

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

TESIS DE GRADO

"SIMULACION DIGITAL DE LA MAQUINA SINCRONICA
PARA COMPORTAMIENTO DINAMICO"

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

GALO GERARDO NUÑEZ VILLACRES

QUITO, MARZO 1981

CERTIFICACION

Certifico que el presente trabajo
fue realizado en su totalidad por
el señor Galo G. Nuñez Villacrés.



ING. MENTOR POVEDA A.
Director de Tesis

AGRADECIMIENTO

Al Señor Ingeniero Méntor Poveda, Guía y Colaborador del Proyecto.

A los miembros del Departamento de Potencia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y del Centro de Computo.

A todos, mi más sincero agradecimiento.

EN MEMORIA DE MI HERMANO FABIAN

INDICE

Contenido	Página
INTRODUCCION	
CAPITULO I	
MODELO MATEMATICO	
1.1 Modelos matemáticos disponibles	1
1.2 Ecuación de las concatenaciones de flujo	5
1.3 Modelo matemático escogiendo concatenaciones de flujo como variables de estado.	6
1.4 Recuperación de las corrientes	9
1.5 Representación del sistema mecánico	10
CAPITULO II	
SIMULACION DE LA MAQUINA SINCRONICA	
2.1 Método de representación del modelo en el Computador digital	13
2.2 Condiciones iniciales de operación	13
2.2.1 Ecuaciones en estado estable	15
2.2.2 Diagramas Fasoriales	19
2.3 Método de solución del sistema de ecuaciones diferenciales no lineales	23
2.4 Período de Integración	26

Contenido	Página
2.5 Programa Digital	27
2.5.1 El programa principal	31
2.5.2 Subprograma CINIP	31
2.5.3 Función RUNGE	32
2.5.4 Subrutina PLOT	33
CAPITULO III	
APLICACIONES DEL PROGRAMA	
3.1 Incremento del Torque	34
3.2 Cortocircuito Trifásico	36
3.3 Incremento del Voltaje de excitación	47
CAPITULO IV	
ANALISIS Y COMPARACION DE RESULTADOS	
4.1 Experimentación de laboratorio con las perturbaciones usadas en la aplicación del programa	52
4.1.1 Incremento brusco del torque de la Máquina Impulsora	52
4.1.2 Cortocircuito Trifásico	58
4.1.3 Incremento del Voltaje de Excitación	61
4.1.4 Parámetros de la Máquina Experimentada	61

Contenido	Página
4.2 Comparación de los resultados del programa digital y de los resultados experimentales	63
4.2.1 Resultados que son comparados	63
4.2.2 Incremento brusco del torque de la Máquina Impulsora	63
4.2.3 Cortocircuito Trifásico	66
 CAPITULO V	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
REFERENCIAS	73
 APENDICES :	
APENDICE A	
Diagrama de Flujo de la Simulación Digital	75
APENDICE B	
Listado del Programa	76
APENDICE C	
Manual de uso del programa Simulación Digital de la Máquina Síncronica	82
APENDICE D	
Características del Equipo empleado en la experimentación	87
APENDICE E	
Valores Base. Corrección de Parámetros.	89

S U M A R I O

En el presente proyecto se realiza la Simulación Digital de la Máquina Sincrónica para comportamiento dinámico; creando así la posibilidad de predecir su comportamiento en cualquier forma de operación.

En forma resumida la tesis ha sido desarrollada así:

Se discuten las ventajas y desventajas de los modelos de tallados corrientemente en uso para análisis dinámico de máquinas sincrónicas. El modelo planteado en función de concatenaciones de flujo es llevado al programa digital para ser utilizado en varias aplicaciones de comportamiento dinámico. Finalmente se comparan los resultados obtenidos en el computador y los experimentales; lográndose resultados satisfactorios.

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

Uno de los dispositivos fundamentales en un sistema eléctrico de potencia es la máquina sincrónica; por esta razón es indispensable desarrollar técnicas que permitan investigar como actúa este componente en cualquier estado de operación aislado o formando parte de una gran red eléctrica. Una de las formas de lograr el objetivo antes planteado y que se está difundiendo actualmente en nuestro medio es el de realizar la simulación del sistema físico en computadores para lo cual se requiere de modelos matemáticos; destacando que, cada día los modelos son orientados a que los fenómenos transitorios sean bien entendidos y que los cálculos sean razonablemente interpretados. Teniendo en mente lo antes expuesto, se realiza el presente trabajo de investigación el mismo que; se cree proveerá una estructura para trabajos posteriores en este campo.

C A P I T U L O I

MODELO MATEMATICO

1.1 MODELOS MATEMATICOS DISPONIBLES

Para hablar acerca de este t3pico se considera necesario plantear las ecuaciones de voltaje de la m3quina sincr3nica trif3sica elemental de dos polos como se muestra en la figura 1.1.1. |1|, puesto que la generalizaci3n a la m3quina de P polos es cuesti3n de una constante. Se asumen las siguientes restricciones:

- a) Circuito magn3tico lineal
- b) Entrehierro uniforme
- c) Distribuci3n sim3trica de los devanados del estator de tal forma que se produzca una fuerza magnetomotriz distribu3das sinusoidalmente en el entrehierro.

Antes de escribir las ecuaciones (1.1.1) cabe mencionar que 3stas son obtenidas mediante la aplicaci3n de la transformada de Park a las ecuaciones de voltaje en variables a,b,c.

| | Referencias

En la Fig. 1.1.2 se presenta un esquema de utilización de la transformada de Park a lo largo de todo este trabajo.

Las ecuaciones de voltaje en valores por unidad con la convención de signos para acción motora son:

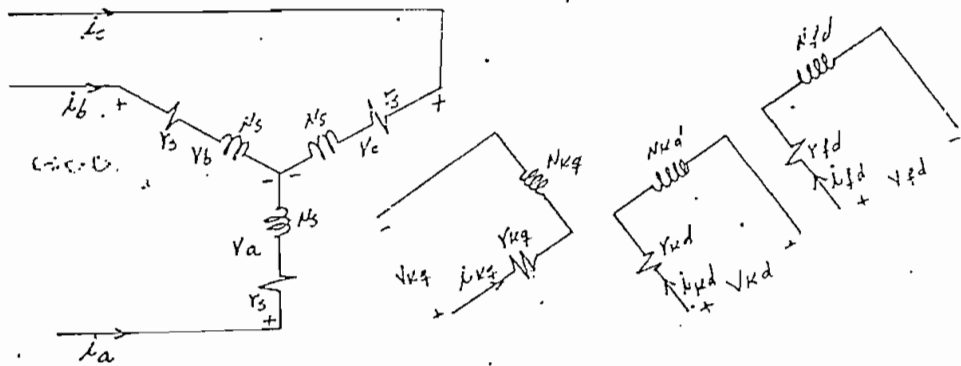
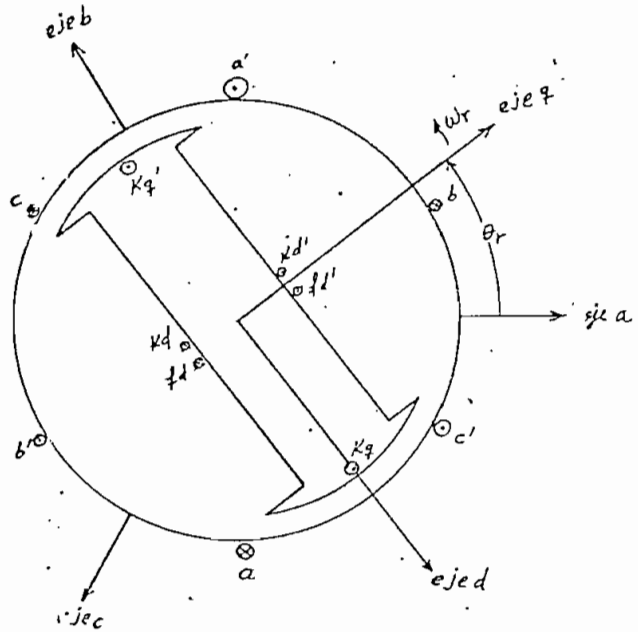


FIG. 1.1.1 Máquina trifásica elemental de polos salientes [1]

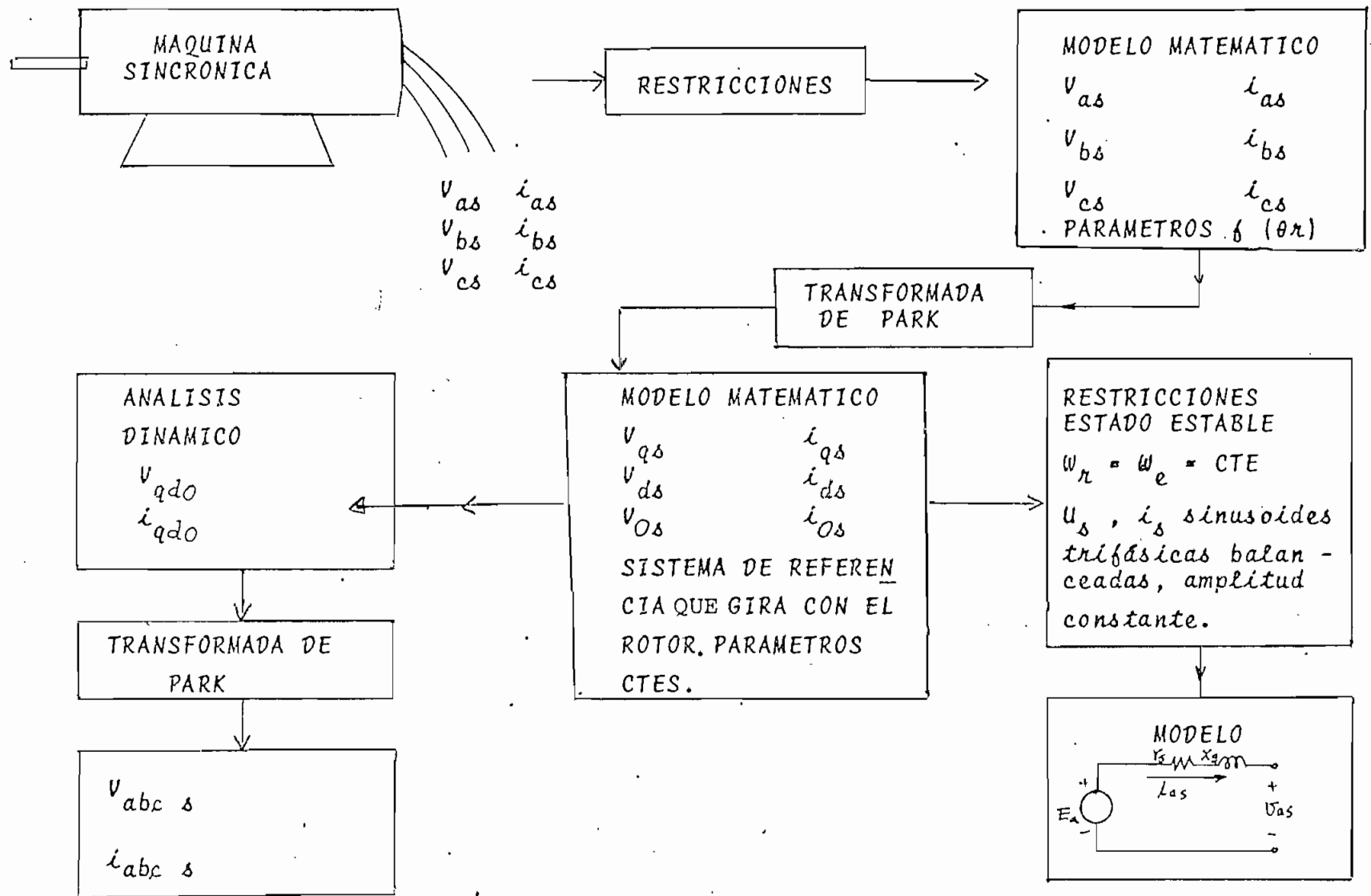


FIG. 1.1.2. Esquema de utilización de la transformada de Park

$$V_q = r_s i_q + \frac{p}{\omega b} \psi_q + \psi_d \frac{\omega r}{\omega b}$$

$$V_d = r_s i_d + \frac{p}{\omega b} \psi_d - \psi_q \frac{\omega r}{\omega b}$$

$$0 = r_{kq} i_{kq} + \frac{p}{\omega b} \psi_{kq} \quad (1.1.1)$$

$$0 = r_{kd} i_{kd} + \frac{p}{\omega b} \psi_{kd}$$

$$V_f = r_{fd} i_{fd} + \frac{p}{\omega b} \psi_{fd}$$

Las concatenaciones de flujo ψ se las definirán más adelante.

