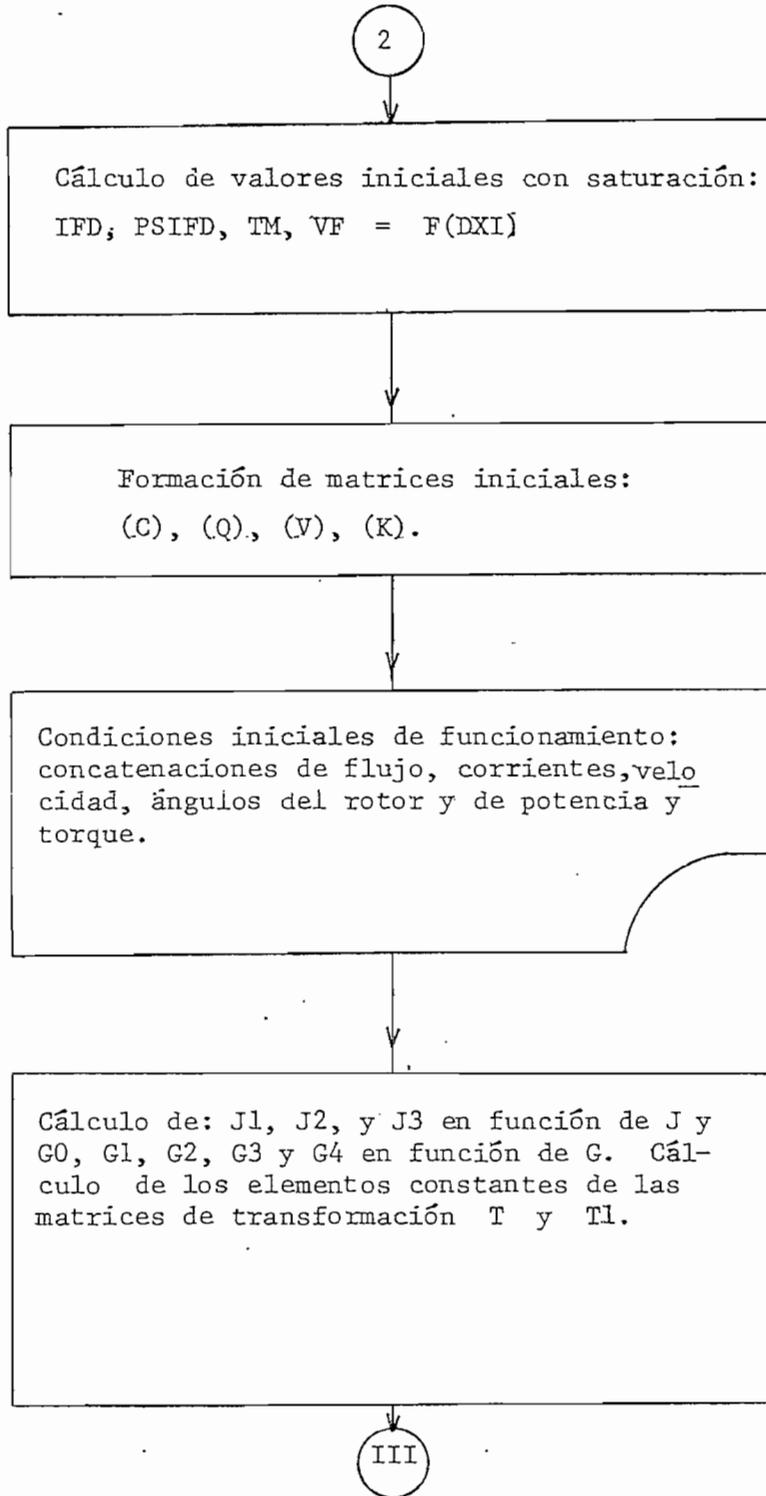
BLOQUE I.-



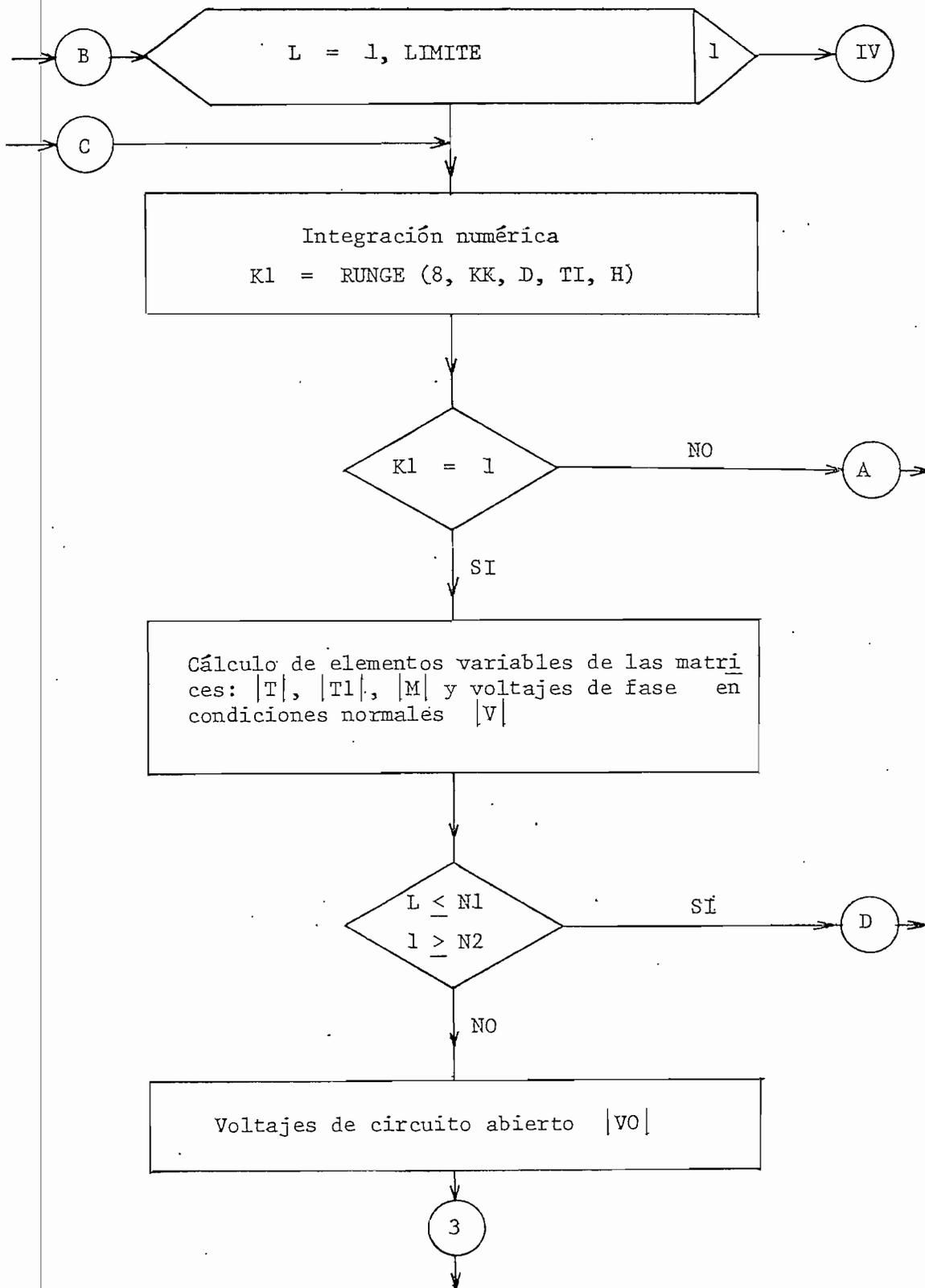


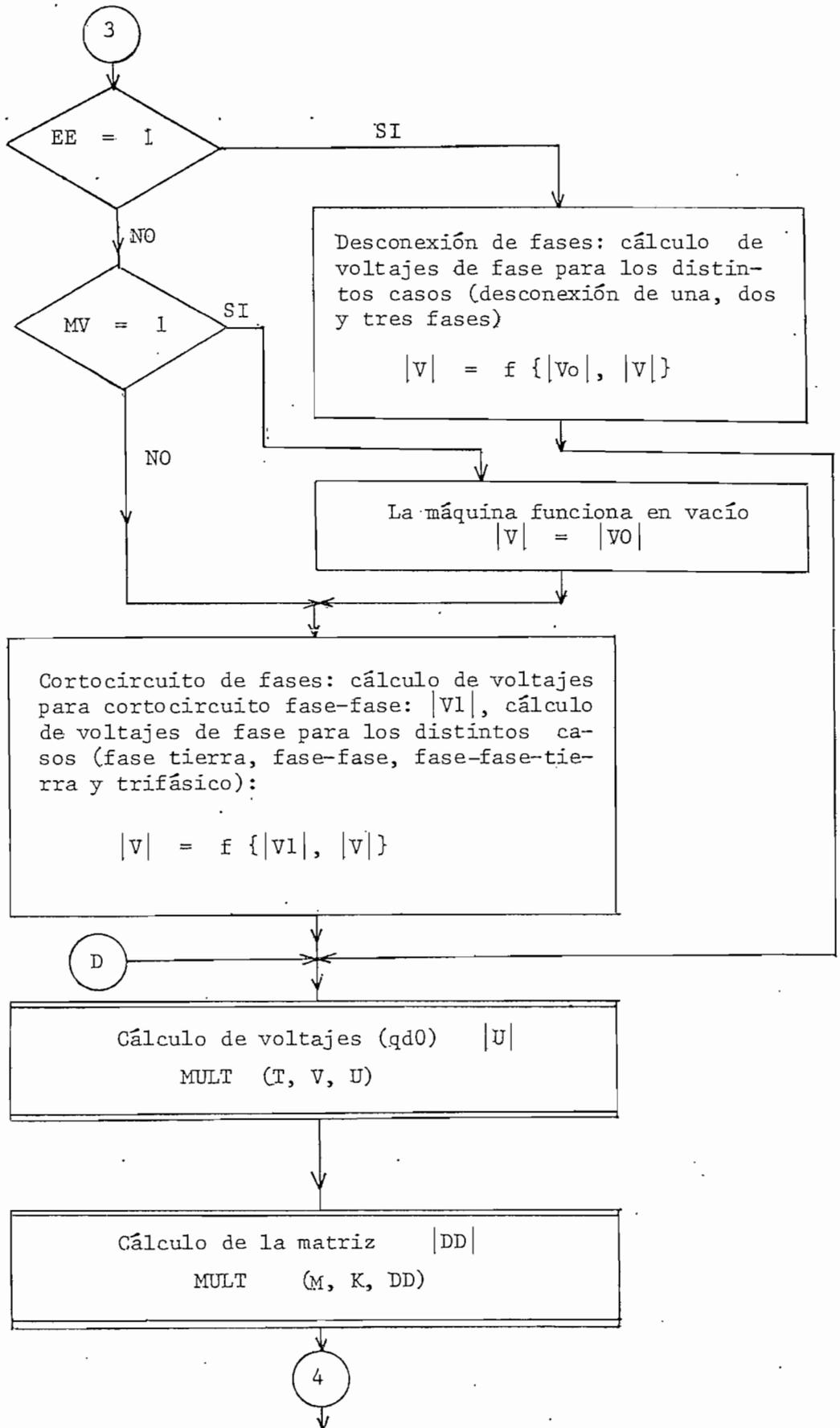
BLOQUE II.-

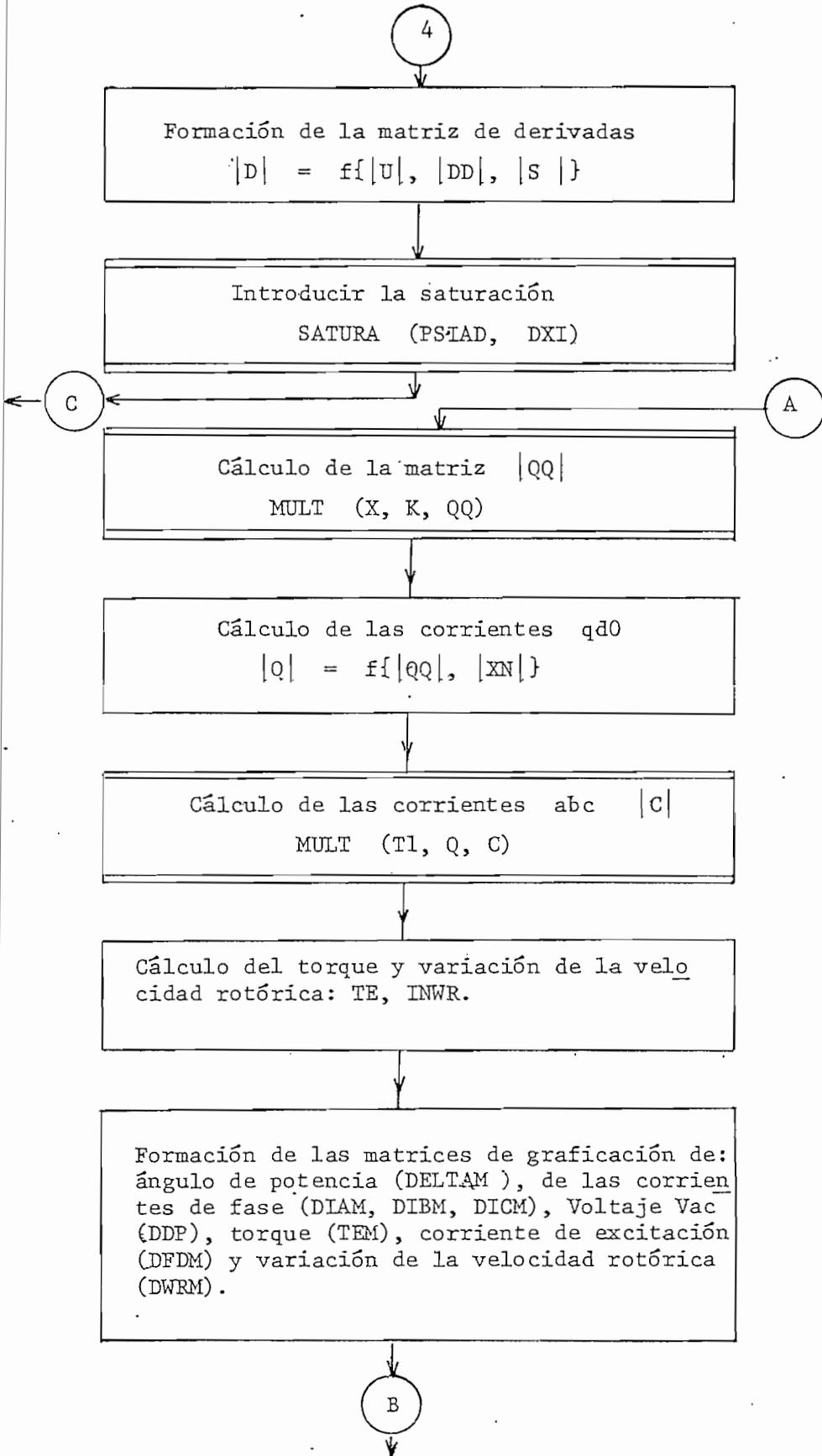




BLOQUE III.-







BLOQUE IV.-

Impresión de la variable a graficarse y el valor del factor de multiplicación utilizado.

Graficación de: corrientes de fase, voltaje entre las fases A y C, torque, ángulo de potencia, corriente de excitación y variación de la velocidad rotórica.

PLOT (G, l, L, N).

G = matriz de datos a graficarse

N = valor de la escala superior de los gráficos.

FIN

C A P I T U L O I V

ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 CASOS IMPLEMENTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

Se han implementado todos los casos analizados en el capítulo anterior, esto es: desconexión de una, dos y tres fases, para la máquina funcionando como motor o generador, sub o sobre-excitado; en lo referente a cortocircuitos se implementan ejemplos de cortocircuito fase-tierra, fase-fase, fase-fase-tierra y trifásico para la máquina funcionando en vacío o con carga, con distintos valores de voltaje y para distintos ángulos de cortocircuito.

Con el objeto de comparar los resultados con los obtenidos en trabajos anteriores y debido a la gran cantidad de resultados, se presenta en el Apéndice "C" los correspondientes a un ejemplo para cada caso, siendo los datos para los ejemplos de: desconexión de una fase, cortocircuito de una fase, cortocircuito fase-fase y cortocircuito fase-fase-tierra, los mismos utilizados en los trabajos: "MODELO Y SIMULACION DIGITAL DE LA MAQUINA SINCRONICA CON UNA FASE ABIERTA Y CON RECONEXION INCLUIDA LA SATURACION" para el análisis de desconexión de una fase y "FALLAS ASIMETRICAS EN MAQUINAS SINCRONICAS" para el caso de cortocircuitos.

4.1.1 DESCONEXION DE FASES

Se analizan las características de las variables para los casos de desconexión de fases, al final se presentan los cuadros No. 1, No. 2 y No. 3, en

los cuales están los valores máximos alcanzados por las variables en condiciones de falla, los cuales ilustran lo que se expresa en el análisis. En los casos de desconexión de una fase se considera para el análisis los resultados obtenidos para la máquina funcionando con el neutro desconectado, ya que para este caso, se dan mayores valores máximos que para funcionamiento con el neutro conectado, siendo las formas de onda similares para los dos tipos de funcionamiento.

Las corrientes de fase presentan las siguientes características:

Las fases que se desconectan presentan valores cercanos a cero durante la desconexión, tal como se puede observar en las figuras del apéndice "C", la causa principal para que no tomen este valor es el tiempo de integración utilizado (0.0005 segundos), ya que si éste es más pequeño se obtienen valores cada vez más cercanos a cero, pero el tiempo de computación se incrementa demasiado; para observar lo expuesto, se probó para un paso de integración de 0.0001 segundos, obteniéndose valores de corriente muy cercanos a cero durante la desconexión de las fases, pero el tiempo de computación que se utiliza en el proceso es muy grande, por tal motivo se sacrifica la exactitud de los resultados, a cambio de menores tiempos de computación.

Las corrientes en las fases que no se desconectan, presentan incrementos paulatinos durante la desconexión, lo cual es lógico, ya que por las fases conectadas se está transmitiendo potencia, la forma de onda difiere de la sinusoidal, reflejando de esta manera el funcionamiento desbalanceado de la máquina. En el Apéndice "C" se puede apreciar lo expuesto para los casos de desconexión de una y dos fases.

En el primer semiciclo luego de la reconexión, las corrientes por las tres fases (las que se desconectan y las que no se desconectan) presentan su mayor valor, posterior a lo cual comienzan a decrecer con una forma de onda sinusoidal tendiendo paulatinamente a su valor de estado estable. Se puede citar como una de las principales causas de la presencia de estos picos de corriente, a una pequeña pérdida de sincronismo entre la máquina y la barra infinita debido a variaciones en la velocidad y en el voltaje de la máquina durante la desconexión. En los cuadros No. 1, No. 2 y No.3 se pueden apreciar valores máximos de corriente para distintos casos de desconexión de fases.

Los valores máximos de corriente dependen del número de fases desconectadas y del tiempo de desconexión. Para la desconexión de las tres fases se da el mayor pico de corriente y para desconexión de una fase el menor, en el cuadro No. 2 se dan valores máximos de corriente para desconexión de una, dos y tres fases para la máquina funcionando como motor sobre-excitado, en el que se puede apreciar las diferencias, así como también que la variación de la velocidad rotórica para desconexión de tres fases es bastante mayor que para el caso de desconexión de una y dos fases, lo cual puede ser una de las causas que ocasione las diferencias. El tiempo que permanecen las fases abiertas incide directamente en la magnitud de la corriente máxima, así para tiempos mayores corresponden picos mayores, en el cuadro No. 1 se dan valores máximos de corriente para desconexión de la fase A, para tiempos de desconexión de 0.084 segundos y 0.1325 segundos, pudiendo apreciar la mayor variación en el segundo caso, así como también las mayores variaciones de voltaje y velocidad rotórica, los cuales podrían ser una de las causas de las diferencias.

El ángulo de reconexión incide en el valor máximo de la corriente, ya que de éste depende los valores de voltaje que presente la fase de la barra in finita a reconectarse. Debido a la gran cantidad de tipos de falla y ca sos corridos para el análisis, así como también por las limitaciones en el uso del computador, no se dispone de la cantidad suficiente de información que permita establecer la incidencia del ángulo de reconexión en la corrien te máxima.

En lo referente al voltaje en las fases desconectadas se observa las siguientes características:

Para los casos de desconexión de una y dos fases, el voltaje en las fases desconectadas presenta una forma de onda distinta a la sinusoidal, reflejando de esta manera la condición desbalanceada. Para desconexión de las tres fases, como era de esperarse, el voltaje presenta una forma de onda sinusoidal.

Para el caso de operación motor y condiciones de desconexión de una y dos fases, se producen incrementos en los valores de voltaje tal como se puede observar en el cuadro No. 2, que para el caso de la desconexión de la fase A el voltaje entre las líneas A y C es de 2.4803 p.u. Mientras que para el caso de desconexión de las tres fases se produce un decrecimiento del voltaje, siendo éste de un valor de 1.5639 p.u. Como complemento se tiene el valor en estado estable el cual es de 1.5652 p.u. De lo que se puede con cluir que el mayor valor de voltaje se produce con una fase abierta.

Para el caso de operación generador, el efecto de la desconexión de fases en el voltaje de las fases abiertas es contrario al que se da para opera-

ción motor, por tanto, se producen reducciones en los valores de voltaje para la desconexión de una y dos fases, tal como se puede observar en el cuadro No. 3, que para el caso de la desconexión de la fase A el voltaje entre las líneas A y C es de 1.319 p.u. Mientras que para el caso de desconexión de las tres fases se produce un incremento del voltaje, siendo éste de un valor de 1.631 p.u. Como complemento se tiene el valor en estado estable el cual es de 1.5 p.u. De lo que se puede concluir que el mayor valor de voltaje se produce con tres fases abiertas.

Tanto para operación motor, así como para operación generador, la magnitud del valor máximo alcanzado por el voltaje en las fases desconectadas, depende en forma directa del tiempo de desconexión, tal como se puede observar en el cuadro No. 1, que para la máquina funcionando como motor con un tiempo de desconexión de la fase A de 0.084 segundos el voltaje entre las líneas A y C es de 1.774 p.u. Mientras que para un tiempo de desconexión de la misma fase de 0.1325 segundos es de 1.8682 p.u. Como complemento se tiene el valor en estado estable el cual es de 1.4652 p.u. De lo que se puede concluir que para mayores tiempos de desconexión el voltaje en las fases desconectadas es mayor.

El torque electromagnético presenta las siguientes características:

En estado estable es positivo para funcionamiento como motor y negativo para funcionamiento como generador, lo cual es correcto.

Durante la desconexión de una y dos fases, el torque oscila presentando valores medios inferiores al de estado estable, paulatinamente la onda va desplazando su punto medio el cual se acerca cada vez más al valor de es

tado estable. El torque y la corriente de excitación presentan esta naturaleza oscilatoria durante la desconexión de las fases, lo cual se debe a la interacción, producto de la condición desbalanceada, entre las ondas de fuerza magneto-motriz producto de las corrientes que circulan por las fases no desconectadas y la fuerza magneto-motriz del campo y los devanados de amortiguamiento. En los gráficos presentados en el apéndice "C" se puede apreciar el comportamiento descrito.

Durante la desconexión de las tres fases, en los primeros instantes de la desconexión el torque y la corriente de excitación decrecen bruscamente, tanto para operación motor así como para operación generador; posteriormente, cuando la máquina funciona como generador decrecen lentamente hacia valores cada vez más pequeños y cuando funciona como motor crecen lentamente tendiendo a estabilizarse en un valor muy inferior al de estado estable. El comportamiento descrito es lógico, ya que cuando la máquina funciona como generador al desconectar todas sus fases se queda en vacío y cuando funciona como motor la carga conectada frenará a la máquina disminuyendo el valor del torque.

En general para todos los tipos de desconexión y operación de la máquina, a partir de la reconexión el torque inicia un crecimiento rápido hasta alcanzar su mayor valor, luego de lo cual inicia un descenso paulatino hacia su valor de estado estable. Siendo la causa del crecimiento del torque la necesidad de acelerar a la máquina cuando funciona como motor y de frenarla cuando funciona como generador. La magnitud del valor máximo presentado por el torque depende del número de fases desconectadas; tal como se puede observar en el cuadro No. 2, que para la máquina funcionando como motor el valor máximo del torque cuando se desconecta una fase es de 3.2662 p.u.

Mientras que para la desconexión de las tres fases es de 21.67 p.u. Como complemento se tiene el valor en estado estable el cual es de 0.8907 p.u. De lo que se puede concluir que el mayor valor de torque se produce para la desconexión de tres fases y el menor para la desconexión de una fase, para operación motor o generador.

En general para todos los casos de desconexión y operación de la máquina, el valor máximo alcanzado por el torque depende del tiempo que permanecen las fases abiertas, tal como se puede observar en el cuadro No. 1, que para la máquina funcionando como motor con un tiempo de desconexión de la fase A de 0.084 segundos el torque máximo es de 1.8311 p.u. Mientras que para un tiempo de desconexión de 0.1325 segundos es de 2.5958 p.u. Como complemento se tiene el valor en estado estable el cual es de 0.5906 p.u. De lo que se puede concluir que para mayores tiempos de desconexión el valor máximo que alcanza el torque es mayor, para la máquina funcionando como motor o generador.

En cuanto al ángulo de potencia se observa el siguiente comportamiento:

En estado estable es negativo para funcionamiento como motor y positivo para funcionamiento como generador, lo cual es correcto.

Durante la desconexión el ángulo de potencia incrementa su valor en forma exponencial, debido a la variación de la posición relativa entre el campo magnético giratorio y el campo establecido por los polos; posteriormente en la reconexión, inicialmente incrementa ligeramente su valor para luego de crecer tendiendo a su valor de estado estable. La magnitud del valor máximo que presenta el ángulo de potencia en la reconexión depende del número

de fases desconectadas, tal como se puede observar en el cuadro No. 2, que para la máquina funcionando como motor (igual comportamiento se da para operación generador) el valor máximo del ángulo de potencia cuando se desconecta una fase es de 0.9141 radianes. Mientras que para la desconexión de las tres fases es de 4.2551 radianes. Como complemento se tiene el valor en estado estable el cual es de 0.3756 radianes. De lo que se puede concluir que el mayor valor de ángulo de potencia se produce con tres fases abiertas y el menor con una fase abierta, para la máquina funcionando como motor o generador.

En general para todos los casos de desconexión y operación de la máquina, el valor máximo alcanzado por el ángulo de potencia depende del tiempo que permanecen las fases abiertas, tal como se puede observar en el cuadro No. 1, que para la máquina funcionando como motor con un tiempo de desconexión de la fase A de 0.084 segundos el ángulo de potencia máximo es de 0.7141 radianes. Mientras que para un tiempo de desconexión de 0.1325 segundos es de 0.9049 radianes. Como complemento se tiene el valor en estado estable el cual es de 0.5468 radianes. De lo que se puede concluir que para mayores tiempos de desconexión el valor máximo que alcanza el ángulo de potencia es mayor, para la máquina funcionando como motor o generador.

La corriente de excitación presenta las siguientes características:

En condiciones de desconexión y reconexión de fases presenta características similares a las del torque electromagnético, lo cual se explicó anteriormente, siendo los porcentajes de variación distintos a los que se dan para el torque. A continuación se analiza la incidencia del número de fases desconectadas y del tiempo de desconexión en los valores máximos al-

canzados por la corriente de excitación durante la reconexión.

La magnitud del valor máximo presentado por la corriente de excitación de pende del número de fases desconectadas, tal como se puede observar en el Cuadro No. 2, que para la máquina funcionando como motor (igual comportamiento se da para operación generador) el valor máximo de la corriente de excitación cuando se desconecta una fase es de 4.4802 p.u. Mientras que para la desconexión de las tres fases es de 10.972 p.u. Como complemento se tiene el valor en estado estable el cual es de 2.6718 p.u. De lo que se puede concluir que el mayor valor de corriente de excitación se produce para la desconexión de las tres fases y el menor para desconexión de una fase, para operación motor o generador.

En general para todos los casos de desconexión y operación de la máquina, el valor máximo alcanzado por la corriente de excitación depende del tiem po que permanecen las fases abiertas, tal como se observa en el Cuadro No. 1, que para la máquina funcionando como motor con un tiempo de desconexión de la fase A de 0.084 segundos la corriente de excitación máxima es de 2.4027 p.u. Mientras que para un tiempo de desconexión de 0.1325 segundos es de 3.2013 p.u. Como complemento se tiene el valor en estado estable el cual es de 1.584 p.u. De lo que se puede concluir que para mayores tiempos de desconexión el valor máximo que alcanza la corriente de excitación es mayor, para operación motor o generador.

La velocidad del rotor presenta las siguientes características:

Durante la desconexión la velocidad se incrementa en forma paulatina para funcionamiento como generador y disminuye en igual forma para funcionamienu

to como motor, luego de la reconexión tiende a recuperar su valor de esta do estable superando inicialmente ese valor. El comportamiento descrito es lógico, ya que cuando la máquina funciona como generador al desconectar las fases se está disminuyendo carga lo que produce su aceleración y cuando funciona como motor al desconectar las fases la carga se mantiene y la máquina se frena, sucediendo lo contrario al reconectar las fases.

La magnitud de la variación de la velocidad rotórica depende del número de fases desconectadas, tal como se puede observar en el Cuadro No. 2, que para operación motor (igual comportamiento se da para operación generador) la variación de la velocidad durante la desconexión de una fase es de 0.86%. Mientras que para la desconexión de las tres fases es de 16.49%. De lo que se puede concluir que la mayor variación de velocidad se da para la desconexión de las tres fases y la menor para la desconexión de una fase, para operación motor o generador.

En general para todos los casos de desconexión y operación de la máquina, la magnitud de la variación de la velocidad depende del tiempo que permanecen las fases abiertas, tal como se observa en el cuadro No. 1, que para la máquina funcionando como motor con un tiempo de desconexión de la fase A de 0.084 segundos la variación de la velocidad es de 0.79%. Mientras que para un tiempo de desconexión de 0.1325 segundos es de 0.99%. De lo que se puede concluir que para mayores tiempos de desconexión, mayor es la variación de la velocidad de la máquina; para operación motor o generador.

C U A D R O N º 1

VALORES PICO PARA EL ANALISIS DE DESCONEXION DE FASES - MOTOR SUB-EXCITADO

CASO #	I _A	I _B	I _C	VOLTAJE FASE A- FASE C	TORQUE ELECTROMAG.	ANGULO DE POTENCIA	CORRIENTE DE EXCITACION	VARIACION V. ROTORICA
1	1.2615	1.2550	1.2590	1.4652	0.5906	0.5468	1.5840	0
2	2.4899	2.6021	2.1689	1.7740	1.8311	0.7141	2.4027	79.48 x 10 ⁻⁴
3	3.8741	3.9721	3.0005	1.8682	2.5958	0.9049	3.2013	98.73 x 10 ⁻⁴
4	3.7257	3.5693	4.7707	1.8295	2.4771	1.0202	3.2661	137 x 10 ⁻⁴

- Todos los valores están en p.u., excepto el ángulo de potencia que está en radianes.

CASO # 1 Estado Estable.

CASO # 2 Desconexión de la Fase A, tiempo de apertura 0.084 segundos, ángulo de desconexión 30°.

CASO # 3 Desconexión de la Fase A, tiempo de apertura 0.1325 segundos, ángulo de desconexión 30°.

CASO # 4 Desconexión de Fases A y B, tiempo de apertura 0.1325 segundos, ángulo de desconexión 30°.

Para todos los casos la máquina se encuentra funcionando como motor sub-excitado, teniendo las siguientes condiciones iniciales de funcionamiento:

POTENCIA APARENTE MONOFASICA = 1.06734 p.u.

ANGULO DE FACTOR DE POTENCIA = -0.270356 rad.

VOLTAJE FASE - FASE = 1.4652 p.u.

C U A D R O N º 2

VALORES PICO PARA EL ANALISIS DE DESCONEXION DE FASES - MOTOR SOBRE-EXCITADO

CASO #	I _A	I _B	I _C	VOLTAJE FASE A- FASE C	TORQUE ELECTROMAG.	ANGULO DE POTENCIA	CORRIENTE DE EXCITACION	VARIACION V. ROTORICA
1	1.1073	1.0914	1.1032	1.5652	0.8907	0.3756	2.6718	0
2	4.1685	4.9154	4.2701	2.4803	3.2662	0.9141	4.4802	86.06 x 10 ⁻⁴
3	6.9207	7.7494	8.6857	2.3240	3.5654	1.2718	6.1361	123 x 10 ⁻⁴
4	20.3460	15.8540	18.4920	1.5639	21.6700	4.2551	10.9720	1649 x 10 ⁻⁴

- Todos los valores están en p.u., excepto el ángulo de potencia que está en radianes.

CASO # 1 Estado Estable.

CASO # 2 Desconexión de la Fase A, ángulo de desconexión 30°, tiempo de apertura 0.25 segundos.

CASO # 3 Desconexión de las Fases A y B, ángulo de desconexión 30°, tiempo de apertura 0.25 segundos.

CASO # 4 Desconexión de las tres Fases, ángulo de desconexión 30°, tiempo de apertura 0.25 segundos.

Para todos los casos la máquina se encuentra funcionando como motor sobre-excitado, teniendo las siguientes condiciones iniciales de funcionamiento:

POTENCIA APARENTE MONOFASICA = 1.00063 p.u.

ANGULO DE FACTOR DE POTENCIA = 0.31707 rad.

VOLTAJE FASE - FASE = 1.5652 p.u.

C U A D R O N ° 3

VALORES PICO PARA EL ANALISIS DE DESCONEXION DE FASES - GENERADOR SUB-EXCITADO

CASO #	I _A	I _B	I _C	VOLTAJE FASE A- FASE C	TORQUE ELECTROMAG.	ANGULO DE POTENCIA	CORRIENTE DE EXCITACION	VARIACION V. ROTORICA
1	1.0488	1.0622	1.0592	1.5000	0.9643	0.4098	2.3653	0
2	2.7203	2.6494	2.7449	1.3190	2.6940	0.7391	2.8425	79.30 x 10 ⁻⁴
3	10.7013	11.4790	8.5673	1.6310	14.1160	1.6662	5.9733	442 x 10 ⁻⁴

- Todos los valores están en p.u., excepto el ángulo de potencia que está en radianes.

CASO # 1 Estado Estable.

CASO # 2 Desconexión de la fase A, ángulo de desconexión 30°, tiempo de apertura 0.1325 segundos.

CASO # 3 Desconexión de las tres fases, ángulo de desconexión 30°, tiempo de apertura 0.1325 segundos.

Para todos los casos la máquina se encuentra funcionando como generador sub-excitado teniendo las siguientes condiciones iniciales de funcionamiento:

POTENCIA APARENTE MONOFASICA = 0.9200 p.u.

ANGULO DE FACTOR DE POTENCIA = 0.154361 rad.

VOLTAJE FASE - FASE = 1.5 p.u.

4.1.2 CORTOCIRCUITO DE FASES

Se analiza y se comenta las principales características de las variables de la máquina en condiciones de cortocircuito y en distintos estados de funcionamiento previo a la falla (condiciones iniciales). Al final se presentan los cuadros comparativos de valores máximos No. 4, No. 5 y No. 6, los cuales ilustran en forma numérica lo que se expone a continuación.

Las corrientes de fase presentan las siguientes características:

En las fases cortocircuitadas las corrientes presentan su mayor valor en los primeros instantes del cortocircuito, para luego atenuarse, primeramente en forma rápida y luego lentamente, lo cual representa la forma real de comportamiento de la máquina en condiciones de cortocircuito.

- Los valores de corriente de cortocircuito dependen en forma directa del voltaje que tiene la máquina antes de producirse la falla, tal como se puede observar en el Cuadro No. 4, que para la máquina funcionando en vacío la corriente máxima de cortocircuito en la fase A cortocircuitada es de 7.3585 p.u. para voltaje nominal. Mientras que para voltaje reducido es de 1.8166 p.u. Como complemento se tiene el valor en estado estable para voltaje y carga nominal el cual es de 1.7321 p.u. De lo que se puede concluir que para mayores valores de voltaje corresponden mayores valores de corriente de cortocircuito.

Los valores máximos de corriente de cortocircuito dependen de la condición de conexión o no de la máquina con una barra infinita, tal como se puede ob

servar en el Cuadro No. 4, que la corriente máxima en la fase A cortocircuitada es 7.3585 p.u. cuando la máquina funciona con voltaje nominal y aisladamente. Mientras que cuando está conectada a una barra infinita es 8.8408 p.u. Como complemento se tiene el valor en estado estable para voltaje y carga nominal el cual es de 1.7321 p.u. De lo que se puede concluir que los valores de corriente de cortocircuito son mayores cuando la máquina se encuentra conectada a una barra infinita [6], [7]; pudiendo decir que en cierta forma la barra infinita contribuye a la falla.

El ángulo de cortocircuito incide en el valor máximo de corriente, ya que de éste depende la magnitud del voltaje en el instante del cortocircuito, tal como se puede observar en el cuadro No. 5, que para una falla dos fases tierra la corriente máxima de cortocircuito en la fase B cortocircuitada es de 1.7601 p.u. para un ángulo de cortocircuito de 9° . Mientras que para un ángulo de cortocircuito de 45° es de 1.9075 p.u. Debido a la gran cantidad de tipos de falla y casos analizados, así como también por las limitaciones en el uso del computador, no se dispone de la cantidad suficiente de información que permita establecer la incidencia del ángulo de cortocircuito en las corrientes de cortocircuito.

El tipo de falla incide en los valores máximos de corriente, tal como se puede observar en el cuadro No. 6, que para un ángulo de cortocircuito de 90° los valores máximos de corrientes de cortocircuito son distintos para cada tipo de cortocircuito. Al variar el ángulo de cortocircuito las magnitudes de las corrientes de cortocircuito varían en forma diferente para cada falla, por tanto no se puede establecer en forma fija cuál de los tipos de cortocircuito arroja un mayor valor de corriente máxima de cortocircuito.

Para el caso de cortocircuito fase-fase, los resultados de corriente de cortocircuito en las fases involucradas en la falla, tienen signo contrario pero las magnitudes no son iguales, siendo apreciable la diferencia en los primeros instantes de la falla, posteriormente, esta diferencia va disminuyendo para finalmente presentar magnitudes ligeramente diferentes, lo cual se puede apreciar en los gráficos presentados en el apéndice "C". Al igual que lo comentado para desconexión de fases, la principal causa para que se den estas diferencias es la magnitud del paso de integración, pudiendo ser mejoradas las respuestas utilizando pasos de integración más pequeños.

En general, cuando la máquina se encuentra previamente funcionando con carga y conectada a una barra infinita, las corrientes que circulan por las fases no cortocircuitadas presentan una forma de onda diferente a la sinusoidal, evidenciando de esta manera el funcionamiento desbalanceado. La magnitud varía respecto a la de estado estable tal como se puede observar en el cuadro No. 4, que para la máquina funcionando con carga y voltaje nominal durante el cortocircuito de la fase A la corriente máxima en la fase B es 2.9023 p.u. Mientras que en la fase C es 1.6575 p.u. Como complemento se tiene el valor en estado estable el cual es de 1.7321 p.u. De lo que se puede concluir que se dan incrementos o decrementos de corriente en las fases no cortocircuitadas dependiendo del ángulo de cortocircuito.