Un análisis ligero de las ecuaciones (1.1.1) conduce a afirmar que es un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales de primer orden que contienen como variables tanto corrientes como concatenaciones de flujo; pero existe también algo importante, ésto es la dependencia entre concatenaciones de flujo y corrientes de tal forma que se pueda expresar un conjunto de variables en función de otro. Específicamente concatenaciones de flujo en función de corrientes o viceversa.

Es por los motivos antes expuestos que se puede afirmar

que los modelos matemáticos más comúnmente usados en el análisis de máquinas sincrónicas son dos:

- a) Uno que se basa sobre las corrientes como variables de estado, esto es: $\underline{x}^t = (i_q, i_d, i_{fd}, i_{kq}, i_{kd})$ el cual tiene la ventaja que ofrece una relación simple entre los voltajes V_q y V_d con las variables de estado |2|.
- b) Un conjunto basado sobre concatenaciones de flujo como variables de estado, $\underline{x}^t = (\psi_q, \psi_d, \psi_{kq}, \psi_{kd}, \psi_{fd})$.

Si bien, en el modelo basado en concatenaciones de flujo la obtención de las ecuaciones de la Máquina Sincrónica es menos directa, en cambio presentan la gran ventaja de que se requiere menos esfuerzo de computación al introducir la no linealidad del núcleo. El modelo en función de las corrientes exige la obtención del flujo en cada paso, lo que implica un mayor tiempo de computación.

Por lo antes mencionado, el modelo que se escoge para el presente estudio está dado en función de concatenaciones de flujo.

1.2 ECUACION DE LAS CONCATENACIONES DE FLUJO |1|

Las ecuaciones (1.2.1) son las de las concatenaciones de

flujo por unidad de tiempo. Esta terminología de "por unidad de tiempo" se refleja en la etapa de transformar las ecuaciones de voltajes a un sistema en por unidad. Las ecuaciones en cuestión están definidas así:

$$\begin{aligned}\psi_q &= x_{ls} i_q + x_{aq} (i_q + i_{kq}) \\ \psi_d &= x_{ls} i_d + x_{ad} (i_d + i_{kd} + i_{fd}) \\ \psi_{kq} &= x_{lkq} i_{kq} + x_{aq} (i_q + i_{kq}) \\ \psi_{kd} &= x_{lkd} i_{kd} + x_{ad} (i_d + i_{kd} + i_{fd}) \\ \psi_{fd} &= x_{lfd} i_{fd} + x_{ad} (i_d + i_{kd} + i_{fd})\end{aligned}\tag{1.2.1}$$

1.3 MODELO MATEMATICO ESCOGIENDO CONCATENACIONES DE FLUJO COMO VARIABLES DE ESTADO.

La ecuación (1.1.1) se resuelve en función de las concatenaciones de flujo, dando como resultado la ecuación (1.3.1).

$$\frac{1}{\omega b} |p\psi| = |v_{q, d, f}| + |x_{mch}| |\psi|\tag{1.3.1}$$

En donde:

$$|\psi|^T = |\psi_q, \psi_d, \psi_{kq}, \psi_{kd}, \psi_{fd}|$$

$$|v_{q,d,f}|^T = |v_q, v_{d,o,o}, v_f|$$

$$[X_{mch}] = \begin{bmatrix} \frac{r_s}{x_{1s}} \left(\frac{x_{mq}}{x_{1s}} - 1 \right) & -\omega_r & \frac{r_s}{x_{1s}} \sqrt{\frac{x_{mq}}{x_{1kq}}} & 0 & 0 \\ \frac{r_s}{x_{1s}} \left(\frac{x_{md}}{x_{1s}} - 1 \right) & 0 & \frac{r_s}{x_{1s}} \sqrt{\frac{x_{md}}{x_{1kq}}} \frac{r_s}{x_{1s}} \sqrt{\frac{x_{md}}{x_{1fd}}} & 0 & 0 \\ \frac{r_{kq}}{x_{1kq}} \sqrt{\frac{x_{mq}}{x_{1s}}} & 0 & \frac{r_{kq}}{x_{1kq}} \left(\frac{x_{mq}}{x_{1kq}} - 1 \right) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{r_{kd}}{x_{1kd}} \sqrt{\frac{x_{md}}{x_{1s}}} & 0 & \frac{r_{kd}}{x_{1kd}} \left(\frac{x_{md}}{x_{1kd}} - 1 \right) & \frac{r_{kd}}{x_{1kd}} \sqrt{\frac{x_{md}}{x_{1fd}}} \\ 0 & \frac{r_{fd}}{x_{1fd}} \sqrt{\frac{x_{md}}{x_{1s}}} & 0 & \frac{r_{fd}}{x_{1fd}} \sqrt{\frac{x_{md}}{x_{1kd}}} \frac{r_{fd}}{x_{1fd}} \left(\frac{x_{md}}{x_{1fd}} - 1 \right) & \frac{r_{fd}}{x_{1fd}} \sqrt{\frac{x_{md}}{x_{1fd}}} \end{bmatrix}$$

$$X_{mq} = \frac{1}{\frac{1}{x_{1s}} + \frac{1}{x_{aq}} + \frac{1}{x_{kq}}} \quad (1.3.2)$$

$$X_{md} = \frac{1}{\frac{1}{x_{1s}} + \frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{kd}} + \frac{1}{x_{fd}}}$$

El modelo que se ha formulado es utilizado en la simulación digital y además tiene la ventaja de ser utilizado en la simulación analógica cuando ésta sea requerida, en cuyo caso las ecuaciones diferenciales deben ser modificadas de la siguiente manera:

$$p(x_i) = f_i(\underline{x}, u, t) \quad [2] \quad (1.3.3)$$

a

$$x_i = \int_0^t f_i(\underline{x}, \underline{u}, t) dt + x_i(0)$$

en donde:

$x_j, j = 1, \dots, n$ son las variables de estado, y

$u_k, k = 1, \dots, r$ son las variables de control.

Cabe destacar que las ecuaciones (1.3.1) son un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales y tiene dos tipos de no linealidades:

- a) Uno del tipo producto $x_i x_j$ (donde x_i y x_j son las variables de estado); y,
- b) El otro tipo es debido a no linealidades trigonométricas

por la presencia de $\cos \theta$ y $\sin \theta$.

Las no linealidades antes mencionadas son abordadas convenientemente (ver capítulo dos) en la simulación digital y en la simulación analógica deben ser escogidos componentes especiales para su representación.

1.4. RECUPERACION DE LAS CORRIENTES

Las corrientes que son de utilidad en este análisis considerando a la máquina conectada a un sistema trifásico simétrico, esto es con $i_0 = 0$, están representadas en la ecuación (1.4.1).

$$[i_q, i_d] = - \frac{1}{x_{1s}} [x_i] [\psi] \quad (1.4.1)$$

en donde:

$$[x_i] = \begin{bmatrix} \frac{x_{mq}}{x_{1s}} - 1 & 0 & \frac{x_{mq}}{x_{1kq}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{x_{md}}{x_{1s}} - 1 & 0 & \frac{x_{md}}{x_{1kd}} & \frac{x_{md}}{x_{1fd}} \end{bmatrix}$$

$$\{i_{q,d}\}^T = \{i_q, i_d\}$$

Las corrientes de fase pueden así ser obtenidas fácilmente mediante la aplicación de la transformada de Park [3].

(ver figura 1.1.2). La corriente de la fase a es:

$$i_a = i_q \cos \theta_r + i_d \sin \theta_r \quad (1.4.2)$$

1.5. REPRESENTACION DEL SISTEMA MECANICO

El sistema mecánico está representado por las ecuaciones (1.5.1), (1.5.2) y (1.5.3). Las tres mencionadas anteriormente permiten obtener la velocidad y el torque electromagnético, ambos en por unidad.

$$\omega_r = \frac{1}{2Hp} (T_e - T_m) \quad (1.5.1)$$

$$T_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d \quad (1.5.2)$$

En donde:

T_m = Torque de la máquina impulsora en por unidad.

H = Constante de inercia en segundos.

El ángulo de potencia está dado por (1.5.3), así:

$$\delta = \frac{\omega_b}{p} (\omega_r - \omega_e) \quad (1.5.3)$$

En donde:

ω_e = Velocidad angular eléctrica en por unidad.

ω_b = Velocidad angular eléctrica base.

El significado de todos los parámetros planteados en las ecuaciones de esta y las secciones anteriores es el que a continuación se detalla:

r_s = resistencia de armadura

x_{1s} = reactancia de dispersión del devanado de armadura.

r_{kq} = resistencia del devanado amortiguador en el eje en cuadratura,

x_{1kq} = reactancia de dispersión del devanado amortiguador en el eje en cuadratura.

r_{kd} = resistencia del devanado amortiguador del eje directo.

x_{1kd} = reactancia de dispersión del devanado del eje directo.

r_{fd} = resistencia del devanado de campo.

x_{1fd} = reactancia de dispersión del devanado de campo.

x_{aq} = reactancia de magnetización del eje en cuadratura.

x_{ad} = reactancia de magnetización del eje directo.

p = operador $\frac{d}{dt}$

* * * *

CAPITULO II

SIMULACION DE LA MAQUINA SINCRONICA

C A P I T U L O I I

SIMULACION DE LA MAQUINA SINCRONICA

2.1. METODO DE REPRESENTACION DEL MODELO EN EL COMPUTADOR DIGITAL.

El método empleado para la representación del modelo en el computador digital es visualizado en el diagrama de bloques que se muestra en la figura 2.1.1. Está orientado a describir el comportamiento dinámico de la máquina sincrónica. Cada uno de los bloques serán detallados cuando se llegue a la sección que trata del programa digital.

2.2. CONDICIONES INICIALES DE OPERACION

En todo estudio dinámico son requeridas las condiciones iniciales. Estas incluyen todas las corrientes, concatenaciones de flujo y fuerzas electromotrices para los diferentes circuitos de la máquina. Además se requiere conocer la posición inicial del rotor con respecto al eje del sistema de re

ferencia.

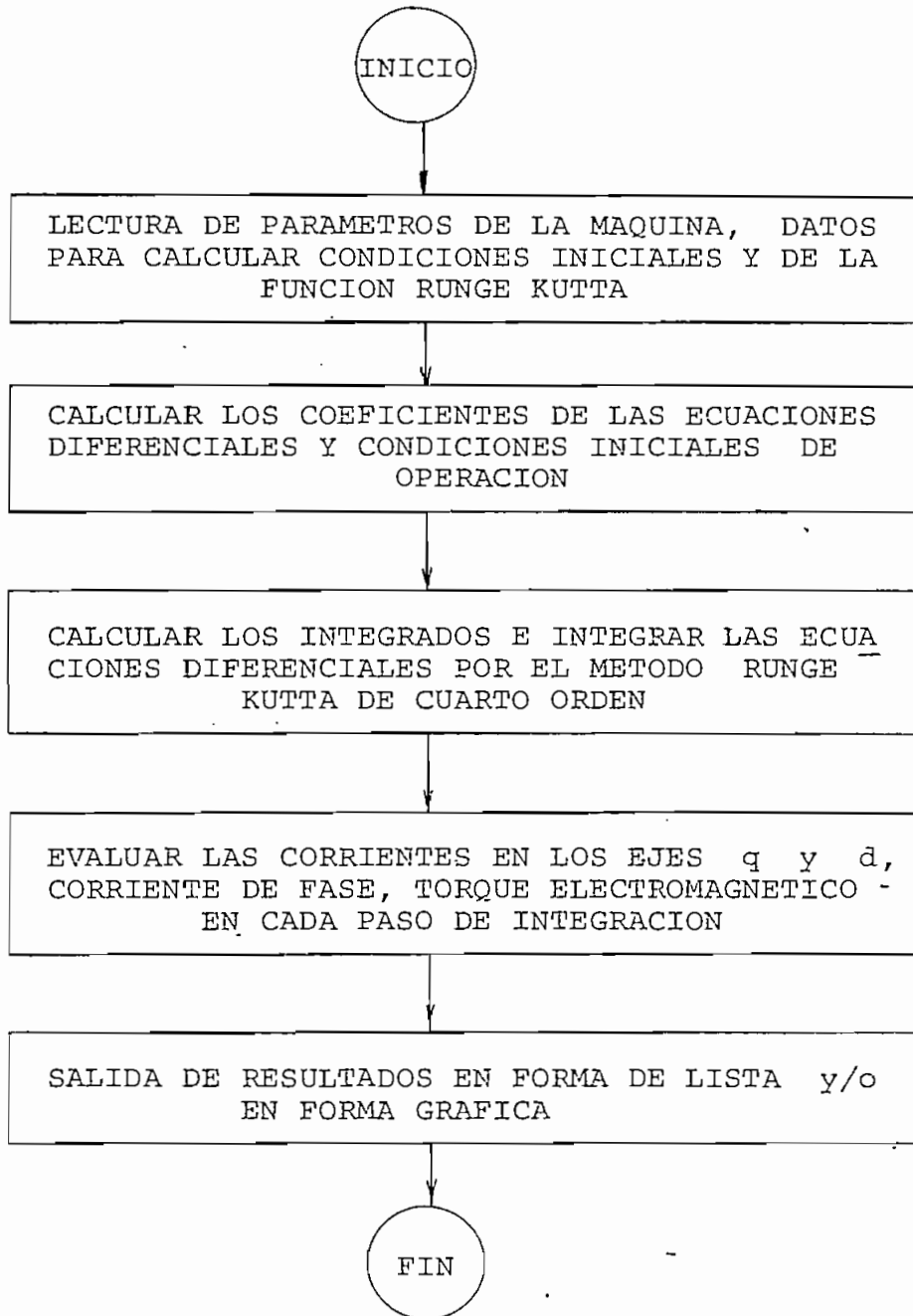


FIG. 2.1.1. Método de representación del modelo en el computador digital.

En esta sección las magnitudes antes mencionadas serán determinadas desde los datos disponibles en los terminales de la máquina, a la misma que se la considera conectada a una barra infinita.

2.2.1. ECUACIONES EN ESTADO ESTABLE

Las ecuaciones diferenciales que fueron derivadas en el capítulo primero, describen el comportamiento de la máquina sincrónica en función del tiempo. Pero, cuando la máquina opera en condiciones de estado estable las soluciones de las ecuaciones diferenciales son constantes en la referencia fija al rotor, ejes q , d , 0 , ó varían sinusoidalmente con el tiempo en la referencia del estator. En esta situación para su análisis las ecuaciones fasoriales son las más apropiadas y son estas las que van a ser derivadas en esta sección.

Es claro que se asume una operación en estado estable antes de la producción de cualquier perturbación.

De la ecuación (1.1.1) tomamos las siguientes:

$$V_q = r_s i_q + p \frac{\psi_q}{\omega_b} + \psi_d \frac{\omega_r}{\omega_b} \quad (2.2.1)$$

$$V_d = r_s i_d + p \frac{\psi_d}{\omega_b} - \psi_q \frac{\omega_r}{\omega_b}$$

$$V_f = r_{fd} i_{fd} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{fd}$$

Si en la ecuación (2.2.1) aplicamos condiciones de operación en estado estable tenemos que:

$$p \psi_q = 0$$

$$p \psi_d = 0$$

$$p \psi_{fd} = 0$$

$$y \omega_r = \omega_e$$

Transformándose la ecuación (2.2.1) a la (2.2.2) así:

$$V_q = r_s i_q + \psi_d$$

$$V_d = r_s i_d - \psi_q \tag{2.2.2}$$

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

Ahora se introduce el siguiente concepto para poder expresar las ecuaciones (2.2.2) en forma de fasores [5], de la

siguiente manera:

$$F_{qs} - jF_{ds} = \tilde{F}_{as} e^{-j\delta} \quad (2.2.3)$$

En donde F puede ser: voltaje, corriente, etc.

Con la transformación introducida antes del voltaje de la fase a es:

$$\tilde{V}_a e^{-j\delta} = V_q - jV_d \quad (2.2.4)$$

$$\begin{aligned} \tilde{V}_a e^{-j\delta} = & r_s I_q + x_d I_d + x_{ad} I_f - jr_s I_d + jx_q I_q + \\ & + x_q I_d - x_q I_d \end{aligned}$$

Se define:

$$j\tilde{I}_a e^{-j\delta} = I_d + jI_q \quad (2.2.5)$$

Reemplazando (2.2.5) en (2.2.4) tenemos:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_a e^{-j\delta} = & r_s \tilde{I}_a e^{-j\delta} + jx_q \tilde{I}_a e^{-j\delta} + (x_d - x_q) I_d + \\ & + x_{ad} I_{fd} \end{aligned}$$

$$\underline{V}_a = r_s \underline{I}_a + jx_q \underline{I}_a + [(x_d - x_q) I_d + x_{ad} I_{fd}] e^{j\delta}$$

Finalmente:

$$\underline{V}_a = (r_s + jx_q) \underline{I}_a + \underline{E}_a \quad (2.2.6)$$

En donde:

$$\underline{E}_a = [(x_d - x_q) I_d + x_{ad} I_{fd}] e^{j\delta}$$

La ecuación (2.2.6) es representada por el circuito equivalente de la figura (2.2.1). Se afirma que para esta condición de estado estable, la máquina está representada por un voltaje \underline{E}_a detrás de una impedancia.

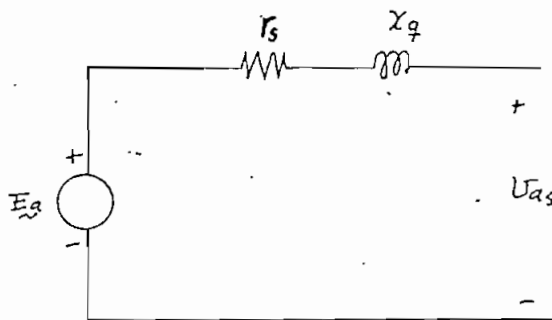


FIG. 2.2.1. Circuito equivalente de la fase (a) de la máquina sincrónica trabajando en estado estable.

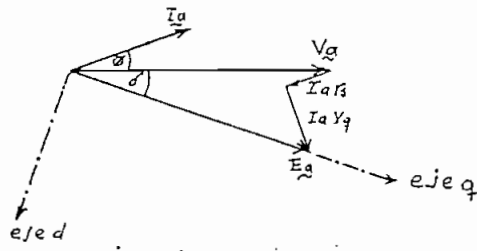
2.2.2. DIAGRAMAS FASORIALES

Los diagramas fasoriales tanto para motor como para generador son la representación gráfica de la ecuación (2.2.6); que tal como está planteada corresponde a la ecuación de voltaje de un motor que opera en estado estable. Sin embargo se supone un motor hipotético que está entregando potencia a la red y sin variar la ecuación se pueden dibujar los diagramas 2.2.2. a, b, c y d. (ver figura 2.2.2). Sobre los diagramas se hace la siguiente observación: Se han dibujado de forma tal que se realice una generalización en el cálculo de las condiciones iniciales, pudiendo la máquina sincrónica operar como motor o generador subexcitado o sobreexcitado; facilitando el cálculo de las condiciones iniciales teniendo en cuenta que I_a se la puede definir respecto al eje d, formando un ángulo de $\frac{\pi}{2} + \delta + \phi$ radianes para motor y $\pi - \phi + (\frac{\pi}{2} - \delta)$ para generador.

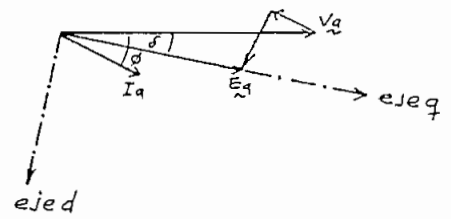
El ángulo ϕ será positivo o negativo según opere la máquina sincrónica sobreexcitada o subexcitada respectivamente.

2.2.3. CONDICIONES INICIALES

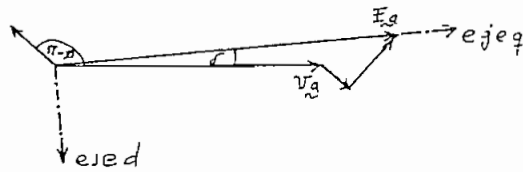
De la ecuación fasorial (2.2.6) y sus correspondientes diagramas fasoriales (figura 2.2.2) se calculan las condicio-



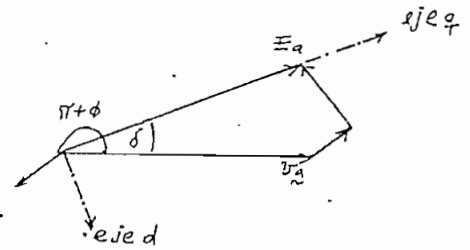
(a)



(b)



(c)



(d)

FIG. 2.2.2 Diagramas Fasoriales de la máquina sincrónica:

- (a) Motor Sobreexcitado.
- (b) Motor Subexcitado.
- (c) Generador Sobreexcitado.
- (d) Generador Subexcitado.

nes iniciales para las variables i_q , i_d , δ , i_{fd} , para lo cual se requieren de los siguientes datos del sistema: KVA/fase , V_a , ϕ y ω_r en estado estable.

Las concatenaciones de flujo son calculadas en función de las corrientes obtenidas a través de las ecuaciones fasoriales pero, debe tenerse en cuenta que, las magnitudes de los fasores son valores eficaces mientras que las magnitudes referidas en las ecuaciones de las concatenaciones de flujo son valores pico; por lo tanto todas las corrientes deben ser multiplicadas por el factor $\sqrt{2}$. Las ecuaciones utilizadas para realizar los cálculos antes mencionados son obtenidos de las (1.2.1). (Ver sección 1.2).

Con las siguientes restricciones de estado estable:

$$i_{kq} = 0$$

$$i_{kd} = 0$$

Transformándose la ecuación a:

$$\psi_q = x_q i_q$$

$$\psi_d = x_d i_d + x_{ad} i_{fd}$$

$$\psi_{kq} = x_{aq} i_q \quad (2.2.7)$$

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

$$\psi_{fd} = (x_{lfd} + x_{ad}) i_{fd} + x_{ad} i_d$$

En donde: $x_q = x_{ls} + x_{aq}$

$$x_d = x_{ls} + x_{ad}$$

La posición relativa del rotor se calcula como ya se men-
cionó antes a partir de la ecuación (2.2.6), sin embargo con
viene mencionar que, para cualquier condición de funcionamien-
to, δ viene dado por la ecuación (2.2.8).

$$\delta = \int (\omega_r - \omega_e) dt + \theta_r(o) - \theta_e(o) \quad (2.2.8)$$

Con la condición de operación en estado estable $\omega_r = \omega_e$
la posición del rotor se reduce a:

$$\delta = \theta_r(o) - \theta_e(o)$$

El cálculo de los voltajes V_q , V_d y el torque de la má-
quina impulsora T_m son calculados así:

$$V_q = V_m \text{ Cos } \delta$$

(2.2.9)

$$V_d = V_m \text{ Sen } \delta$$

El torque mecánico en estado estable se considera igual al torque electromagnético y es calculado con la relación (2.2.10).

$$T_m = T_e$$

$$T_m = \psi_{d(o)} i_{q(o)} - \psi_{q(o)} i_{d(o)} \quad (2.2.10)$$

Para terminar con esta sección se informa que el cálculo de las condiciones iniciales se realiza en una subrutina llamada CINIP que será discutida en la sección correspondiente al programa digital.

2.3. METODO DE SOLUCION DEL SISTEMA DE ECUACIONES DIFERENCIALES NO LINEALES.

Toda simulación digital en el computador debe resolver ecuaciones diferenciales en una forma discreta, es decir el dominio del tiempo es dividido a segmentos de longitud Δt y las ecuaciones diferenciales son resueltas para cada segmento.

En la figura (2.3.1) |2| se muestra un diagrama de bloques simplificado para el proceso de integración.

El algoritmo utilizado para la resolución de las ecuaciou

nes diferenciales no lineales de la máquina sincrónica es el de Runge-Kutta de cuarto orden con coeficientes de Kutta |4|.