Los voltajes de la máquina en condiciones de cortocircuito presentan las siguientes características:

Cuando la máquina se encuentra funcionando aisladamente, los voltajes en las fases que no se cortocircuitan presentan una forma de onda diferente a la

sinusoidal, lo cual se debe al funcionamiento desbalanceado. La magnitud del voltaje durante el cortocircuito es diferente al de estado estable, tal como se puede observar en el cuadro No. 4, que para la máquina funcionando con voltaje nominal durante el cortocircuito de la fase A el voltaje de la fase C alcanza un valor máximo de 0.9812 p.u. Mientras que en estado estable es de 0.577 p.u. De lo que se puede concluir que el voltaje en las fases no cortocircuitadas se incrementa durante la falla.

La magnitud del sobrevoltaje presentado por las fases no cortocircuitadas depende del ángulo de cortocircuito, tal como se observa en el cuadro No. 5, que para un cortocircuito fase B - fase C - tierra el voltaje máximo en la fase A es 0.1419 p.u. para un ángulo de cortocircuito de 9° . Mientras que para un ángulo de 351° es de 0.1261 p.u. En estado estable es 0.1205 p.u. De lo que se puede concluir que para los casos presentados en dicho cuadro el mayor valor de voltaje se da para un ángulo de cortocircuito de 9° y el menor para uno de 351° .

El valor del sobrevoltaje presentado por las fases no cortocircuitadas depende del tipo de cortocircuito, tal como se observa en el cuadro No. 6, que para un ángulo de cortocircuito de 90° los valores máximos de voltaje en las fases no cortocircuitadas son distintos para cada tipo de cortocircuito. Al variar el ángulo de cortocircuito la magnitud del voltaje varía en forma diferente para cada falla, por tanto no se puede establecer en forma fija cuál de los tipos de cortocircuito arroja un mayor valor de voltaje en las fases no cortocircuitadas.

La magnitud de los sobrevoltajes presentados en un cortocircuito son reducidos considerablemente en una máquina sincrónica al incluir en ésta deva

ados de amortiguamiento, además, en general el sobrevoltaje se reduce al considerar a la máquina conectada a un sistema de potencia [4]. Al considerar a la máquina conectada a una barra infinita, los voltajes en las fases no cortocircuitadas permanecerán necesariamente constantes.

El torque electromagnético en condiciones de falla presenta las siguientes características:

Para todos los casos de cortocircuito presenta su mayor valor en los primeros instantes de la falla. Para los casos de falla fase-tierra, fase-fase y fase-fase-tierra, luego de presentar su mayor valor comienza a oscilar, siendo los picos de mayor magnitud de signo correspondiente al funcionamiento de la máquina (positivo para motor y negativo para generador). Para el caso de cortocircuito trifásico, luego de presentar su mayor valor decrece rápidamente y posteriormente en forma lenta tendiendo a un valor constante.

La magnitud del valor máximo que alcanza el torque depende del voltaje aplicado a la máquina y de si ésta se encuentra o no conectada a una barra infinita, tal como se puede observar en el cuadro No. 4, que para un cortocircuito fase A-tierra el valor máximo del torque cuando la máquina se encuentra conectada a una barra infinita con voltaje nominal es de 3.3157 p.u. Para la máquina funcionando aisladamente con voltaje nominal es de 2.7684 p.u. Mientras que para la máquina funcionando aisladamente con voltaje reducido es de 0.1421 p.u. Como complemento se tiene el valor en estado estable con carga y voltaje nominal el cual es de 1.135 p.u. De lo que se puede concluir que para mayores valores de voltaje mayor es el valor máximo del torque; así como también que para funcionamiento de la máquina acoplada a una barra infinita y con carga se dan mayores

valores de torque que si la máquina estuviera aislada y sin carga.

El valor máximo que alcanza el torque depende del ángulo de cortocircuito, tal como se puede observar en el cuadro No. 5, que para un cortocircuito fase B - fase C - tierra el valor que alcanza el torque para un ángulo de cortocircuito de 315° es de 0.13 p.u. Mientras que para un ángulo de cortocircuito de 351° es de 0.1505 p.u. En estado estable la máquina se encuentra en vacío y con voltaje reducido. De lo que se puede concluir que para los casos presentados en dicho cuadro el mayor valor alcanzado por el torque se da para un ángulo de cortocircuito de 351° y el menor para uno de 315° .

El valor máximo del torque depende del tipo de cortocircuito, tal como se observa en el cuadro No. 6, que para un ángulo de cortocircuito de 90° los valores máximos que alcanza el torque son distintos para cada tipo de falla. Al variar el ángulo de cortocircuito los valores que presenta el torque varían, por tanto no se puede establecer en forma fija cual de los tipos de cortocircuito arroja el mayor valor de torque durante la falla.

El ángulo de potencia presenta las siguientes características:

Cuando la máquina se encuentra previamente funcionando en vacío y en forma aislada, a partir del cortocircuito el ángulo de potencia incrementa su valor en forma paulatina, posteriormente el incremento va disminuyendo tendiendo a estabilizar su valor. El valor máximo que alcanza el ángulo de potencia depende del voltaje que tiene la máquina antes del cortocircuito, tal como se observa en el cuadro No. 4, que para una falla fase-tierra y un ángulo de cortocircuito de 90° el valor máximo que alcanza el ángulo

de potencia es de 0.8187 radianes cuando se aplica el voltaje nominal. Mientras que para voltaje reducido es de 0.0138 radianes. De lo que se puede concluir que para mayores valores de voltaje, mayor es el valor que alcanza el ángulo de potencia cuando la máquina se encuentra funcionando previamente en vacío.

Cuando la máquina se encuentra funcionando con carga y conectada a una barra infinita, en los primeros instantes de la falla se presenta una ligera disminución del ángulo de potencia, luego incrementa o disminuye su valor, dependiendo de la carga y el voltaje previos a la falla y finalmente trata de estabilizarse sobre o bajo su valor también dependiendo de estos dos factores. Por tanto el valor máximo también depende del voltaje y carga que tiene la máquina antes de la falla, tal como se observa en el cuadro No. 4, que para una falla fase-tierra y un ángulo de cortocircuito de 90° el valor máximo que alcanza el ángulo de potencia es de 0.7637 radianes para carga y voltaje nominal. Mientras que para carga y voltaje reducidos es de 1.2267 radianes. Para funcionamiento en estado estable con carga y voltaje nominal es de 0.8203 radianes. De lo que se puede concluir que para voltaje reducido el ángulo de potencia es mayor para las cargas consideradas en el cuadro No. 4.

El valor que alcanza el ángulo de potencia depende del ángulo de cortocircuito, tal como se puede observar en el cuadro No. 5, que para un cortocircuito fase B - fase C - tierra el valor que alcanza el ángulo de potencia es de 0.0179 radianes para un ángulo de cortocircuito de 351° . Mientras que para un ángulo de cortocircuito de 9° es de 0.0245 radianes. En estado estable la máquina se encuentra en vacío y con voltaje reducido. De lo que se puede concluir que para los casos presentados en dicho cuadro el mayor valor alcanzado por el ángulo de potencia se da para un ángulo de

cortocircuito de 9° y el menor para uno de 351° .

El valor máximo que alcanza el ángulo de potencia depende del tipo de cortocircuito, tal como se observa en el cuadro No. 6, que para un ángulo de cortocircuito de 90° los valores máximos que alcanza el ángulo de potencia son distintos para cada tipo de falla. Al variar el ángulo de cortocircuito los valores máximos de ángulo de potencia varían, por tanto no se puede establecer en forma fija cual de los tipos de falla arroja el mayor valor.

La corriente de excitación presenta las siguientes características:

En igual forma que para el caso de desconexión de fases, las características de la corriente de excitación son similares a las que presenta el torque electromagnético, siendo diferentes los porcentajes de variación.

El valor máximo que alcanza la corriente de excitación depende del voltaje aplicado a la máquina y de si ésta se encuentra o no conectada a una barra infinita, tal como se puede observar en el cuadro No. 4, que para una falla fase-tierra y un ángulo de cortocircuito de 90° el valor máximo que alcanza la corriente de excitación es de 3.7786 p.u. para la máquina conectada a una barra infinita con carga y voltaje nominal. Para la máquina aislada, en vacío y con voltaje nominal es de 3.0262 p.u. Mientras que para la máquina aislada, en vacío y con voltaje reducido es de 0.6942 p.u. Para funcionamiento en estado estable con voltaje y carga nominal es de 1.9812 p.u. De lo que se puede concluir que para mayores valores de voltaje la máquina alcanza mayores valores de corriente de excitación; así como también que cuando la máquina se encuentra previamente con carga y conectada a una barra infinita, se alcanzan mayores valores de corriente de excitación du

rante la falla que cuando se encuentra previamente en vacío y aislada.

El valor que alcanza la corriente de excitación depende del ángulo de cortocircuito, tal como se puede observar en el cuadro No. 5, que para un cortocircuito fase B-fase C-tierra el valor que alcanza la corriente de excitación es de 0.7993 p.u. para un ángulo de cortocircuito de 9° . Mientras que para un ángulo de cortocircuito de 45° es de 0.8273 p.u. En estado estable es de 0.2175 p.u. De lo que se puede concluir que para los casos presentados en dicho cuadro el mayor valor de corriente de excitación se da para un ángulo de cortocircuito de 45° y el menor para un ángulo de cortocircuito de 9° .

El valor que alcanza la corriente de excitación depende del tipo de cortocircuito, tal como se observa en el cuadro No. 6, que para un ángulo de cortocircuito de 90° los valores máximos que alcanza la corriente de excitación son distintos para cada tipo de falla. Al variar el ángulo de cortocircuito los valores máximos de la corriente de excitación varían, por tanto no se puede establecer en forma fija cuál de los tipos de falla arroja el mayor valor.

Las características de la velocidad rotórica son las siguientes:

Para todos los casos de cortocircuito de un generador se da una disminución muy pronunciada en los primeros instantes, para luego seguir disminuyendo en forma cada vez más lenta tratando de estabilizarse.

La magnitud de la variación de la velocidad rotórica depende de la condición de conexión o no de la máquina a una barra infinita, así como también

de la carga y voltaje que presenta antes del cortocircuito, tal como se puede observar en el cuadro No. 4, que para una falla fase-tierra y un ángulo de cortocircuito de 90° el valor que alcanza la variación de la velocidad rotórica es de 0.26% para la máquina funcionando con carga, voltaje nominal y conectada a una barra infinita. Para la máquina aislada, en vacío y con voltaje nominal es de 1.61%. Para la máquina en vacío y con voltaje reducido es de 0.069%. Mientras que para la máquina conectada a una barra infinita con voltaje y carga reducidos es de 0.043% de signo positivo (se acelera). De lo que se puede concluir que para funcionamiento de la máquina acoplada a una barra infinita se dan menores valores de variación de velocidad, llegando incluso a tener variaciones de signo contrario al esperado (se acelera para funcionamiento como generador) cuando el voltaje y la carga son reducidos; así como también que para mayores voltajes se dan mayores variaciones de velocidad.

La magnitud de la variación de la velocidad depende del ángulo de cortocircuito, tal como se puede observar en el cuadro No. 5, que para un cortocircuito dos fases tierra el valor que alcanza la variación de la velocidad es de 0.089% para un ángulo de cortocircuito de 45° . Mientras que para un ángulo de cortocircuito de 9° es de 0.12%. De lo que se puede concluir que para los casos presentados en dicho cuadro la mayor variación de velocidad se da para 9° y la menor para 45° .

La magnitud de la variación de la velocidad depende del tipo de cortocircuito, tal como se puede observar en el cuadro No. 6, que para un ángulo de cortocircuito de 90° el valor de la variación de la velocidad varía con el tipo de falla. Al variar el ángulo de cortocircuito y las condiciones de funcionamiento, cambia la magnitud de la variación de la velocidad, por

tanto no se puede establecer en forma fija cuál de los tipos de falla arroja el mayor valor.

C U A D R O N° 4

VALORES PICO PARA EL ANALISIS DE CORTOCIRCUITOS-CORTOCIRCUITO FASE A (90°)

CASO #	I _A	I _B	I _C	VOLTAJE FASE A- FASE C	TORQUE ELECTROMAG.	ANGULO DE POTENCIA	CORRIENTE DE EXCITACION	VARIACION V. ROTORICA
1	8.8408	2.9023	1.6575	0.5770	3.3157	0.7637	3.7786	26x10 ⁻⁴
2	7.3585	~ 0	~ 0	0.9812	2.7684	0.8187	3.0262	161x10 ⁻⁴
3	2.3301	1.1980	0.6497	0.1205	0.2317	1.2267	1.2632	4.31x10 ⁻⁴ (*)
4	1.8166	~ 0	~ 0	0.2095	0.1421	0.0138	0.6942	6.9x10 ⁻⁴

- Todos los valores están en p.u., excepto el ángulo de potencia que está en radianes.

CASO # 1 La máquina funcionando previamente con carga y voltaje nominales, en estado estable se tiene:

CORRIENTE DE FASE	= 1.7321 p.u.	ANGULO DE POTENCIA	= 0.8203 rad.
VOLTAJE FASE-TIERRA	= 0.5774 p.u.	CORRIENTE DE EXCITACION	= 1.9812 p.u.
TORQUE ELECTROMAGNETICO	= 1.1350 p.u.		

CASO # 2 La máquina funcionando previamente con voltaje nominal y sin carga

CASO # 3 La máquina funcionando previamente con voltaje reducido (0.1205 p.u.) y carga reducida (0.1 p.u.)

CASO # 4 La máquina funcionando previamente con voltaje reducido (0.1205 p.u.) y sin carga

(*) La máquina se acelera.

C U A D R O N º 5

VALORES PICO PARA EL ANALISIS DE CORTOCIRCUITOS - CORTOCIRCUITO FASE B - FASE C - TIERRA

ANGULO DE CORTOCIRC.	I _A	I _B	I _C	VOLTAJE FASE A-FASE C	TORQUE ELECTROMAG.	ANGULO DE POTENCIA	CORRIENTE DE EXCITACION.	VARIACION V. ROTORICA
9°	~ 0	1.7601	1.3007	0.1419	0.1475	0.0245	0.7993	12x10 ⁻⁴
45°	~ 0	1.9075	1.1404	0.1384	0.1503	0.0196	0.8273	8.9x10 ⁻⁴
315°	~ 0	1.5866	1.3329	0.1241	0.1300	0.0180	0.7999	10 x 10 ⁻⁴
351°	~ 0	1.7047	1.3404	0.1261	0.1505	0.0179	0.8094	10 x 10 ⁻⁴

- Todos los valores están en p.u., excepto el ángulo de potencia que están en radianes.

Para todos los casos la máquina se encuentra funcionando en vacío y con un voltaje fase-tierra de 0.1205 p.u. y una corriente de excitación de 0.2175 p.u.

VALORES PICO PARA EL ANALISIS DE CORTOCIRCUITOS

TIPO DE FALLA	I_A	I_B	I_C	VOLTAJE FASE A-FASE C	TORQUE ELECTROMAG.	ANGULO DE POTENCIA	CORRIENTE DE EXCITACION	VARIACION V. ROTORICA
Fase A-Tierra	1.8166	~ 0	~ 0	0.2095	0.1421	0.0138	0.6942	6.9×10^{-4}
Fases B y C-T.	~ 0	1.5680	1.3467	0.1189	0.0950	0.0142	0.8192	7.72×10^{-4}
Fase B-Fase C	~ 0	1.0393	1.2656	0.2432	0.0900	0.0135	0.7035	6.1×10^{-4}
Trifásica	1.5679	1.2978	1.3497	0	0.1380	0.0159	0.9233	8.2×10^{-4}

- Todos los valores están en p.u., excepto el ángulo de potencia que están en radianes.

Para todos los casos la máquina se encuentra funcionando en vacío, con un voltaje fase tierra de 0.1205 p.u. y una corriente de excitación de 0.2175 p.u. El ángulo de cortocircuito es 90° .

4.2 COMPARACION CON RESULTADOS EXPERIMENTALES Y OBTENIDOS EN TESIS ANTERIORES

En el numeral anterior se realiza un análisis cualitativo y cuantitativo general de las variables de la máquina en condiciones de falla, en esta parte se realiza una comparación cuantitativa de resultados experimentales y teóricos presentados en tesis anteriores con los obtenidos en este trabajo.

Los valores base y los parámetros de la máquina se presentan en el apéndice "D".

4.2.1 DESCONEXION DE UNA FASE

La desconexión de una fase se analiza en el trabajo "MODELO Y SIMULACION DIGITAL DE LA MAQUINA SINCRONICA CON UNA FASE ABIERTA Y CON RECONEXION INCLUIDA LA SATURACION"; por considerar de mayor importancia se presentan cuadros comparativos de las corrientes máximas en condición de falla, para la máquina funcionando como motor sub y sobreexcitado y como generador sub y sobre-excitado.

En los cuadros No. 7, 8, 9 y 10, se presentan los valores máximos de corriente, en los cuales se denomina como resultados anteriores a los obtenidos experimental y teóricamente en la tesis anterior mencionada y resultados de la simulación a los obtenidos en ésta. Para todos los casos el neutro de la máquina está desconectado, ya que esta es la condición analizada en el trabajo tomado para la comparación. Previo a los cuadros comparativos se presenta las condiciones de funcionamiento de la máquina. Para

todos los tipos de operación de la máquina, los resultados para funcionamiento en estado estable son prácticamente iguales.

En general las formas de onda de todas las variables para la desconexión de la fase y para la reconexión son similares en los dos resultados comparados, lo cual se puede apreciar al comparar los resultados de desconexión de la fase A para la máquina funcionando como motor sub-excitado los cuales están disponibles en el trabajo mencionado y en el Apéndice "C" en éste. Se presentan variaciones en la magnitud de los picos presentados, las cuales son mayores para el primer pico, en los cuadros No. 7, No. 8, No. 9 y No. 10 se pueden apreciar las diferencias mencionadas para todos los tipos de funcionamiento de la máquina.

Las diferencias que se aprecian en los cuadros comparativos pueden deberse a algunas causas, pudiéndose citar como posibles las siguientes:

- Fallas en el sistema de medición y en la apreciación de la misma, así como la tarea casi imposible de producir la desconexión y posterior reconexión de la fase en un tiempo determinado.
- En el presente trabajo se determina un modelo matemático general en el cual se introducen condiciones de falla para la simulación; en el trabajo que se toma como base para la comparación, se determina un modelo matemático y luego se realiza un extenso desarrollo matemático para la simulación de la desconexión de la fase A, pudiendo existir errores en el mismo.
- El método iterativo utilizado, así como la incidencia de la magnitud del

paso de integración en la exactitud de los resultados, puede ocasionar errores considerables en el trabajo mencionado, así como también en éste.

FUNCIONAMIENTO COMO MOTOR SUB-EXCITADO

CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO

$$V_{ff} = 337 \text{ V.} \quad (0.84594 \text{ p.u.})$$

$$S_{3\phi} = 3.735.7 \text{ VA.} \quad (1.06734 \text{ p.u.})$$

$$P_{3\phi} = 3.600 \text{ W.}$$

$$I_{línea} = 6.4 \text{ A.}$$

$$I_{excitación} = 0.79 \text{ A.}$$

$$f_p = 0.96367481 \text{ (-)} \quad (-0.27036 \text{ radianes})$$

tiempo que permanece la fase abierta \approx 132 m. segundos

Inicio de la perturbación = 21.5 m. segundos (43 pasos)

Fin de la perturbación = 154 m. segundos (308 pasos)

Paso de integración = 0.5 m. segundos

Todos los resultados obtenidos para este caso se presentan en el Apéndice "C".

C U A D R O N ° 7

DESCONEXION DE LA FASE A MOTOR SUB-EXCITADO

MEDICION	IA			IB			IC		
	RESULTADOS ANTERIORES		RESULTADO SIMULACION	RESULTADOS ANTERIORES		RESULTADO SIMULACION	RESULTADOS ANTERIORES		RESULTADO SIMULACION
	EXPERIMENTO	PROGRAMA	PROGRAMA	EXPERIMENTO	PROGRAMA	PROGRAMA	EXPERIMENTO	PROGRAMA	PROGRAMA
Estado estable	4.5 div. 18.00 App.	1.2615 p.u. 18.09 App.	1.2615 p.u. 18.09 App.	4.4 div. 17.60 App.	1.2590 p.u. 18.06 App.	1.2550 p.u. 18.01 App.	4.4 div. 17.60 App.	1.2590 p.u. 18.064 App.	1.2590p.u. 18.06 App.
Arrastre de Fase	5.3 div. 21.20 Ap.	3.096 p.u. 22.21 Ap.	3.8741 p.u. 27.79 Ap.	5.6 div. 22.4 Ap.	3.1200 p.u. 22.38 Ap.	3.9720 p.u. 28.49 Ap.	4.1 div. 16.40 Ap.	2.4383 p.u. 17.49 Ap.	2.5575p.u. 18.35 Ap.
55 ms. desde la apertura	4.1 div. 16.40 Ap.	2.3321 p.u. 16.73 Ap.	2.1603 p.u. 15.50 Ap.	4.15 div. 16.60 Ap.	2.457 p.u. 17.63 Ap.	2.7818 p.u. 19.96 Ap.	4.6 div. 18.40 Ap.	2.6419 p.u. 18.95 Ap.	2.5945p.u. 18.61 Ap.

FUNCIONAMIENTO COMO MOTOR SOBRE-EXCITADO

CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO

$$V_{ff} = 360 \text{ V.} \quad (0.90368 \text{ p.u.})$$

$$S_{3\phi} = 3.502.2 \text{ VA.} \quad (1.00063 \text{ p.u.})$$

$$P_{3\phi} = 3.327.6 \text{ W.}$$

$$I_{línea} = 5.8 \text{ A.}$$

$$I_{excitación} = 1.05 \text{ A.}$$

$$f_p = 0.95015 (+) \quad (0.31708 \text{ radianes})$$

Tiempo que permanece la fase abierta \approx 250 m. segundos

Inicio de la perturbación = 21.5 m. segundos (43 pasos)

Fin de la perturbación = 271.5 m. segundos (543 pasos)

Paso de integración = 0.5 m. segundos.

CUADRO N° 8

DESCONEXION DE LA FASE A MOTOR SOBRE-EXCITADO

MEDICION	I _A		I _B		I _C				
	RESULTADOS ANTERIORES	RESULTADO SIMULACION	RESULTADOS ANTERIORES	RESULTADO SIMULACION	RESULTADOS ANTERIORES	RESULTADO SIMULACION			
	EXPERIMENTO	PROGRAMA	EXPERIMENTO	PROGRAMA	EXPERIMENTO	PROGRAMA			
Estado estable	4.1 div. 16.40App.	1.1066p.u. 15.88 App.	1.107p.u. 15.89 App.	4.0 div. 16.00App.	1.1030p.u. 15.82 App.	1.0914p.u. 15.66 App.	4.0 div. 16.00App.	1.1025p.u. 15.82 App.	1.1032p.u. 15.82 App.
Pierre de fase	5.7 div. 22.80 Ap.	3.0730p.u. 22.05 Ap.	3.967p.u. 28.46 Ap.	5.80div. 23.20 Ap.	3.2006p.u. 22.96 Ap.	4.3430p.u. 31.15 Ap.	4.8 div. 19.20 Ap.	2.9076p.u. 20.86 Ap.	3.6998p.u. 26.54 Ap.
15 m.seg. desde apertura	0A	0A	~ 0A.	4.4 div. 17.60 Ap.	2.2105p.u. 15.86 Ap.	2.6369p.u. 18.92 Ap.	4.0 div. 16.00 Ap.	2.2971p.u. 16.48 Ap.	2.3382p.u. 16.77 Ap.

FUNCIONAMIENTO COMO GENERADOR SUB-EXCITADO

CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO

$$V_{ff} = 345 \text{ V.} \quad (0.86603 \text{ p.u.})$$

$$S_{3\phi} = 3.220.0 \text{ VA.} (0.92 \text{ p.u.})$$

$$P_{3\phi} = 3.181.71 \text{ W.}$$

$$I_{línea} = 5.6 \text{ A.}$$

$$I_{excitación} = 0.8 \text{ A.}$$

$$f_p = 0.98811 (+) \quad (0.154361 \text{ radianes})$$

Tiempo que permanece la fase abierta \approx 132 m. segundos

Inicio de la perturbación = 21.5 m. segundos (43 pasos)

Fin de la perturbación = 154 m. segundos (308 pasos)

Paso de integración = 0.5 m. segundos

C U A D R O N ° 9

DESCONEXION DE LA FASE A GENERADOR SUB-EXCITADO

MEDICION	I _A		I _B			I _C			
	RESULTADOS ANTERIORES		RESULTADO SIMULACION	RESULTADOS ANTERIORES		RESULTADO SIMULACION	RESULTADOS ANTERIORES		RESULTADO SIMULACION
	EXPERIMENTO	PROGRAMA	PROGRAMA	EXPERIMENTO	PROGRAMA	PROGRAMA	EXPERIMENTO	PROGRAMA	PROGRAMA
Estado estable	4.0 div. 16.00App.	1.0570p.u. 15.16 App.	1.0488p.u. 15.05 App.	3.8div. 15.20App.	1.0622 p.u. 15.24 App.	1.0622p.u. 15.24 App.	3.8 div. 15.20 App.	1.0592 p.u. 15.20 App.	1.0592p.u. 15.20 App.
Corriente de fase	4.2 div. 16.80 Ap.	2.5698p.u. 18.43 Ap.	2.7203p.u. 19.51 Ap.	4.1 div. 16.40Ap.	2.3690 p.u. 16.99 Ap.	2.5800p.u. 18.51 Ap.	3.5 div. 14.00 Ap.	1.8139 p.u. 13.01 Ap.	1.9545p.u. 14.02 Ap.
7 ms. desde el cierre	1.8 div. 7.20 Ap.	0.9855p.u. 7.07 Ap.	0.9654p.u. 6.93 Ap.	1.6 div. 6.40 Ap.	0.8916p.u. 6.40 Ap.	0.8808p.u. 6.32 Ap.	≈ 0 A.	0.0346p.u. 0.25 Ap.	0.0416p.u. 0.30 Ap.

FUNCIONAMIENTO COMO GENERADOR SOBRE-EXCITADO

CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO

$$V_{ff} = 345 \text{ V.} \quad (0.86603 \text{ p.u.})$$

$$S_{3\phi} = 3.042.27 \text{ VA.} \quad (0.86922 \text{ p.u.})$$

$$P_{3\phi} = 2.947.81 \text{ W.}$$

$$I_{\text{línea}} = 5.4 \text{ A.}$$

$$I_{\text{excitación}} = 1.24 \text{ A.}$$

$$f_p = 0.96895 \text{ (-)} \quad (-0.249848 \text{ radianes})$$

Tiempo que permanece la fase abierta \approx 160 m. segundos

Inicio de la perturbación = 21.5 m. segundos (43 pasos)

Fin de la perturbación = 180 m. segundos (360 pasos)

Paso de integración = 0.5 m. segundos

C U A D R O N ° 1 0

DESCONEXION DE LA FASE A GENERADOR SOBRE-EXCITADO

MEDICION	I _A		I _B			I _C			
	RESULTADOS ANTERIORES		RESULTADO SIMULACION	RESULTADOS ANTERIORES		RESULTADO SIMULACION	RESULTADOS ANTERIORES		RESULTADO SIMULACION
	EXPERIMENTO	PROGRAMA	PROGRAMA	EXPERIMENTO	PROGRAMA	PROGRAMA	EXPERIMENTO	PROGRAMA	PROGRAMA
Estado estable	4.0 div. 16.00App.	1.0036p.u. 14.40App.	1.0037p.u. 14.40App.	4.0div. 16.00App.	1.0007p.u. 14.36App.	1.0003p.u. 14.35App.	4.0 div. 16.00App.	1.0007p.u. 14.36App.	1.0000p.u. 14.35App.
Pierres de fase	3,2 div. 12.80 Ap.	2.1610p.u. 15.50 Ap.	2.4443p.u. 17.53 Ap.	3.1 div. 12.40 Ap.	2.2770p.u. 16.33 Ap.	2.5566p.u. 18.34 Ap.	3.5 div. 14.00 Ap.	1.8812p.u. 13.49 Ap.	2.3733p.u. 17.02 Ap.

4.2.2 CORTOCIRCUITO DE FASES

Los casos de cortocircuito: fase-tierra, fase-fase y fase-fase-tierra se analizan en el trabajo "FALLAS ASIMETRICAS EN MAQUINAS SINCRONICAS", para todos los casos la máquina se encuentra funcionando como generador en vacío antes del cortocircuito.

Por considerar de mayor importancia y por disponer en el trabajo mencionado de resultados de corrientes de cortocircuito, se presentan los cuadros No. 11, No. 12 y No. 13, en los que se comparan los valores máximos que alcanzan las corrientes de cortocircuito y los tiempos a los que éstos se producen, denominándose resultados anteriores a los obtenidos experimental y teóricamente en la tesis anterior mencionada y resultados de la simulación a los obtenidos en ésta.

En general, las formas de onda de los resultados obtenidos en el trabajo anterior mencionado y en éste, difieren ligeramente, lo cual se puede apreciar en los resultados que están disponibles en el trabajo mencionado y en el apéndice "C" de éste. Se dan diferencias considerables de magnitud en el primer pico (mayor), principalmente en las corrientes de cortocircuito, posteriormente se dan diferencias cada vez menores tendiendo a valores cada vez más parecidos, lo cual se aprecia claramente en los cuadros comparativos No. 11, No. 12 y No. 13.

Las diferencias que se pueden apreciar principalmente en magnitud, pueden deberse a algunas causas posibles, pudiendo citar como principales las siguientes:

- Resultados experimentales con errores, de medición y apreciación de las variables obtenidas como resultado, así como también en la fijación de condiciones iniciales (voltaje, ángulo de cortocircuito, etc).
- En el trabajo que se toma como referencia se realiza un extenso desarrollo matemático, en el cual se hacen una serie de restricciones y consideraciones, siendo una de las más significativas la no consideración de la saturación, lo cual en conjunto puede ocasionar errores en los resultados.
- El método iterativo utilizado para la resolución de las ecuaciones diferenciales, así como la incidencia directa de la magnitud del paso de integración en la exactitud de los resultados, puede causar errores considerables en los resultados obtenidos en este trabajo.

En general para todos los casos a compararse, la máquina presenta las siguientes condiciones de funcionamiento antes de producirse el cortocircuito.

$$V_{ff} = 48 \text{ V. (0.12049 p.u.)}$$

$$S_{3\phi} = 0 \text{ VA. (vacío)}$$

$$\text{Paso de integración} = 0.4167 \text{ m. segundos}$$

Los resultados de los casos a compararse se presentan en el apéndice "C".

C U A D R O N º 1 1

CORTOCIRCUITO DE LA FASE A

MEDICION	CORRIENTE FASE A (Ap.)			TIEMPO DE OCURRENCIA (ms.)		
	RESULTADOS ANTERIORES		RESULTADO SIMULACION	RESULTADOS ANTERIORES		RESULTADO SIMULACION
	EXPERIMENTO	PROGRAMA	PROGRAMA	EXPERIMENTO	PROGRAMA	PROGRAMA
Primer Pico	~ 11.0	11.677	11.549 (1.610 p.u.)	~ 4	4.17	7.50
Segundo Pico	~ 11.5	11.038	8.587 (1.197 p.u.)	~ 12	12.50	16.25
Tercer Pico	~ 10.5	10.466	9.462 (1.319 p.u.)	~ 21	20.83	25.00
Cuarto Pico	~ 11.0	9.958	8.572 (1.195 p.u.)	~ 30	29.17	32.50
Quinto Pico	~ 9.5	9.502	9.039 (1.260 p.u.)	~ 37	37.50	41.24

- 111 -

ANGULO DE CORTOCIRCUITO = 240° en este trabajo y 90° en el trabajo que se toma para la comparación.

C U A D R O N ° 1 2

CORTOCIRCUITO DE LAS FASES B Y C A TIERRA

MEDICION	CORRIENTE DE FASE B (Ap.)			TIEMPO DE OCURRENCIA (ms.)		
	RESULTADOS ANTERIORES		RESULTADO SIMULACION	RESULTADOS ANTERIORES		RESULTADO SIMULACION
	EXPERIMENTO	PROGRAMA	PROGRAMA	EXPERIMENTO	PROGRAMA	PROGRAMA
Primer Pico	~ 11	16.566	13.687 (1.908 p.u.)	~ 7	7.50	6.67
Segundo Pico	~ 11	7.397	8.163 (1.138 p.u.)	~ 16	16.25	15.41
Tercer Pico	~ 9.5	9.576	9.125 (1.272 p.u.)	~ 24	24.17	24.16
Cuarto Pico	~ 9	7.442	8.178 (1.140 p.u.)	~ 33	32.92	32.91
Quinto Pico	~ 8	7.457	8.135 (1.134 p.u.)	~ 42	41.25	40.41

- 112 -

ANGULO DE CORTOCIRCUITO = 45° en este trabajo y 135° en el trabajo que se toma para la comparación.

C U A D R O N ° 1 3

CORTOCIRCUITO FASE B-FASE C

MEDICION	CORRIENTE FASE B (Ap.)			TIEMPO DE OCURRENCIA (ms.)		
	RESULTADOS ANTERIORES		RESULTADO SIMULACION	RESULTADOS ANTERIORES		RESULTADO SIMULACION
	EXPERIMENTO	PROGRAMA	PROGRAMA	EXPERIMENTO	PROGRAMA	PROGRAMA
Primer Pico	~ 7	6.622	6.872 (0.958 p.u.)	~ 2.5	3.33	3.75
Segundo Pico	~ 8	8.643	6.413 (0.894 p.u.)	~ 11	11.66	12.50
Tercer Pico	~ 7.5	6.875	5.796 (0.808 p.u.)	~ 20	20.00	21.25
Cuarto Pico	~ 6.5	7.122	5.674 (0.791 p.u.)	~ 27.5	28.33	28.75
Quinto Pico	~ 6.5	6.417	5.825 (0.812 p.u.)	~ 35	36.66	37.49

ANGULO DE CORTOCIRCUITO = 255° en este trabajo y 15° en el trabajo que se toma para la comparación.

4.3 COMENTARIOS, CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y APLICACIONES

4.3.1 COMENTARIOS

En base al análisis cualitativo y cuantitativo de los resultados obtenidos, así como la comparación realizada con resultados obtenidos en trabajos anteriores, se puede decir que los resultados reflejan el comportamiento de la máquina sincrónica en condiciones de falla.

Tanto para el caso de desconexión de una fase, así como los casos de cortocircuito fase-tierra, fase-fase y fase-fase-tierra, las comparaciones hechas en el numeral anterior reflejan diferencias principalmente en magnitud, las cuales son mayores para los picos de mayor valor, tendiendo luego a diferencias cada vez menores cuando las variables se acercan a un valor estable, lo cual se aprecia claramente en los cuadros comparativos presentados y en los gráficos que se encuentran disponibles en los trabajos mencionados y en el apéndice "C" de este trabajo.

Los resultados tomados de trabajos anteriores tanto experimentales como teóricos, pueden tener errores de diferente índole, por ejemplo errores de medición y apreciación en los primeros y un complicado desarrollo matemático en los segundos, así como también consideraciones y restricciones, como es la no consideración de la saturación para el estudio de cortocircuitos en el trabajo que se toma como referencia para la comparación. Los resultados obtenidos en este trabajo presentan errores principalmente debido al método iterativo de solución de las ecuaciones diferenciales, el cual se reduce considerablemente al reducir el paso de integración.

Un aspecto que no se ha tomado en cuenta en el desarrollo de este trabajo y que ayudaría en la exactitud de los resultados, es el calentamiento que produce la falla en las bobinas de la máquina, el cual es mayor para una falla fase-fase. (5).

Un aspecto muy importante que se debe tomar en cuenta es la magnitud del paso de integración, ya que de ella depende la exactitud de los resultados que se obtengan, en los resultados presentados se utiliza un paso de integración de 0.5 milisegundos para la simulación de fases abiertas y 0.4167 milisegundos para cortocircuitos, estos valores se los escogió por ser los utilizados en los trabajos anteriores ya mencionados y además porque proporcionan resultados aceptables. Con el fin de comparar se corrió ejemplos con pasos de integración menores, dando resultados más exactos, obteniendo también un mayor número de puntos de las ondas que representan las variables, teniendo como contrapartida tiempos de computación muy altos.

Debido a la gran cantidad de fallas y tipos de funcionamiento analizados y corridos en el programa digital, no se dispone de la cantidad necesaria de información para analizar más profundamente la incidencia del ángulo de reconexión para el caso de desconexión de fases y del ángulo de cortocircuito para el caso de cortocircuitos, en el comportamiento de las variables de la máquina en condiciones de falla.

4.3.2 CONCLUSIONES

El presente trabajo cumple con su objetivo, el cual es determinar un modelo matemático de la máquina sincrónica que permita simular a ésta en cualquier estado de funcionamiento, así:

- En estado estable (motor o generador), en vacío en forma aislada o con carga conectada a una barra infinita.
- Desconexión de una, dos y tres fases, incluyendo la reconexión, para la máquina funcionando como generador o motor sub o sobre-excitado.
- Todos los tipos de cortocircuitos de fases, para la máquina funcionando en forma aislada en vacío o conectada a una barra infinita con carga.

Un aspecto muy importante en la desconexión de fases, es la incidencia directa del tiempo que permanecen las fases abiertas en los picos que presentan las variables de la máquina en la reconexión, ya que según la magnitud de éstos se podrá o no reconectar las fases desconectadas, ya que para tiempos de desconexión muy altos se dan picos muy elevados.

El número de fases desconectadas influye en los valores máximos que alcanzan las variables en la desconexión y en la reconexión, tal como se puede observar en los cuadros No. 2 y No. 3, que para la máquina funcionando como motor o como generador los valores máximos de corrientes, torque electromagnético, ángulo de potencia, corriente de excitación y variación de la velocidad rotórica son mayores para desconexión de tres fases y menores para la desconexión de una fase. El valor que alcanza el voltaje durante la desconexión cuando la máquina funciona como generador es mayor para la desconexión de las tres fases y menor para la desconexión de la una fase. Mientras que para operación motor es mayor para la desconexión de una fase y menor para desconexión de las tres fases.

Debido a la gran cantidad de casos analizados y a la restricción en el uso

del computador, no se dispone de la cantidad necesaria de información que permita establecer la dependencia de los valores máximos con el ángulo de reconexión.

Un aspecto muy importante en el comportamiento de las variables en condiciones de cortocircuito, es la incidencia del voltaje que tiene la máquina antes de la falla, tal como se puede observar en el cuadro No. 4, que para mayores voltajes se presentan mayores valores máximos de corrientes de falla, torque electromagnético y corriente de excitación. Para la velocidad rotórica el efecto es contrario, dándose menores variaciones. Mientras que el ángulo de potencia presenta incrementos cuando la máquina está en vacío y decrementos o incrementos, dependiendo del voltaje y la carga aplicados a la máquina, cuando está conectada a una barra infinita.

Al considerar a la máquina conectada a una barra infinita se dan valores máximos de las variables distintos a los que se tiene para funcionamiento de la máquina en forma aislada, tal como se puede observar en el cuadro No. 4, que para voltaje nominal cuando la máquina está conectada a una barra infinita se dan mayores valores máximos de corrientes de cortocircuito, torque electromagnético y corriente de excitación. Mientras que el ángulo de potencia y la variación de la velocidad rotórica son menores.