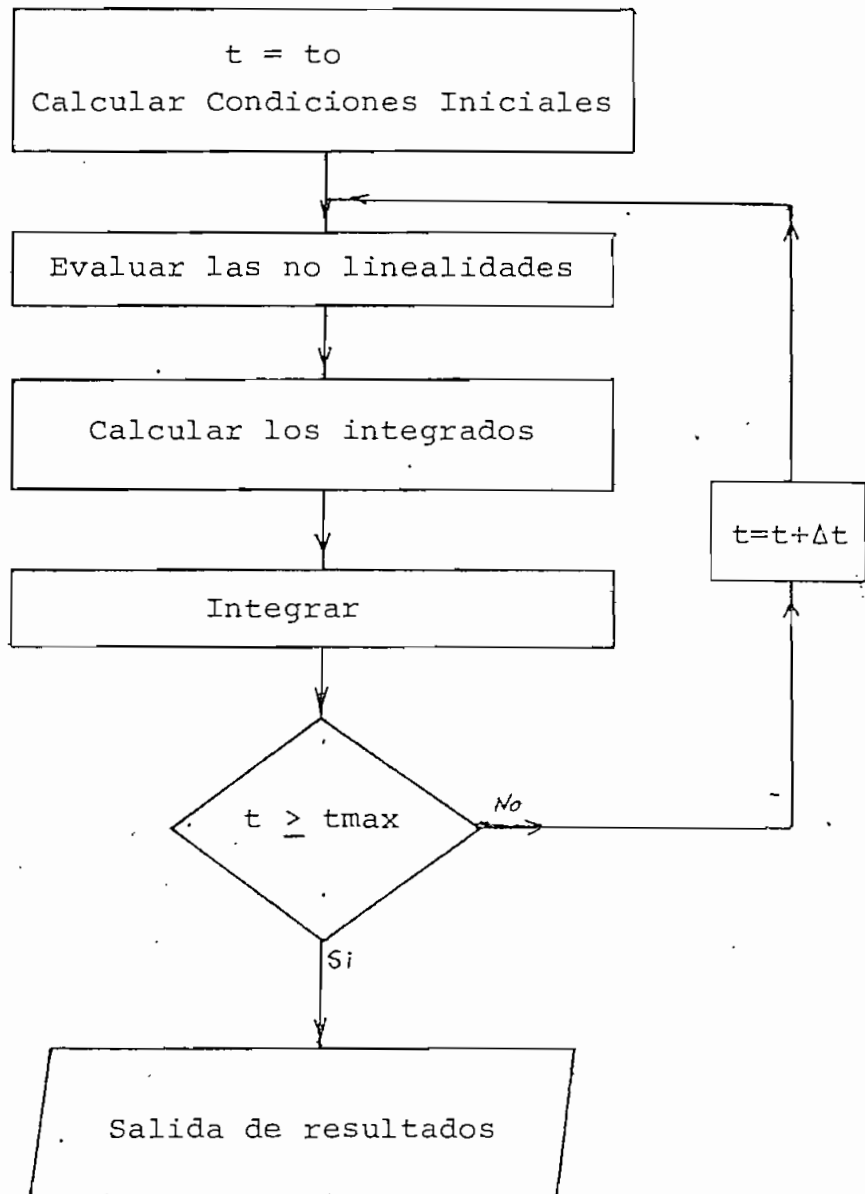


FIG. 2.3.1. Proceso de integración digital.

Inicialmente se pensó linealizar las ecuaciones diferenciales mediante algún algoritmo conocido, pero posteriormente se observó que era más factible realizar por el método que utiliza el algoritmo R-K. En este, cada nuevo valor de la variable de estado es calculado y pasa a formar parte de cualquier tipo de función matemática que sea requerida para evaluar los integrandos.

En síntesis, el algoritmo R-K de cuarto orden para m pasos de integración de una ecuación de primer grado con una condición inicial apropiada $y_i = y(x_i)$ se implementa para un sistema de n ecuaciones diferenciales de primer orden con n condiciones iniciales.

$$Y_{ji} = Y_j(x_i) \quad j = 1, 2, \dots, n$$

Donde Y_{ji} es la j ésima ecuación en el sistema de ecuaciones (2.3.1) en x_i

$$\frac{dy_1}{dx} = f_1(x, Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n)$$

$$\frac{dy_2}{dx} = f_2(x, Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n) \quad (2.3.1)$$

$$\frac{dy_n}{dx} = f_n(x, Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$$

001923

La condición inicial para el paso ceroésimo será usualmente conocida exactamente. Posteriormente las condiciones iniciales para el paso iésimo pueden aproximarse a las condiciones iniciales verdaderas $Y_j(x_i)$, $j = 1, 2, \dots, n$ ya que resultan desde la aplicación del método R-K en el $(i-1)$ ésimo intervalo.

El método de solución así descrito permite realizar en cualquier instante de tiempo la perturbación y los valores de las funciones integradas antes de la perturbación son tomados como las condiciones iniciales del siguiente intervalo de integración.

2.4. PERIODO DE INTEGRACION.

En el presente trabajo el paso de integración se ha escogido atendiendo a dos requerimientos:

- a) El poder representar satisfactoriamente un fenómeno transitorio de tal forma que se facilite su representación gráfica.
- b) El poder evaluar las funciones con una aproximación racional; es aquí donde surge la disyuntiva de escoger un paso de integración extremadamente pequeño por ejemplo;

pero el tiempo requerido por el computador puede incrementarse no sólo en horas sino en días y puede introducirse ruido en la solución.

Es por esta razón que en este trabajo se probó con pasos de integración diferentes, y se escogió el máximo de entre ellos, pero que producía los mismos resultados que el inmediatamente inferior dentro de la aproximación estimada. Además al escoger los tiempos antes mencionados no se lo hizo a priori sino que se basó en un trabajo del Doctor R. Kerkman [6] y consiste en observar las respuestas mecánicas para diferentes valores del tamaño del paso de integración. El más grande que preserva las características mecánicas esenciales corresponde a un valor más bajo del límite superior del tamaño del paso de integración. El límite superior considerado es de 0.008 seg. en las aplicaciones de la simulación aparece en lista el valor escogido para el paso de integración, sin embargo se dice de antemano que está comprendido entre 0.001 seg. y 0.006 seg.

2.5. PROGRAMA DIGITAL.

El modelo matemático desarrollado en el capítulo uno junto con el cálculo de condiciones iniciales desarrollado en el capítulo dos, han sido transformados a instrucciones en FOR-

TRAN IV para luego correr el programa en el computador de la Escuela Politécnica Nacional.

Al programa digital, se lo puede dividir en cuatro partes, estas son:

Programa principal

Subprograma CINIP

Subprograma PLOT

Subprograma RUNGE

En el Apendice A se puede analizar la intercomunicación existente entre todas las partes antes mencionadas. Ahora es conveniente indicar como se llevaron a cabo las pruebas del programa. La forma más sencilla es realizar la simulación de la máquina sincrónica operando en estado estable ya que en esta condición de operación los resultados son de antemano, perfectamente conocidos. Así, son constantes las variables en ejes q y d es decir, concatenaciones de flujo, corrientes, voltajes. Son constantes también la velocidad del rotor y el torque electromagnético, mientras que las variables a , b , c , son sinusoidales y comprenden corrientes, concatenaciones de flujo y voltajes. Todo lo expresado anteriormente es ratificado observando los resultados gráficos del programa para esta condición de operación, tal como lo demuestran las figuras 2.5.1 y 2.5.2.

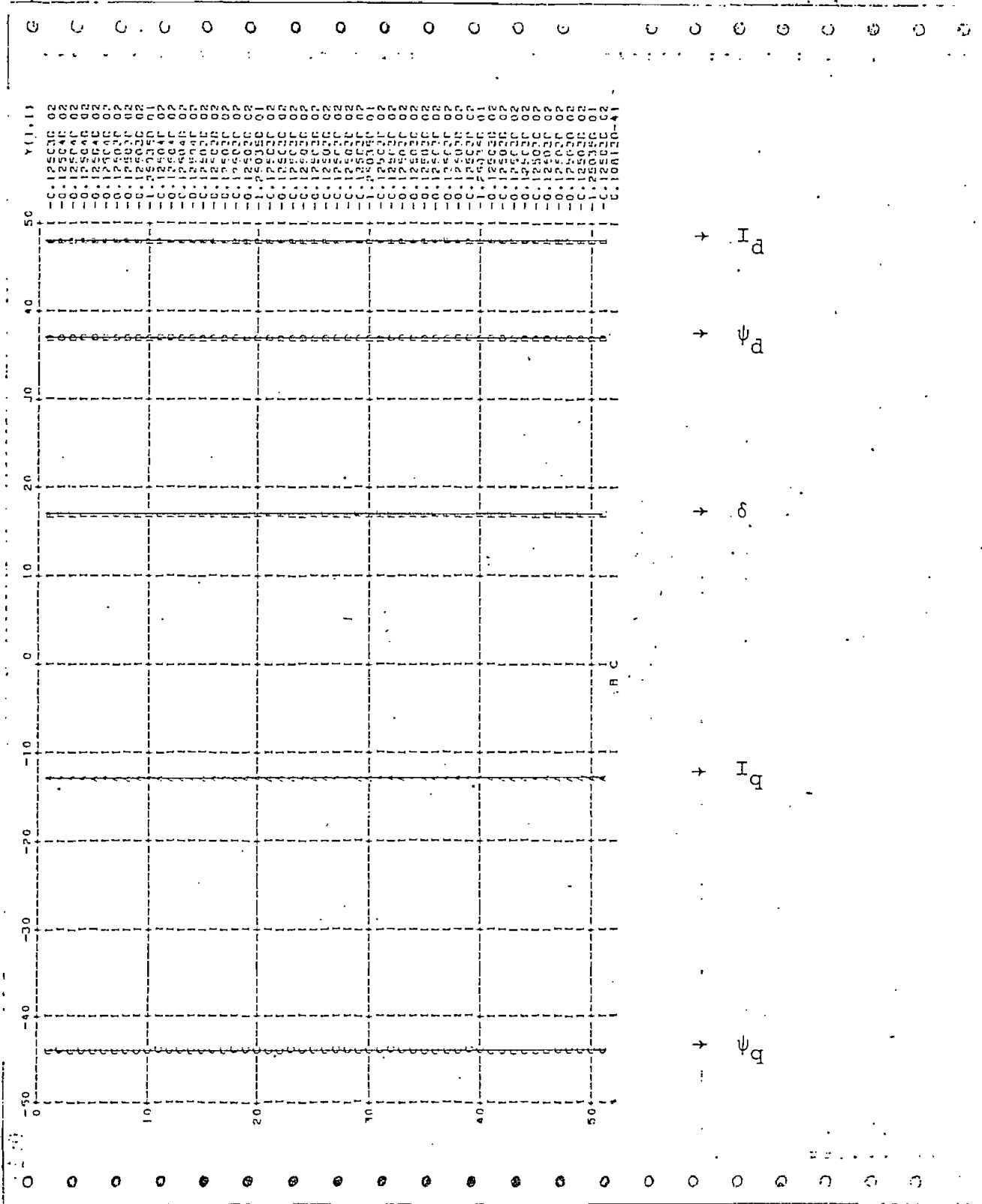
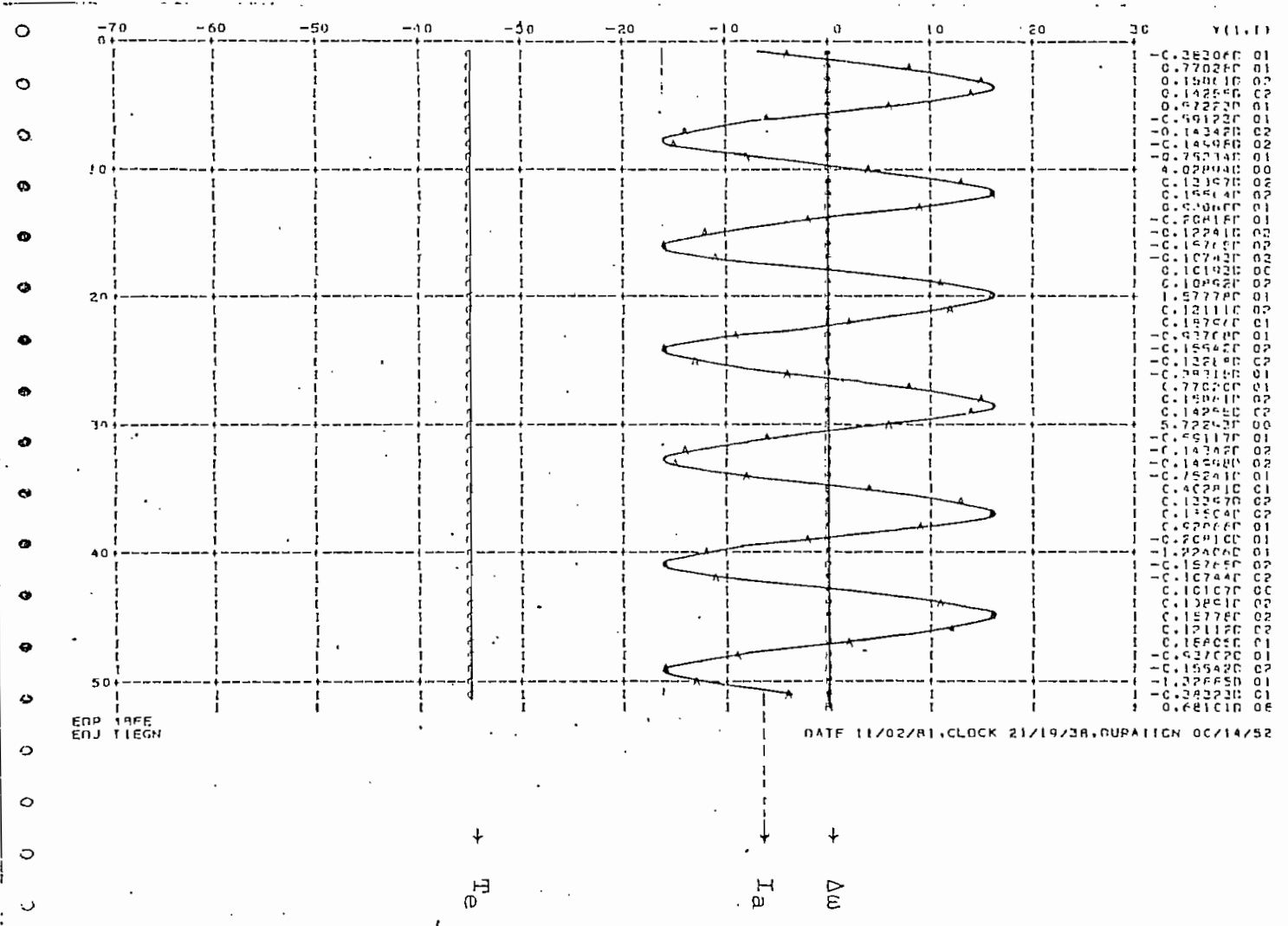


FIG. 2.5.1 Operación en Estado Estable..

CORRIENTE TORQUE Y DESVIACION DE VELOCIDAD

FIG. 2.5.2 Operación en Estado Estable.



2.5.1. EL PROGRAMA PRINCIPAL

El programa principal realiza las siguientes funciones:

- Suministra los datos de entrada al computador y los resultados al usuario.
- Llama a todos los subprogramas para que estos realicen las funciones para las que fueron implementados.

Los resultados se obtienen en forma gráfica o simplemente un listado de variables evaluadas, sin embargo, es más fácil analizar los resultados cuando son obtenidos en forma gráfica, por lo tanto en las aplicaciones se adopta la obtención gráfica de resultados.

2.5.2. SUBPROGRAMA CINIP

El Subprograma CINIP es del tipo subrutina, en este son calculados los coeficientes de las ecuaciones diferenciales así como las condiciones iniciales del sistema.

Los argumentos de esta subrutina son transmitidos implícitamente, esto se debe a que están definidos en bloques COMMON tanto en el programa principal como en el subprograma. Los argumentos que se transmiten son:

- a) Resistencias y reactancias de la máquina sincrónica.
- b) Datos de operación de la máquina sincrónica conectada a la barra infinita. Estos son:

Potencia aparente,
Factor de Potencia,
Voltaje en los terminales.

- c) Condiciones iniciales de operación, las mismas que son entregadas al programa principal para que este continúe con la resolución de las ecuaciones diferenciales. Es conveniente anotar que el cálculo de Condiciones Iniciales en Subrutina CINIP se realizan para una máquina sin crónica conectada a una barra infinita y que opera como generador o motor; dependerá sólo de la forma en que se suministra al programa el ángulo del factor de potencia.

2.5.3. FUNCION RUNGE |4|

La función Runge está implementada para resolver un sis tema de n ecuaciones diferenciales Lineales o No lineales.

En el programa principal deben ser inicializadas las si guientes variables:

- x ← x_i Valor de la variable independiente (tiempo).
- H ← h Tamaño del paso de integración.
- N ← n Número de Ecuaciones Diferenciales.
- Y_j ← Y_{ji} , $j = 1, 2, 3, \dots, n$ Valores de solución (estos son obtenidos en subrutina CINIP) para las n ecuaciones en x_i .

En esta función son integradas las ecuaciones diferenciales (1.3.1), (1.5.1) y (1.5.3) y el Subprograma RUNGE es llamado cuatro veces por cada paso de integración, entregando en última instancia al programa principal el valor definitivo de la función evaluada.

2.5.4. SUBROUTINA PLOT |7|

La función de este Subprograma es la de entregar gráficamente los resultados. Junto con los anteriores se obtiene una lista de ordenadas graficadas (multiplicadas por cierto factor). Pueden ser graficadas cualquier cantidad de puntos y la posición de los ejes se lo hace mediante los argumentos de llamada.

* * * *

C A P I T U L O I I I

APLICACIONES DEL PROGRAMA

En este capítulo se utilizará el programa digital en tres aplicaciones de comportamiento dinámico y son: Incremento brusco del torque, Cortocircuito Trifásico e Incremento del Voltaje de excitación.

3.1. INCREMENTO DEL TORQUE.

El cuadro físico antes de producirse el incremento brusco del torque de la máquina impulsora; es el de un generador sincrónico operando en estado estable conectado directamente a una barra infinita.

Repentinamente se produce incremento del torque de la máquina impulsora, motivo por el cual se producen un conjunto de transformaciones en el sistema electromecánico, afirmándose que, todas las variables de la máquina sincrónica sufren transformación. En este estudio se va a centrar la atención

en los cambios que se producen en la corriente, velocidad angular, ángulo de potencia y torque electromagnético; la razón es que los resultados que son suministrados, en este caso particular, por el programa digital son los antes mencionados, entendiéndose que si se requieren otras variables para ser analizadas, no existe ningún inconveniente para su obtención.

En el programa digital el método empleado para producir la perturbación de la máquina sincrónica es el de incrementar el torque de la máquina impulsora como una función escalón. Además un aspecto muy importante dentro de esta aplicación es el de cómo hacer coincidir el ángulo de perturbación en la simulación digital y el de la experimentación.

Se logra lo propuesto, si primero se realiza la experi-
mentación en laboratorio, es con los datos obtenidos experi-
mentalmente, que se alimenta al programa digital. Así, el ángulo en cuestión se calcula de las fotos obtenidas en el osciloscopio (Ver capítulo cuatro). El proceso inverso es muy complicado.

El ángulo de perturbación entra en juego en el proceso de integración de las Ecuaciones Diferenciales en el instante en que se realiza la perturbación; es así como empieza una nueva integración lo que significa que, todas las variables calculadas hasta aquel instante, son las nuevas condiciones ini

ciales del nuevo período de integración.

Los resultados obtenidos en la simulación digital son los indicados en las figuras 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3 y 3.1.4.

La Figura 3.1.1. muestra la corriente en función del tiempo, se observa claramente como la onda de corriente aumenta en comparación con su valor original hasta estabilizarse con una onda de mayor amplitud.

En la Figura 3.1.2. es mostrada la variación de velocidad respecto a la velocidad sincrónica. Se observa una oscilación amortiguada hasta otra vez alcanzar la velocidad que tenía antes de producirse la perturbación.

La Figura 3.1.3. muestra la variación del ángulo de potencia, el mismo que crece hasta alcanzar su nuevo punto de operación y comenzar a estabilizarse.

Finalmente la variación del torque electromagnético, es mostrada en la figura 3.1.4. observándose que se produce el incremento hasta alcanzar el nuevo punto de operación.

3.2. CORTOCIRCUITO TRIFASICO.

En esta aplicación del programa la máquina sincrónica, objeto de estudio está operando en vacío conectada a la barra infinita, luego, súbitamente se produce un cortocircuito trifasico, el cual originará como se verá más adelante, un conjunto de transformaciones en la operación de la máquina sincrónica.

Para lograr la simulación de la máquina sincrónica trabajando en la condición antes mencionada, se supone que esta opera subexcitada y entrega una potencia pequeña al sistema ya que simular exactamente la máquina conectada a una barra infinita y en vacío significa caer en problemas de ruido en las variables de estado.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, se traza el diagrama fasorial de la figura 3.2.1., el que fue empleado en el cálculo de las condiciones iniciales, es así como se consigue que $|E_a| \cong |v_a|$. No está demás recalcar que este diagrama fasorial es un caso particular del más general que se muestra en la figura 2.2.2.d.

Dentro del programa la perturbación se produce para la condición en que $V_q = V_d = 0$. Se consigue ésto si, en el instante de la perturbación, y sólomente en este instante los voltajes V_q y V_d son multiplicados por cero, luego el ángulo de la perturbación es inicializado en su valor correspondien-

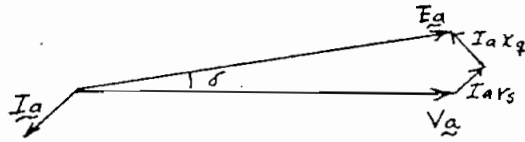


FIG. 3.2.1. Aproximación a la máquina sincrónica subexcitada trabajando en vacío.

te y se produce "la nueva integración" en forma parecida a la explicada en la sección anterior. Cabe anotar que la forma en que se obtuvo el ángulo de la perturbación, es la misma que para el incremento de torque.

En las figuras 3.2.2, 3.2.3, 3.2.4 y 3.2.5, se muestran la corriente, variación de velocidad, ángulo de potencia δ y torque electromagnético respectivamente. En la corriente se observa que existe una oscilación amortiguada, amortiguamiento que depende de las resistencias de los devanados de damping. La velocidad de la máquina disminuye, es como si existiera alguna fuerza externa que tiende a frenarla. El torque electromagnético y ángulo δ tienden a disminuir a un valor más bajo del que tenían para la condición simulada de vacío.

CORRIENTE EN LA FASE A
 ORDENADA MULTIPLICADA POR NFA = 15

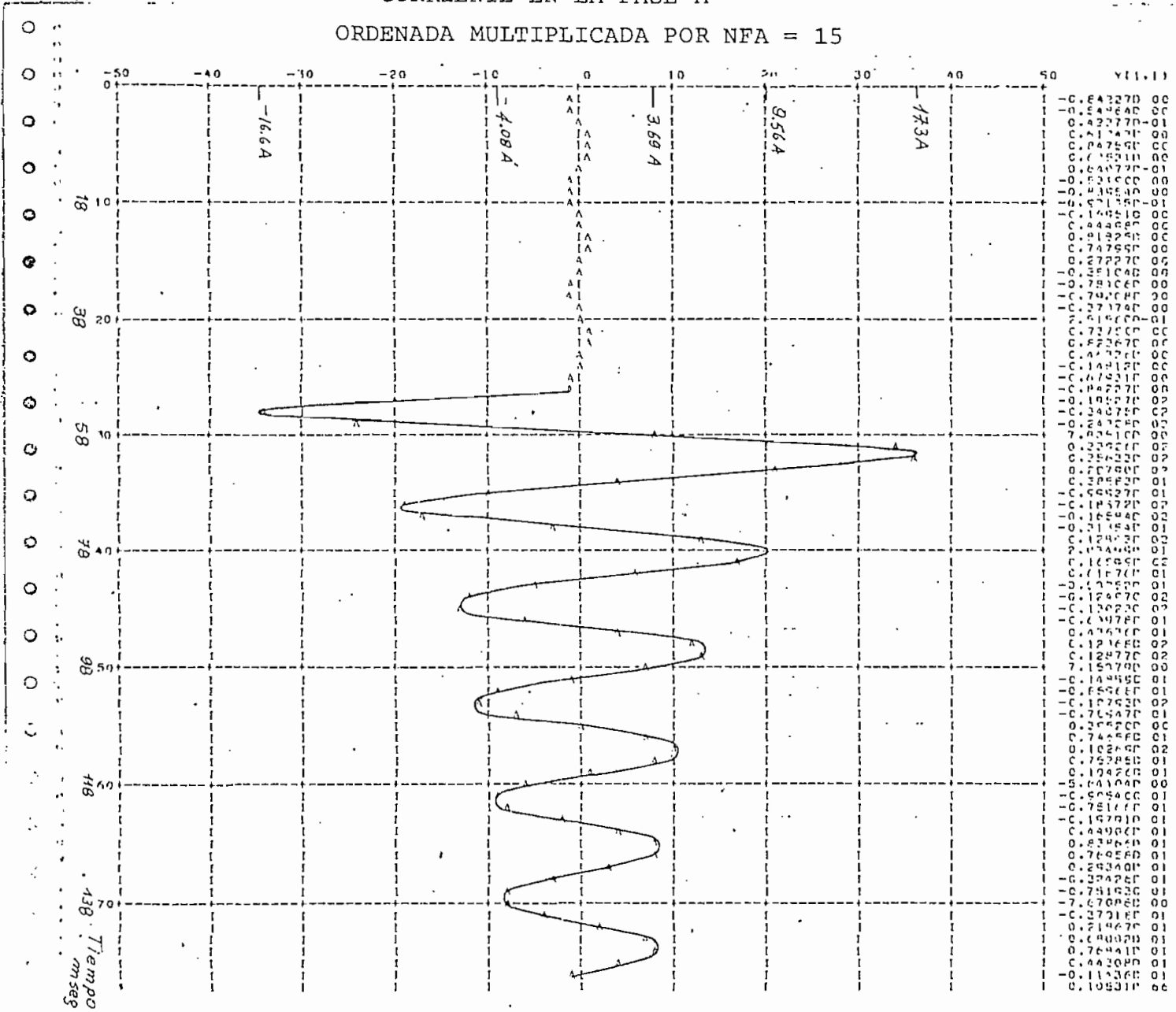


FIG. 3.2.2 Cortocircuito Trifásico Mag. Sincrónica
 Barra Infinita.