El tipo de falla y ángulo de cortocircuito inciden en la magnitud de los valores que alcanzan las variables durante la falla, debido a la gran cantidad de casos analizados y a la restricción en el uso del computador, no se dispone de la cantidad suficiente de información que permita establecer la forma de dependencia de los valores máximos con el ángulo de cortocircuito.

4.3.3 RECOMENDACIONES

Se recomienda avanzar en el estudio de fallas de máquinas sincrónicas, desarrollando aspectos que no se han topado en este trabajo, pudiéndose citar entre los principales los siguientes:

El efecto del incremento de la temperatura, principalmente en las resistencias de las bobinas de la máquina [5].

Considerar a la máquina como un elemento más de un Sistema Eléctrico de Potencia, con lo que se podría incorporar los resultados para el diseño de protecciones de todo el sistema, así como también se podría establecer el nivel de incidencia de las fallas de la máquina en la estabilidad del sistema [2].

Incluir las pérdidas por histéresis y corrientes de Eddy.

4.3.4 APLICACIONES

Las aplicaciones que se puede dar al presente trabajo son entre otras las siguientes:

Se puede observar el comportamiento de las variables de una máquina sincrónica sin los problemas que representa realizar las pruebas experimentales correspondientes, ya que el programa determina el comportamiento en el tiempo de todas las variables que se deseen.

Una de las aplicaciones de los resultados de desconexión de fases, es estu

diar la utilización de sistemas de despeje de fallas de alta velocidad. Cuando la máquina y/o la línea conectada a ésta son afectadas por una falla transitoria, es necesario aislar la máquina y reconectarla en un intervalo de tiempo lo más pequeño posible, ya que de la magnitud de éste dependen los picos de corriente en la reconexión, la magnitud de los cuales indica si es o no posible la reconexión. El sistema utilizado para despejar estas fallas transitorias son los reconectores, por tanto los resultados servirían para estudiar la conveniencia de utilización de reconectores monopolares o tripolares, así como las características de éstos.

Entre las principales aplicaciones que se puede dar al estudio de cortocircuitos se puede citar a las siguientes:

Los resultados obtenidos de la simulación, principalmente las corrientes de cortocircuito y voltaje en las fases no afectadas, pueden ser utilizados para la calibración de las protecciones de la máquina.

Se puede analizar las características que presenten las variables de una máquina en los distintos casos de cortocircuito, con lo que se puede comprobar si la máquina analizada cumple con los requerimientos establecidos en las normas. [6].

```
// JOB TESIS
// EXEC SNUMREP EN163TE EN163 EN163 EN163 EN163 EN163
// EXEC SNUMREP EN163 EN163 EN163 EN163 EN163 EN163
DATE 24/03/88, CLUCK 14/26/22
```

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL ** INSTITUTO DE INFRMATICA Y COMPUTACION

```
VASQUEZ BRITO ALFONSO VASQUEZ BRITO ALFONSO VASQUEZ BRITO ALFONSO VASQUEZ BRITO ALFONSO
// EXEC WATFIV PARTICION= BG
```

```
SJOB
C=CPTICNS T=2500,P=50,LINE=0
*****
* ESCUELA POLITECNICA NACIONAL *
* FACULTAD: INGENIERIA ELECTRICA *
* ESPECIALIZACION POTENCIA *
* TESIS DE GRADO *
* TEMA: MODELO DIGITAL DE LA MA *
* QUINA SINCRONICA PARA EL ESTU *
* DIO DE FALLAS *
* REALIZADO POR: ALFONSO VASQUEZ *
* DIRIGIDO POR: ING. HILTON IDA *
* PATA *
*****
```

DOCUMENTACION
 LOS DATOS PROPORCIONADOS AL PROGRAMA DEBEN ESTAR EN P.W., EXEPTO VAEB

1.- MATRICES
 V,U= VOLTAJES (A,B,C), (C,D,O), ADEMAS VKQ, VKU Y VFO PARA LOS DOS CASOS
 I,Q= CORRIENTES (A,B,C), (C,D,O), ADEMAS IKQ, IKU E IFO PARA LOS DOS CASOS
 R= CONDUCTANCIAS DE FLUJO POR SEGUNDO (C,D,O)
 KK= MAGN. VELICIDAD DEL ROTOR Y ANGULO DE POTENCIA
 T= DE TRANSFORMACION (A,B,C) ----> (C,D,O)
 TI= DE TRANSFORMACION (C,D,O) ----> (A,B,C)
 VU= VOLTAJES (A,B,C) DE CURTOCIRCUITO FASE-FASE
 VU= VOLTAJES (A,B,C) DE CIRCUITO ABICAO
 OIAM, OIM, OICM= CORRIENTES DE FASE PARA LA GRAFICACION
 CCP= VOLTAJE ENTRE LAS FASES A Y C PARA LA GRAFICACION
 OELTA= ANGULO DE POTENCIA PARA LA GRAFICACION
 TLM= TORQUE ELECTROMAGNETICO PARA LA GRAFICACION
 DFLM= COEFICIENTE DE EXCITACION PARA LA GRAFICACION
 ENRM= VARIACION DE LA VELOCIDAD ROTORICA PARA LA GRAFICACION
 P= DERIVADAS DE CONDUCTANCIAS DE FLUJO,
 DE VELOCIDAD DEL ROTOR Y ANGULO DE POTENCIA
 M,S,JD= AUXILIARES PARA EL CALCULO DE U
 XN, JJ= AUXILIARES PARA EL CALCULO DE U

2.- PARAMETROS
 RS= RESISTENCIA DE ARMADURA
 RKQ= RESISTENCIA DEL DEVANADO AMORTIGUADOR DE EJE EN CUADRATURA
 RKC= RESISTENCIA DEL DEVANADO AMORTIGUADOR DEL EJE DIRECTO
 RFU= RESISTENCIA DEL DEVANADO DE CAMPO
 XLS= REACTANCIA DE DISPERSION DEL DEVANADO DE ARMADURA
 XAS= REACTANCIA DE MAGNETIZACION DEL EJE EN CUADRATURA
 XAD= REACTANCIA DE MAGNETIZACION DEL EJE DIRECTO
 XCKQ= REACTANCIA DE DISPERSION DEL DEVANADO AMORTIGUADOR
 DEL EJE EN CUADRATURA
 XCKD= REACTANCIA DE DISPERSION DEL DEVANADO AMORTIGUADOR
 DEL EJE DIRECTO
 XCFU= REACTANCIA DE DISPERSION DEL DEVANADO DE CAMPO
 HMA= CONSTANTE DE INERCIA DE LA MAQUINA
 VAERI= VELOCIDAD ANGULAR ELECTRICA INICIAL DEL ROTOR
 VAFI= VELOCIDAD ANGULAR ELECTRICA BASL
 VA= VOLTAJE TERMINAL FASE-TIERRA (MODO Y ANGULO)
 PHI= ANGULO DEL FACTOR DE POTENCIA (RADIANES)
 NYA= POTENCIA APARENTE MONOFASICA
 WK= VELOCIDAD DEL ROTOR
 INRM= VARIACION DE LA VELOCIDAD ROTORICA
 TL, TA= TORQUE ELECTROMAGNETICO Y MECANICO
 DFL= ANGULO DE POTENCIA
 ZK= ANGULO DEL ROTOR

7= TIPO DE FUNCIONAMIENTO DE LA MAQUINA (1 MOTOR, 2 GENERADOR)
 EE= TIPO DE FALLA (1 DESCONECION, 2 CORTOCIRCUITO)
 G= NUMERO DE FASES QUE INTERVIENEN EN LA FALLA
 J= FASES AFECTADAS (1 PARA A Y AB, 2 PARA B Y BC, 3 PARA C Y AC)
 GS= CONDICION DE CONEXION O DESCONECION DEL NEUTRO
 (0 PARA C "EXIEN, 1 PARA DESCONECION)
 J1, J2, J3= F(I, J)
 G0, G1, G2, G3, G4, GF= F(I, G)

3.- OBJETIVO
 CONOCER EL COMPORTAMIENTO DE LA MAQUINA SINCRONICA PARA LOS
 SIGUIENTES TIPOS DE FUNCIONAMIENTO:
 --- ESTADO ESTABLE FUNCIONANDO COMO MOTOR O GENERADOR
 --- DESCONECION DE UNA, DOS Y TRES FASES CON RECONEXION
 Y PARA LA MAQUINA FUNCIONANDO COMO MOTOR O GENERADOR
 --- CORTOCIRCUITO FASE-TIERRA, FASE-FASE, FASE-FASE-TIERRA
 Y TRIFASICO, PARA FUNCIONAMIENTO EN FORMA AISLADA O
 CONECTADA A UNA BARRA INFINITA Y CON CARGA

4.- METODO DE SOLUCION
 LAS ECUACIONES DIFERENCIALES DE PRIMER ORDEN QUE TIENEN COMO
 VARIABLES DE ESTADO A LAS CONCATENACIONES DE FLUJO POR SEGURIDAD,
 DEFINIDAS EN EL MODELO MATEMATICO SON RESUELTAS MEDIANTE EL
 METODO DE RUNGE-KUTTA DE CUARTO ORDEN

DIMENSION DEL TAM(1,2000), DDP(1,2000), LIAA(1,2000), DIM(1,2000)
 *TEM(1,2000), OFDM(1,2000), UWRM(1,2000), DILM(1,2000), T16(6)
 *T1(6), M16(6), X16(6), V16(6), U16(6), C16(6), K16(6), KR(6), O16(6)
 *CJ16(6), JC16(6), VO(3), V1(3), S16(6), XM16(6)
 T, TI → LATA 1, T1/7200 /
 CARACTER TF*13, FF*18
 REAL J, J1, J2, J3, INWR
 REAL M, K, KK
 INTEGER RUNGE
 COMPLEX IA, VA, EA, Z
 REAL KVA, IAX, IAY, IC, IO, IFD
 DATA M, S, X, XN, C, V, K, O/110*0 /
 COMMON/PSAT/PSIADC, P2, P3, P4, P7, P8, ISAT

TITULO

6 FRMT(20//, 40X, 'TESIS DE GRADO', /40X, 1+(1**), //40X, 'MODELO LIGIT
 *AL DE LA MAQUINA SINCRONICA PARA EL ESTUDIO DE FALLAS', /40X, 65(1**
 *), //40X, 'REALIZADO POR: ALFONSO VASQUEZ', /40X, 30(1**), //)

LEER COEFICIENTES DE LA CURVA DE SATURACION

2 READ(1, 2) PSIADC, P2, P3, P4, P7, P8, ISAT
 FRMT(6F10.5, I2)

ESCRIBIR ISAT SI ES 1 SE CONSIDERA LA SATURACION SI ES 0 NO

3 WRITE(3, 3) ISAT
 FRMT(///, 50X, 'ISAT', I2, /50X, 7(1**), //)

FACTORES DE MULTIPLICACION Y VALORES DE LAS ESCALAS SUPERIORES DE LOS GRAFICOS

4 READ(1, 4) NSA, NBA, NT, ND, NFD, NVR, NAC, NTC, VADU, NFD, NW
 FRMT(11I6)

NUMERO DE: TOTAL DE PASOS DE INTEGRACION, INICIO Y FIN DE LA PERTURBACION
 VALOR DEL PASO DE INTEGRACION

5 READ(1, 5) LIMITE, N1, N2, H
 FRMT(3I5, F10.5)
 WRITE(3, 50) LIMITE, N1, N2, H
 50 FRMT(//, 21X, 'LIMITE', I5, 5X, 'INICIO', I5, 5X, 'FIN', I5, 5X, 'PASO',
 *F10.5, //)

IERROR=0
 10 IF(LIMITE-CT-2000) GOTO 11
 IF(N1-GE-LIMITE-CR-N2-LE-N1) GOTO 13
 GOTO 9

11 IERROR=IERROR+1
 WRITE(3, 12)
 12 FRMT(///, 34X, 'EL NUMERO DE PUNTOS DE GRAFICACION EXEDE EL LIMITE
 *E//)

GOTO 10
 13 IERROR=IERROR+1
 WRITE(3, 14)
 14 FRMT(///, 35X, 'DATOS DE INICIO O FIN DE LA FALLA SON
 *INCORRECTOS//)

9 IF(IERROR-EQ, 0) GOTO 16.
 STOP

LECTURA DEL TIPO DE FALLA, GS=1. NEUTRO DESCONECTADO

```

36 16 READ (1,200)EE,G,J,C5
37 200 FORMAT(F2.1)
38 WRITE (3,210)G5
39 210 FORMAT(//,51X,'G5=',F3.1,/,51X,5(' '),//)
40 IF (E.EQ.1)IGL1051
41 IF ('CORTUCIRCUITC')
42 IF (E.EQ.0)IGOTO 52
43 GOTO 54
44 51 TF='DESCONECCION'
45 IF (E.EQ.1)IGOTO 55
46 IF (E.EQ.2)IGOTO 56
47 IF (E.EQ.3)IGOTO 57
48 55 IF (J.EQ.1) FF='DE LA FASE A'
49 IF (J.EQ.2) FF='DE LA FASE B'
50 IF (J.EQ.3) FF='DE LA FASE C'
51 GOTO 53
52 56 IF (J.EQ.1) FF='DE LAS FASES A Y B'
53 IF (J.EQ.2) FF='DE LAS FASES B Y C'
54 IF (J.EQ.3) FF='DE LAS FASES A Y C'
55 GOTO 53
56 52 IF (J.EQ.1) FF='FASE A -FASE B'
57 IF (J.EQ.2) FF='FASE B -FASE C'
58 IF (J.EQ.3) FF='FASE A -FASE C'
59 GOTO 53
60 57 FF='DE LAS TRES FASES'
61 WRITE (3,58)TF,FF
62 58 FORMAT(/,38X,A13,1X,A18)

```

CHARACTER TF*13

CHARACTER FF*18

LER LOS PARAMETROS DE LA MAQUINA

```

63 READ (1,15)RS,RKQ,RKD,RFD,XLS,XAQ,XAD,XLK,XLKD,XLFD,HMAQ,VAERI
64 15 FORMAT(8F10.5)
65 WRITE (3,25)RS,RKQ,RKD,RFD,XLS,XAQ,XAD,XLK,XLKD,XLFD,HMAQ,VAERI
66 25 FORMAT(//,40X,'PARAMETROS DE LA MAQUINA',/40X,2(' '),/7X,'RS=',
*F10.5,5X,'RKQ=',F10.5,5X,'RKD=',F10.5,5X,'RFD=',F10.5,7X,'XLS=',
*F10.5,4X,'XAQ=',F10.5,5X,'XAD=',F10.5,5X,'XLK=',F10.5,7X,'XLKD=',
*F10.5,2X,'XLFD=',F10.5,4X,'HMAQ=',F10.5,4X,'VAERI=',F10.5,/)

```

CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO

```

67 READ (1,35)VAED,VA,PHI,KVA,I
68 35 FORMAT(F10.5,(F10.5,F10.5),F10.7,F10.5,I2)
69 WRITE (3,26)I,KVA,VA,PHI,VAED
70 26 FORMAT(//,40X,'DATOS PARA CONDICIONES INICIALES',/40X,32(' '),//,
*40X,'I=1 ACCION MOTORA,I=2 ACCION GENLAJLRA',//,20X,'I=',I2,20X,
*,'KVA=',F10.5,5X,'VA=',F10.5,F10.5,5X,'PHI=',F10.7,5X,'VAED=',
*F10.5,/)
71 IF (KVA.EQ.0)MV=1
72 IF (KVA.GT.0)MV=0
73 IF (KVA.EQ.0)ICO=-1
74 IF (KVA.GT.0)ICO=1

```

CALCULO DELS ELEMENTOS CONSTANTES DE LAS MATRICES

```

75 XMO=1./((1./XLS)+(1./XAC)+(1./XLKE))
76 XMO=1./((1./XLS)+(1./XAD)+(1./XLKD)+(1./XLFD))
77 A=R/ XLS
78 E=RKQ/XLKQ

```

MATRICES PARA EL CALCULO DE LAS DERIVADA.

```

79 M(1,1)=A*(XMO/XLS-1.)
80 M(1,2)=-VAERI
81 M(1,4)=A*XMO/XLKQ
82 P(2,1)=-M(1,2)
83 M(2,2)=-A
84 M(3,3)=-A
85 M(4,1)=B*XMO/XLS
86 P(4,4)=B*(XMO/XLKQ-1.)
87 H(5,5)=-RKD/XLKD
88 M(6,6)=-RFD/XLFD
89 S(2)=A
90 S(5)=-H(5,5)
91 S(6)=-H(6,6)

```

MATRICES PARA EL CALCULO DE LAS CORRIENTES

```

92 E=XMO/XLS
93 X(1,1)=-E/XLKQ
94 X(1,4)=-E/XLKQ
95 X(2,2)=1./XLS
96 X(3,3)=X(2,2)
97 X(4,1)=-E/XLKQ
98 X(4,4)=-X(1,4)/XLKQ
99 X(5,5)=1./XLKD
100 X(6,6)=1./XLFD
101 XN(2)=-1./XLS
102 XN(3)=-X(5,5)

```

```

103      XN(6)=-X(6,6)
      C
      C
      C
104      PI=AR*0.5*(-1.)
105      Z=CMPLX(IRS,XLS+XAQ)
106      GUTJ(111,112),1
107      111 BETA=PI/11
108      GUTJ 113
109      112 EETA=PI/11+PI
110      1-13 IAX=K*VA+CCS(BETA)/GABS(VA)
111      IAY=K*VA*SIN(BETA)/CABS(VA)
112      IA=CMPLX(IAX,IAY)
113      EA=VA-Z*IA
114      DEL=ATAN(IMG(AE)/REAL(EA))
115      IQ=CABS(IA)*SIN(BETA-DEL+(PI/2.))
116      IQ=CABS(IA)*CCS(BETA-DEL+(PI/2.))
117      IFD=(CABS(EA)-(XAD-XAQ)*ID)/XAD
118      PSIQ=(XAC+XLS)*IQ
119      PSIKQ=XAC+IQ
120      PSIAD=XAD*(IFD+IFD)
121      PSIKD=PSIAD
122      PSIJ=XLS*ID+PSIAD
      C
      C
      C
123      INTRODUCIR LA SATURACION SI ISAT=1
      C
      C
      C
124      CALL SATURA(PSIAD,DXI)
125      IFD=(PSIAD+DXI)/XAD-ID
126      PSIFD=XLFD*IFD+PSIAD
127      TJ=(1.-XMO/XLS)/XLS
128      TZ=-XMJ/(XKCC*XLS)
129      TM=PSIJ*(1+PSIQ+T*PSIKQ)-PSIQ*(PSID-PSIAD)/XLS
      VF=XFD*IFD
      C
      C
      C
130      FORMACION DE LA MATRIZ DE CORRIENTES INICIALES
      C
      C
      C
131      ANG=PI*2./3.
132      C(1)=IAX
133      C(2)=CABS(IA)*COS(BETA-ANG)
134      C(3)=CABS(IA)*COS(BETA+ANG)
135      C(6)=IFD
      Q(1)=IQ;C(2)=ID
      C
      C
      C
137      MATRIZ DE VOLTAJES INICIALES
      C
      C
      C
138      V(1)=CABS(VA)
139      V(2)=V(1)*CCS(-ANG)
140      V(3)=V(1)*CCS(ANG)
      V(6)=VF
      C
      C
      C
141      MATRIZ DE CONCATENACIONES INICIALES
      C
      C
      C
142      K(1)=PSIQ
143      K(2)=PSID
144      K(4)=PSIKC
145      K(5)=PSIKD
146      K(6)=PSIFD
147      VR=VAER1; TE=TM; AR=DEL; hb=VAEB; INWR=0.
148      KK(1)=K(1);KK(2)=K(2);KK(3)=K(3);KK(4)=K(4);KK(5)=K(5);KK(6)=K(6)
149      KK(7)=VR; KK(8)=DEL
150      A=0.
151      TI=J.
152      VAR=V(1); TETA=0.; TT=2./3.
153      WRITE(3,20)
154      20 FORMAT(91/),40X,'RESULTADOS INICIALES',/UX,22(' '),51/),4X,'T',5X
155      *,'PJ',5X,'PD',6X,'KQ',6X,'KO',6X,'FD',6X,'CA',14,'6X',10,'6X',10,'6X',10,'6X',
156      *,'VR',6X,'IA',4X,'ARCT',4X,'DELTA',3X,'TL',/))
157      PRINT 91, TI,K(1),K(2),K(4),K(5),K(6),C(1),Q(2),C(6),R,C(1),AR,
158      *DEL,TE
159      91 FORMAT(F7.3,13F8.4)
      C
      C
      C
160      CALCULO DE J1,J2,J3 EN FUNCION DE J, G0,G1,G2,G3,G4 EN FUNCION DE G
      C
      C
      C
161      J1=J
162      J2=-13.*J**2/2.+11.*J/2.-2.
163      J3=3.*J**2/2.-13.*J/2.+E.
164      IF(C.EQ.0.)GOTO199
165      GF=J.
166      GUTJ 201
167      199 CONTINUE
168      GF=1.
169      G=G+2.
170      201 CONTINUE
      C
      C
      C
171      FALLA FASE-FASE SI G=0.,GF=1.
      C
      C
      C
172      G0=-(G**2/2.)+5.*G/2.-2.
173      G1=-G0

```

```

180 G2=- (3.*G**2/2.)+11.*G/2.-3. ←
181 G3=- (0.*2/2.)+3.*G/2.
182 G4=L.-G3
CCC
ELEMENTOS CONSTANTES DE LAS MATRICES T Y TI
183 CC 21 I=1.8
184 T(3,1)=1./3.
185 T(1,3)=1. ←
186 J=3+1
187 T(J,J)=1.
188 T(I,J)=1.
189 CCNTINJE
190 P13=2.*P1/3.
191 CA=AR
CCC
COMIENZA EL PROCESO ITERATIVO
197 CO 1 L=1, LIMITE
193 → 7 KI=RUNGE(8, KK, D, TI, H)
194 CC 17 J=1, 6
195 K(I)=KK(I)
196 CCNTINJE
197 KK=KK(I) ; DEL=KK(8)
199 IF (K1.NE.1)GOTO8
200 TETA=WB*PI
201 CT=1-A
202 AR=AR+KK(I)*WB*DT
CCC
CALCULO DE LOS ELEMENTOS VARIABLES DE T, T1 Y M
203 T(1,1)=CCS(AR)
204 T(1,2)=COS(AR-P13)
205 T(1,3)=CCS(AR+P13)
206 T(1,1)=SIN(AR)
207 T(1,2)=SIN(AR-P13)
208 T(1,3)=SIN(AR+P13)
209 T(1,1)=T(1,1)*TT
210 T(1,2)=T(1,2)*TT
211 T(1,3)=T(1,3)*TT
212 T(2,1)=T(1,1)*TT
213 T(2,2)=T(1,2)*TT
214 T(2,3)=T(1,3)*TT
215 M(1,2)=-AR
216 M(2,1)=AR
217 V(1)=VAB*CCS(TETA)
218 V(2)=VAB*COS(TETA-P13)
219 V(3)=VAB*CCS(TETA+P13)
220 IF(L.E.N1.OR.L.GE.N2)GCTG100
CCC
VGLTAJES DE CIRCUITO ABIERTO ←
221 A1=(D(1)/XLS+D(4)/XLKC)*XMD
222 A2=(K(1)/XLS+K(4)/XLKC)*XMQ*WR*WB
223 A3=(D(2)/XLS+D(5)/XLKE+D(6)/XLFC)*XMD
224 A4=(A(2)/XLS+K(5)/XLKD+K(6)/XLFC)*XMD*WR*WB
225 VO(1)=(COS(AR)*(A1+A4)+SIN(AR)*(A3-A2))/WB
226 VO(2)=(COS(AR-P13)*(A1+A4)+SIN(AR-P13)*(A3-A2))/WB
227 VO(3)=(COS(AR+P13)*(A1+A4)+SIN(AR+P13)*(A3-A2))/WB
228 IF(L.E.3.2)GCTD 43
CCC
DESCONEXION DE FASES
229 VN=G5*(G2/2.*(VO(1)+G0*VO(2)+G1*V(2)+V(3)))
230 V(1)=VO(1)
231 V(2)=G1*(V(2)-VN)+G0*VO(2)
232 V(3)=G3*(V(3)-VN)+G4*VO(3)
233 GCTD 100
CCC
CURTOCIRCUITO DE FASES
234 43 IF(NV.EQ.1)GOTO 120
235 GCTD 44
236 120 V(1)=VO(1); V(2)=VO(2); V(3)=VO(3)
237 44 CCNTINJE
238 A1=C(1)*K(2)*WR
239 A2=D(2)-K(1)*WR
240 A3=1/WB
241 V(1)=A1*(CCS(AR-P13)+CCS(AR))*A3/2
242 V(1)=V(1)+(A2*(SIN(AR-P13)+SIN(AR))*A3/2)
243 V(2)=A3*(A1*(CCS(AR)*COS(P13))+A2*(SIN(AR)*COS(P13)))
244 V(3)=A1*(COS(AR+P13)+CCS(AR))*A3/2
245 V(3)=V(3)+(A2*(SIN(AR+P13)+SIN(AR))*A3/2)
246 V(J)=G1*V(J)
247 V(J2)=G1*V(J2)+V(J)
248 V(J3)=G3*V(J3)
249 GCTD 100
250 100 CCNTINJE
251 CALL MULT (T,V,U) ←
252

```

```

253 CALL MULT(M,K,DD)
254 DO 30 I=1,6
255 C(I)=ND*(U(I)+OD(I))+PSIAD*S(I) ← ojo
256 CONTINUE
257 C(7)=(K(2)*(T3+K(1)+T2+K(4))-K(1)*(K(2)-PSIADI/XLS)-TH)/(2*HHA) ← ojo
258 C(8)=ND*(KK(7)-1.)

```

CONTINUE INT=DDJCIR LA SATURACION

```

259 CALL SATURA (PSIAD,DXI)
260 PSIAD=ND*(K(2)/XLS)+(K(5)/XLKD)+(K(6)/ALFD)-(XND/XAD)*CX1
261 VI6=(K(6)-PSIAD)*RF0/XLFD
262 A=TI
263 GOTO 7
264 CONTINUE
265 CALL MULT(X,K,QQ) /
266 DO 31 I=1,6
267 Q(I)=Q(I)+PSIAD*XN(I)
268 CONTINUE
269 CALL MULT(TI,Q,C)
270 TE=K(2)*Q(1)-K(1)*C(2)
271 INWK=AR-CA

```

CONTINUE MATRICES DE GRAFICACION NO,NSA,NBA,NT,NFD,NVR,FACTORES DE MULTIPLICACION DE ANGULO DE POTENCIA, CORRIENTES DE FASE, VOLTAJES, TORQUE ELECTROMAGNETICO, CORRIENTE DE EXCITACION Y DESVIACION DE LA VELOCIDAD ROTORICA

```

272 DELTAH(1,L)=DEL*ND
273 CIAM(1,L)=C(1)*NSA*ICO
274 EI0(1,L)=C(2)*NSA*ICO
275 C(1,L)=C(3)*NSA*ICO
276 CDP(1,L)=(V(1)-V(3))*NBA
277 TEM(1,L)=TE*NT
278 CF0(1,L)=C(6)*NFD
279 CWR(1,L)=INWK*NVR
280 CONTINUE

```

CONTINUE GRAFICAR VARIABLES DE SALIDA NA0,NAU,NT0,NFO,NV, VALORES DE LAS ESALAS SUPERIORES DE LOS GRAFICOS DE ANGULO DE POTENCIA, CORRIENTES Y VOLTAJE DE FASE, TORQUE ELECTRO MAGNETICO, CORRIENTE DE EXCITACION Y DESVIACION DE LA VELOCIDAD ROTORICA

```

281 WRITE(3,104)NSA
282 CALL PLOT(DIAM,1,L,NAC)
283 WRITE(3,105)NSA
284 CALL PLOT(I0IM,1,L,NAC)
285 WRITE(3,106)NSA
286 CALL PLOT(I0IM,1,L,NAC)
287 WRITE(3,102)NBA
288 CALL PLOT(CDP,1,L,NA0)
289 WRITE(3,103)NT
290 CALL PLOT(TEM,1,L,NT0)
291 WRITE(3,101)KD
292 CALL PLOT(DELTAH,1,L,NADD)
293 WRITE(3,107)NFD
294 CALL PLOT(CF0,1,L,NFC)
295 WRITE(3,108)NVR
296 CALL PLOT(CWR,1,L,NK)
297 *101. FORMAT(10I/),55X,'ANGULO DE POTENCIA',53X,10I/**),///45X,
298 *102. FORMAT(10I/),55X,'VOLTAJE A-C',55X,11I/**),///44X,
299 *103. FORMAT(10I/),49X,'TORQUE ELECTROMAGNETICO',49X,23I/**),///45X,
300 *104. FORMAT(10I/),51X,'CORRIENTE DE FASE A',51X,19I/**),///44X,
301 *105. FORMAT(10I/),51X,'CORRIENTE DE FASE B',51X,19I/**),///44X,
302 *106. FORMAT(10I/),51X,'CORRIENTE DE FASE C',51X,19I/**),///44X,
303 *107. FORMAT(10I/),49X,'CORRIENTE DE EXCITACION',49X,22I/**),///45X,
304 *108. FORMAT(10I/),43X,'VARIACION DE LA VELOCIDAD ROTORICA',43X,34I/**),
305 *///,45X,'FACTOR DE MULTIPLICACION NVR=',6I///)
306 STOP
END

```

CONTINUE SUBROUTINA DE GRAFICACION

```

307 SUBROUTINE PLCT (Y,M,NF,NS)
308 DIMENSION Y(1,2000),LINE(101),L(11),JL(5)
309 DATA JL/1:=1,1H,1HC,1HD,1HE /,JN,JP,11,JLANK,J2/1H,1H+,1H.,1H.,
*1H+/
310 DO 99 I=1,101

```

```

311 LINE(I)=JBLANK
312 99 CCNTINUE
313 N=0
CCC
    ESCRIBIR LAS ESCALAS DE LAS COORDENADAS
314 CC 101 I=1,11
315 L(I)=10*I-11C+NS
316 CCNTINUE
317 PRN1 105 (L(I),I=1,11)
318 105 FCRMAT(3X,11(14,6X),6HY(1,I))
319 GOTO 115
320 110 IF((N/30-(N-1)/30).L25,125,115)
CCC
    CONSTRUIR LAS LINEAS DE LAS ORDENADAS
321 115 NC=N
322 CC 120 I=1,10
323 ND=ND+1
324 LINE(ND)=JP
325 CC 120 J=1,9
326 NC=ND+1
327 120 LINE(ND)=JN
328 LINE(101)=JP
329 IF(N)135,121,135
330 121 PRINT 170,N,LINE
331 GOTO 185
332 125 CC 130 I=1,101,10
333 LINE(I)=JI
334 130 CCNTINUE
CCC
    CAMBIAR NUMEROS POR LETRAS
335 135 CC 160 I=1,M
336 XNS=XNS
337 JA=Y(I,N)+101.49999-XNS
338 IF(JA-101)14C,155,145
339 IF(JA)150,150,155
340 145 LINE(101)=JZ
341 GOTO 160
342 150 LINE(I)=JZ
343 GOTO 160
344 155 LINE(JA)=JL(I)
345 160 CCNTINUE
CCC
    ESCRIBIR LOS DATOS DE LA LINEA
346 IF((N/30-(N-1)/30).L75,175,165)
347 170 FCRMAT(1X,14,101A1,1X,1PE12.5)
348 165 PRINT 170,N,LINE,Y(1,N)
349 GOTO 185
350 175 PRINT 180,LINE,Y(1,N)
351 180 FCRMAT(5X,101A1,1X,E12.5)
352 185 CC 190 I=1,101
353 LINE(I)=JBLANK
354 190 CCNTINUE
355 N=N+1
356 IF(N-NF)110,200,200
CCC
    CONSTRUIR Y ESCRIBIR LA ULTIMA LINEA DE LAS COORDENADAS
357 200 ND=0
358 DC 193 I=1,10
359 NC=ND+1
360 LINE(ND)=JP
361 CC 193 J=1,9
362 ND=ND+1
363 LINE(ND)=JN
364 LINE(101)=JP
365 PRINT 194,LINE
366 194 FCRMAT(5X,101A1)
367 EV 191 I=1,11
368 L(I)=10*I-11C+NS
369 CCNTINUE
370 PRINT 192,(L(I),I=1,11)
371 192 FCRMAT(3X,11(14,6X))
372 RETURN
373 END
CCC
    SUBROUTINA PARA INCLUIR LA SATURACION
374 SUBROUTINE SATURA (PSIAD,DXI)
    INTRODUCIR LA SATURACION
375 COMMON/PSAT/PSIADC,P2,P3,P4,P7,P8,ISAT
376 IF(ISAT.EQ.0.)GOTO5

```

```

377 PSIADA=ABS(PSIAD)
378 IF(PSIADA-LT.PSIADC)GCTC5
379 GCTC 6
380 DXI=0.
381 RETURN
382 IF(PSIADA-LT.P2.AND.PSIADA.GE.PSIADC)GCTJ 2

```

```

C
C
C
383 SE APROXIMA AL SEGUNDO SEGMENTO DE RECTA
384 DXI=P3*PSIADA-P4
GCTJ3

```

```

C
C
C
385 SE APROXIMA AL PRIMER SEGMENTO DE RECTA
386 DXI=P7*PSIADA-P8
387 IF(PSIAD-LT.0.)GOTO4
388 DXI=DXI
389 RETURN
390 DXI=-DXI
RETURN;END

```

```

C
C
C
392 SUBROUTINE MULT (X,K,C)
MULTIPLICA UNA MATRIZ DE DIMENSION (N,N) POR UNA DE DIMENSION (N)
DIMENSION X(6,6),K(6),Q(6)
REAL X
DO 20 I=1,6
C(I)=0.
DO 20 KI=1,6
C(I)=C(I)+X(I,KI)*K(KI)
CONTINUE
RETURN;END

```

```

C
C
C
402 EVALUAR LAS DERIVADAS, METODO DE RUNGE KUTTA DE CUARTO ORDEN
FUNCTION RUNGE(N,Y,F,X,H)
INTEGER RUNGE
DIMENSION PHI(50),SAVEY(50),Y(N),F(N)
DATA H/0/

```

```

C
C
C
406 COMIENZA INTEGRACION NUMERICA
407 M=M+1
GCTC (1,2,3,4,5),M

```

```

C
C
C
408 PASO 1
409 RUNGE=1
RETURN

```

```

C
C
C
410 PASO 2
411 GO 22 J=1,N
412 SAVEY (J)=Y(J)
413 PHI(J)=F(J)
414 Y(J)=SAVEY(J)+0.5*H*F(J)
415 X=X+0.5*H
416 RUNGE=1
RETURN

```

```

C
C
C
417 PASO 3
418 GO 33 J=1,N
419 PHI(J)=PHI(J)+2.0*F(J)
420 Y(J)=SAVEY(J)+0.5*H*F(J)
421 RUNGE=1
RETURN

```

```

C
C
C
422 PASO 4
423 GO 44 J=1,N
424 PHI(J)=PHI(J)+2.0*F(J)
425 Y(J)=SAVEY(J)+H*F(J)
426 X=X+0.5*H
427 RUNGE=1
RETURN

```

```

C
C
C
428 PASO 5
429 GO 55 J=1,N
430 Y(J)=SAVEY(J)+(PHI(J)+F(J))*H/6.0
431 M=0
432 RUNGE=0.
433 RETURN
END

```

X, K, C
T, Q, C

N = 8
Y = K K
F = 0
T = X
H = H

V(1) =

A P E N D I C E B

MANUAL DE USO DEL PROGRAMA DIGITAL

1. NOMENCLATURA

a: VARIABLES DE ENTRADA

<u>NOMBRE</u>	<u>DESCRIPCION</u>
PSIADC	Valor crítico de las concatenaciones de flujo mútuo en el eje directo, se aprecia en la curva de saturación.
P2, P3, P4, P7, P8	Coefficientes de la curva de saturación.
ISAT	Indice que indica si se considera o no la saturación, si es igual a 1 se la considera, si 0 no.
NSA, NBA, NT, ND, NIFD, NVR	Factores de multiplicación de: corrientes de fase, voltaje de fase, torque electromagnético, ángulo de potencia, corriente de excitación y variación de la velocidad rotórica.
NAO, NTO, NADO, NFO, NW	Valores de las escalas superiores de los gráficos de: corrientes de fase y voltaje fase-fase, torque electromagnético, ángulo de potencia, corriente de excitación y variación de la velocidad rotórica. Las escalas superiores se dividen en cien puntos y estos valores fijan el valor superior de la <u>esca</u> la.

<u>NOMBRE</u>	<u>DESCRIPCION</u>
LIMITE	Número total de pasos de integración.
N1, N2	Número de pasos de integración en el que se inicia y finaliza la perturbación.
H	Valor del paso de integración (segundos).
EE	Indica el tipo de falla a considerarse, si es <u>i</u> gual a 1. desconexión de fases, cualquier otro valor para cortocircuito de fases.
G	Representa el número de las fases involucradas en la falla, así: si es igual a 1. una fase, si es igual a 2. dos fases, si es igual a 3. tres fases y si tiene un valor de 0. se trata de un <u>corto</u> circuito fase-fase.
J	Indica cuáles de las fases son afectadas por la <u>fa</u> lla, así: para $J = 1$. las fases a y ab, para $J=2$. las fases b y bc y para $J = 3$. las fases c y ac.
G5	Indica la condición de conexión o desconexión del neutro, si es igual a 1. el neutro estará <u>desconec</u> tado y para un valor de 0. el neutro estará <u>conec</u> tado.
RS	Resistencia de armadura (se debe incluir la <u>resis</u> tencia utilizada para la medición experimental).
RKQ	Resistencia del devanado amortiguador ubicado en el eje en cuadratura.
RKD	Resistencia del devanado amortiguador ubicado en el eje directo.
RFD	Resistencia del devanado de campo.

<u>NOMBRE</u>	<u>DESCRIPCION</u>
XLS	Reactancia de dispersión del devanado de armadura.
XAQ	Reactancia de magnetización del eje en cuadratura.
XAD	Reactancia de magnetización del eje directo.
XLKQ	Reactancia de dispersión del devanado amortiguador ubicado en el eje en cuadratura.
XLKD	Reactancia de dispersión del devanado amortiguador ubicado en el eje directo.
XLFD	Reactancia de dispersión del devanado de campo.
HMAQ	Constante de inercia de la máquina.
VAERI	Velocidad angular eléctrica inicial del rotor.
VAEB	Velocidad angular eléctrica base.
VA	Voltaje de la fase A (parte real y parte imaginaria).
PHI	Angulo del factor de potencia.
KVA	Potencia aparente de la máquina antes de la perturbación.
I	Indice que indica el tipo de funcionamiento de la máquina si es igual a 1 acción motora, si es igual a 2 acción generadora.

b. Variables de Salida

<u>NOMBRE</u>	<u>DESCRIPCION</u>
DIAM, DIBM, DICM, DDP	Valores modificados de las corrientes de fase (A, B, C) y voltaje entre las fases A y C obtenidos pa

NOMBRE

DESCRIPCION

ra la graficación.

TEM, DELTAM, DFDM, DWRM Valores modificados de torque electromagnético, ángulo de potencia, corriente de excitación y variación de la velocidad rotórica.