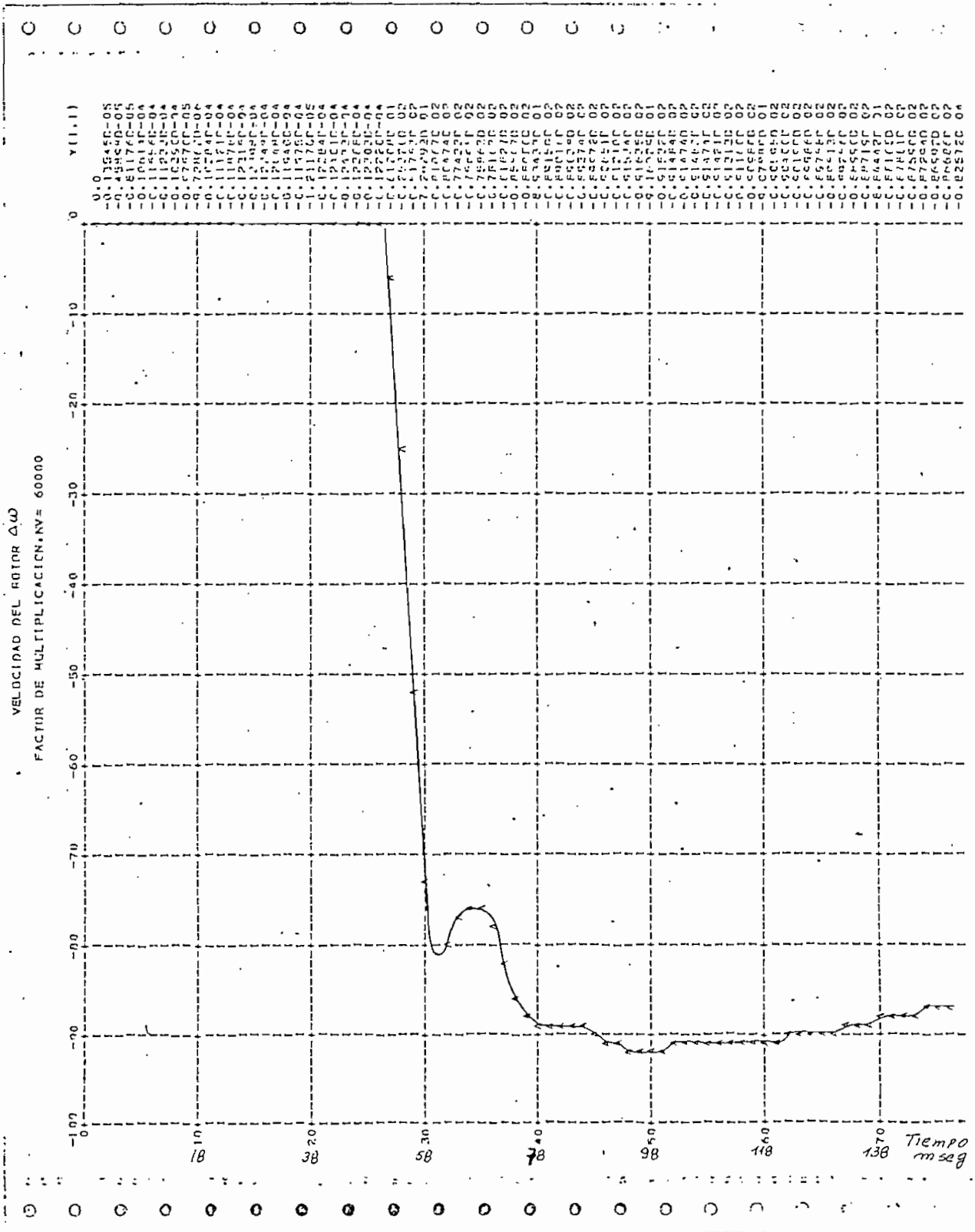


FIG. 3.2.3 Cortocircuito Trifásico Máquina Síncrona Barra Infinita.

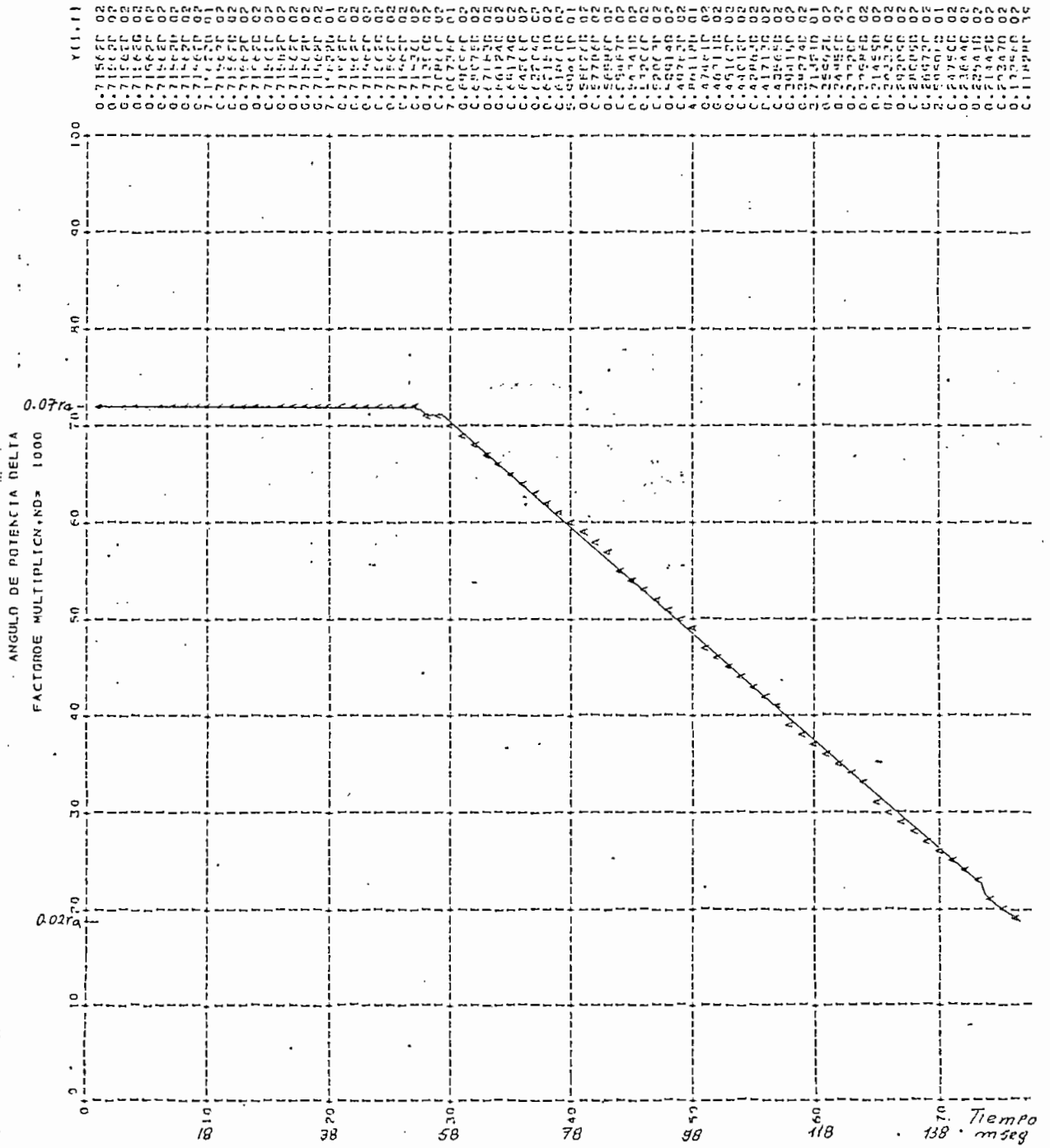


FIG. 3.2.4 Cortocircuito Trifásico Máquina Síncrona Barra Infinita.

3.3. INCREMENTO DEL VOLTAJE DE EXCITACION.

Sobre el incremento brusco de voltaje no se puede realizar un análisis general puesto que éste comprendería incluso pérdida de excitación y constituiría motivo de un estudio completo. Existe acerca de este último tópico un estudio en el que se considera a la máquina en quasiequilibrio [8]; Además en la Facultad de Ingeniería Eléctrica se está trabajando en un proyecto en que se analiza la pérdida de excitación con las ecuaciones generales de la máquina sincrónica.

Teniendo en mente lo mencionado, se realiza la simulación digital del incremento de voltaje de excitación con los datos que fueron empleados para el incremento de torque cuando la máquina sincrónica está operando en estado estable.

La forma en que se produce el cambio brusco dentro del programa digital es como si el incremento se manifestara mediante una función paso, es decir en cierto instante de la operación en estado estable se realiza el cambio intempestivo.

En las figuras 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3, y 3.3.4, se exhiben los resultados obtenidos en la simulación digital y corresponden a concatenaciones de flujo en eje q, concatenaciones de flujo en eje d, torque electromagnético, e incremento de velocidad respectivamente.

CONCATENACION DE FLUJO ψ_a

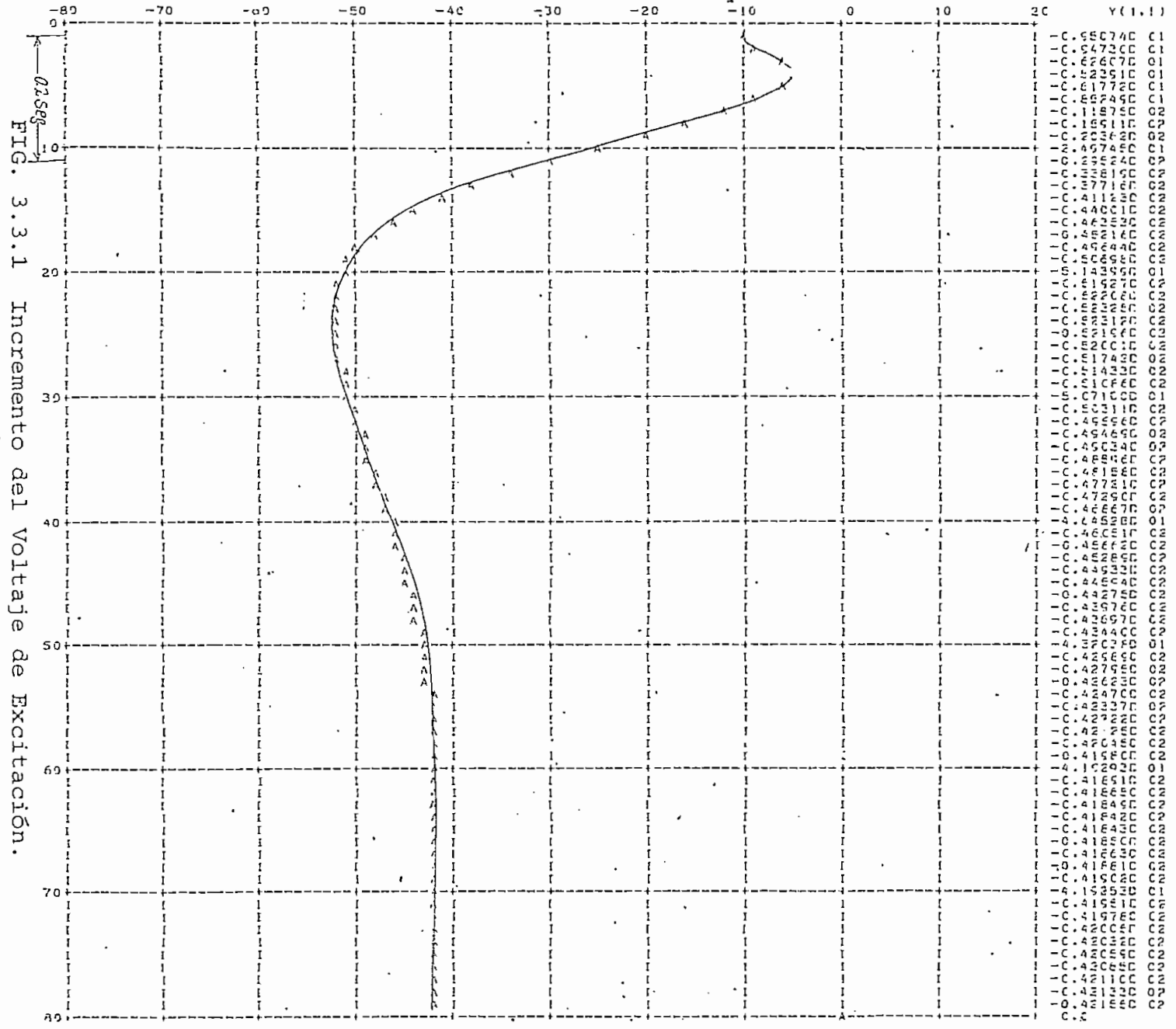


FIG. 3.3.1 Incremento del Voltaje de Excitación.

CONCATENACIONES DE FLUJO ψ_d

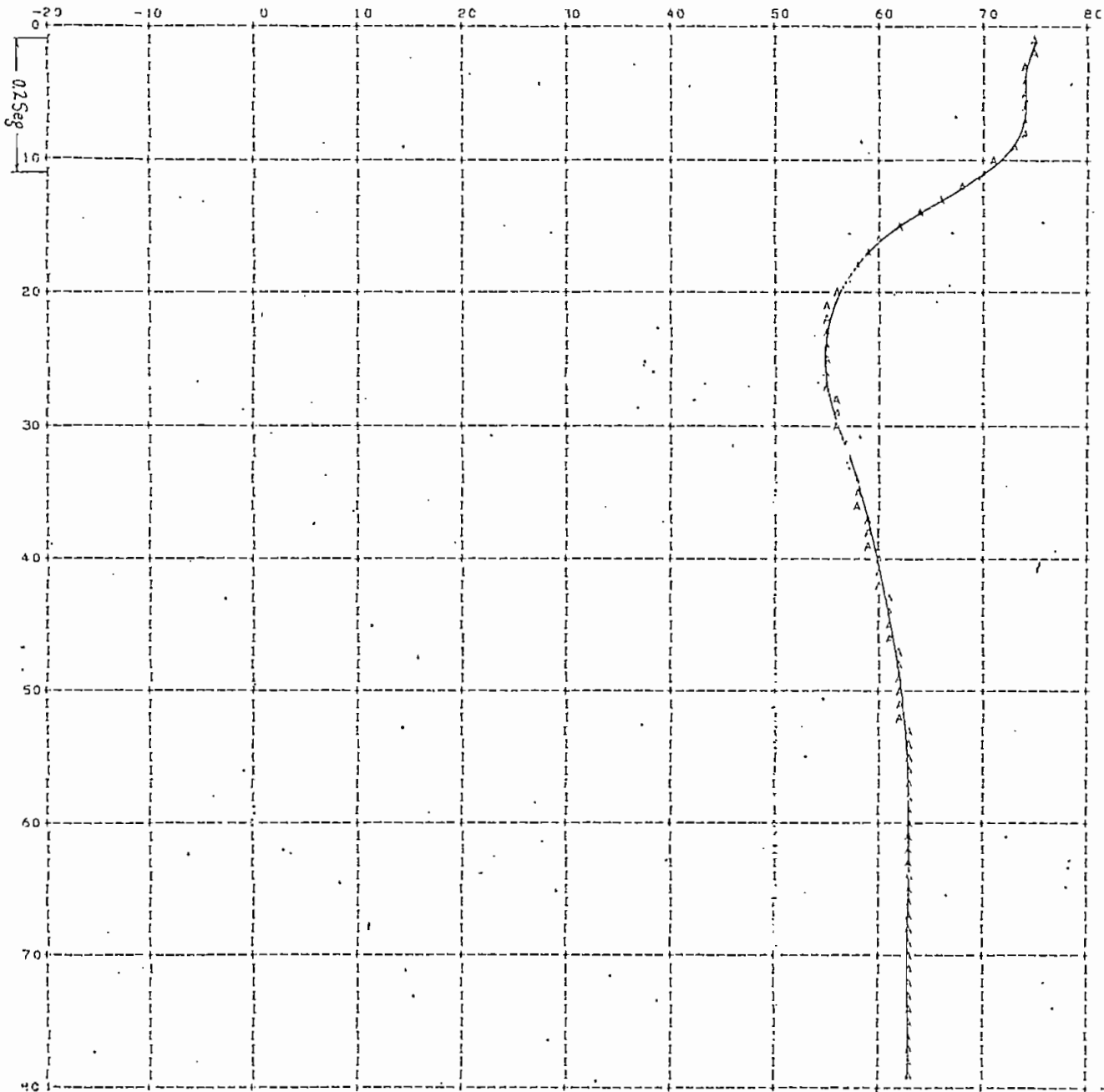


FIG. 3.3.2 Incremento del Voltaje de Excitación.

Y(1,1)	...
0	...
10	...
20	...
30	...
40	...
50	...
60	...
70	...
80	...

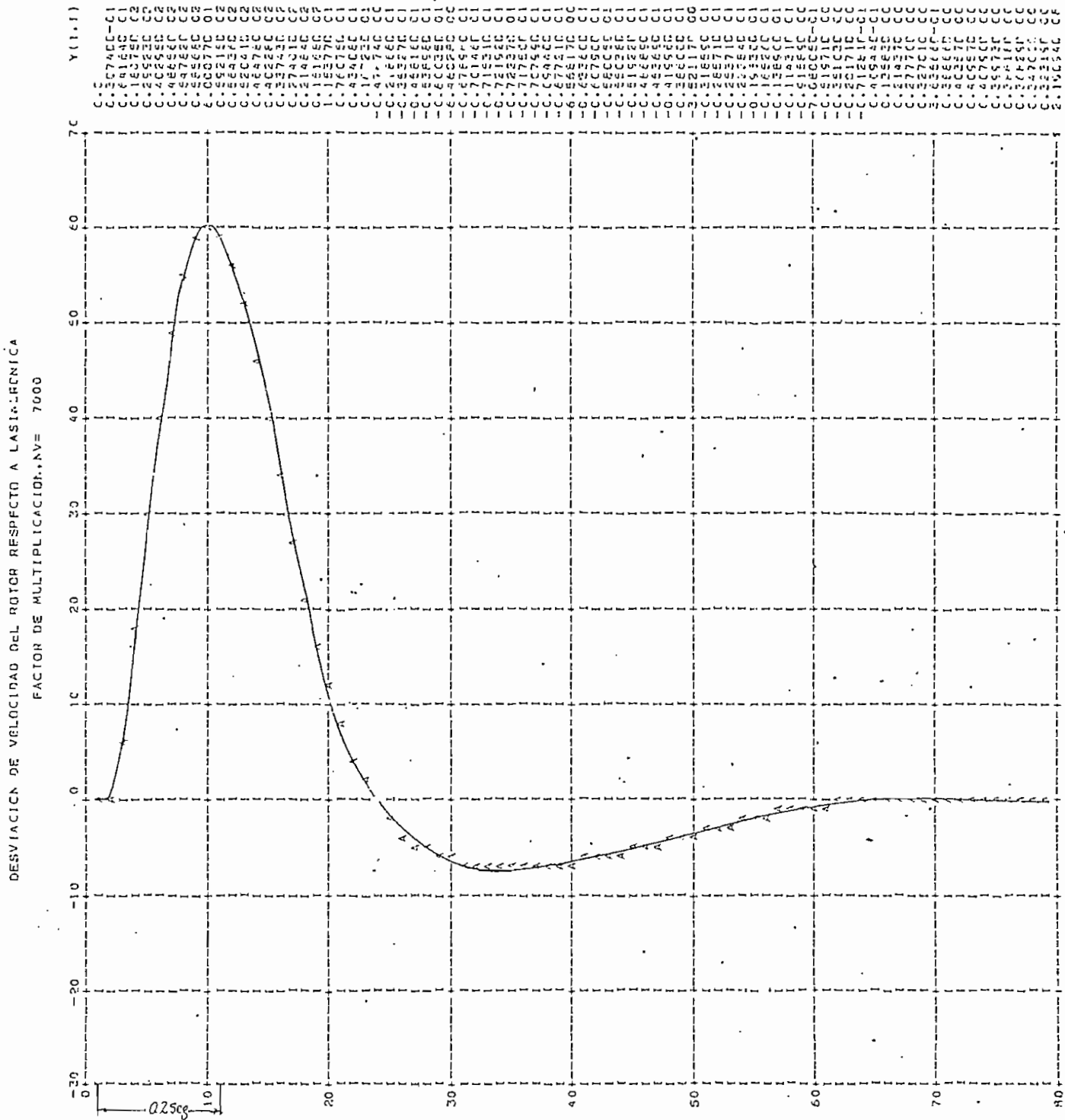


FIG. 3.3.3 Incremento del Voltaje de Excitación.

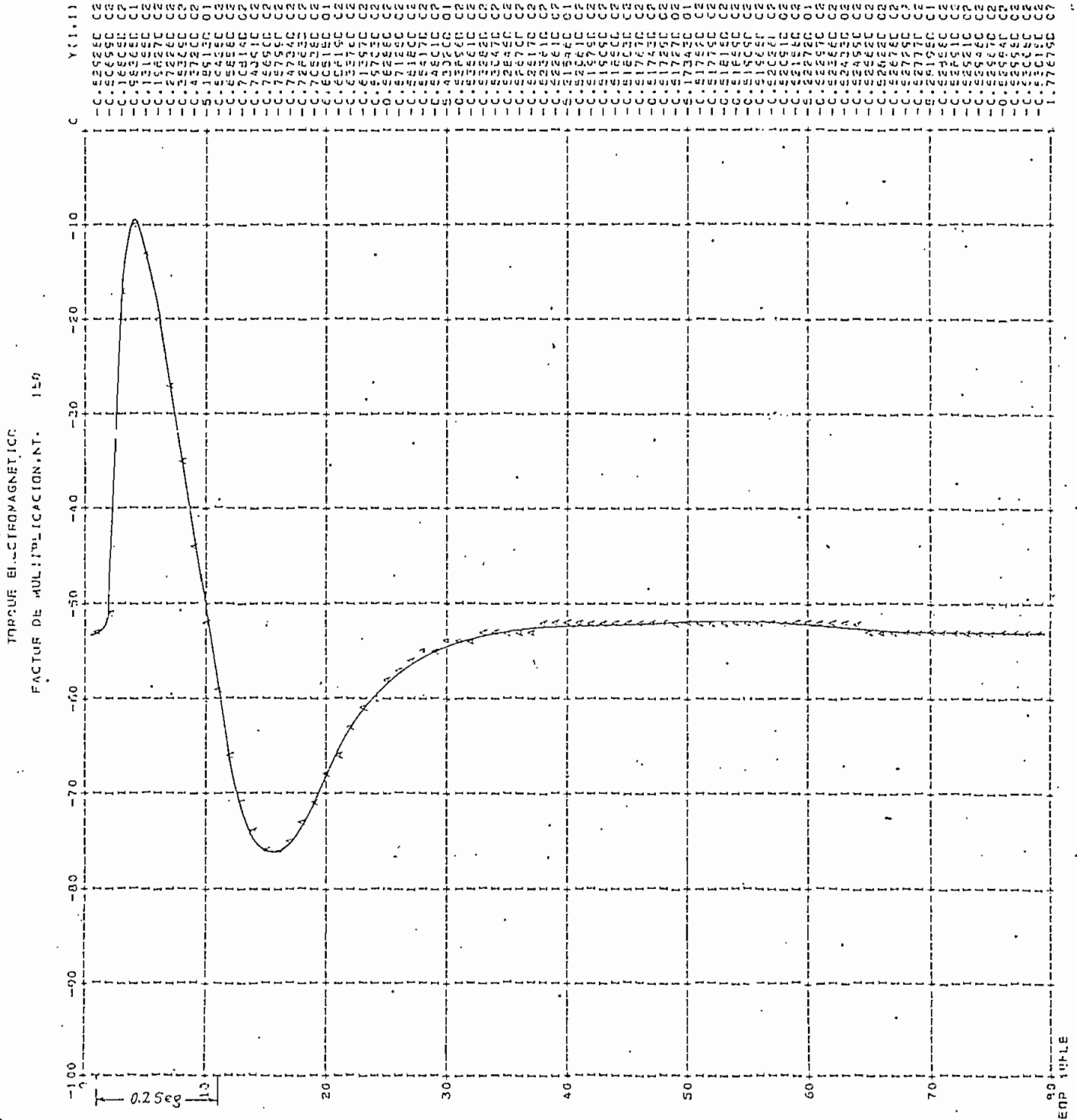


FIG. 3.3.4 Incremento del Voltaje de Excitación.

C A P I T U L O . I V

ANALISIS Y COMPARACION DE RESULTADOS

C A P I T U L O IV

ANALISIS Y COMPARACION DE RESULTADOS

4.1. EXPERIMENTACION DE LABORATORIO CON LAS PERTURBACIONES
USADAS EN LA APLICACION DEL PROGRAMA.

Se indica en este capítulo la forma en que se llevó a ca
bo la experimentación de las perturbaciones analizadas en for
ma digital.