2. FORMA DE PROPORCIONAR LOS DATOS AL PROGRAMA

Todos los valores deben estar en p.u., excepto la velocidad angular eléctrica base que estará en radianes/segundo; el ángulo de factor de potencia estará en radianes.

A continuación se indica en una hoja de codificación la forma de introducir los datos al programa y más adelante, para mayor comprensión, se presenta una hoja de codificación con los datos de uno de los ejemplos presentados.

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

HOJA DE CODIFICACION _____
PROGRAMA _____

PROGRAMADO POR _____
VERIFICADO POR _____

PAGINA _____ DE _____
FECHA _____

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
P: S: I: A: D: C:		P: 2		P: 3		P: 4		P: 7		P: 8:		ISAT																																																																			
F: 10: .5		F: 10: .5		F: 10: .5		F: 10: .5		F: 10: .5		F: 10: .5		I: 2																																																																			
N: S: A:		N: B: A:		N: T:		N: D:		N: I: F: D:		N: V: R:		N: A: I: O:		N: T: O:		N: A: D: O:		N: F: O:		N: W:																																																											
I: 6:		I: 6:		I: 6:		I: 6:		I: 6:		I: 6:		I: 6:		I: 6:		I: 6:		I: 6:		I: 6:																																																											
L: I: M: I: T: E:		N: 1:		N: 2:		H:																																																																									
I: 5:		I: 5:		I: 5:		F: 10: .5																																																																									
E: E: G: J:		G: 5																																																																													
F: 2: 1:		F: 2: 1:		F: 2: 1:		F: 2: 1:																																																																									
R: S: I:		R: K: Q:		R: K: D:		R: F: D:		X: L: S:		X: A: Q:		X: A: D:		X: L: K: Q:																																																																	
F: 10: .5		F: 10: .5		F: 10: .5		F: 10: .5		F: 10: .5		F: 10: .5		F: 10: .5		F: 10: .5																																																																	
X: L: K: D:		X: L: F: D:		H: M: A: Q:		V: A: E: R: I:																																																																									
F: 10: .5		F: 10: .5		F: 10: .5		F: 10: .5																																																																									
V: A: E: B:		R: E: A: L: (VA):		I: M: A: G: (VA):		P: H: I:		K: V: A:		I:																																																																					
F: 10: .5		F: 10: .5		F: 10: .5		F: 10: .7		F: 10: .5		I: 2																																																																					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80

34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

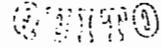
2008-07-15 16:44

REGIONAL

TESIS DE GRADO

MODELADO DIGITAL DE LA MÁQUINA SINCRONICA PARA EL ESTUDIO DE FALLAS

REALIZADO POR: ALFONSO VÁSQUEZ



ISAI 1

LIMITE 500 INICIO 43 FIN 30E PASO 0.00000

C5=1.0

DESCONECCION DE LA FASE A

PARAMETROS DE LA MAQUINA

RS= 0.04096 RKQ= 0.04039 RKO= 0.02703 RFJ= 0.01704
XLS= 0.00196 XAL= 0.30701 XAD= 0.05403 XLAQ= 0.24431
XLKD= 0.00204 XLFD= 0.13498 HVAL= 1.00000 VARI= 1.00000

DAIOS PARA CONDICIONES INICIALES

I=1, ACCION ROTORA, I=2 ACCION GENERADORA

I=1
KVA= 1.06734 VA= 0.84594 U=0.00000 PHI=-0.2103560 VAE= 370.99500

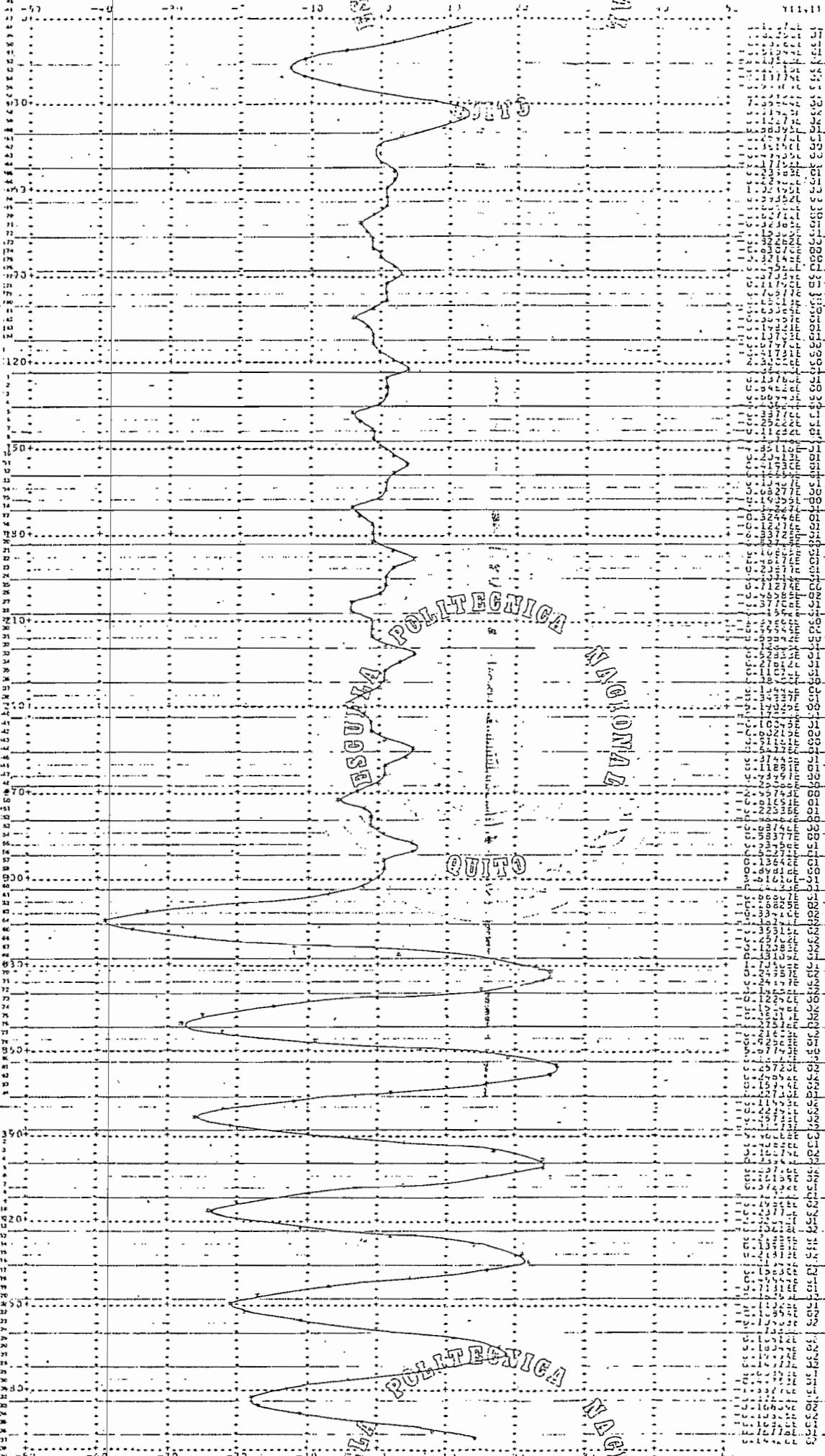
RESULTADOS INICIALES

T	PQ	PD	QK	KD	FD	IQ	IJ	IFJ	PH	IA	ARJ	GELTA	Ic
0.070	0.4230	0.0632	0.3727	0.6775	0.8913	1.2138	0.0443	1.5840	1.00000	0.2159	-0.5460	-0.5468	0.9506

FACILITY NO. TELEVISION 554 x 10

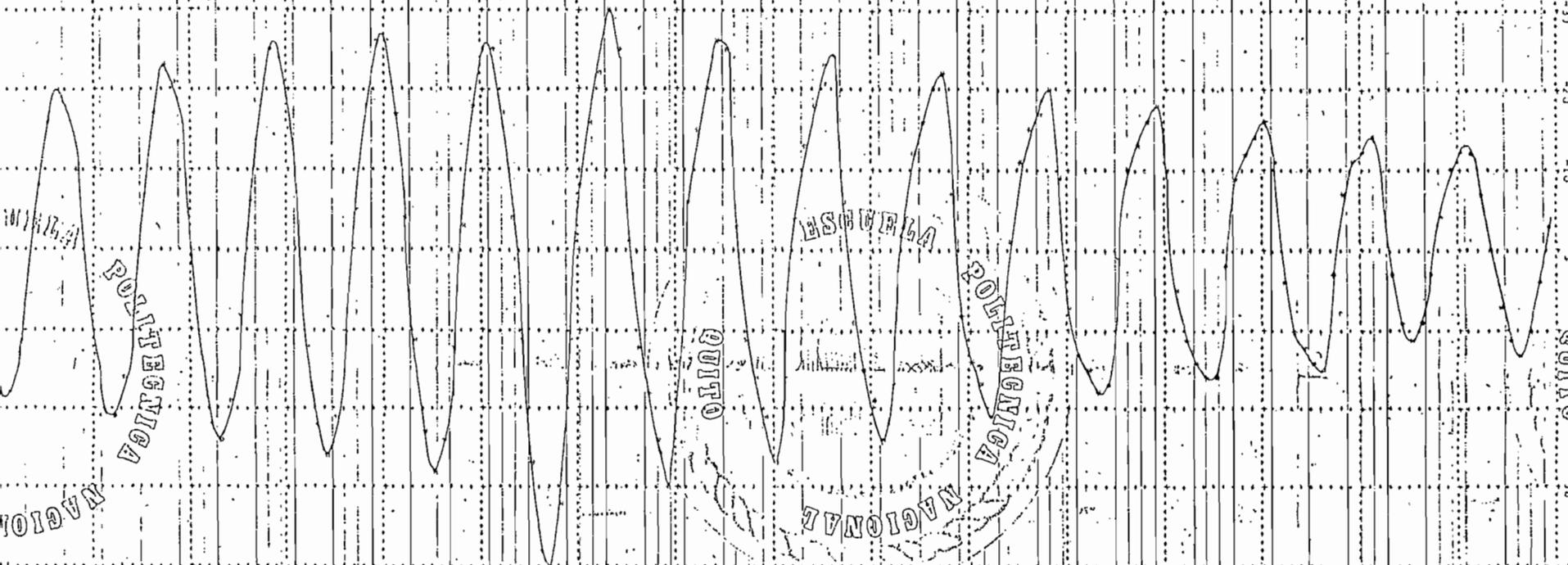
ESCUA
A

ACIONA



ESCUA POLITECNICA NACIONAL QUITO

ESCUA POLITECNICA NACIONAL



ESUELA POLITÉCNICA NACIONAL

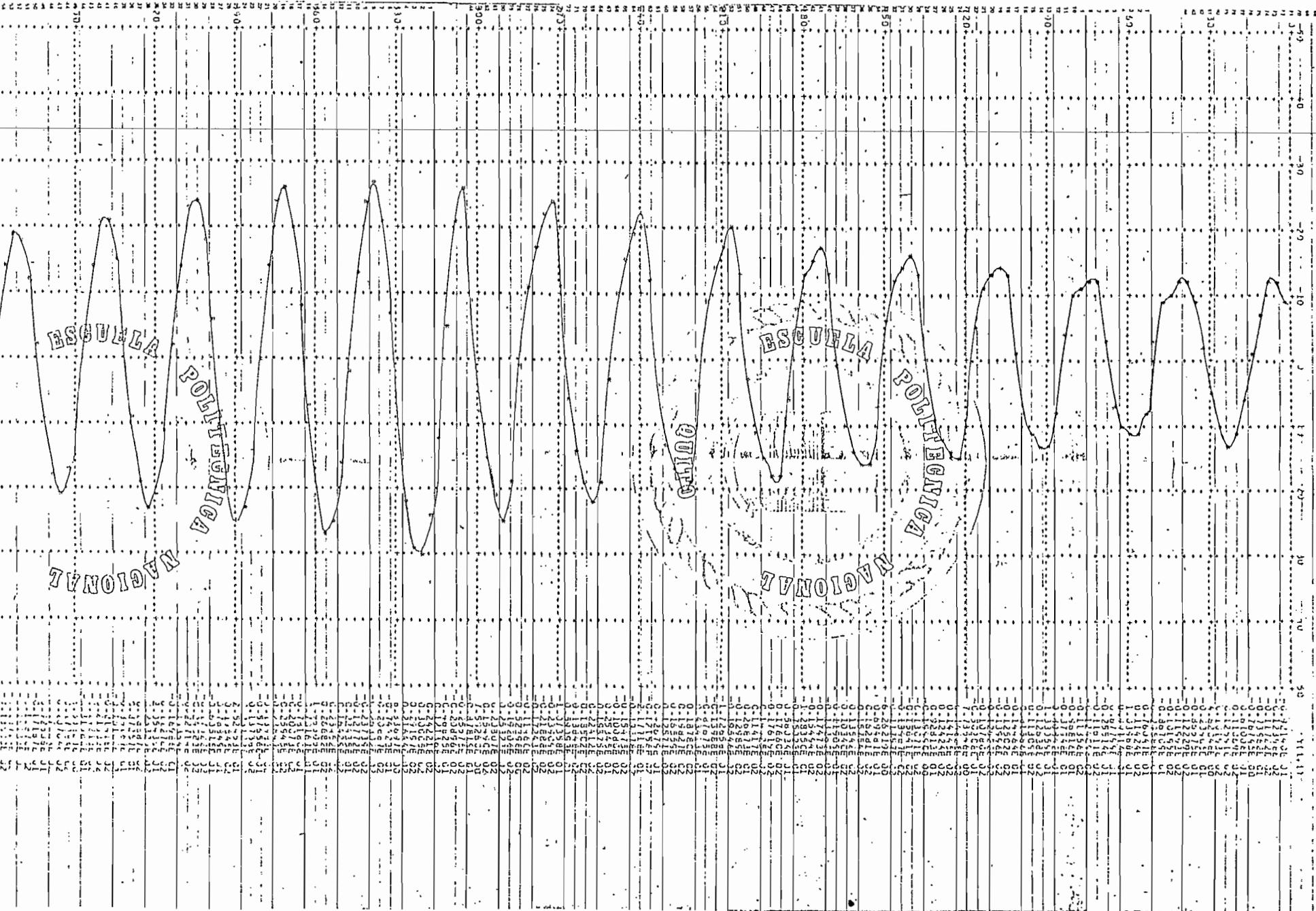
ESUELA POLITÉCNICA

QUITO

ESUELA

POLITÉCNICA

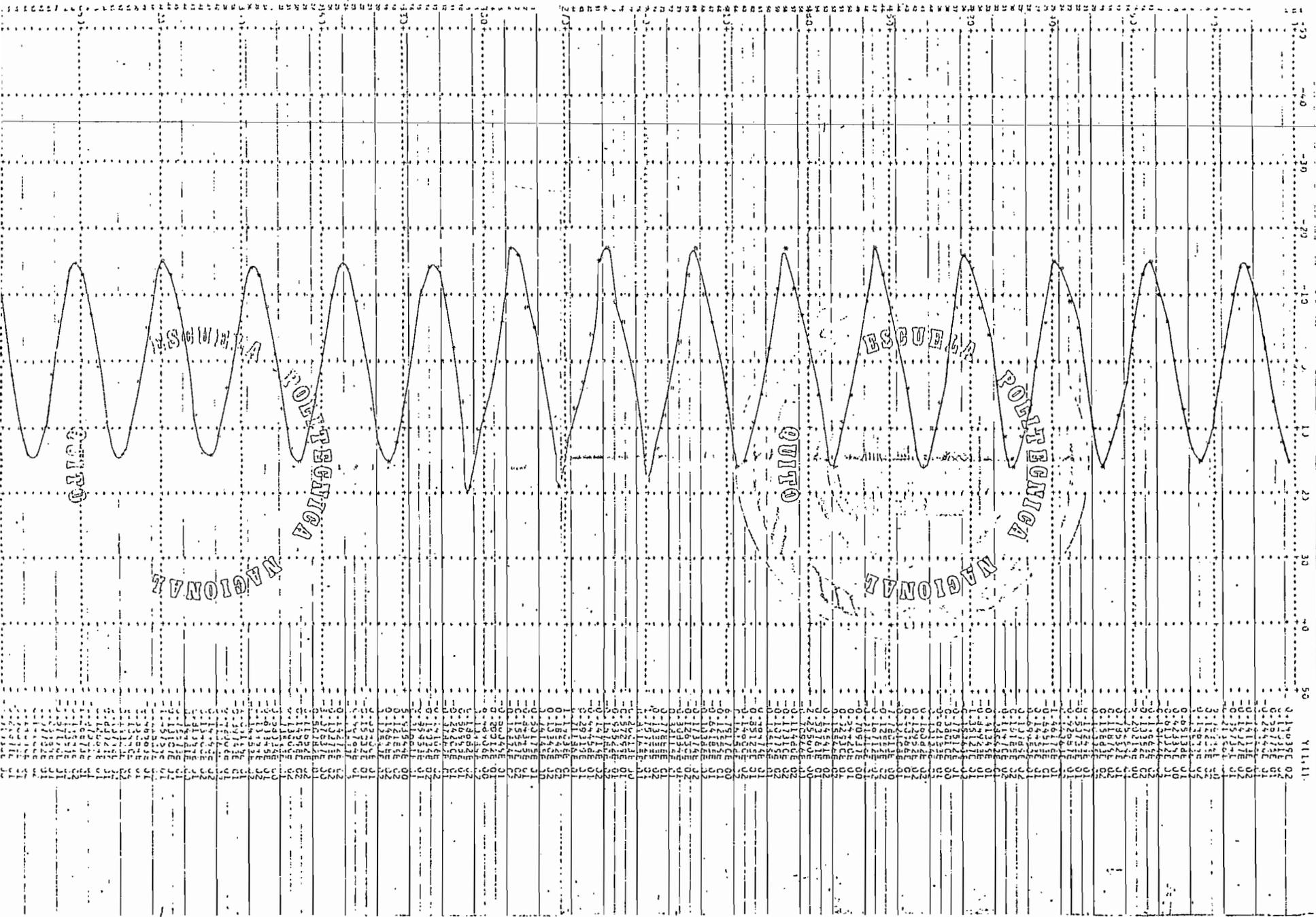
NACIONAL



ESCUELA
POLITECNICA
NACIONAL

OTRO

ESCUELA
POLITECNICA
NACIONAL



150
-40
-30
-20
-10
10
20
30
40
50
Y 11.11

ESCUELA

POLITECNICA

NACIONAL

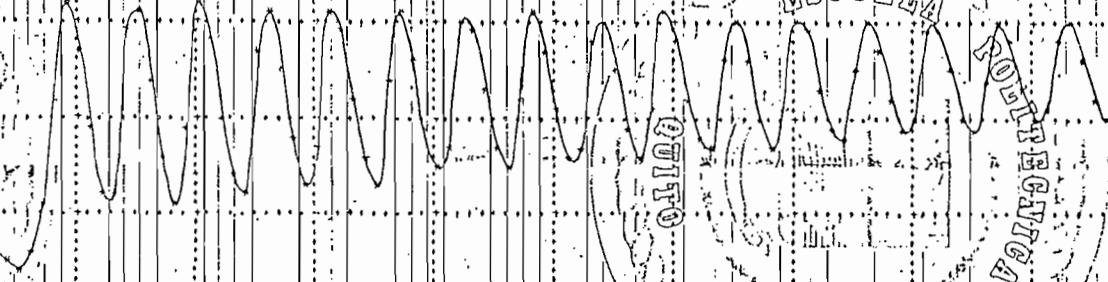
QUITO

ESCUELA

POLITECNICA

NACIONAL

QUITO

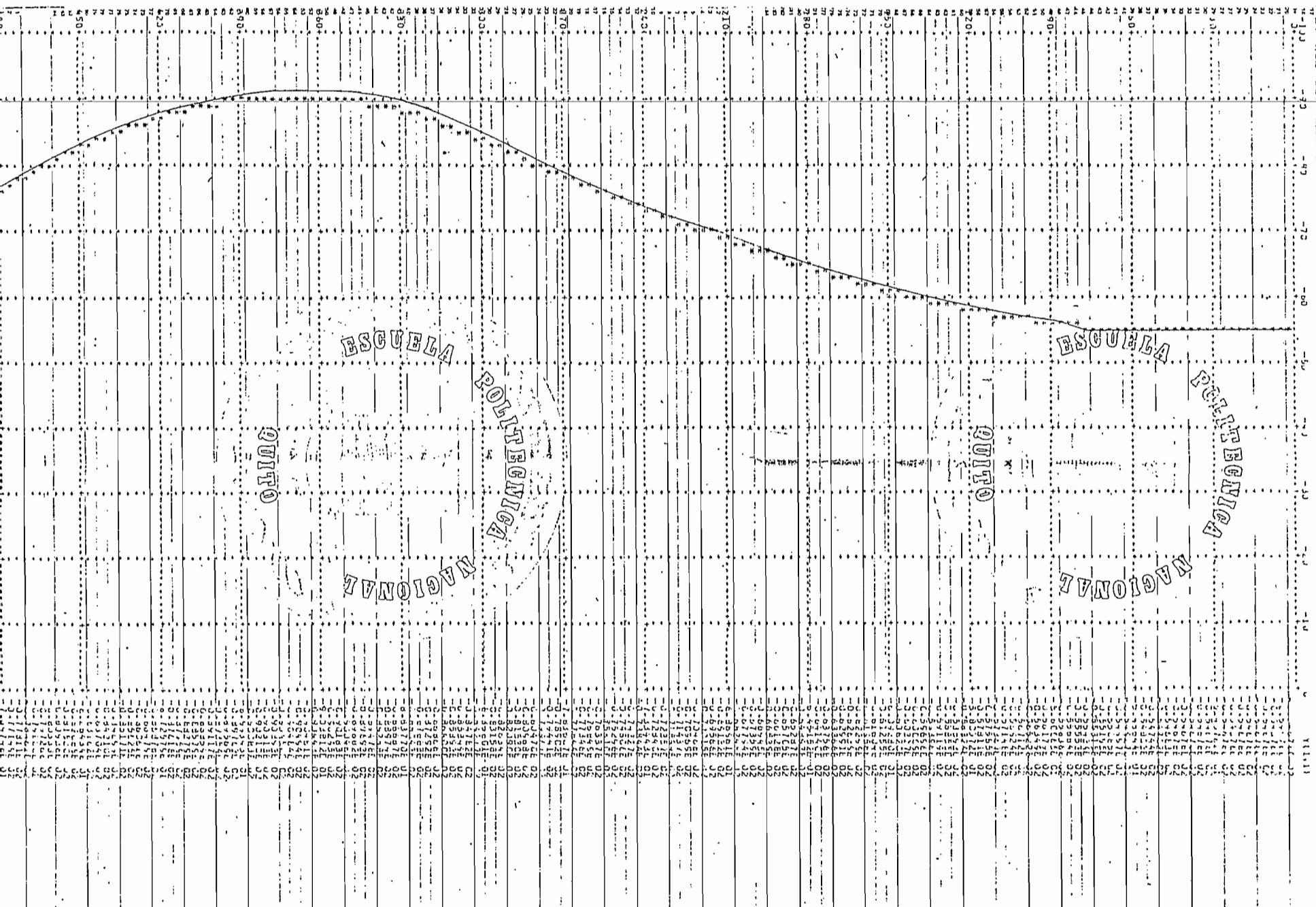


Vertical scale markings on the right side of the grid, including numbers 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200, 210, 220, 230, 240, 250, 260, 270, 280, 290, 300, 310, 320, 330, 340, 350, 360, 370, 380, 390, 400, 410, 420, 430, 440, 450, 460, 470, 480, 490, 500, 510, 520, 530, 540, 550, 560, 570, 580, 590, 600, 610, 620, 630, 640, 650, 660, 670, 680, 690, 700, 710, 720, 730, 740, 750, 760, 770, 780, 790, 800, 810, 820, 830, 840, 850, 860, 870, 880, 890, 900, 910, 920, 930, 940, 950, 960, 970, 980, 990, 1000.

11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
-9
-10
-11
-12
-13
-14
-15
-16
-17
-18
-19
-20
-21
-22
-23
-24
-25
-26
-27
-28
-29
-30
-31
-32
-33
-34
-35
-36
-37
-38
-39
-40
-41
-42
-43
-44
-45
-46
-47
-48
-49
-50
-51
-52
-53
-54
-55
-56
-57
-58
-59
-60
-61
-62
-63
-64
-65
-66
-67
-68
-69
-70
-71
-72
-73
-74
-75
-76
-77
-78
-79
-80
-81
-82
-83
-84
-85
-86
-87
-88
-89
-90
-91
-92
-93
-94
-95
-96
-97
-98
-99
-100
-101
-102
-103
-104
-105
-106
-107
-108
-109
-110
-111
-112
-113
-114
-115
-116
-117
-118
-119
-120
-121
-122
-123
-124
-125
-126
-127
-128
-129
-130
-131
-132
-133
-134
-135
-136
-137
-138
-139
-140
-141
-142
-143
-144
-145
-146
-147
-148
-149
-150
-151
-152
-153
-154
-155
-156
-157
-158
-159
-160
-161
-162
-163
-164
-165
-166
-167
-168
-169
-170
-171
-172
-173
-174
-175
-176
-177
-178
-179
-180
-181
-182
-183
-184
-185
-186
-187
-188
-189
-190
-191
-192
-193
-194
-195
-196
-197
-198
-199
-200
-201
-202
-203
-204
-205
-206
-207
-208
-209
-210
-211
-212
-213
-214
-215
-216
-217
-218
-219
-220
-221
-222
-223
-224
-225
-226
-227
-228
-229
-230
-231
-232
-233
-234
-235
-236
-237
-238
-239
-240
-241
-242
-243
-244
-245
-246
-247
-248
-249
-250
-251
-252
-253
-254
-255
-256
-257
-258
-259
-260
-261
-262
-263
-264
-265
-266
-267
-268
-269
-270
-271
-272
-273
-274
-275
-276
-277
-278
-279
-280
-281
-282
-283
-284
-285
-286
-287
-288
-289
-290
-291
-292
-293
-294
-295
-296
-297
-298
-299
-300
-301
-302
-303
-304
-305
-306
-307
-308
-309
-310
-311
-312
-313
-314
-315
-316
-317
-318
-319
-320
-321
-322
-323
-324
-325
-326
-327
-328
-329
-330
-331
-332
-333
-334
-335
-336
-337
-338
-339
-340
-341
-342
-343
-344
-345
-346
-347
-348
-349
-350
-351
-352
-353
-354
-355
-356
-357
-358
-359
-360
-361
-362
-363
-364
-365
-366
-367
-368
-369
-370
-371
-372
-373
-374
-375
-376
-377
-378
-379
-380
-381
-382
-383
-384
-385
-386
-387
-388
-389
-390
-391
-392
-393
-394
-395
-396
-397
-398
-399
-400
-401
-402
-403
-404
-405
-406
-407
-408
-409
-410
-411
-412
-413
-414
-415
-416
-417
-418
-419
-420
-421
-422
-423
-424
-425
-426
-427
-428
-429
-430
-431
-432
-433
-434
-435
-436
-437
-438
-439
-440
-441
-442
-443
-444
-445
-446
-447
-448
-449
-450
-451
-452
-453
-454
-455
-456
-457
-458
-459
-460
-461
-462
-463
-464
-465
-466
-467
-468
-469
-470
-471
-472
-473
-474
-475
-476
-477
-478
-479
-480
-481
-482
-483
-484
-485
-486
-487
-488
-489
-490
-491
-492
-493
-494
-495
-496
-497
-498
-499
-500
-501
-502
-503
-504
-505
-506
-507
-508
-509
-510
-511
-512
-513
-514
-515
-516
-517
-518
-519
-520
-521
-522
-523
-524
-525
-526
-527
-528
-529
-530
-531
-532
-533
-534
-535
-536
-537
-538
-539
-540
-541
-542
-543
-544
-545
-546
-547
-548
-549
-550
-551
-552
-553
-554
-555
-556
-557
-558
-559
-560
-561
-562
-563
-564
-565
-566
-567
-568
-569
-570
-571
-572
-573
-574
-575
-576
-577
-578
-579
-580
-581
-582
-583
-584
-585
-586
-587
-588
-589
-590
-591
-592
-593
-594
-595
-596
-597
-598
-599
-600
-601
-602
-603
-604
-605
-606
-607
-608
-609
-610
-611
-612
-613
-614
-615
-616
-617
-618
-619
-620
-621
-622
-623
-624
-625
-626
-627
-628
-629
-630
-631
-632
-633
-634
-635
-636
-637
-638
-639
-640
-641
-642
-643
-644
-645
-646
-647
-648
-649
-650
-651
-652
-653
-654
-655
-656
-657
-658
-659
-660
-661
-662
-663
-664
-665
-666
-667
-668
-669
-670
-671
-672
-673
-674
-675
-676
-677
-678
-679
-680
-681
-682
-683
-684
-685
-686
-687
-688
-689
-690
-691
-692
-693
-694
-695
-696
-697
-698
-699
-700
-701
-702
-703
-704
-705
-706
-707
-708
-709
-710
-711
-712
-713
-714
-715
-716
-717
-718
-719
-720
-721
-722
-723
-724
-725
-726
-727
-728
-729
-730
-731
-732
-733
-734
-735
-736
-737
-738
-739
-740
-741
-742
-743
-744
-745
-746
-747
-748
-749
-750
-751
-752
-753
-754
-755
-756
-757
-758
-759
-760
-761
-762
-763
-764
-765
-766
-767
-768
-769
-770
-771
-772
-773
-774
-775
-776
-777
-778
-779
-780
-781
-782
-783
-784
-785
-786
-787
-788
-789
-790
-791
-792
-793
-794
-795
-796
-797
-798
-799
-800
-801
-802
-803
-804
-805
-806
-807
-808
-809
-810
-811
-812
-813
-814
-815
-816
-817
-818
-819
-820
-821
-822
-823
-824
-825
-826
-827
-828
-829
-830
-831
-832
-833
-834
-835
-836
-837
-838
-839
-840
-841
-842
-843
-844
-845
-846
-847
-848
-849
-850
-851
-852
-853
-854
-855
-856
-857
-858
-859
-860
-861
-862
-863
-864
-865
-866
-867
-868
-869
-870
-871
-872
-873
-874
-875
-876
-877
-878
-879
-880
-881
-882
-883
-884
-885
-886
-887
-888
-889
-890
-891
-892
-893
-894
-895
-896
-897
-898
-899
-900
-901
-902
-903
-904
-905
-906
-907
-908
-909
-910
-911
-912
-913
-914
-915
-916
-917
-918
-919
-920
-921
-922
-923
-924
-925
-926
-927
-928
-929
-930
-931
-932
-933
-934
-935
-936
-937
-938
-939
-940
-941
-942
-943
-944
-945
-946
-947
-948
-949
-950
-951
-952
-953
-954
-955
-956
-957
-958
-959
-960
-961
-962
-963
-964
-965
-966
-967
-968
-969
-970
-971
-972
-973
-974
-975
-976
-977
-978
-979
-980
-981
-982
-983
-984
-985
-986
-987
-988
-989
-990
-991
-992
-993
-994
-995
-996
-997
-998
-999
1000

ESCUELA
POLITECNICA
NACIONAL
QUITO

ESCUELA
POLITECNICA
NACIONAL
QUITO



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

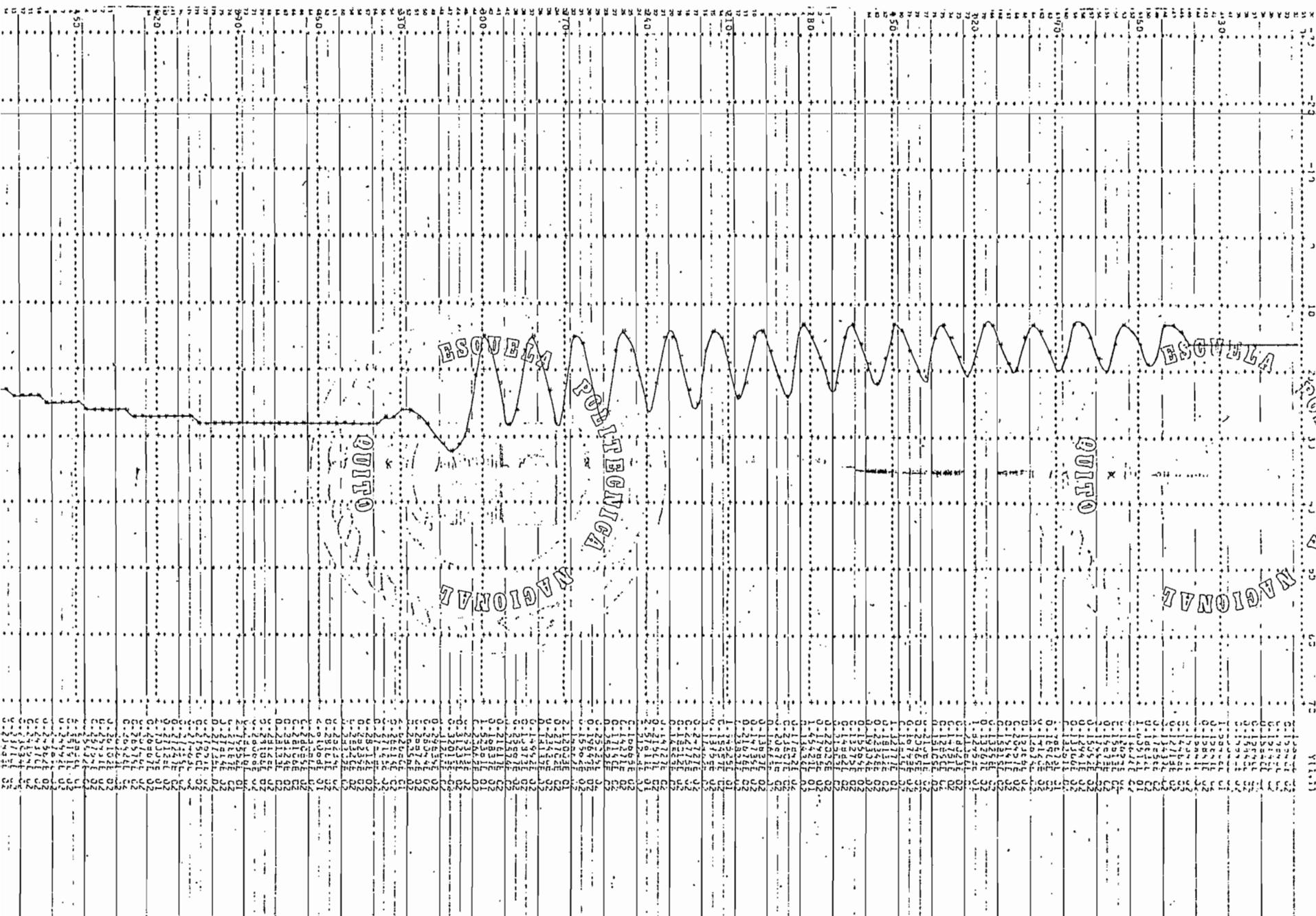
QUITO

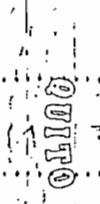
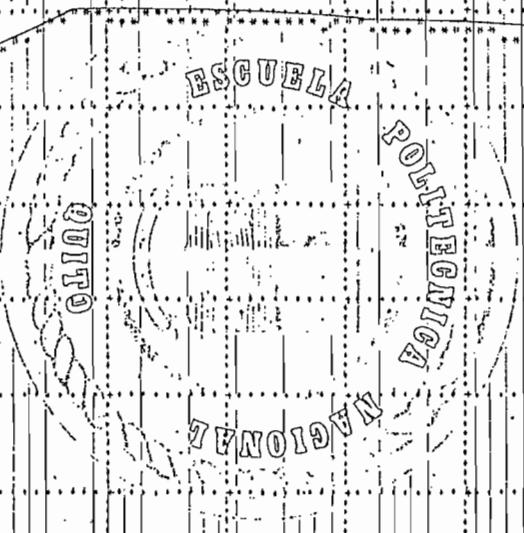
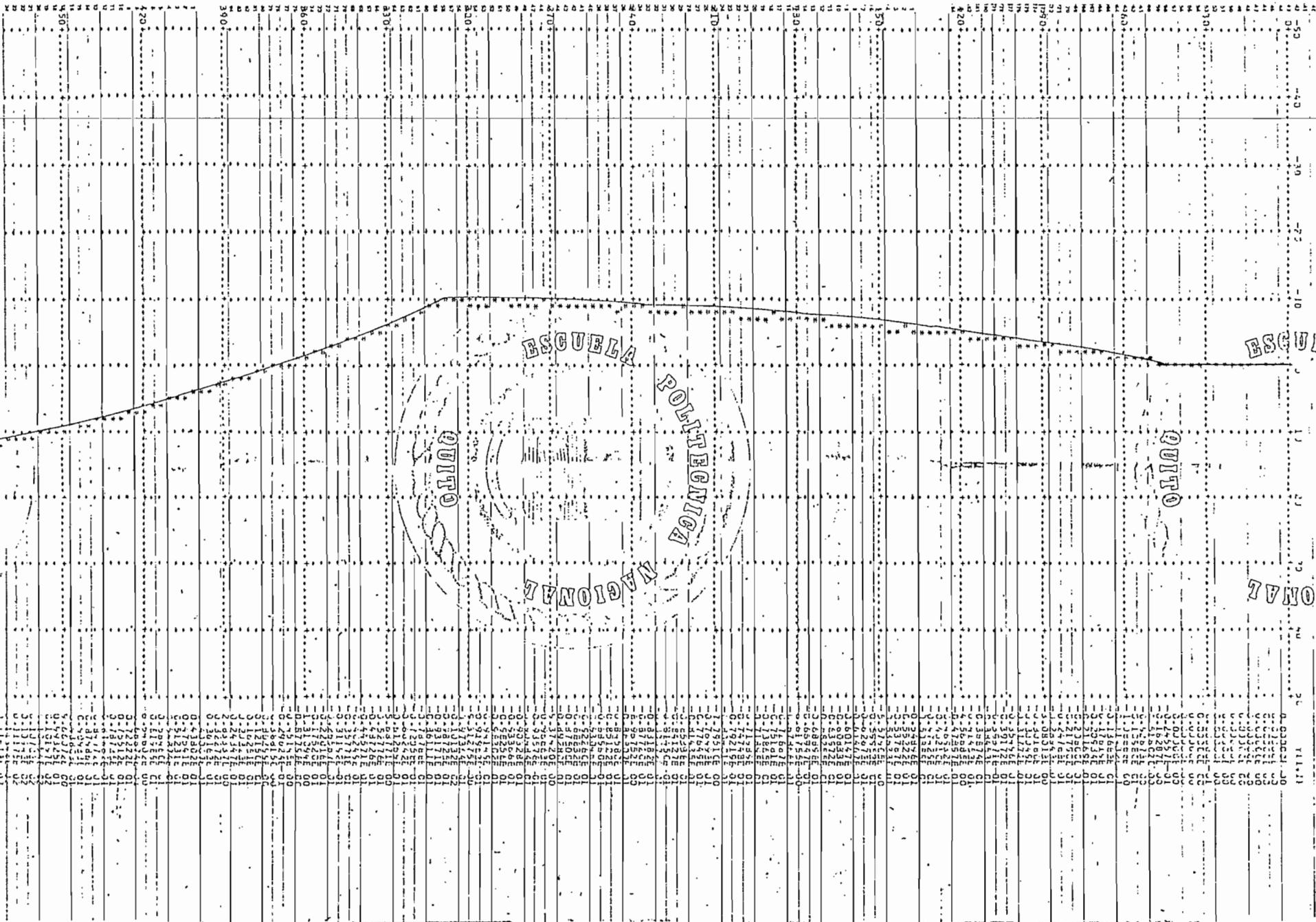
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

QUITO





ESCUELA

NACIONAL

ESCUELA

POLITECNICA

NACIONAL

QUITO

QUITO

100 200 300 400 500
10 20 30 40 50

TESIS DE GRADO

MODELO DIGITAL DE LA MÁQUINA SINCRONICA PARA EL ESTUDIO DE FALLAS

REALIZADO POR: ALONSO VAQUEZ

ACCION

1541 1

1541 1

LIMITE 500 INICIO 43 FIN 308 PASO 0.00050

05=0.0

DESCONECCION DE LAS FASES A Y B

PARAMETROS DE LA MAQUINA

RS= 0.04890 RKC= 0.34039 RKO= 0.02703 RPO= 0.01104
ALS= 0.04146 XAG= 0.30701 XAD= 0.05403 ALX= 0.24457
ALKD= 0.00204 XIFD= 0.13498 HMA= 1.00000 VARI= 1.00000

DATOS PARA CONDICIONES INICIALES

I=1, ACCION ROTURA, I=2, ACCION VEREFACER

I*1-
KVA= 1.06734 VA= 0.84594 0.00000 PHI=-0.270360 VAEB= 376.99500

RESULTADOS INICIALES

I	PQ	PD	KQ	KD	FD	IQ	ID	IFC	AK	IA	AKOI	DELIA	IE
0.000	0.4230	0.0632	0.3727	0.6775	0.8913	1.2138	-0.3443	1.9540	1.0000	1.2159	-0.5160	-0.5460	0.9506

FORMA MEXICA

C-10

Escuela Nacional de Aviación
Escuela de Politecnica Naval

ESCUELA NACIONAL

ESCUELA NACIONAL

QUITO

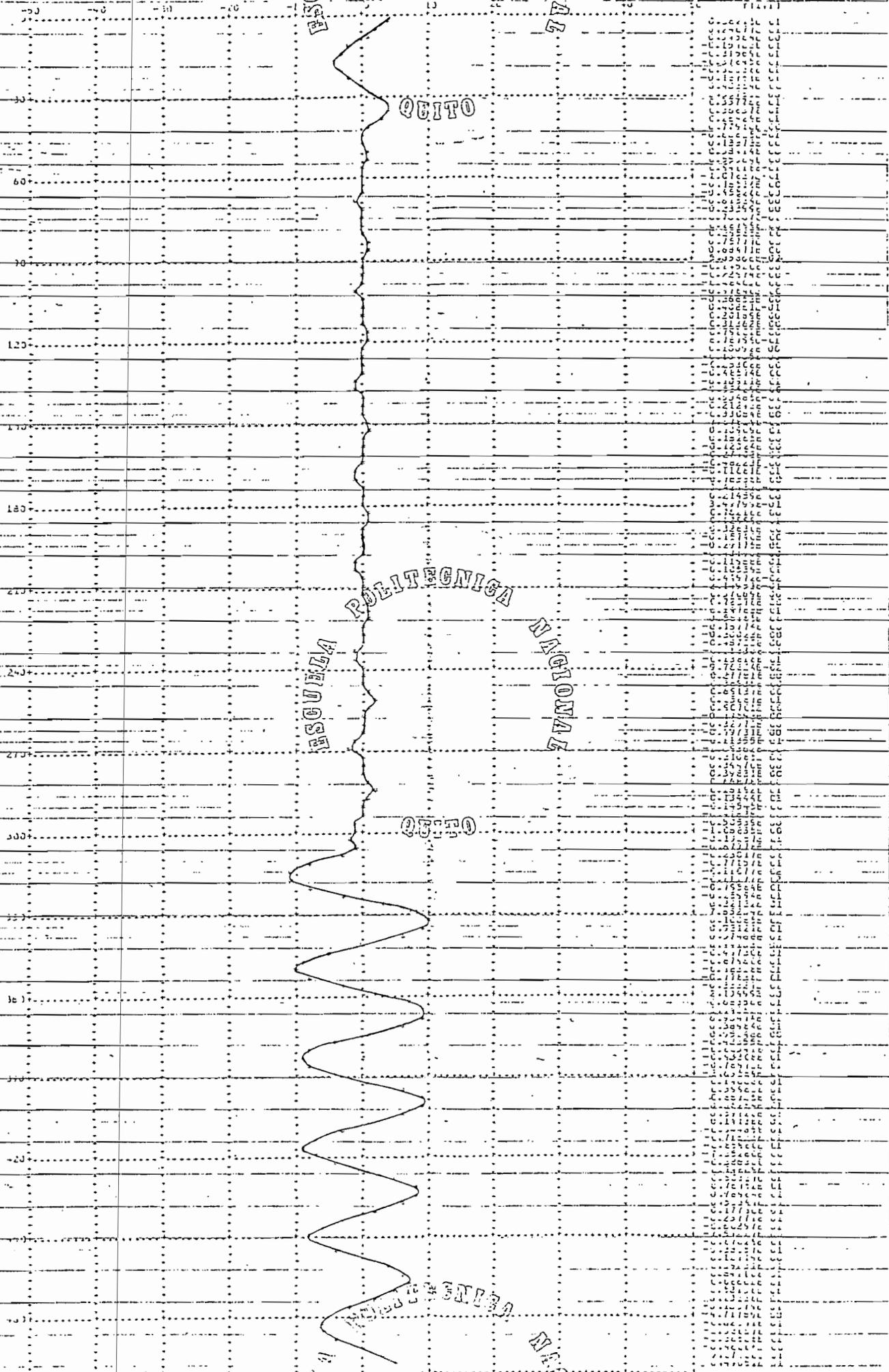
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

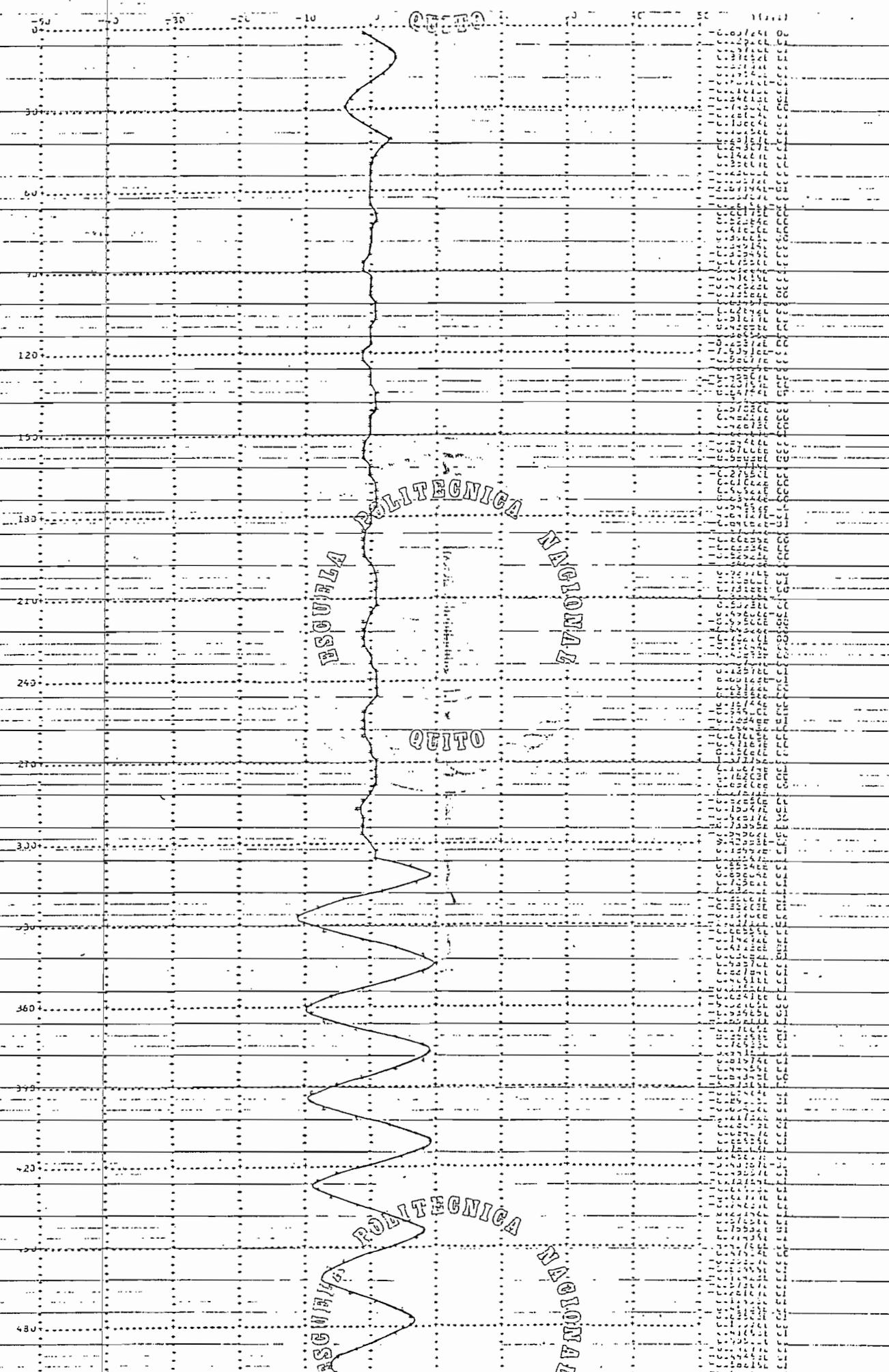
QUITO

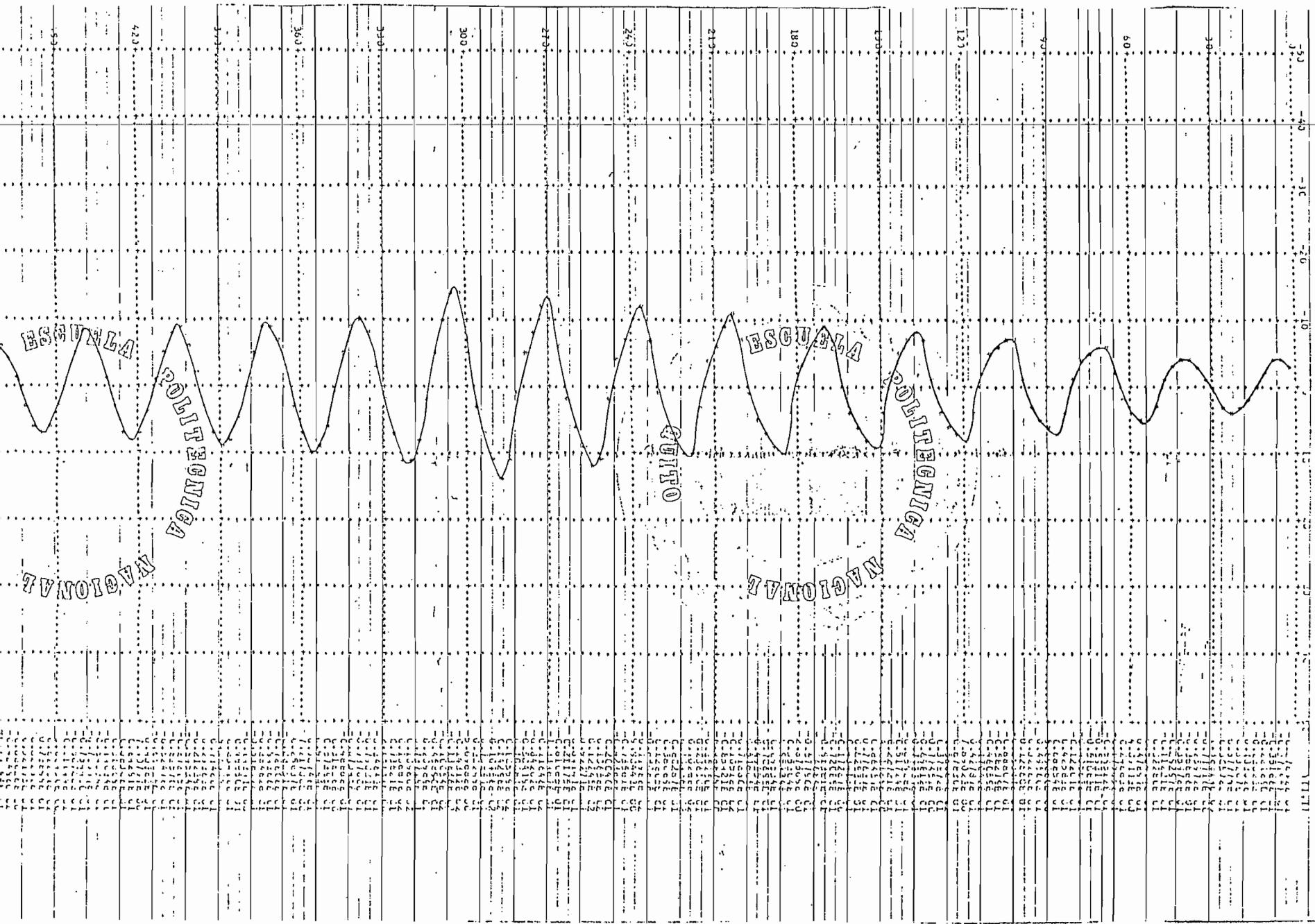
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

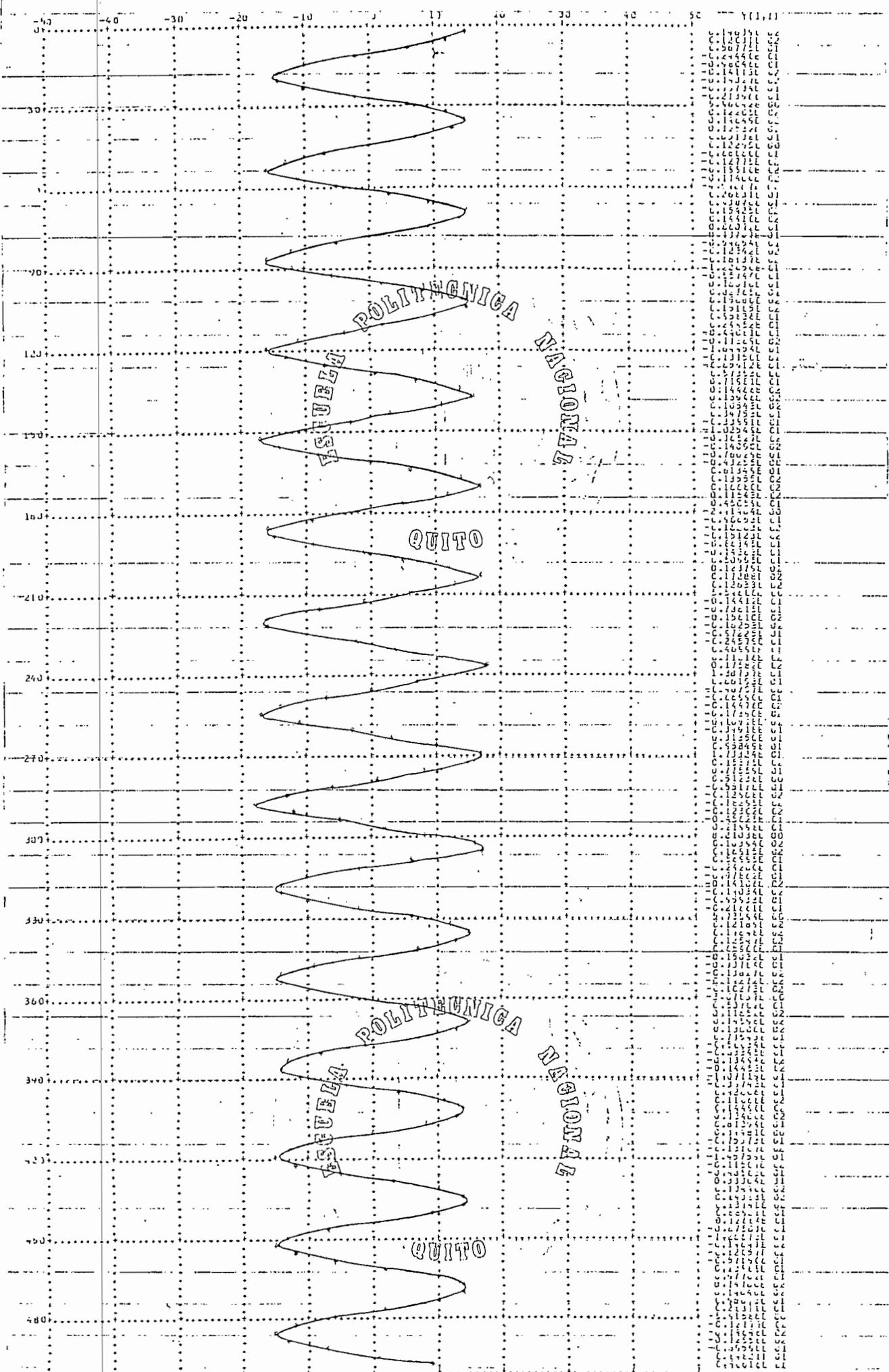


FACTER LE MULTIPLICACION 3



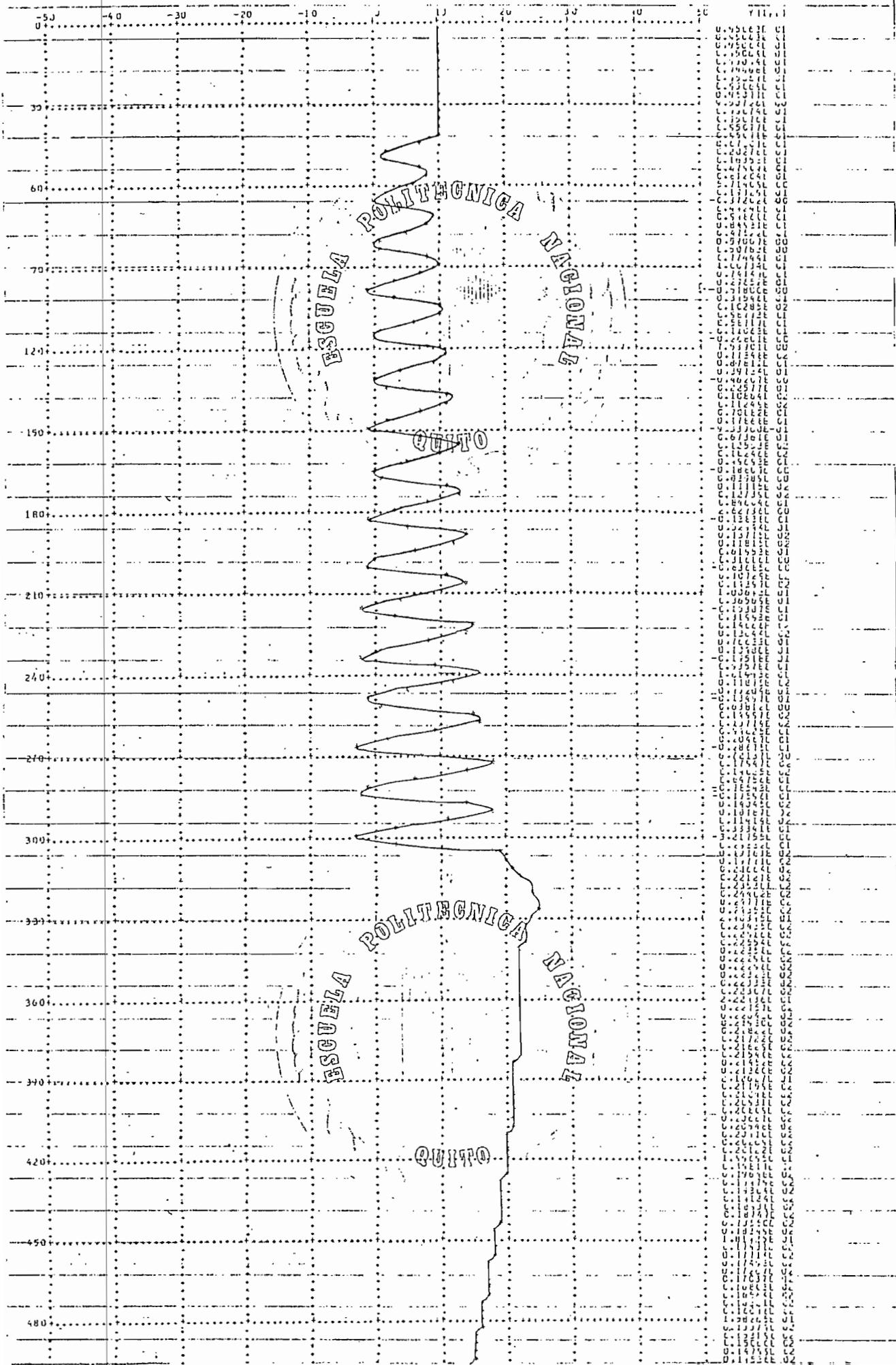


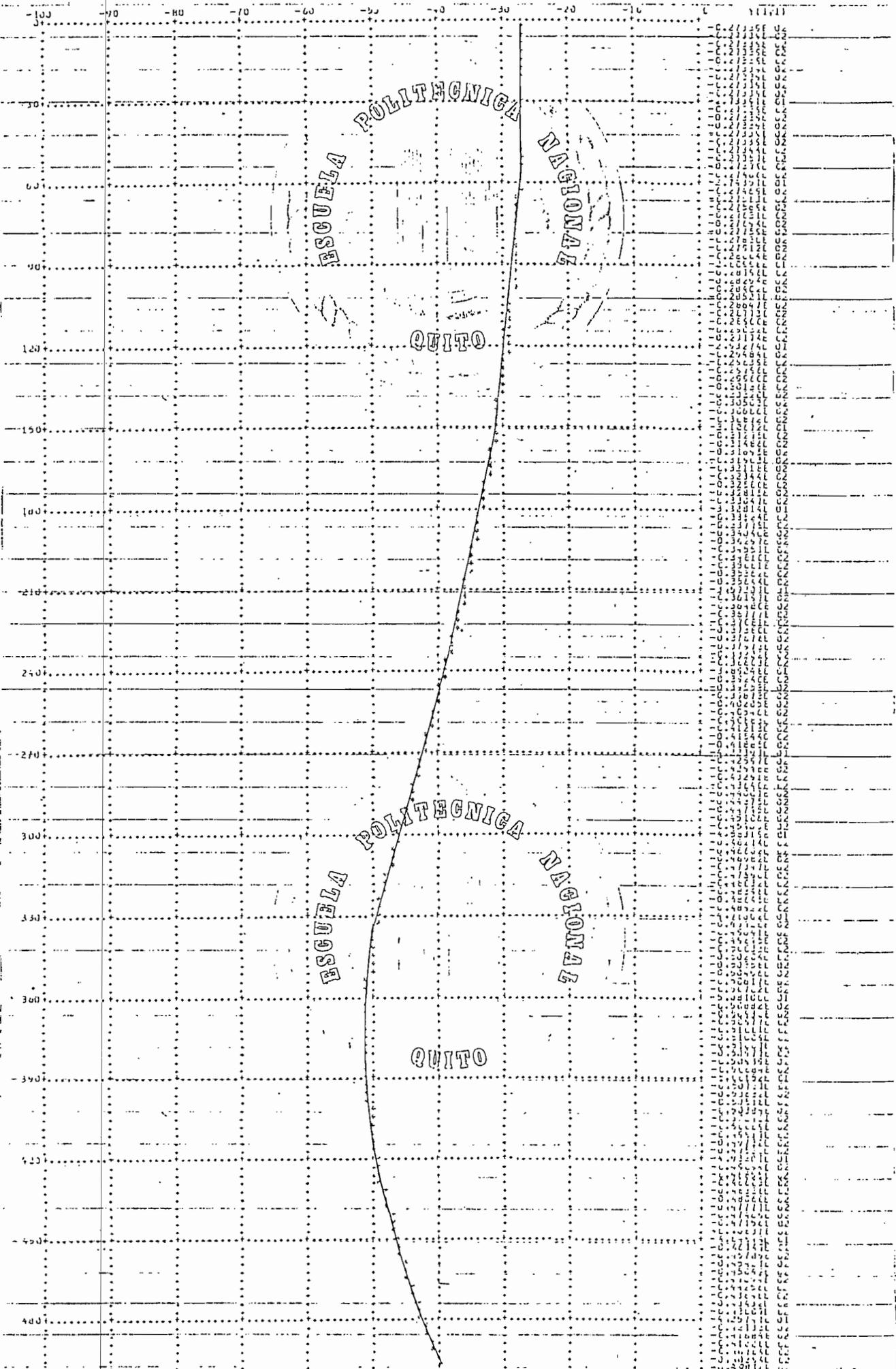
FACTOR DE MULTIPLICACION 101.10

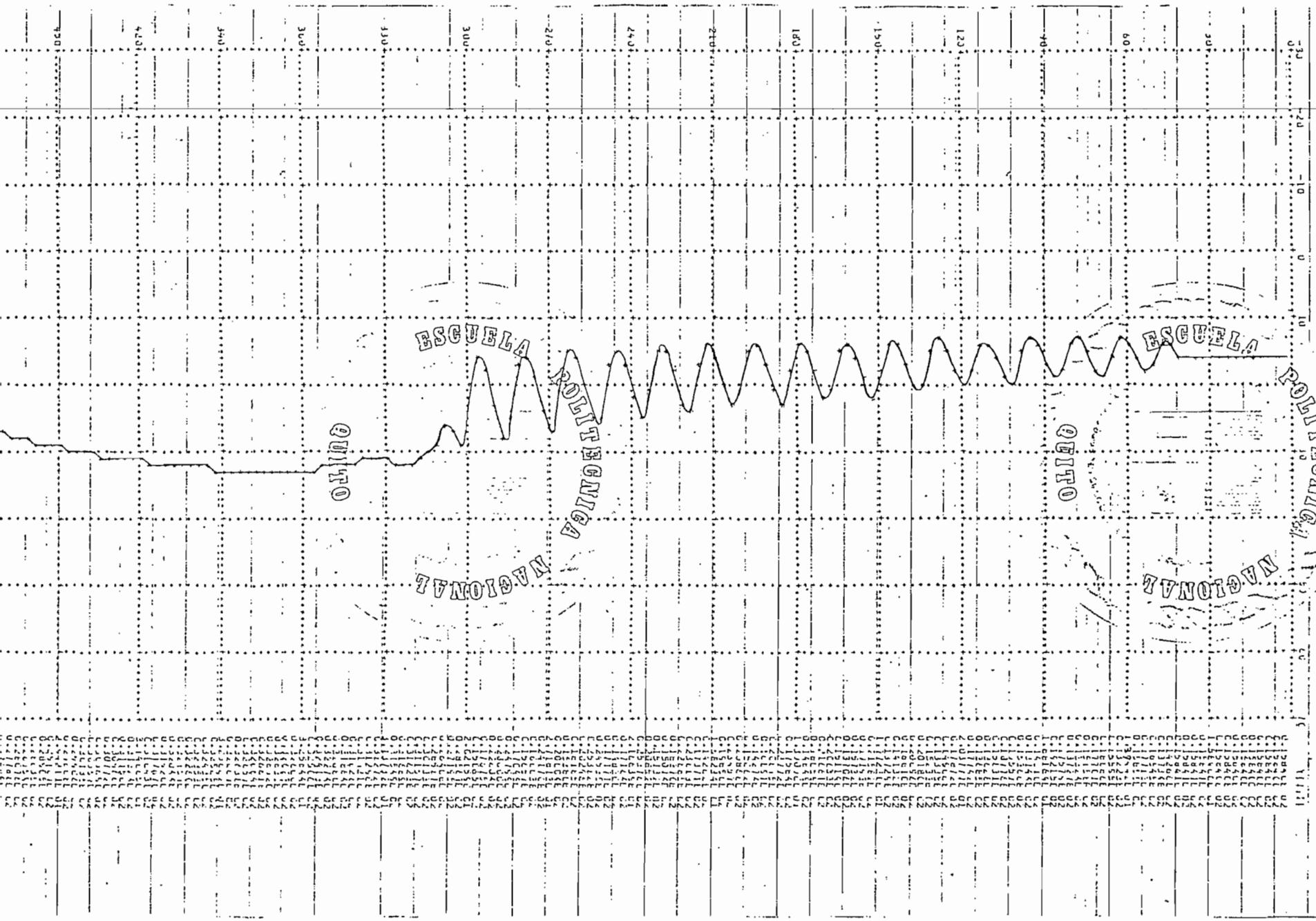


INFORME DE LA INVESTIGACION

FACTUR DE LA INVESTIGACION N° 10







QUITO

ESCUELA

POLITECNICA

NACIONAL

QUITO

ESCUELA

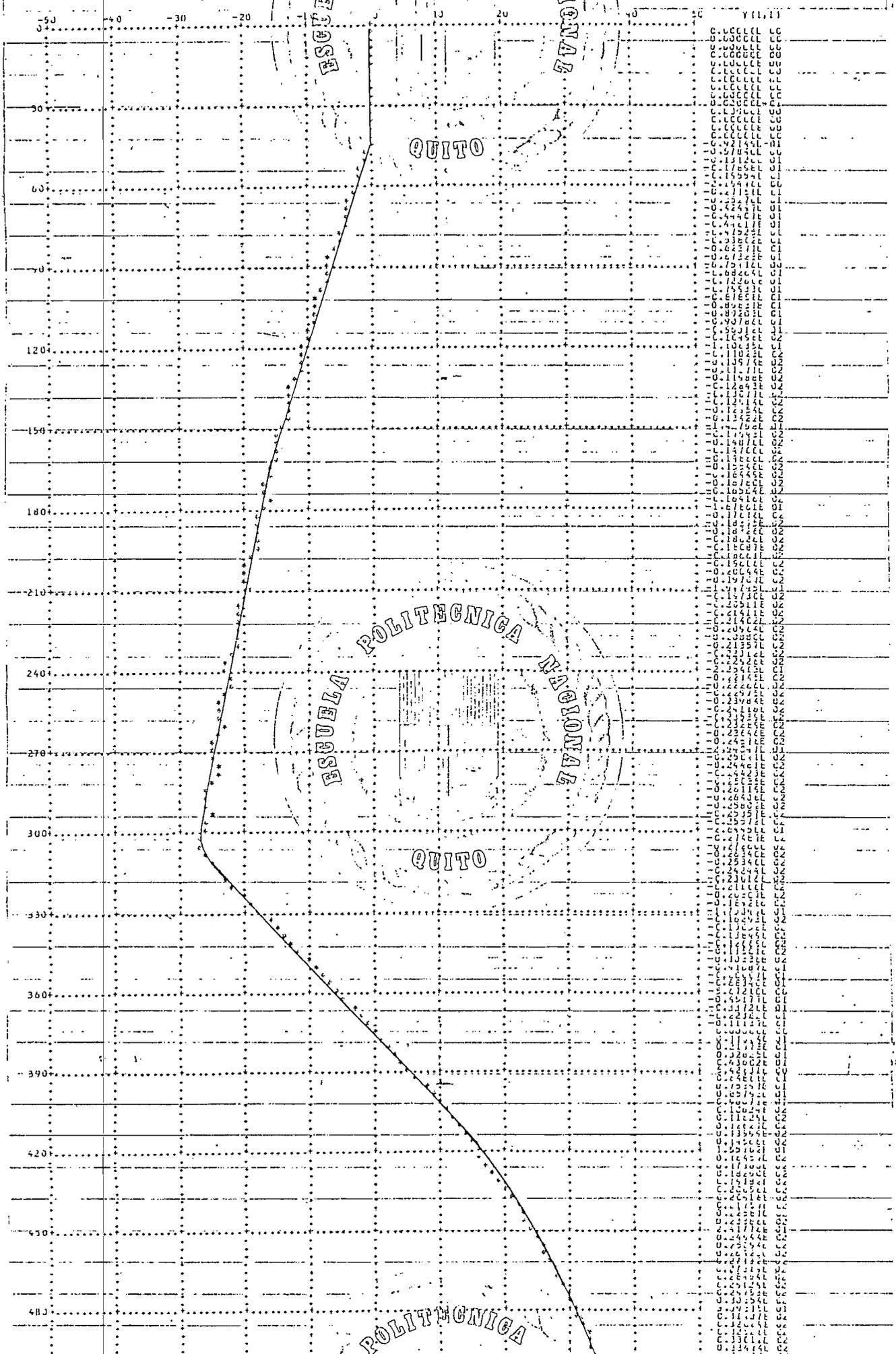
POLITECNICA

NACIONAL

ESUELA POLITECNICA NACIONAL
- C-18 -

VARIACION DE LA VELOCIDAD POLITRICA

TABLA DE MULTIPLICACION 1974 1980



INAGIACION

TESIS DE GRADO

MODELO DIGITAL DE LA MÁQUINA SINCROTRICA PARA EL ESTUDIO DE FALLAS

REALIZADO POR: ALFONSO VAQUERO

ISAT 1

INSTRUMENTO

LIMITE 500 INICIO 43 FIN 306 PASO 0.00050

00=0.0

DESCONECCION DE LAS TRES FASES

PARAMETROS DE LA MAQUINA

RS = 0.04890 RKQ = 0.04039 KXJ = 0.02703 IFJ = 0.01704
XL3 = 0.04140 XAQ = 0.30701 XAU = 0.55433 CLKC = 1.24457
XLKJ = 0.00204 XLFD = 0.13498 HMAQ = 1.05900 JAERL = 1.00000

DATOS PARA CONDICIONES INICIALES

I=1, ACCION MOTORA, I=2 ACCION GENERALERA

I = 2
KVA = 0.92000 VA = 0.86603 0.00000 PHI = 0.1543610 VAL3 = 376.95900

RESULTADOS INICIALES

T	PQ	PD	KQ	KD	FD	IQ	ID	IFJ	IK	IA	ARJF	DLTA	IL
0.000	-0.3582	0.8446	-0.3156	0.8558	1.1750	-1.0279	-0.2684	2.3623	1.0000	-1.0497	0.4058	0.4098	-0.9043



ESCUELA

POLITÉCNICA

NACIONAL

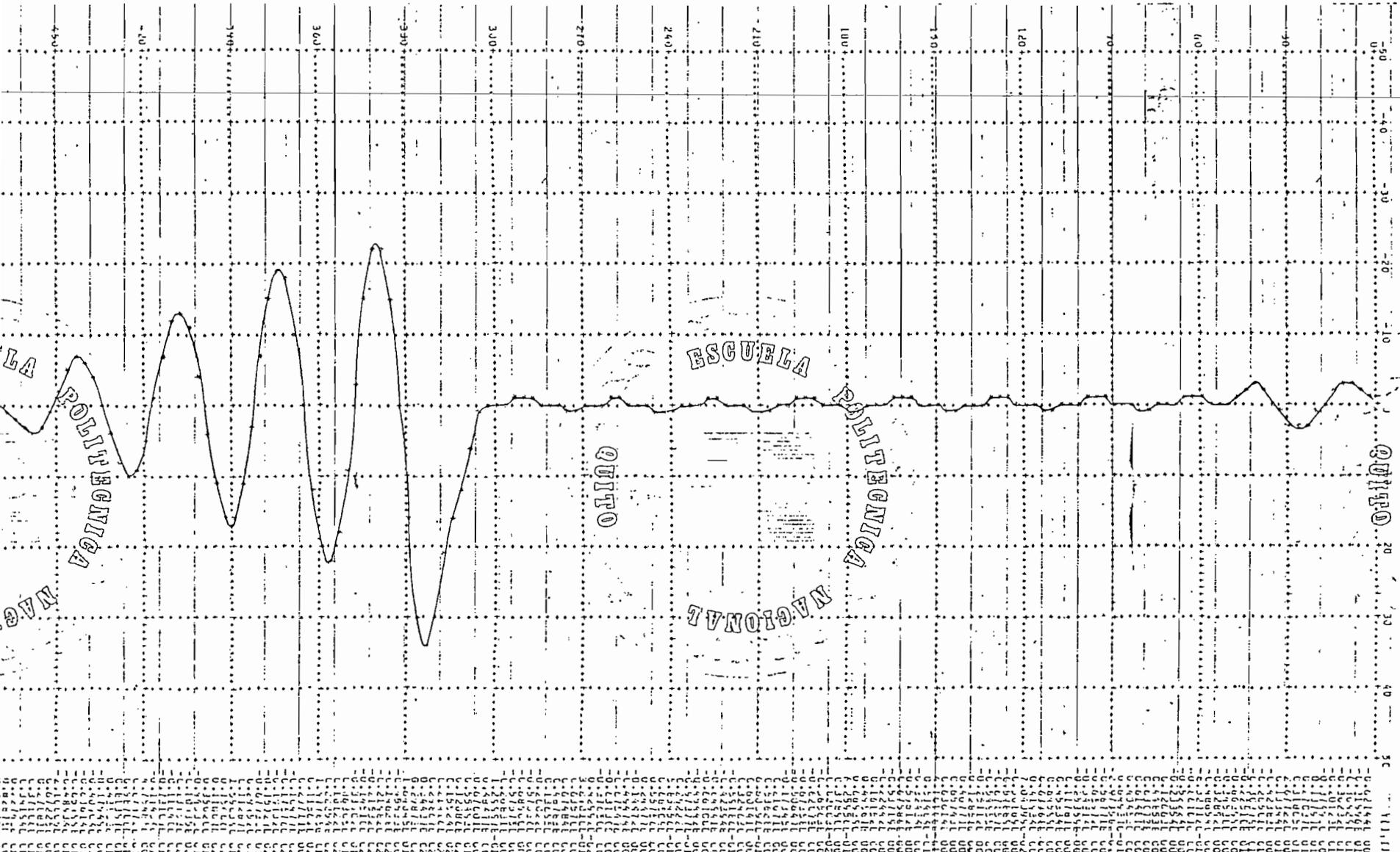
QUITO

QUITO

ESCUELA

NACIONAL

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
C-20



LA POLITECNICA NACIONAL

ESCUELA

POLITECNICA

NACIONAL

QUITO

QUITO

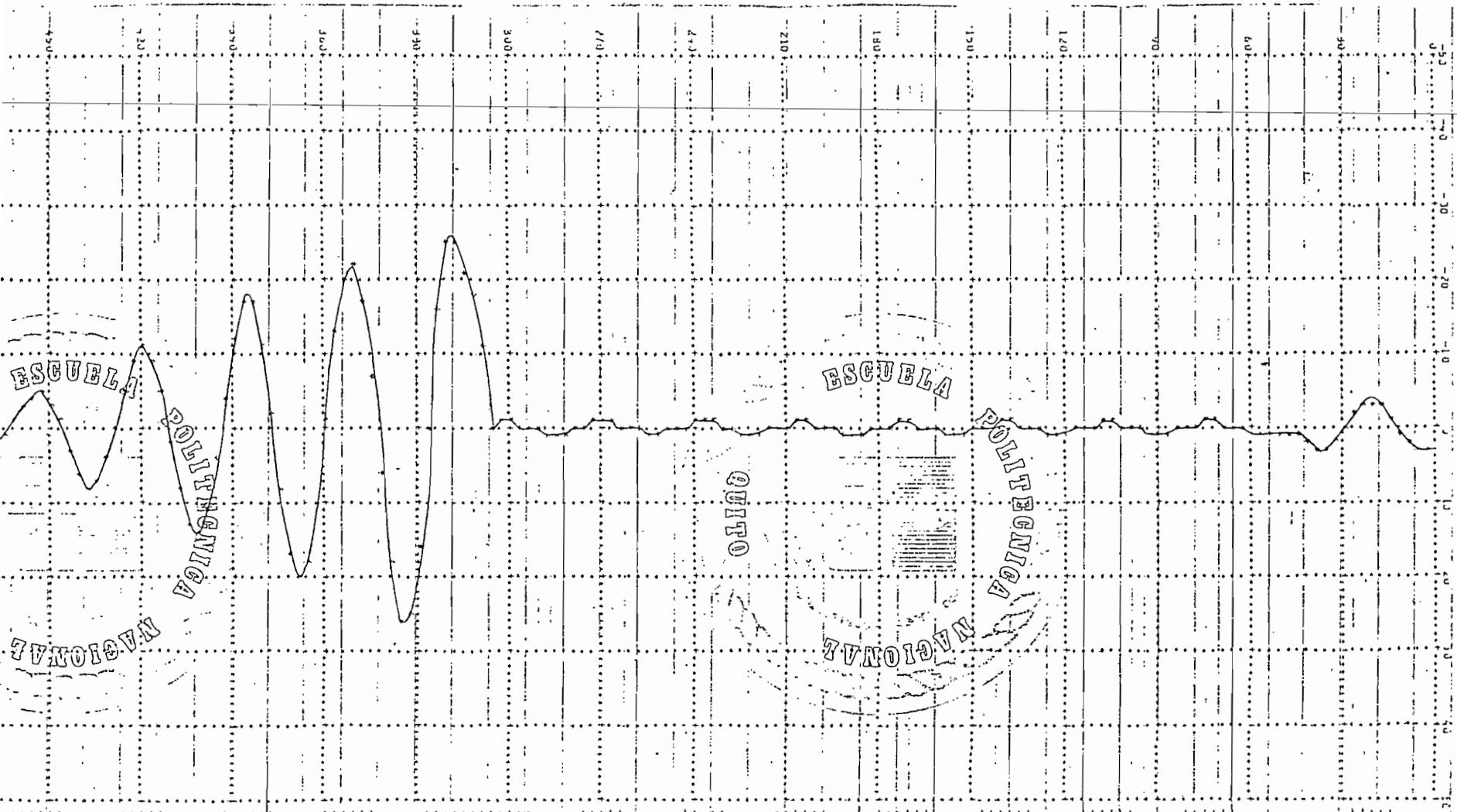
FACTORA DE MULTIPLICACION ASIST. 3

25

UNIVERSIDAD DE ECUADOR

7

Y11.11



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL

QUITO

ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL

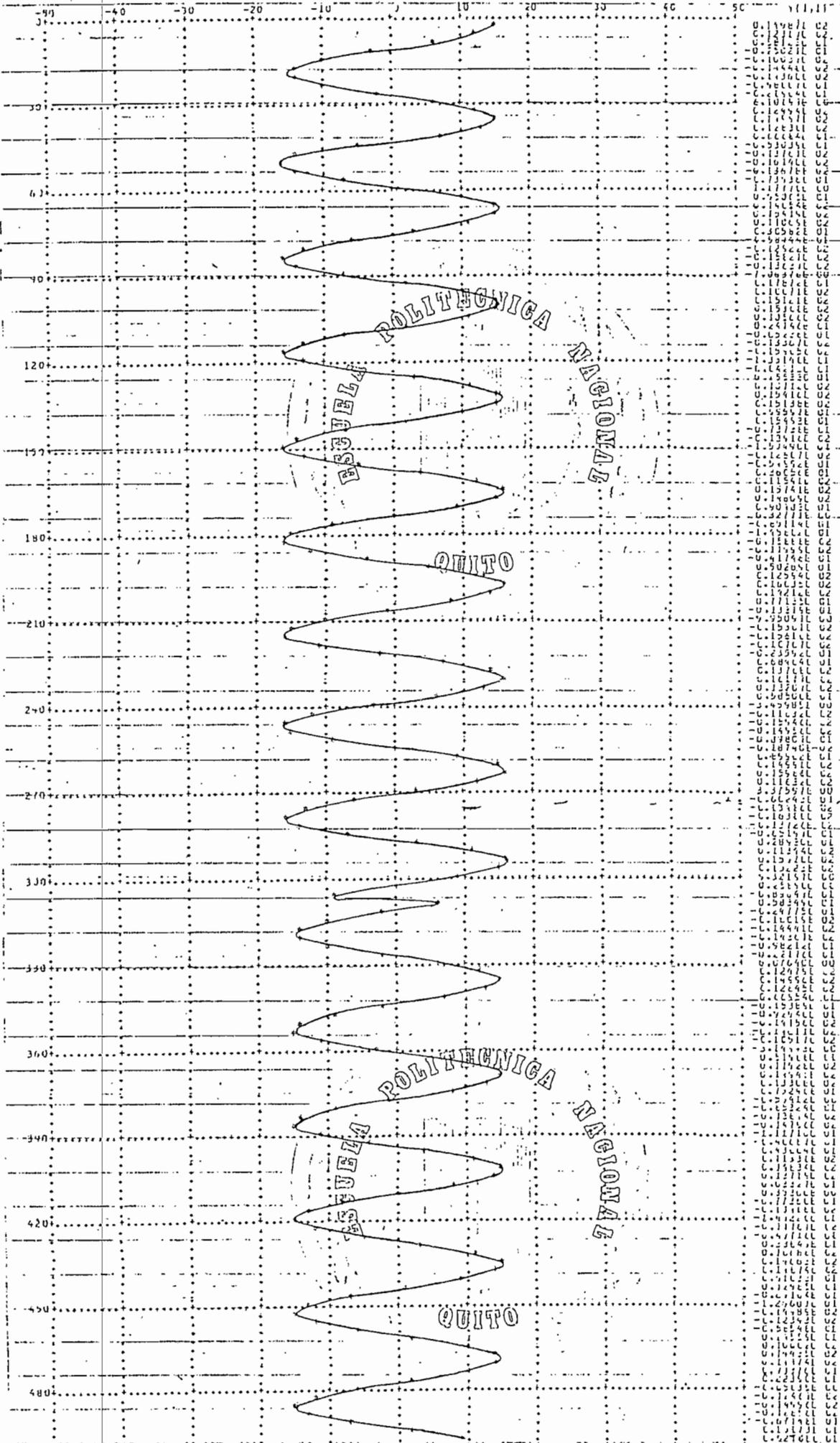
LABOR DE FUENTES DE ALIMENTACION

10/10/1970

22

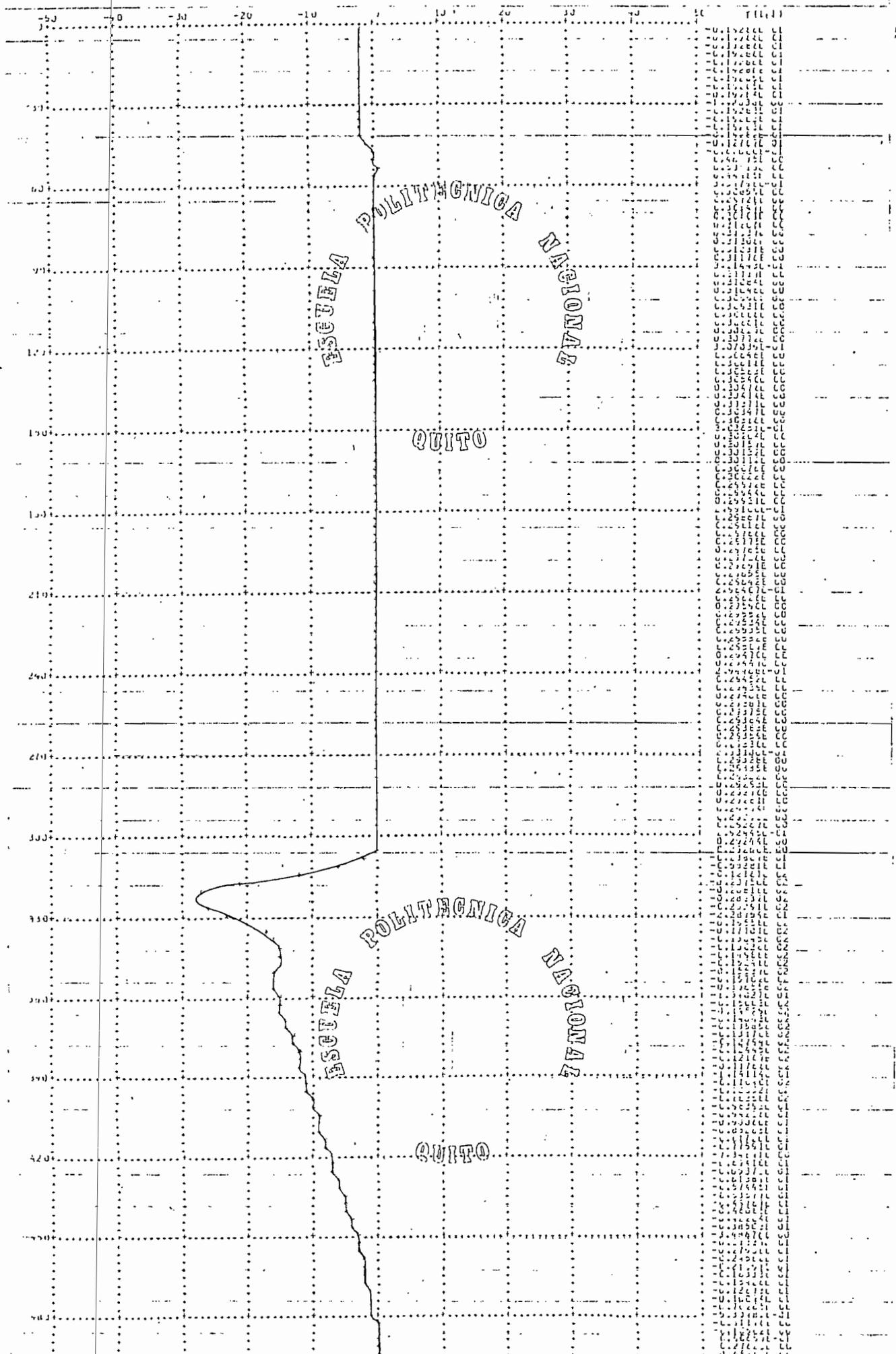
Y (1,1)

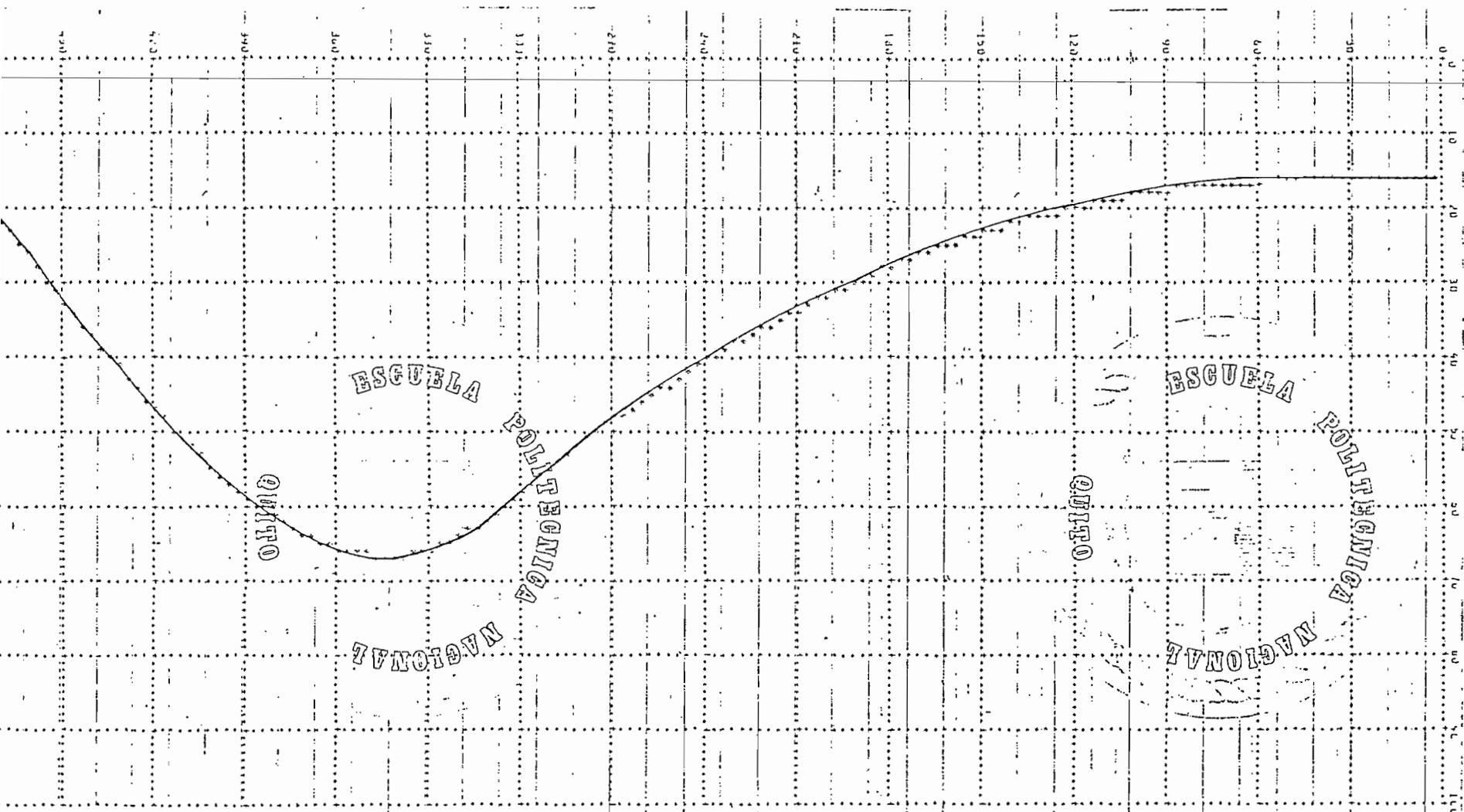
FACTOR DE MULTIPLICACION



UNIVERSITY OF MICHIGAN

FACTORY OF REPLICATIONS





ESCUELA

POLITECNICA

NACIONAL

QUITO

ESCUELA

POLITECNICA

NACIONAL

QUITO

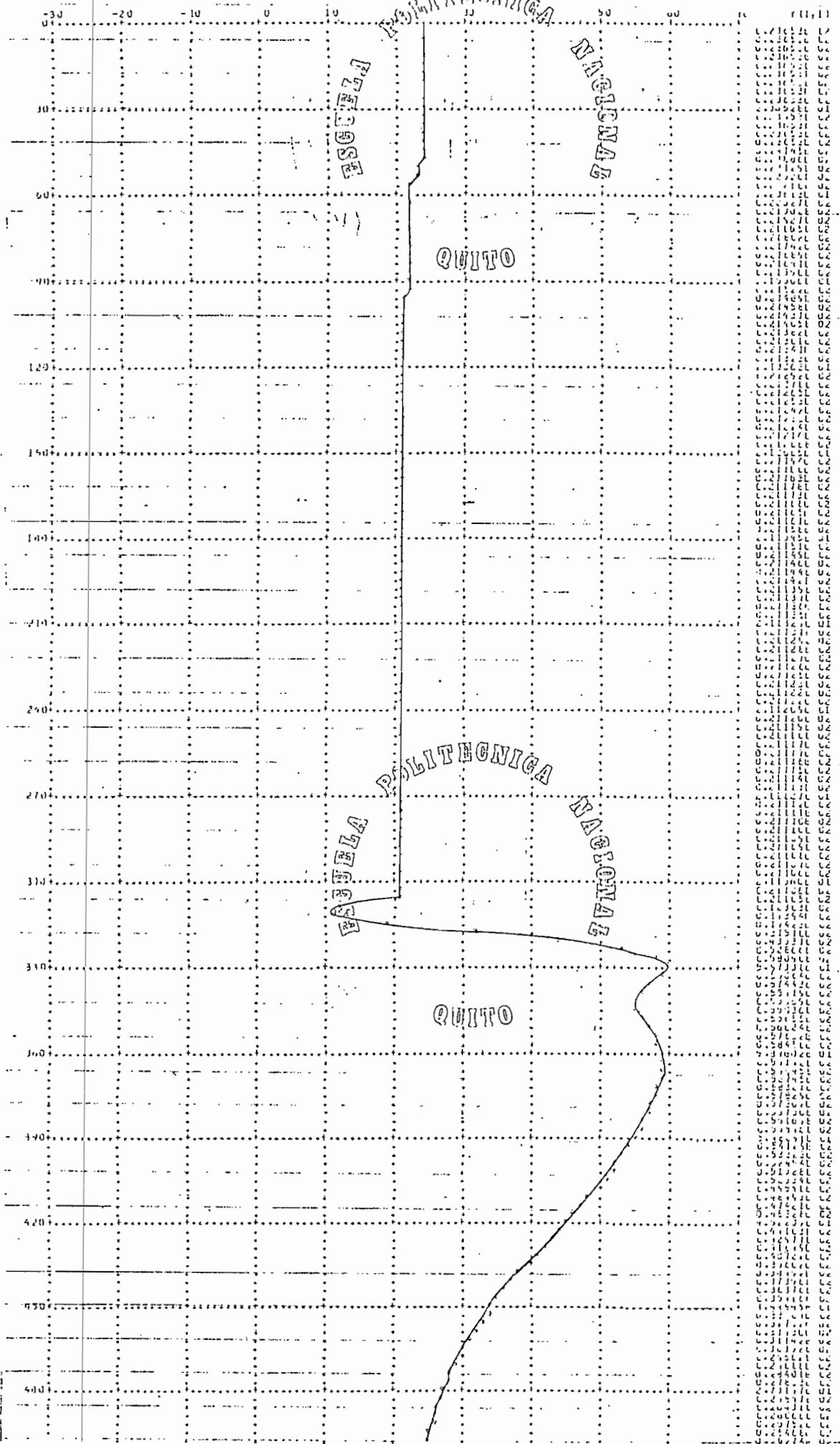
FACILIDAD DE REPRODUCCION NO. 42

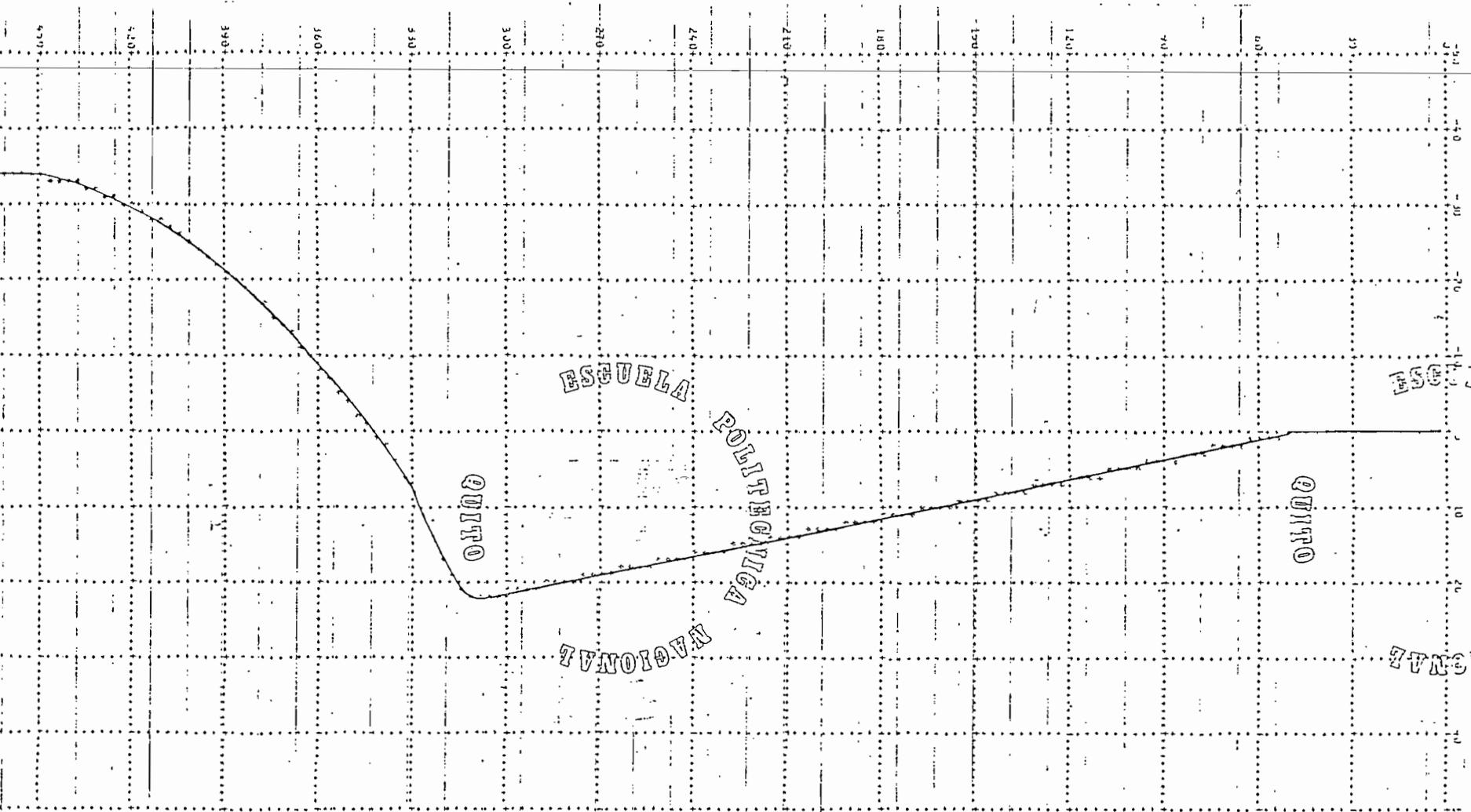
ASOCIACION POLITECNICA

C-25

LOGRILLOS DE CUBIERTA

FACTA DE MULTITUDINIS NUMERUS





QUITTO

ESCUOLA

POLITECNICA

NACIONAL

QUITTO

NACIONAL

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

Forma C-27

TESIS DE GRADU

MODELO DIGITAL DE LA MAQUINA SINCRONICA PARA EL ESTUDIO DE FALLAS

REALIZADO POR: ALFONSO VASQUEZ

ISAT 1

LIMITE 240 INICIO 27 FIN 240 PAIC 0.00042

G5=1.0

CORTOCIRCUITO DE LA FASE A

PARAMETROS DE LA MAQUINA

RS = 0.03683 RKQ = 0.04039 RKO = 0.02773 RFD = 0.98803
XLS = 0.04146 XAC = 0.30701 XAD = 0.55403 XLK = 0.24437
XLKD = 0.08204 XLFD = 0.13498 HMAQ = 1.65000 VAER = 1.00000

DATOS PARA CONDICIONES INICIALES

I=1, ACCION MOTORA, I=2 ACCION GENERADORA

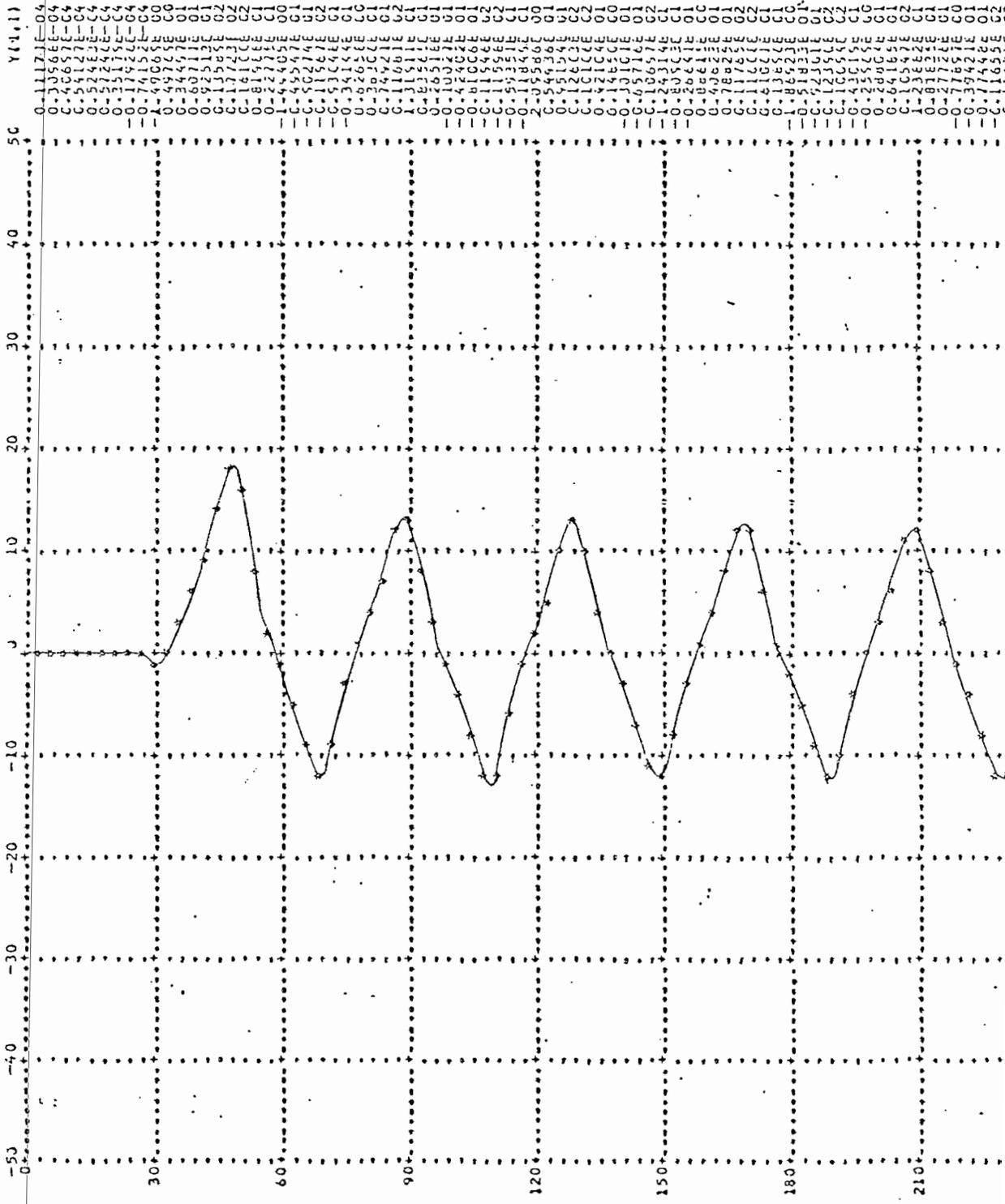
I=2
KVA = 0.00000 VA = 0.12049 0.00000 PFI = -0.2703560 VAEB = 376.99500

RESULTADOS INICIALES

T	PQ	PD	KQ	KD	FD	IQ	ID	IFD	WR	IA	AROT	DELTA	IE
0.000	0.0000	0.1205	0.0000	0.1205	0.1498	0.0000	0.0000	0.2175	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

CONSTANTE DE FASE A
+++++
+++++
+++++
+++++
+++++
+++++

FACTOR DE MULTIPLICACION N=10

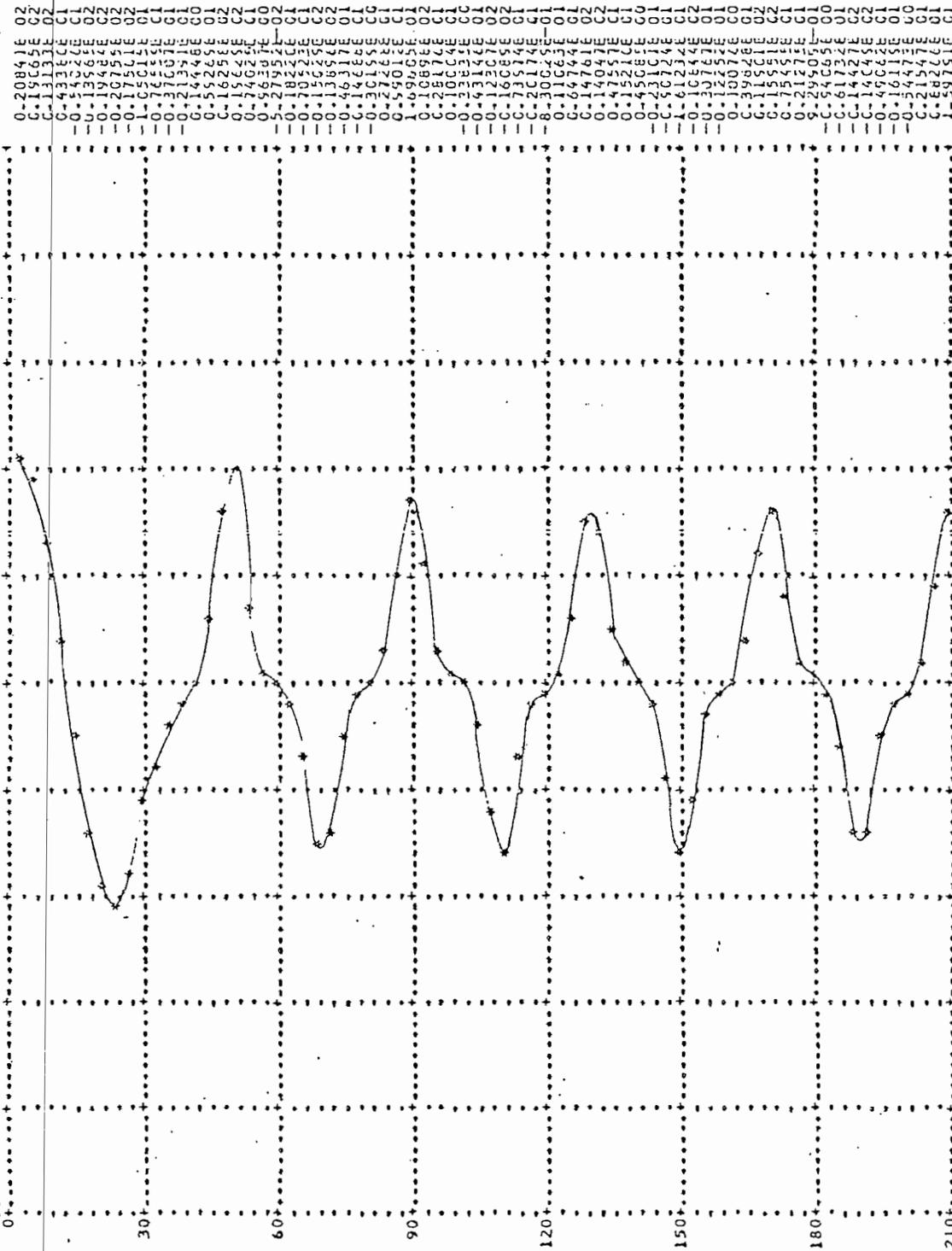


VOLTAJE A-C

FACTOR DE MULTIPLICACION h_{3A=1}CO

Y(1,1)

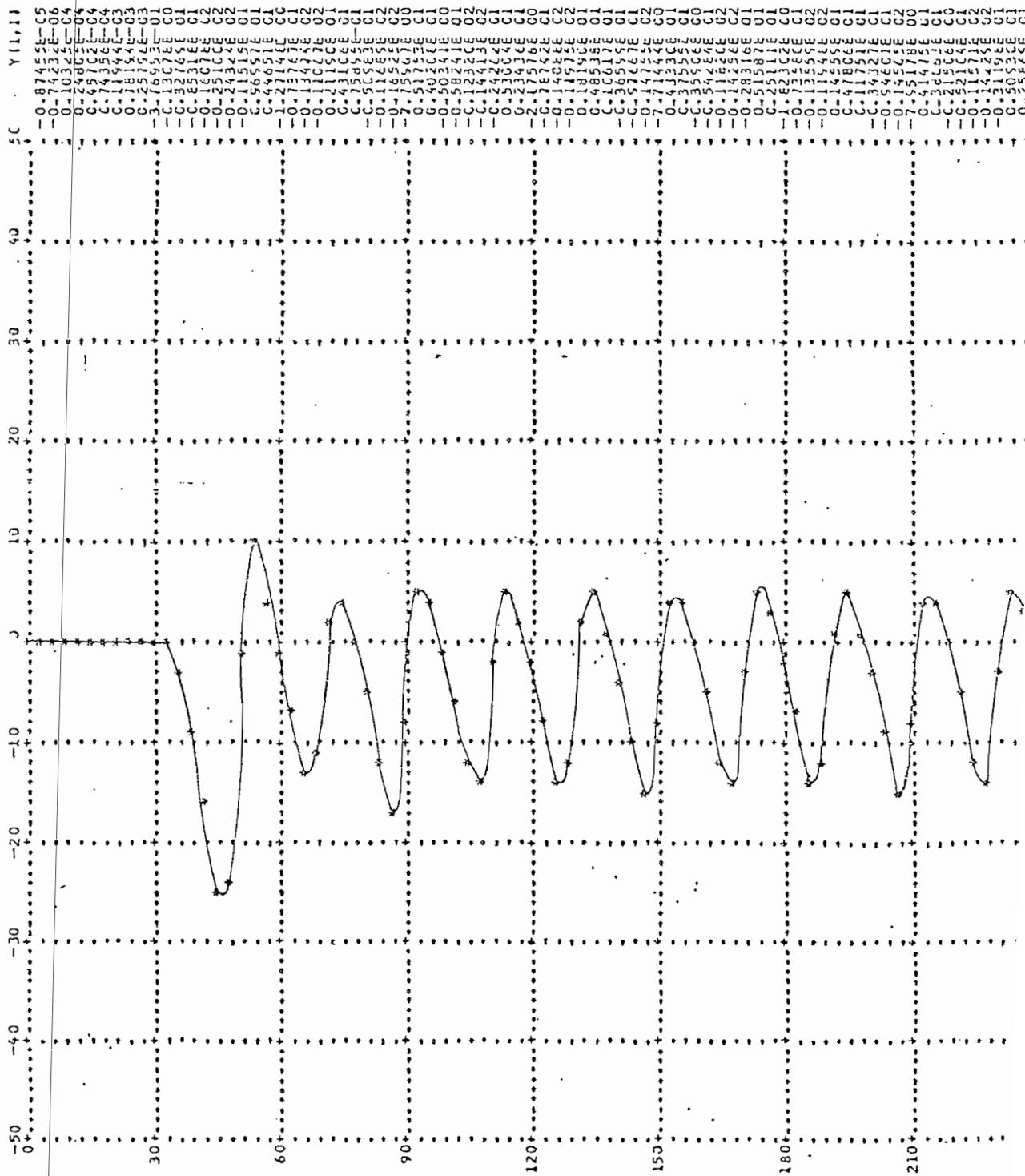
0+ -50 -40 -30 -20 -10 0 10 20 30 40 50



208476
159651
111323
135562
174785
207518
110550
177007
144489
152258
174022
156353
110550
133877
142255
130120
199220
108880
128107
130857
135749
110933
174974
132270
135081
127102
109127
109127
127102
109127
132270
135081
130857
128107
108880
199220
130120
142255
133877
110550
174022
152258
144489
177007
110550
207518
135562
111323
159651
208476

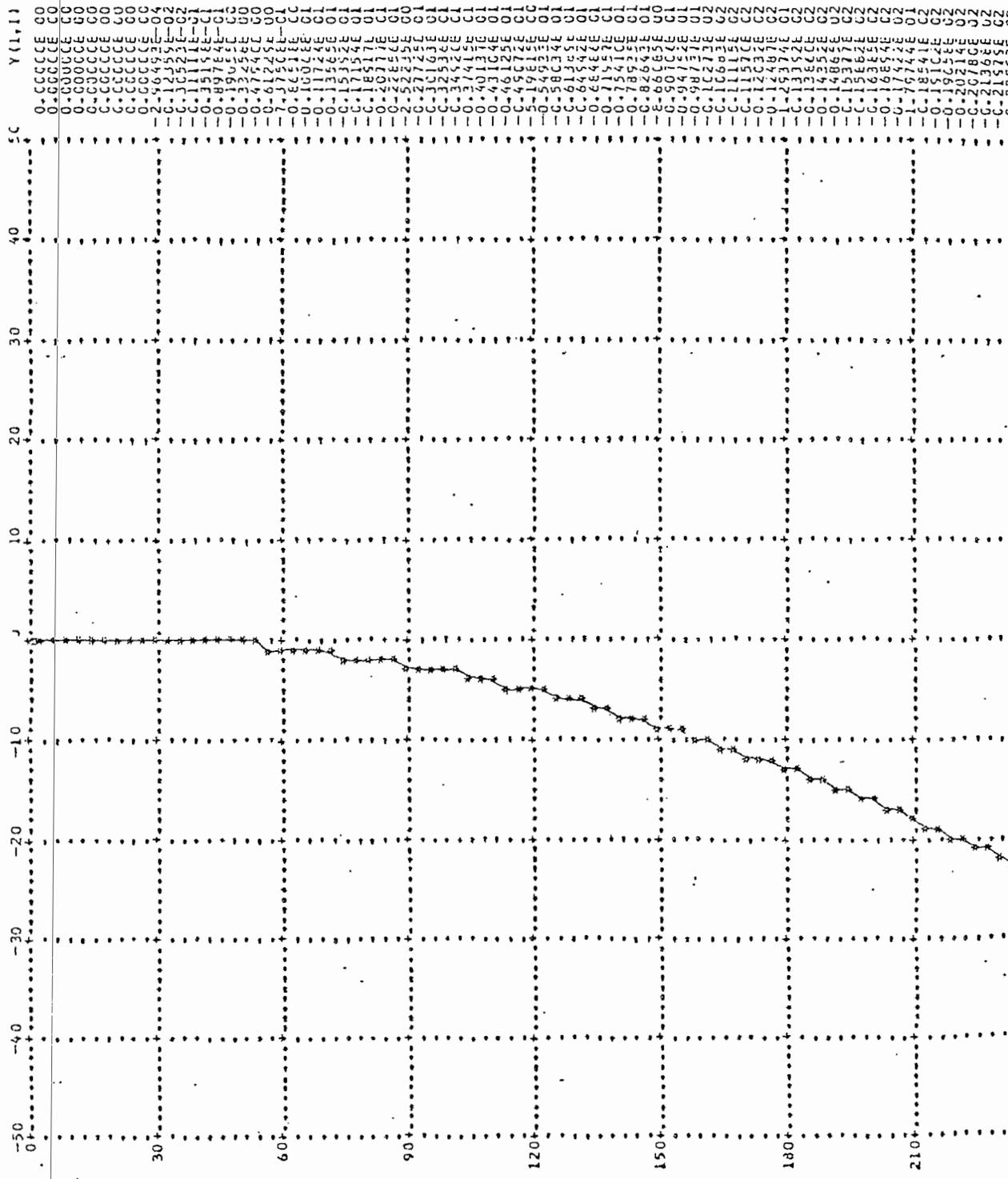
UNIVERSIDAD ELECTROMAGNETICA

FACTOR DE MULTIPLICACION N1=20



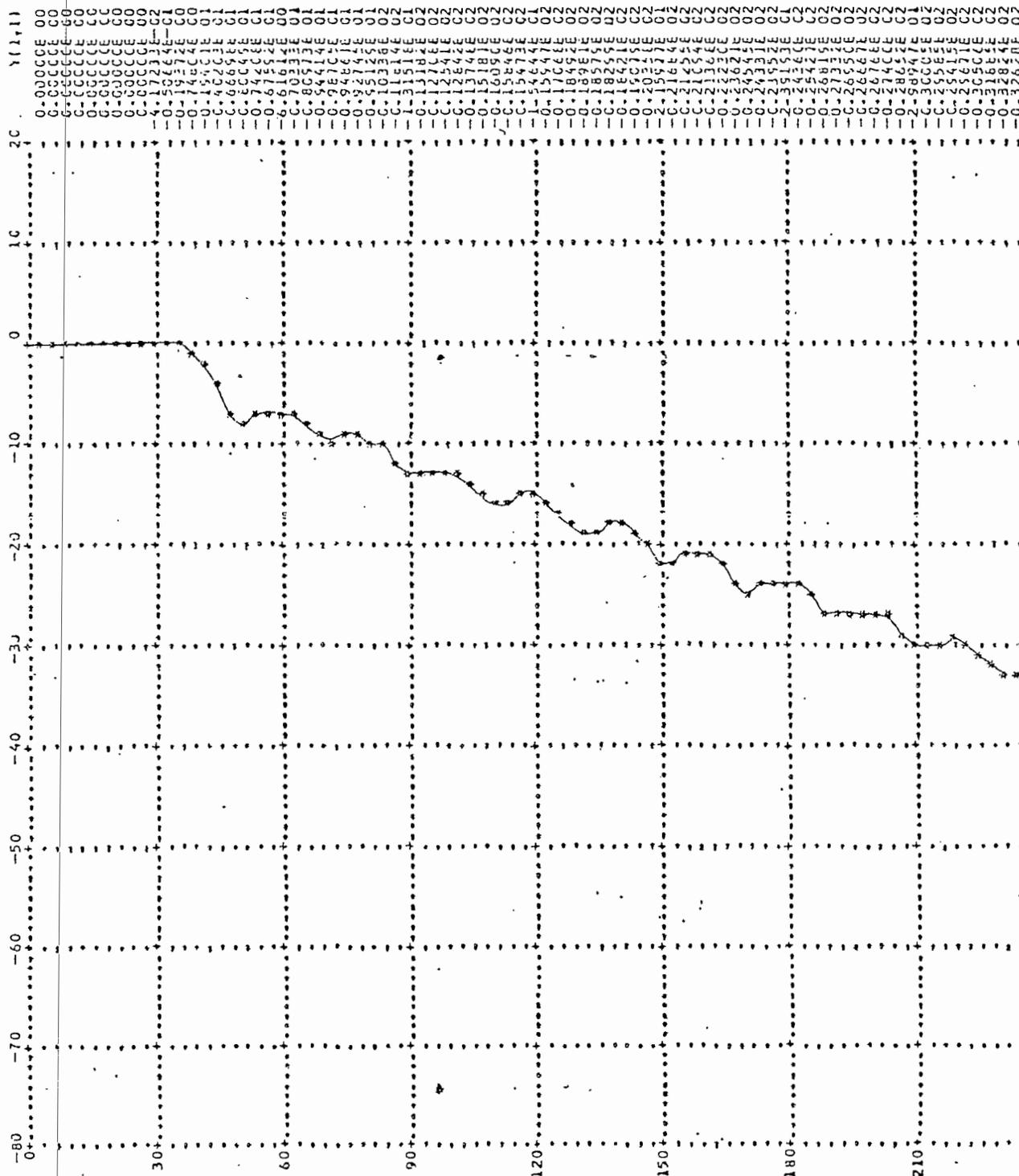
ANÁLISIS DE POTENCIA

FACTORES DE MULTIPLICACION N=20



9
VARIACION LL - A VELOCIDAD ROTACION

FACTOR DE MULTIPLICACION N/R= 50000



TESIS DE GRADU

MODELO DIGITAL DE LA MAQUINA SINCRONICA PARA EL ESTUDIO DE FALLAS

REALIZADO POR: A. FONSO VASQUEZ

ISAT I

LIMITE 240 INICIO 5 FIN 240 PASO 0.00042

G5=0.0

CCRTOCIRCUITU UL LAS FASES a Y C

PARAMETROS DE LA MAQUINA

RKO= 0.04639
XKO= 0.30701
XLD= 0.008204
XLPD= 0.13498
RKO= 0.56775
XKO= 0.56775
XLD= 0.56775
XLPD= 1.00000
RKO= 0.56803
XKO= 0.56803
XLD= 0.56803
XLPD= 1.00000

DATOS PARA COMULIONES INICIALES

I=1, ACCION ROTURA, I=2 ACCION GENERADORA

I=2
KVA= 0.00000 VA= 0.12049 0.00000 PHI=0.2703560 VAEB= 376.99900

RESULTADOS INICIALES

T	PQ	PD	KQ	KD	FD	IQ	ID	IFD	WR	IA	AROT	DELTA	TE
0.000	0.0000	0.1205	0.0000	0.1205	0.1498	0.0000	0.0000	0.2175	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

FACTOR DE MULTIPLICACION NjA= 10

Y11,11

50

40

30

20

10

J

-10

-20

-30

-40

-50

01

00

01

02

02

00

01

02

02

01

01

01

02

02

01

00

01

01

00

02

01

00

01

02

01

00

01

02

01

00

01

02

01

00

01

02

01

00

01

02

01

00

01

02

01

00

01

02

01

00

01

02

01

00

01

02

01

CON LINEA DE BASE 0

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

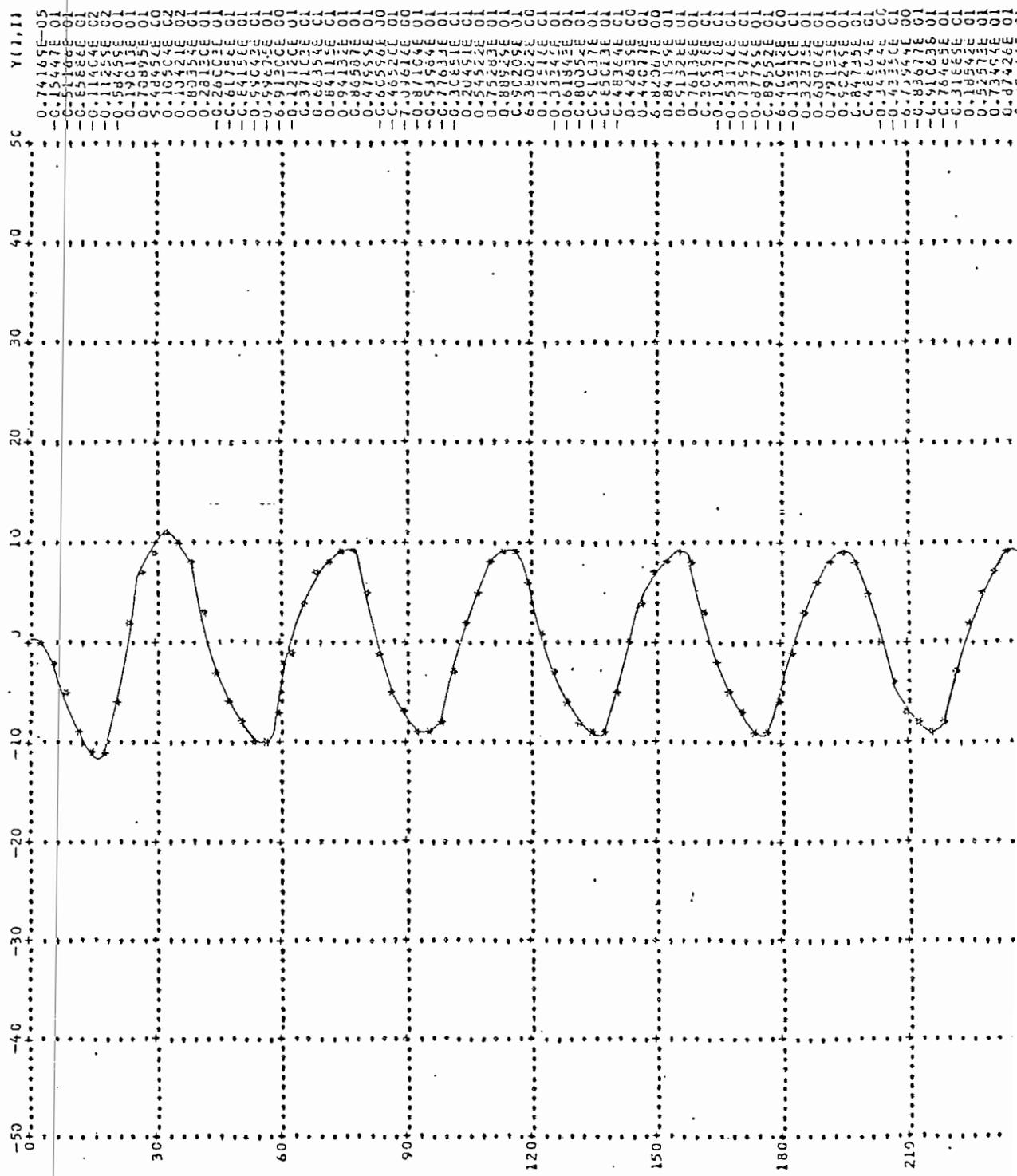
00

00

00

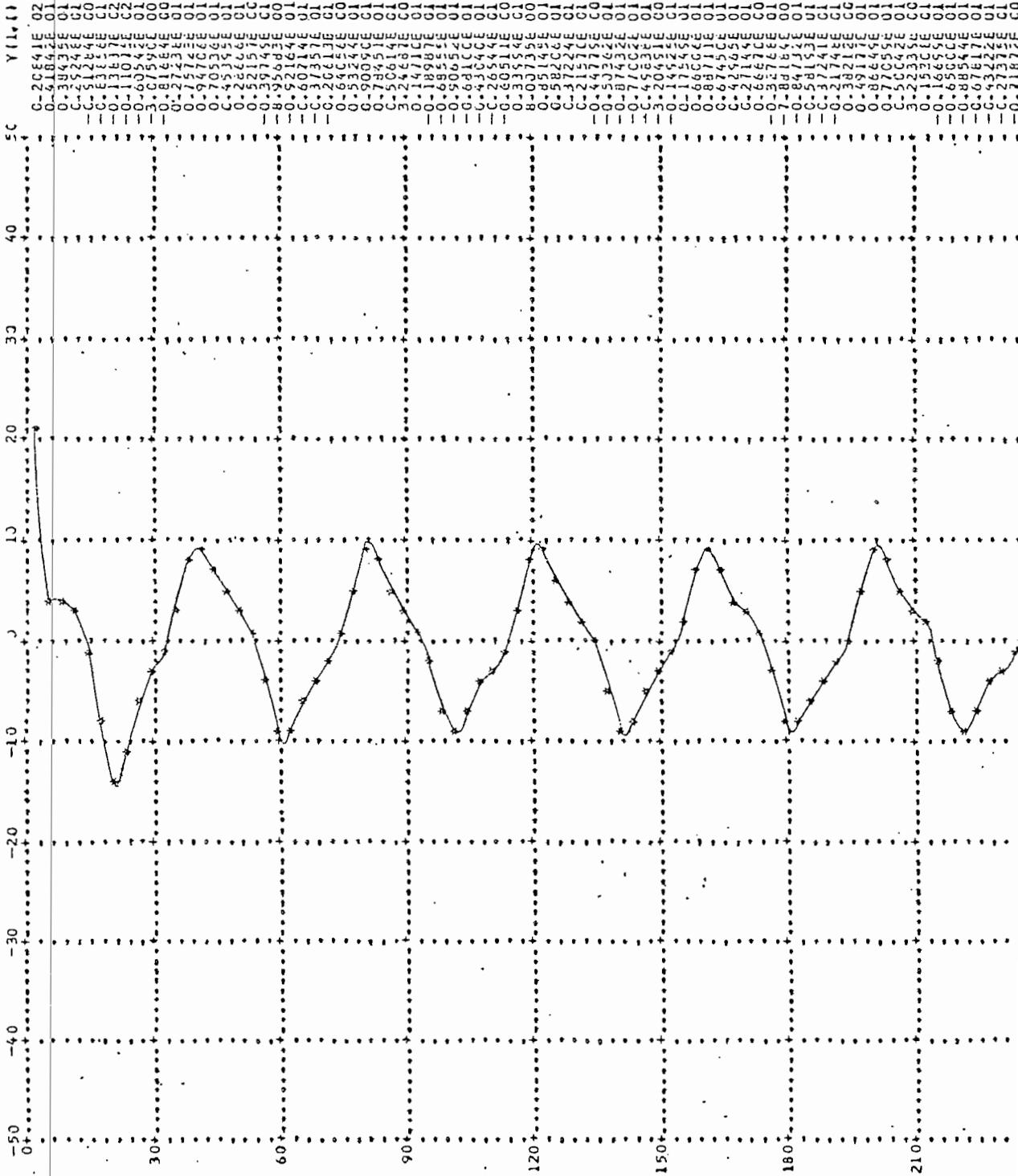
CORRIENTE DE FASE C

FACTOR DE MULTIPLICACION N_{SA} = 10



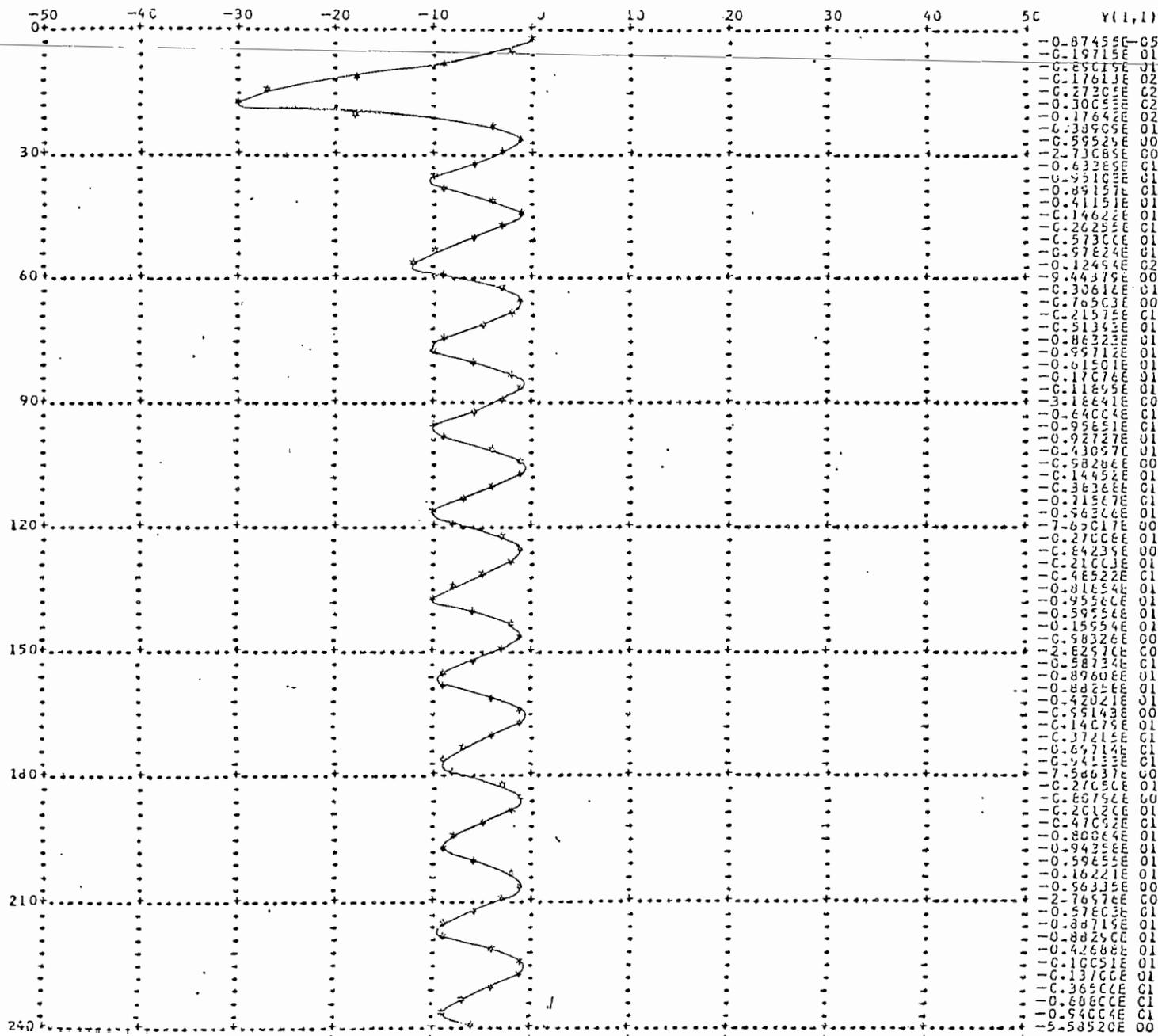
VOLUJE A-C

FACTOR DE MULTIPLICACION NSA=10



TORQUE ELECTROMAGNETICO

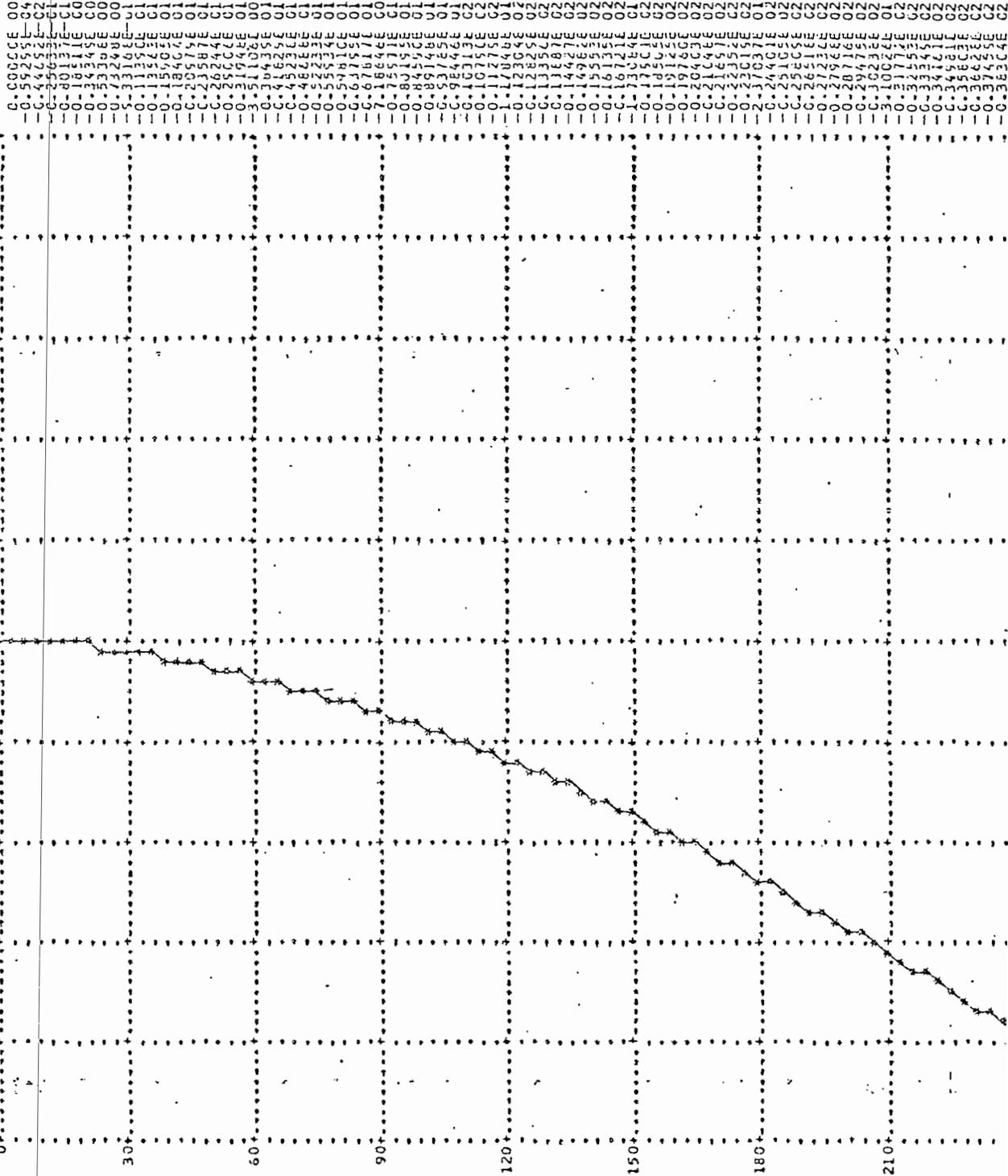
FACTOR DE MULTIPLICACION NT=200



FACTOR DE MULTIPLICACION N0=2000

Y (1,1)

0
-50
-40
-30
-20
-10
J
10
20
30
40
50



TESIS DE GRADU

MODELO DIGITAL DE LA MAQUINA SINCRONICA PARA EL ESTUDIO DE FALLAS

REALIZADO POR: ALONSO VAJUEZ

ISAT 1

LIMITE 240 INICIO 28 FIN 240 PASO 0.00042

US=1.0

CCRTCIRCUITO FASE B -FASE C

PARAMETROS DE LA MAQUINA

RS= 0.03374 RKQ= 0.04039 RKD= 0.02723 RFD= 0.98803
ALS= 0.04146 XAC= 0.30701 XAD= 0.55403 ALK= 0.24437
ALKD= 0.00204 XLFD= 0.13498 HMAC= 1.05000 VAER1= 1.00000

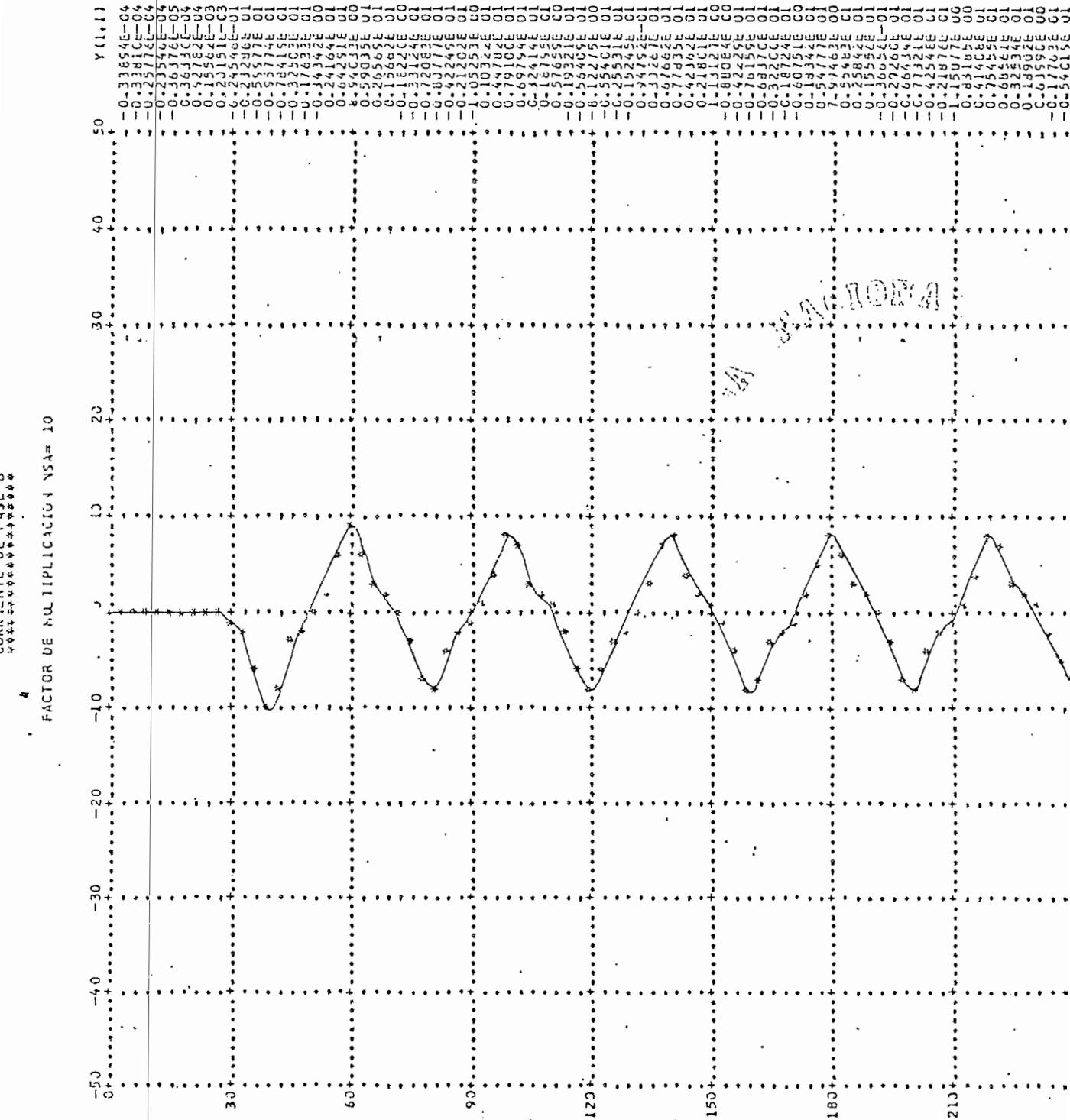
DATOS PARA CONDICIONES INICIALES

I=1, ACCION MUTUA, I=2 ACCION GENERADORA

I=2
KVA= 0.00000 VA= 0.12049 0.00000 PHI=-0.2703560 VAEB= 376.59500

RESULTADOS INICIALES

T	PQ	PD	KC	KD	FD	IQ	ID	IFD	IF	IA	ARCT	DELTA	IC
0.000	0.0000	0.1205	0.0000	0.1235	0.1498	0.0000	0.0000	0.2175	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000



FACTOR DE MULTIPLICACION NSA= 10

1961 NACIONAL

CORRIJONIL DE FASE

FACTOR DE MULTIPLICACION N5A= 10

Y (1,1)

50

40

30

20

10

0

-10

-20

-30

-40

-50

0.74051E-05

0.59666E-04

0.41651E-04

0.85035E-04

0.11970E-03

0.12444E-03

0.97720E-04

0.70544E-01

0.12403E-02

0.81495E-01

0.33333E-01

0.10057E-01

0.46577E-01

0.77428E-01

0.10088E-02

0.71177E-01

0.52470E-01

0.22747E-01

0.55303E-01

0.85105E-01

0.44215E-01

0.43476E-00

0.07235E-00

0.60537E-01

0.85035E-01

0.50720E-01

0.29372E-01

0.20980E-01

0.20980E-01

0.97200E-01

0.22342E-01

0.38397E-01

0.10057E-01

0.76170E-01

0.85035E-01

0.20980E-01

0.74700E-01

0.31100E-01

0.85035E-01

0.20980E-01

0.66000E-01

0.85035E-01

0.20980E-01

0.85035E-01

0.20980E-01

0.74700E-01

0.31100E-01

0.85035E-01

0.20980E-01

0.66000E-01

30

60

90

120

150

180

210

240

270

300

330

360

INSTITUTO TECNOLÓGICO NACIONAL

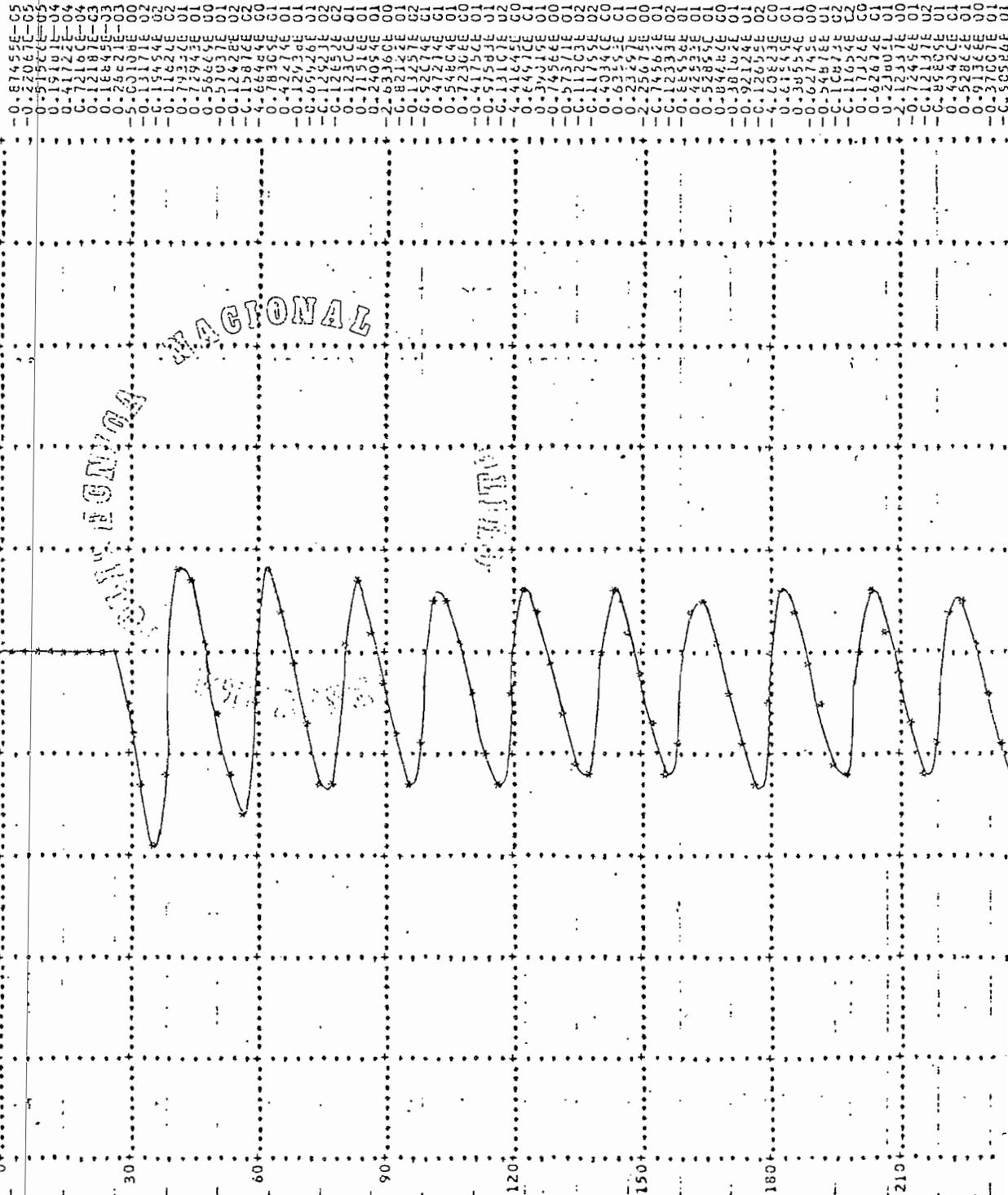
1974

1974

TONULL ELECTRONAJMETICO

FACIOL DE MULTIPLICACION NT=200

Y (1,1)
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50



50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50

50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50

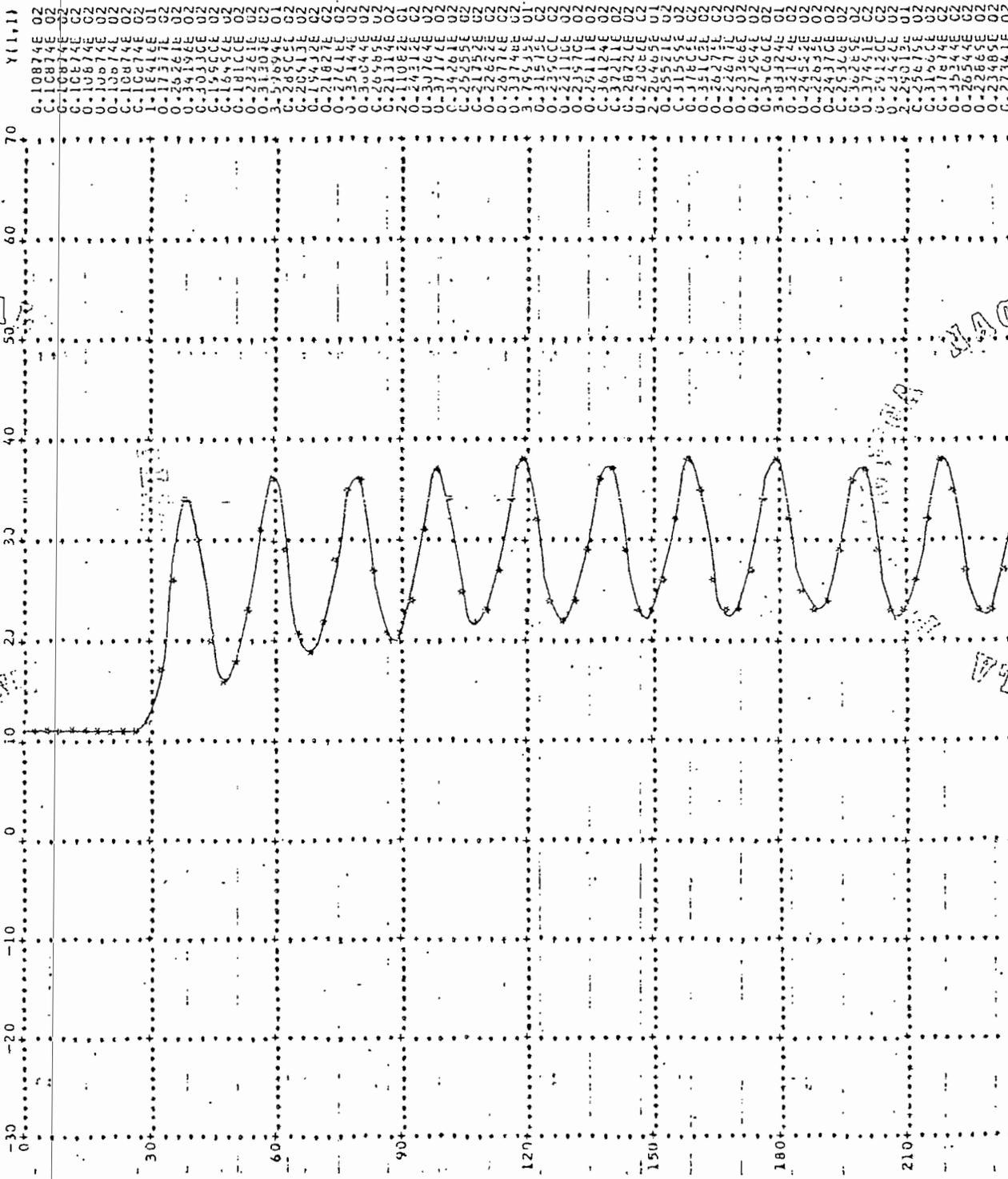
FACTOR DE MULTIPLICACION NO=2000/7A



IONA

CCALIMIE DE EXITACION

FACTOR DL MULTIPLICACION NIFD= 50



MAC

TA

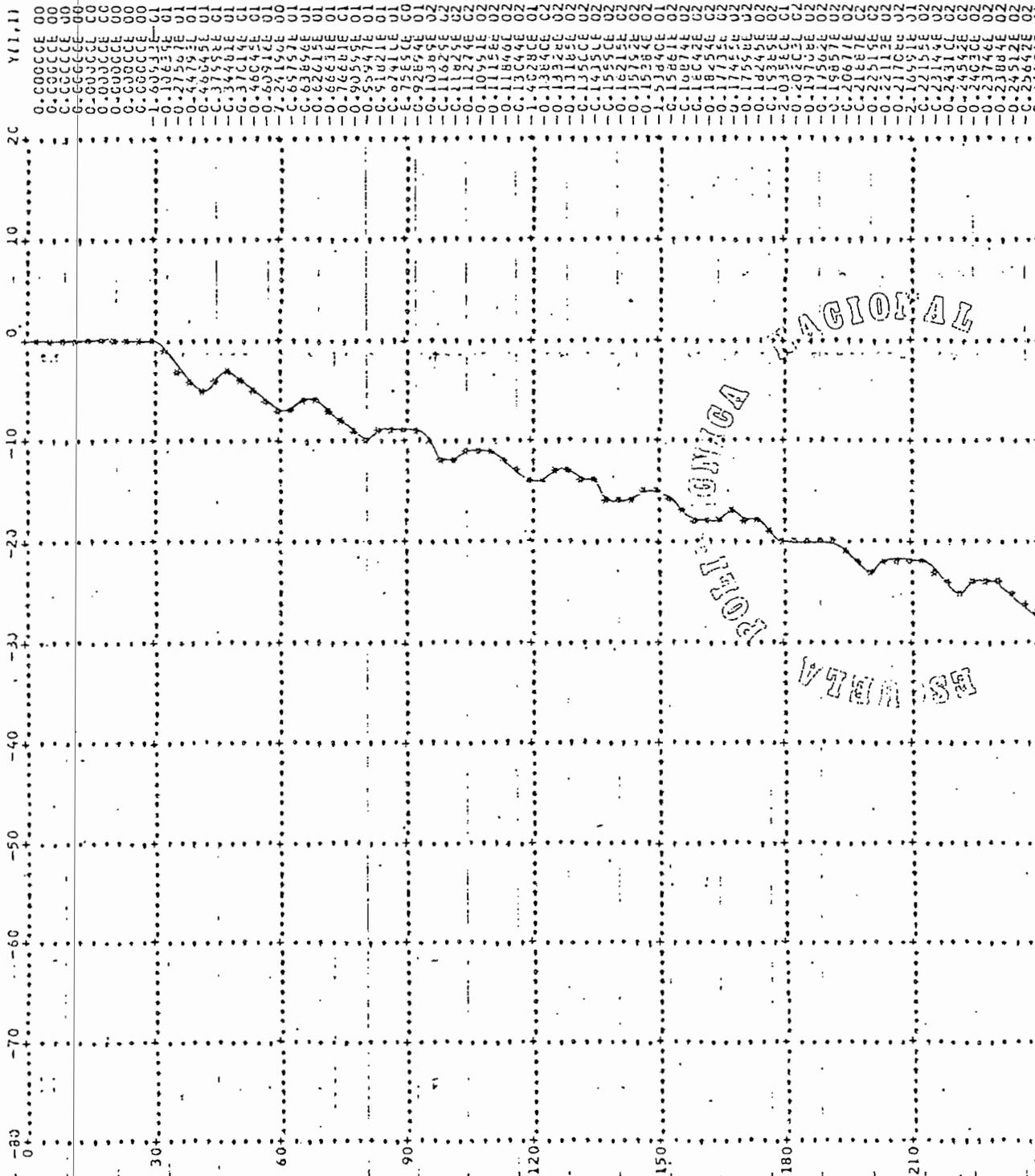
TA

TA

TA

FACTOR DE MULTIPLICACION NVR= 50000

WIND SPEED



UNIVERSIDAD

NACIONAL

TESIS DE GRADU

MODELO DIGITAL DE LA MÁQUINA SINCRÓNICA PARA EL ESTUDIO DE FALLAS

REALIZADO POR: A. FONSECA Y ALVAREZ

ISAT 1

QUITO

LIMITE 240 INICIO 10 FIN 210 PASE 0.00042

G5=0.00

CORRECTIVO DE LAS TRES FASES

PARAMETROS DE LA MÁQUINA

RS=	0.03681	RKQ=	0.04039	RKD=	0.00000	RFQ=	0.00000
XLS=	0.04146	XAC=	0.30701	XAD=	0.00000	XLQ=	0.00000
ALKD=	0.00204	XLFD=	0.13498	HMAQ=	1.00000	ALQ=	1.00000

DATOS PARA CONDICIONES INICIALES

I=1, ACCION MUTUA, I=2 ACCION GENERADORA

I=2	KVA=	0.00000	VA=	0.12049	0.00000	PHI=	-0.2703560	VAEB=	376.99500
-----	------	---------	-----	---------	---------	------	------------	-------	-----------

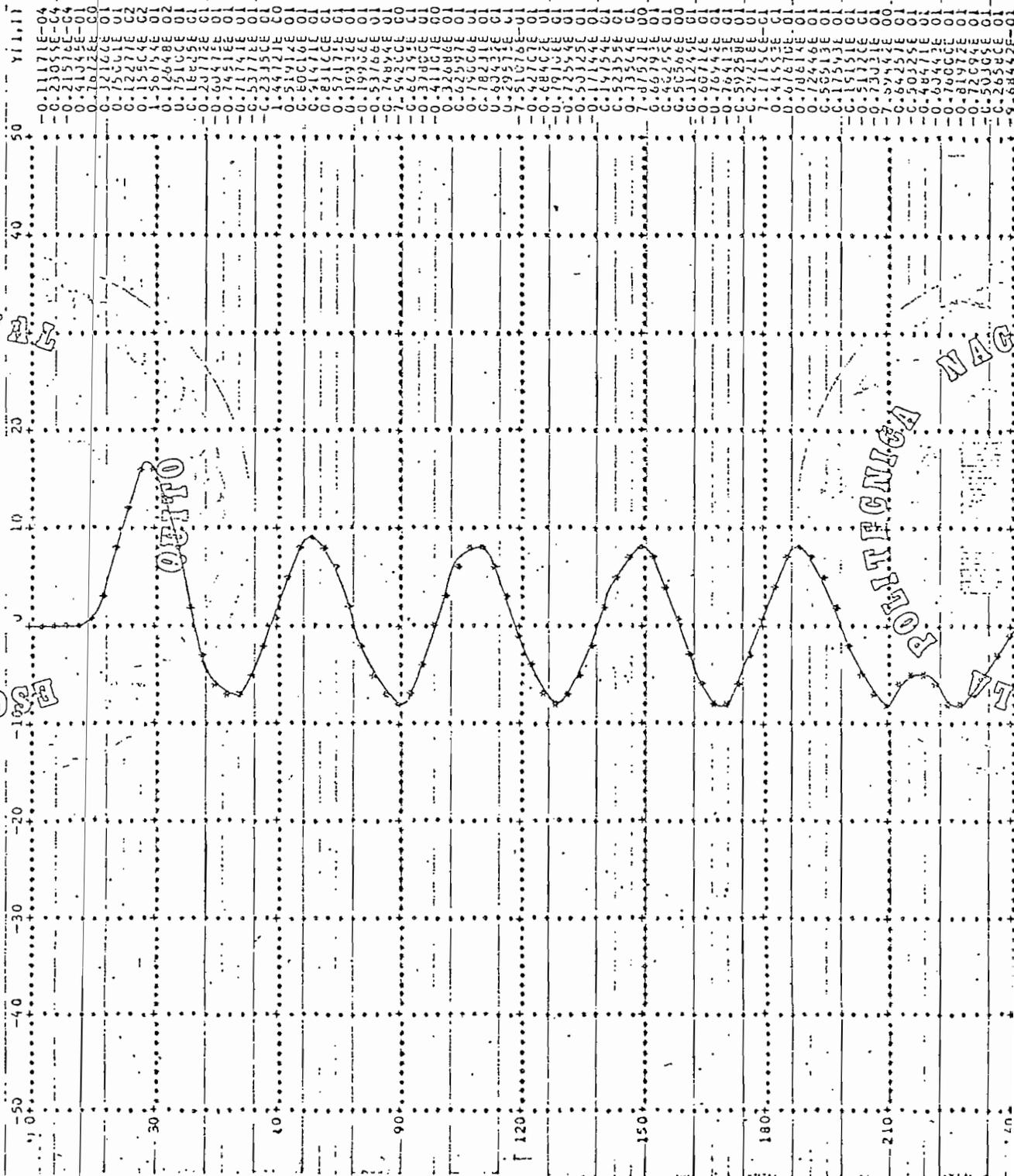
RESULTADOS INICIALES

T	PQ	PD	KQ	KD	FD	IQ	ID	IFD	WR	IA	AROT	DELTA	TE
0.000	0.0000	0.1205	0.0000	0.1205	0.1498	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

POLITECNICA

C-51

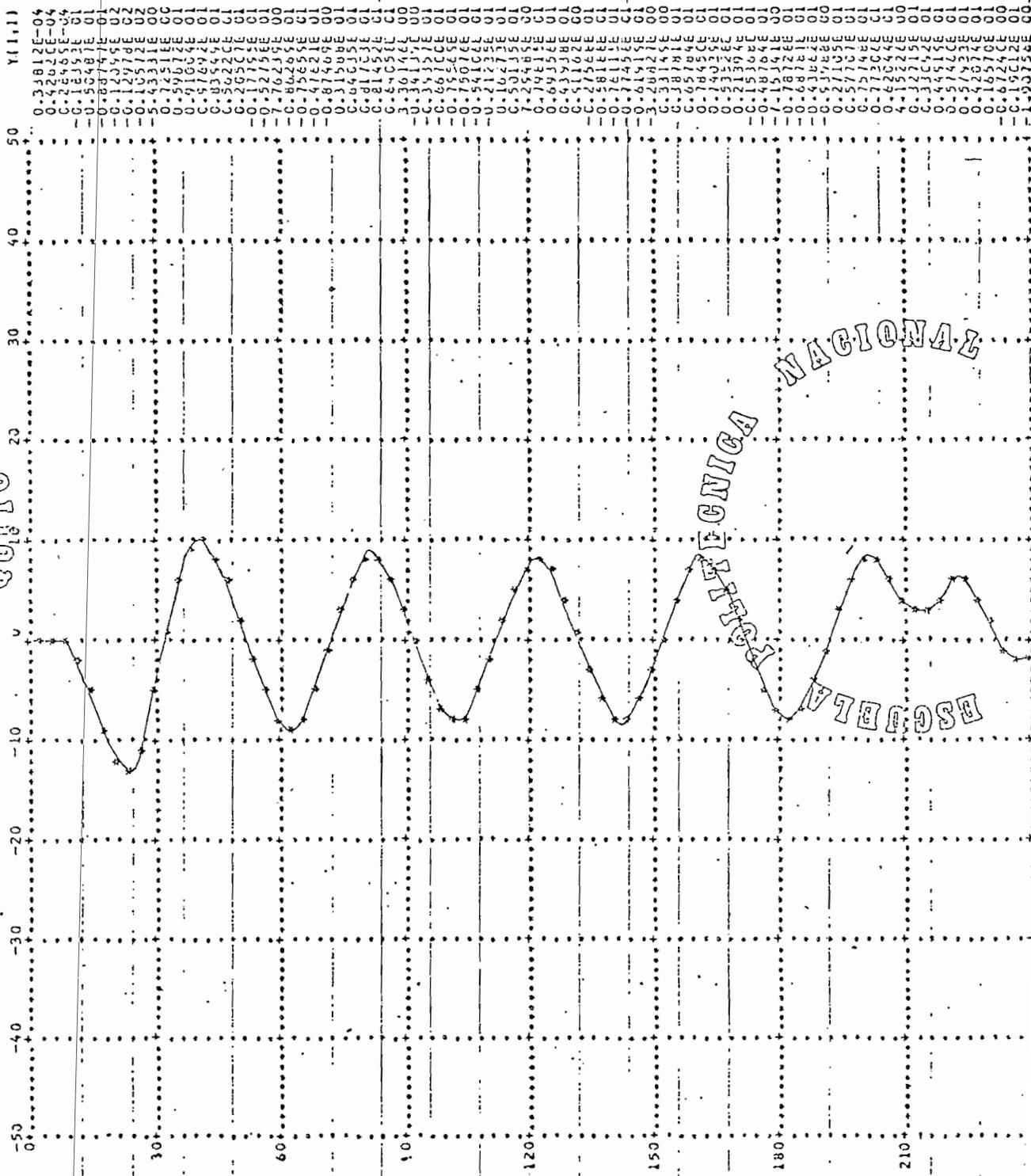
IONAL
FACI
DE REPLICACION ASA* 10



TECNICA
NAG

FACTOR DE MULTIPLICACION NSA* 10

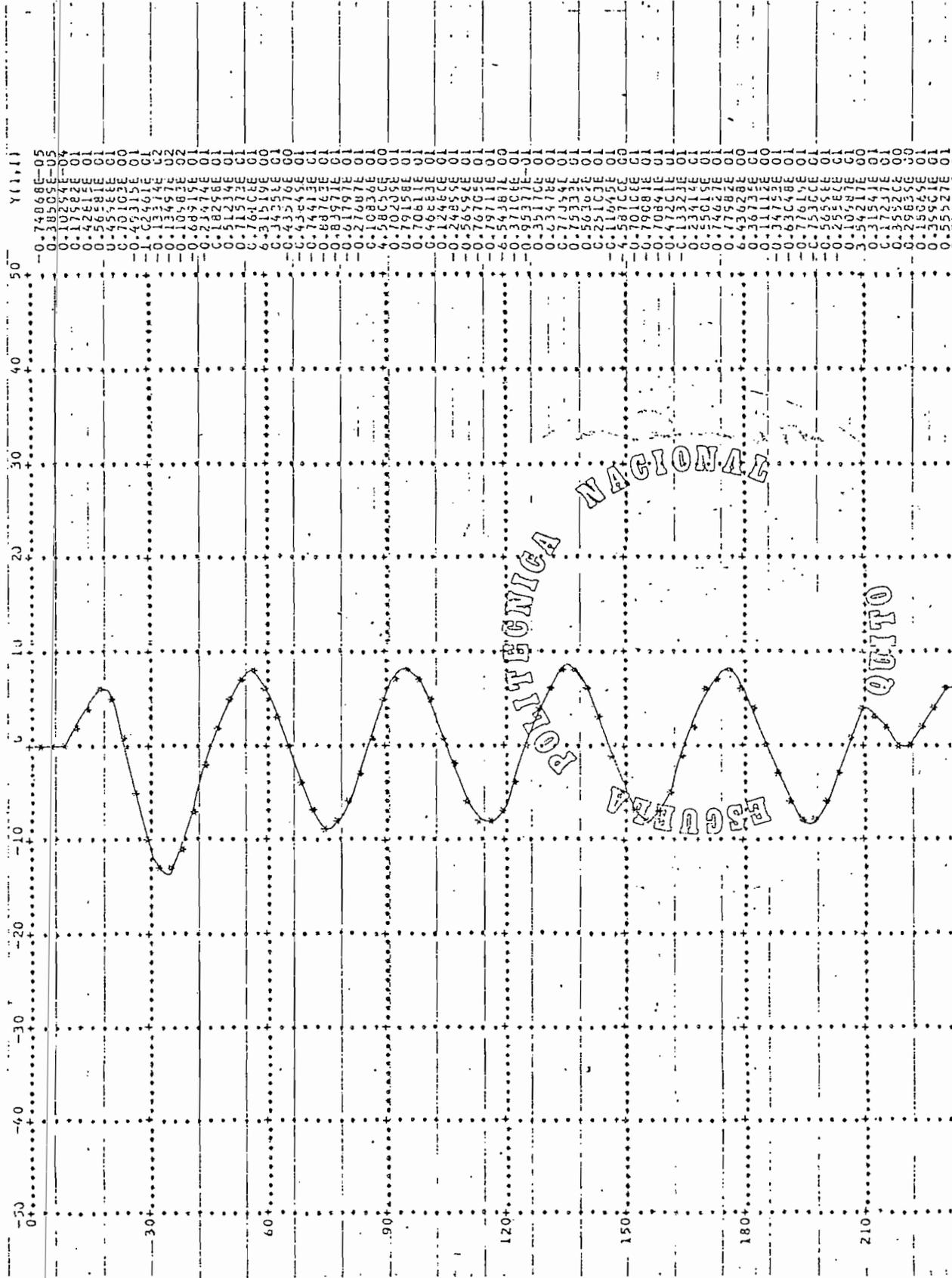
QUITO



Y(1,1) 04
0.3381200000000000
0.4202000000000000
0.4599500000000000
0.4548700000000000
0.4074700000000000
0.3377900000000000
0.2557200000000000
0.1653100000000000
0.0716700000000000
0.0000000000000000
0.0769200000000000
0.1554500000000000
0.2220000000000000
0.2750000000000000
0.3175000000000000
0.3420000000000000
0.3555000000000000
0.3520000000000000
0.3390000000000000
0.3150000000000000
0.2814000000000000
0.2341000000000000
0.1833000000000000
0.1295000000000000
0.0750000000000000
0.0192000000000000
0.0000000000000000
0.0541000000000000
0.1077000000000000
0.1691000000000000
0.2354000000000000
0.3045000000000000
0.3735000000000000
0.4392000000000000
0.4992000000000000
0.5510000000000000
0.5922000000000000
0.6295000000000000
0.6615000000000000
0.6870000000000000
0.7048000000000000
0.7138000000000000
0.7130000000000000
0.7025000000000000
0.6825000000000000
0.6532000000000000
0.6150000000000000
0.5685000000000000
0.5150000000000000
0.4555000000000000
0.3915000000000000
0.3245000000000000
0.2560000000000000
0.1875000000000000
0.1205000000000000
0.0565000000000000
0.0000000000000000
0.0475000000000000
0.0955000000000000
0.1435000000000000
0.1905000000000000
0.2365000000000000
0.2810000000000000
0.3240000000000000
0.3645000000000000
0.4020000000000000
0.4360000000000000
0.4660000000000000
0.4915000000000000
0.5125000000000000
0.5290000000000000
0.5405000000000000
0.5475000000000000
0.5495000000000000
0.5460000000000000
0.5375000000000000
0.5245000000000000
0.5065000000000000
0.4840000000000000
0.4565000000000000
0.4245000000000000
0.3880000000000000
0.3475000000000000
0.3035000000000000
0.2565000000000000
0.2070000000000000
0.1555000000000000
0.1025000000000000
0.0485000000000000
0.0000000000000000
0.0435000000000000
0.0875000000000000
0.1300000000000000
0.1705000000000000
0.2085000000000000
0.2435000000000000
0.2750000000000000
0.3025000000000000
0.3260000000000000
0.3450000000000000
0.3590000000000000
0.3675000000000000
0.3710000000000000
0.3690000000000000
0.3620000000000000
0.3505000000000000
0.3345000000000000
0.3140000000000000
0.2895000000000000
0.2615000000000000
0.2305000000000000
0.1970000000000000
0.1615000000000000
0.1235000000000000
0.0835000000000000
0.0415000000000000
0.0000000000000000
0.0415000000000000
0.0835000000000000
0.1235000000000000
0.1615000000000000
0.1970000000000000
0.2305000000000000
0.2615000000000000
0.2895000000000000
0.3140000000000000
0.3345000000000000
0.3505000000000000
0.3620000000000000
0.3690000000000000
0.3710000000000000
0.3675000000000000
0.3590000000000000
0.3450000000000000
0.3260000000000000
0.3025000000000000
0.2750000000000000
0.2435000000000000
0.2085000000000000
0.1705000000000000
0.1295000000000000
0.0875000000000000
0.0475000000000000
0.0000000000000000

CURRILANTE DE FASE C

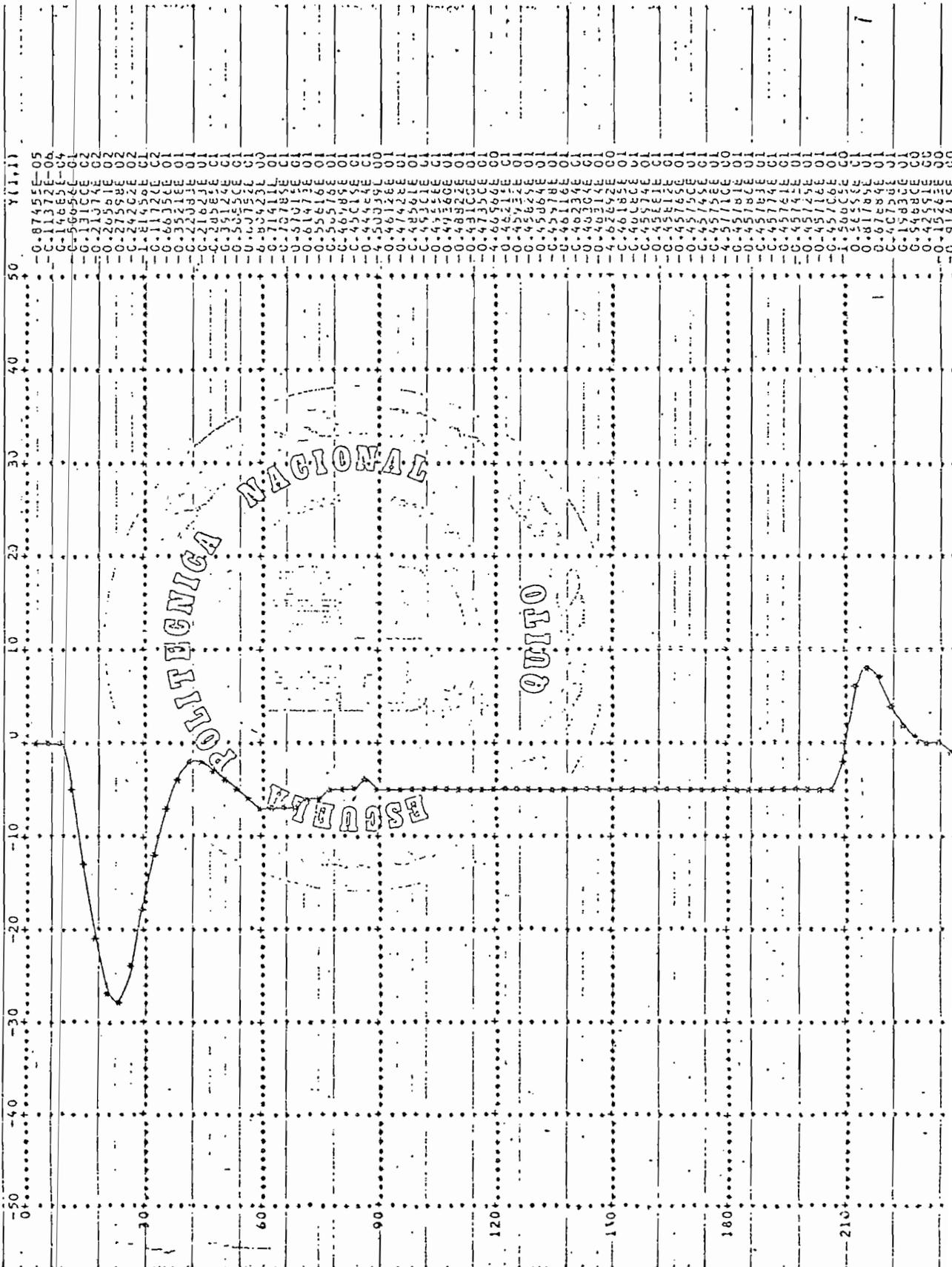
FACTOR DE MULTIPLICACION NSA= 10



Y(1,1)

0.7486805
0.385058
0.0255478
0.0175228
0.0428181
0.0555555
0.0701028
0.0433158
0.0255478
0.0175228
0.0134577
0.0105678
0.0091748
0.0082558
0.0075228
0.0070102
0.0067010
0.0064331
0.0062554
0.0061752
0.0061345
0.0061056
0.0060917
0.0060825
0.0060752
0.0060701
0.0060670
0.0060643
0.0060625
0.0060617
0.0060613
0.0060610
0.0060609
0.0060608
0.0060607
0.0060606
0.0060605
0.0060604
0.0060603
0.0060602
0.0060601
0.0060600
0.0060599
0.0060598
0.0060597
0.0060596
0.0060595
0.0060594
0.0060593
0.0060592
0.0060591
0.0060590
0.0060589
0.0060588
0.0060587
0.0060586
0.0060585
0.0060584
0.0060583
0.0060582
0.0060581
0.0060580
0.0060579
0.0060578
0.0060577
0.0060576
0.0060575
0.0060574
0.0060573
0.0060572
0.0060571
0.0060570
0.0060569
0.0060568
0.0060567
0.0060566
0.0060565
0.0060564
0.0060563
0.0060562
0.0060561
0.0060560
0.0060559
0.0060558
0.0060557
0.0060556
0.0060555
0.0060554
0.0060553
0.0060552
0.0060551
0.0060550
0.0060549
0.0060548
0.0060547
0.0060546
0.0060545
0.0060544
0.0060543
0.0060542
0.0060541
0.0060540
0.0060539
0.0060538
0.0060537
0.0060536
0.0060535
0.0060534
0.0060533
0.0060532
0.0060531
0.0060530
0.0060529
0.0060528
0.0060527
0.0060526
0.0060525
0.0060524
0.0060523
0.0060522
0.0060521
0.0060520
0.0060519
0.0060518
0.0060517
0.0060516
0.0060515
0.0060514
0.0060513
0.0060512
0.0060511
0.0060510
0.0060509
0.0060508
0.0060507
0.0060506
0.0060505
0.0060504
0.0060503
0.0060502
0.0060501
0.0060500

FACTOR DE MULTIPLICACION NI=200



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
QUITO
VENECIA

NACIONAL

CORRIENTE DE EXCITACION

FACTOR DE MULTIPLICACION NIHD= 50

ESUSA

QUITO

POLITECNICA

Y(1,1)

7C

60

40

30

20

10

0

-10

-20

-30

-40

-50

02

02

02

02

02

02

02

02

02

02

02

02

02

02

02

02

02

02

02

02

02

02

02

02

02

02

02

02

02

02

02

02

02

02

02

02

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

00

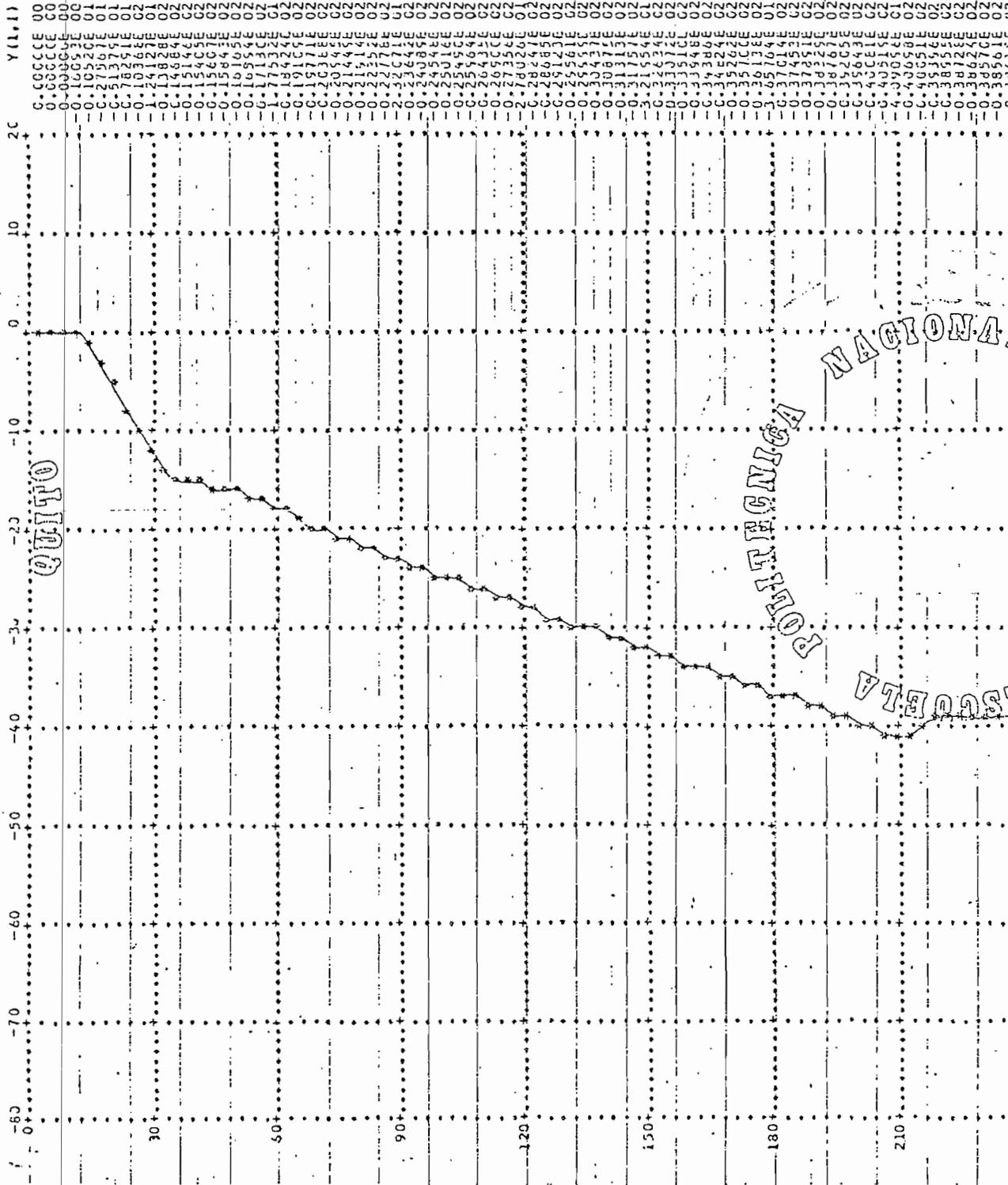
00

00

00

VARIACION DE LA VELOCIDAD RUTINICA

FACTOR DE MULTIPLICACION NVR= 50000



NACIONAL

TECNICA

VELOCIDAD

A P E N D I C E D

DATOS DE LA MAQUINA SINCRONICA UTILIZADOS EN LA SIMULACION

1. CARACTERISTICAS PRINCIPALES

MARCA: SIEMENS

Trifásica, polos salientes, y devanados de damping.

SN = 3.5 KVA.

VN = 230 V. (en delta)

IN = 8.7 A.

f = 60 Hz.

Vex. = 110 V.

fp. = 0.8

2. VALORES BASE

KVAB = 3.5 KVA.

V_B(fn) = 230 V. (conexión Y)

I_B = 5.07246 A.

Z_B = 45.34286 Ω

3. PARAMETROS FUNDAMENTALES DE LA MAQUINA SINCRONICA

r_s = 1.22Ω

T_d'0 = 0.10721 seg.

X_d = 27 Ω

T_d"0 = 0.0187 seg.

X_d' = 6.8 Ω

T_d' = 0.027 seg.

$$\begin{aligned} X_{d''} &= 4.0 \, \Omega & T_{d''} &= 0.011 \text{ seg.} \\ X_q &= 15.8 \, \Omega & T_{q''0} &= 0.03631 \text{ seg.} \\ X_{q''} &= 8.05 \, \Omega & T_{q''} &= 0.01843 \text{ seg.} \\ X_o &= 1.88 \, \Omega \end{aligned}$$

Siendo:

- X_d = Reactancia sincrónica de eje directo.
- $X_{d'}$ = Reactancia transitoria de eje directo.
- $X_{d''}$ = Reactancia subtransitoria de eje directo.
- X_q = Reactancia sincrónica de eje en cuadratura.
- $X_{q''}$ = Reactancia subtransitoria de eje en cuadratura.
- $T_{d'0}$ = Constante de tiempo transitoria de eje directo de circuito abierto.
- $T_{d'}$ = Constante de tiempo transitoria de eje directo de cortocircuito.
- $T_{d''0}$ = Constante de tiempo subtransitoria de eje directo de circuito abierto.
- $T_{d''}$ = Constante de tiempo subtransitoria de eje directo de cortocircuito.
- $T_{q''0}$ = Constante de tiempo subtransitoria de eje en cuadratura de circuito abierto.
- $T_{q''}$ = Constante de tiempo subtransitoria de eje en cuadratura de cortocircuito.

Los valores para la simulación son:

Para desconexión de Fases, se utiliza los valores utilizados en el trabajo

"MODELO Y SIMULACION DIGITAL DE LA MAQUINA SINCRONICA CON UNA FASE ABIERTA Y CON RECONEXION INCLUIDA LA SATURACION" y para los casos de cortocircuito presentados, los datos utilizados en el trabajo "FALLAS ASIMETRICAS EN MAQUINAS SINCRONICAS", en los dos casos se incluye en el valor de resistencia de armadura el valor de la resistencia conectada en serie con las fases para obtener los resultados experimentales en dichos trabajos.

- DESCONEXION DE FASES

r_s	=	2.219646 Ω	r_{kd}	=	1.22554 Ω
X_{1s}	=	1.879796 Ω	X_{1kd}	=	3.719694 Ω
X_{ad}	=	25.11972 Ω	r_{kq}	=	1.831283 Ω
X_{aq}	=	13.91983 Ω	X_{1kq}	=	11.079736 Ω
r_{fd}	=	0.772866 Ω			
X_{1fd}	=	6.119993 Ω			

Los cuales ya fueron definidos en el punto 1.3.

- CORTOCIRCUITO DE FASES

La diferencia en relación a los valores dados para desconexión de fases, es únicamente en la resistencia de armadura y en la resistencia del devanado de excitación.

Para todos los casos de cortocircuito:

$$r_{fd} = 44.8 \Omega$$

Para cortocircuito fase-tierra:

$$r_s = 1.53 \Omega$$

Para cortocircuito fase-fase:

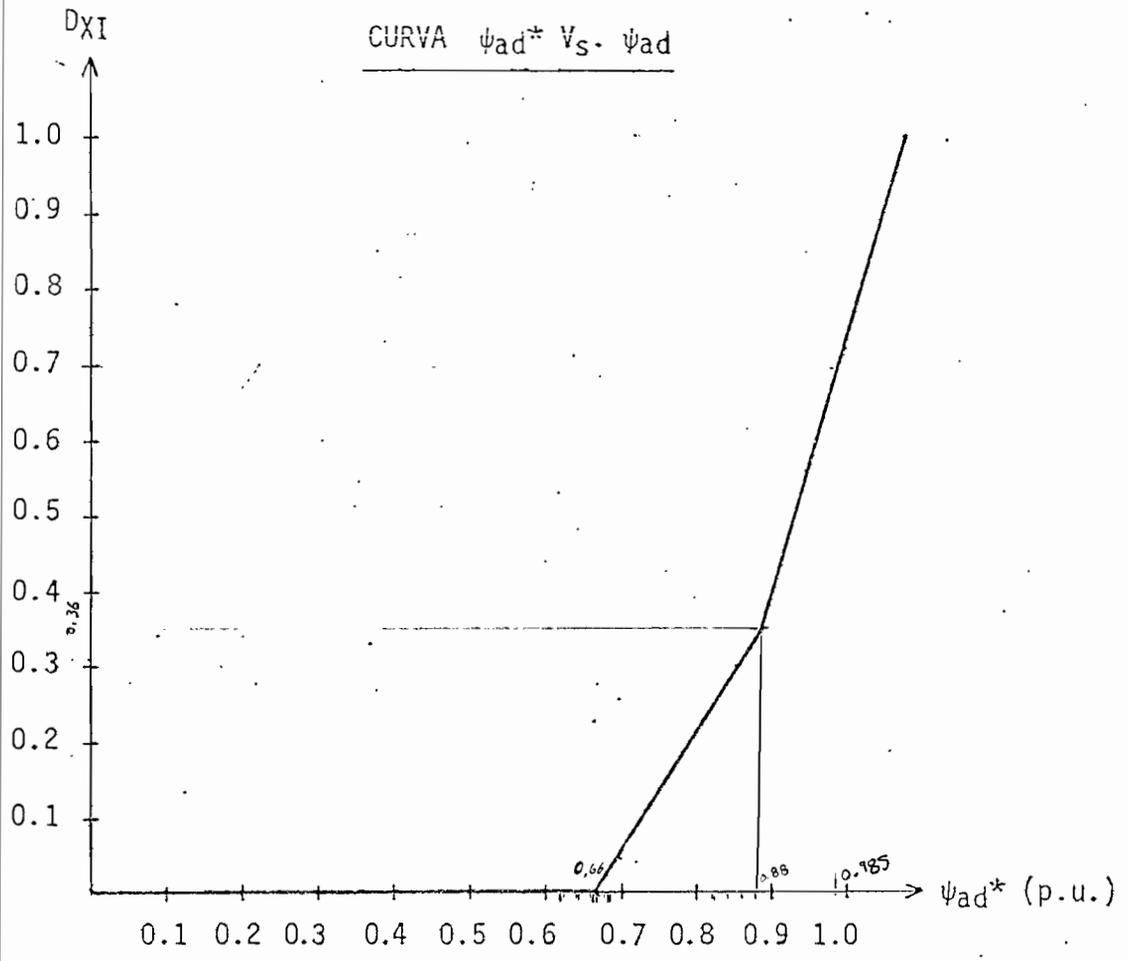
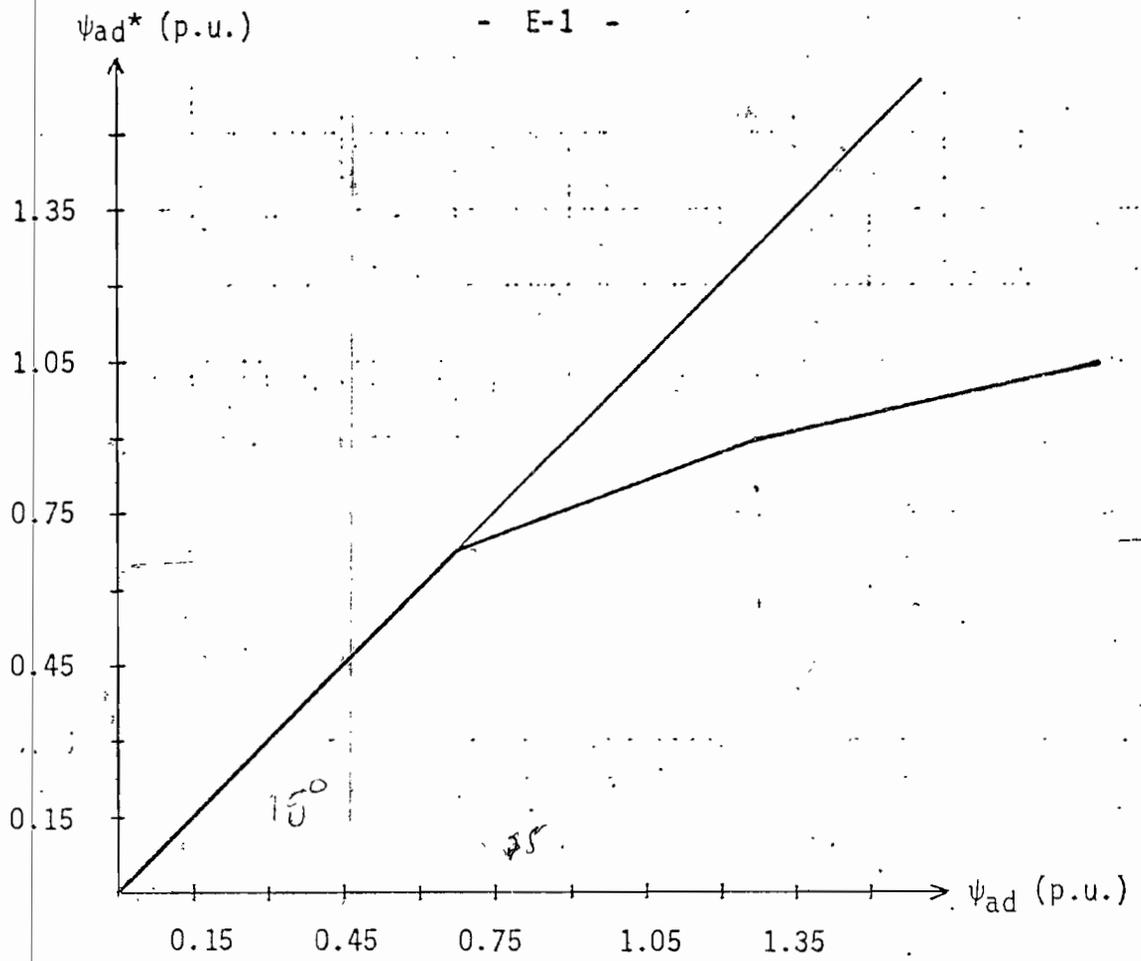
$$r_s = 1.67 \Omega$$

Para cortocircuito fase-fase-tierra:

$$r_s = 1.55 \Omega$$

A P E N D I C E E

CURVA DE SATURACION PARA LA MODELACION DIGITAL



CURVA PARA LA MODELACION DIGITAL

REFERENCES

1. T.N. SAHA, T.K. BASU, "Analysis of asymmetrical faults in synchronous generators by d-q-0 frame of reference", PROC. IEE , Vol. 119, 1972, pp. 587-595.
2. R.E. DOHERTHY, C.A. NICKLE, "Synchronous Machines - IV", Trans. AIEE, Vol. 47, 1928, pp.457-492.
3. C.A. NICKLE, C.A. PIERCE, M.L. HENDERSON, "Single-Phase Short-Circuit Torque of a Synchronous Machine", Trans. AIEE, Vol. 49, 1932, pp. 966-971.
4. E. CLARKE, C.N. WEYGANDT, C. CONCORDIA, "Overvoltages Caused by Unbalanced Short Circuits ", Trans. AIEE, Vol. 57, 1938, pp. 453-467.
5. M.D. ROSS, E.I. KING, "Turbine-Generator Rotor Heating During Single-Phase Short Circuits", Trans. AIEE, Vol. 72, 1953, pp. 40-45.
6. P.L. ALGER, R.F. FRANKLIN, C.E. KILBOURNE, J.B.. McCLURE, "Short-Circuit Capabilities of Synchronous Machines for Unbalanced Faults", Trans. AIEE, Vol. 72, 1953, pp. 394-403.
7. R.F. LAWRENCE, R.W. FERGUSON, "Generator Negative-Sequence Currents for Line-to-Line Faults", Trans. AIEE, Vol. 72, 1953, pp. 9-16.

8. A.E. FITZGERALD, CHARLES KINGSLEY JR., ALEXANDER KUSKO, "Teoría y Análisis de las Máquinas Eléctricas", Ed. Hispano Europea, Barcelona, 1975.
9. I.L. KOSOW, "Máquinas Eléctricas y Transformadores", Ed. Reverté, S.A., Barcelona, 1980.
10. WILLIAM D. STEVENSON, "Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia", McGraw-Hill Latinoamericana, S.A. 2da. Ed., Bogotá, 1979.
11. DIEGO CALDERON, "Modelo y Simulación Digital de la Máquina Síncrona con una Fase Abierta y con Reconexión Incluida la Saturación", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1983.
12. JORGE LOZA, "Simulación de la Máquina de Inducción Trifásica en un Sistema de Coordenadas Arbitrarias de Referencia", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1982.
13. MIGUEL LUCIO, "Fallas Asimétricas en Máquinas Síncronas", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1981.
14. JESUS JATIVA, "Modelo Digital de Máquinas Síncronas Incluida la Saturación", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1981.
15. GALO NUÑEZ, "Simulación Digital de la Máquina Síncrona para Comportamiento Dinámico", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1981.