4.1.1. INCREMENTO BRUSCO DEL TORQUE DE LA MAQUINA IMPULSORA.

La máquina sincrónica en la que se experimentó es del la
boratorio de Máquinas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica
y tiene las características que se indican a continuación:

Marca: SIEMENS

3 ϕ Polos salientes y devanados de damping.

S = 3.5 KVA

V = 230 V (en delta)

$$I = 8.7 \text{ A}$$

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$V_{ex} = 110 \text{ V}$$

$$f_p = 0.8$$

La máquina impulsora fue un motor de inducción del tipo SCHRAGE el mismo que tiene la particularidad de estar alimentado en el rotor mediante anillos rozantes. El estator es similar al de un motor ordinario de inducción, con la sola particularidad de que el devanado trifásico es de fases abiertas estando cada una de sus extremidades a escobillas homólogas de dos coronas portaescobillas del colector de delgas |11|. (figura 4.1.1).

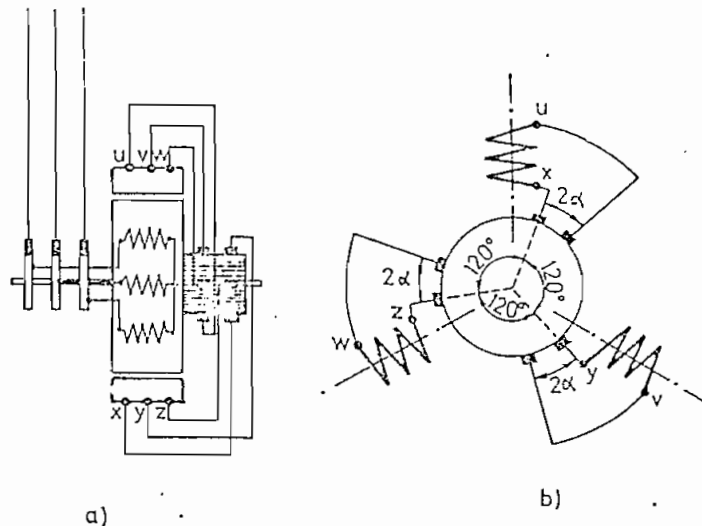


FIG. 4.1.1. Esquema de conexiones de motor de inducción de velocidad variable "SCHRAGE".

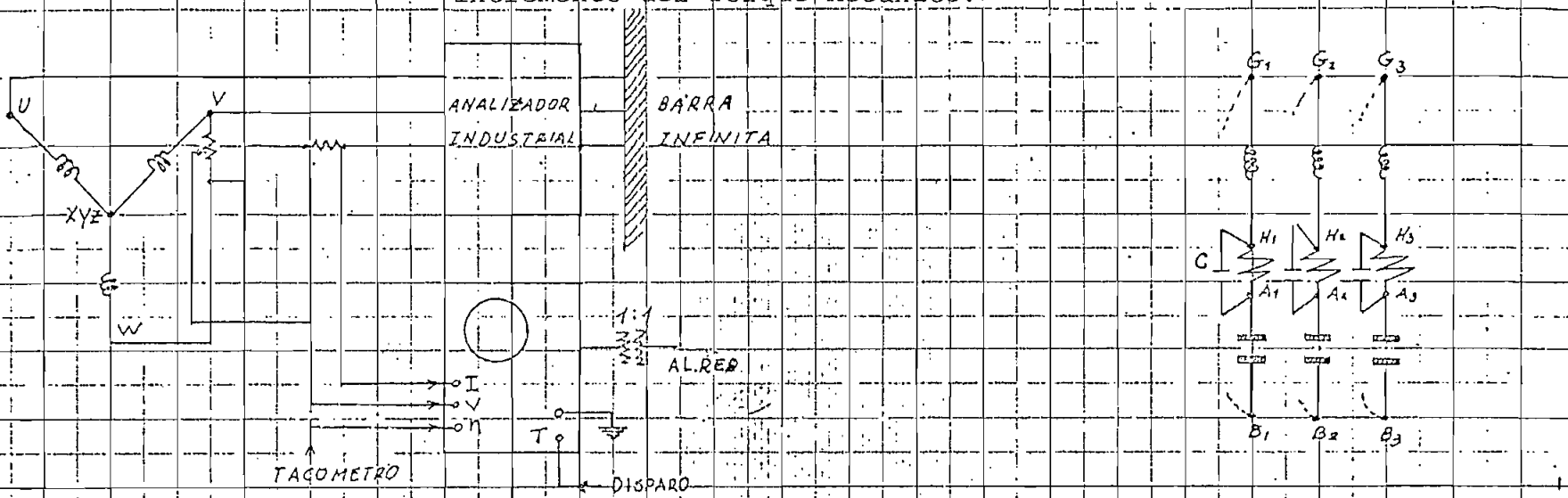
El procedimiento seguido en la experimentación fue el siguiente:

- 1) Arrancar la máquina sincrónica como motor de inducción comprobando que el sentido de giro sea igual al de la máquina impulsora.
- 2) Conectar la excitación y operar como motor sincrónico. Lograr una corriente de campo máximo de 1 Amperio.
- 3) Conectar la máquina impulsora y comenzar a generar.
- 4) Calcular el T_m prior a la perturbación y post-perturbación.
- 5) Enviar al osciloscopio señales de voltaje y corriente.

El cambio repentino de la velocidad de la máquina de inducción se realizó introduciendo repentinamente en cada fase de los devanados pre-cortocircuitados del estator, resistencias de 1Ω mediante un contactor que las conecta lo más bruscamente posible. En la figura 4.1.2, se indican los esquemas que fueron empleados en la experimentación.

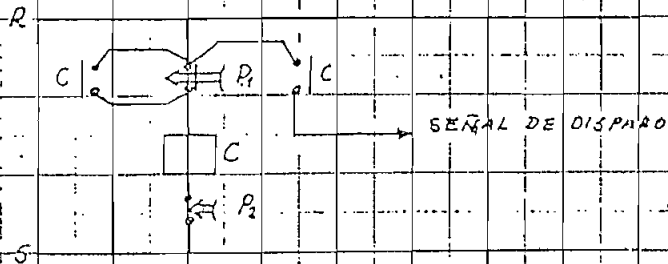
Las condiciones de operación antes de producirse la perturbación fueron:

FIG. 4.1.2 Esquemas de Conexión empleados en la Experimentación Incremento del Torque Mecánico.

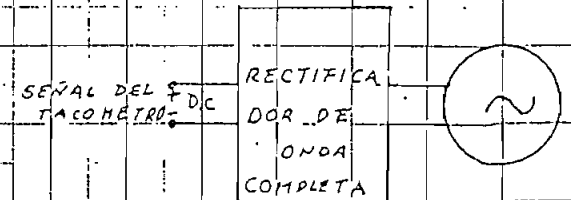


a) Máquina Síncrona, Analizador Industrial y Osciloscopio.

b) Conexión de Resistencias en el Estator del Motor "SCHRAGE".



c) Circuito de Control



d) Rectificación de la señal del Tacogenerador.

$$P = 500 \text{ W}$$

$$Q = 2000 \text{ VAR}$$

$$V_{RS} = 206.74 \text{ V.}$$

$$I_{exc} = 1.7 \text{ A}$$

$$T_{OUT} = \frac{500}{188.4956} = 2.6526 \text{ N.m}$$

$$T_{OUTpu} = \frac{2.6526}{\frac{3.500}{376.99}} = 0.2857$$

El fenómeno transitorio se lo ha captado en las fotos 1 y 2.

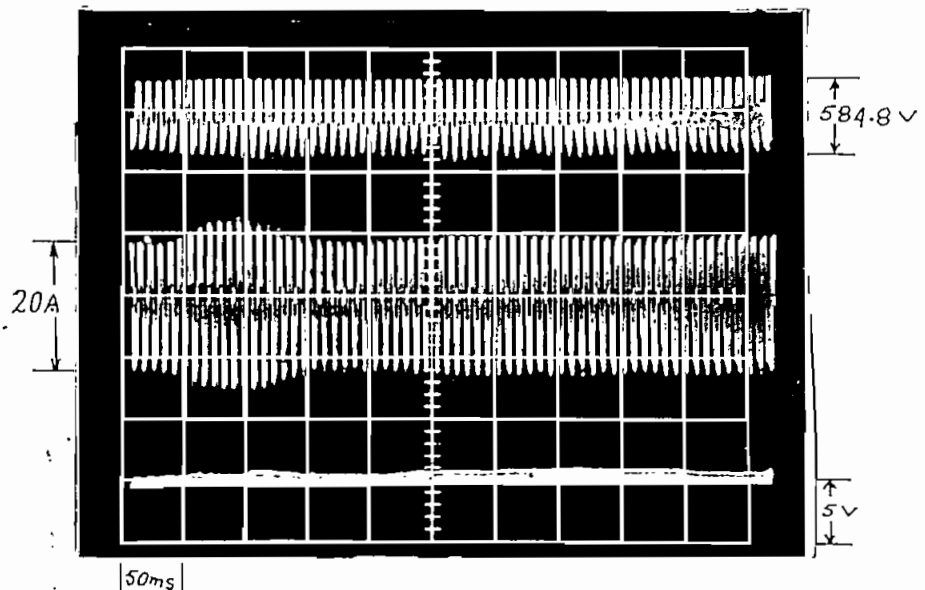


FOTO 1. Voltaje, Corriente y Velocidad cuando se produce el cambio brusco del torque mecánico.

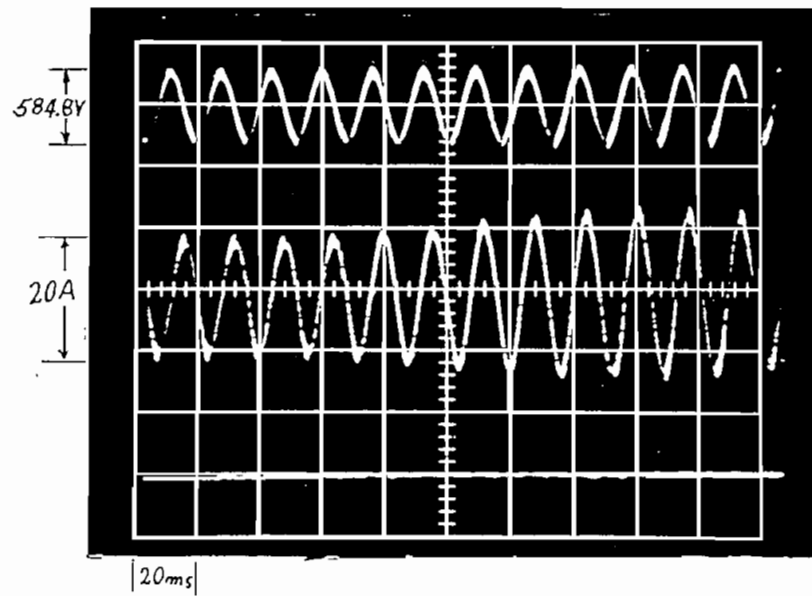


FOTO 2. Voltaje, Corriente y Velocidad cuando se produce el incremento brusco del torque mecánico con mayor barrido del osciloscopio.

La potencia transferida a la barra infinita luego de la perturbación es:

$$P = 2850 \text{ W}$$

$$T_{OUT} = \frac{2850}{188.49} = 15.12 \text{ (N.m)}$$

$$T_{OUT_{pu}} = 1.62 \text{ pu.}$$

Durante el fenómeno transitorio se puede concluir que:

- a) El voltaje del sistema permanece constante. (barra infinita).
- b) La corriente sufre oscilación durante aproximadamente 9 ciclos, para luego adquirir su nuevo valor de estado estable.
- c) Las oscilaciones de velocidad de la máquina no se pueden apreciar adecuadamente porque la medición que se emplea no nos permite observar pequeñas variaciones.
- d) El ángulo de potencia se abre a un nuevo valor (más grande) según se pudo apreciar conectando el estroboscopio.

4.1.2. CORTOCIRCUITO TRIFASICO.

La máquina experimentada fue la misma del caso anterior. Los resultados experimentales fueron tomados de la tesis del Ing. Gabriel Arguello [9]. La forma de conexión del equipo se indica en la figura 4.1.3.

Se puede apreciar claramente en la figura mencionada, que la máquina está conectada en estrella. La excitación proviene de una fuente de corriente continua independiente. Las señales obtenidas fueron: Corriente, desde una resistencia de

0.1 Ω , y la Señal de Voltaje en terminales; esta última con la finalidad de determinar el ángulo de la perturbación, puesto que la forma de onda de la corriente depende del ángulo antes mencionado.

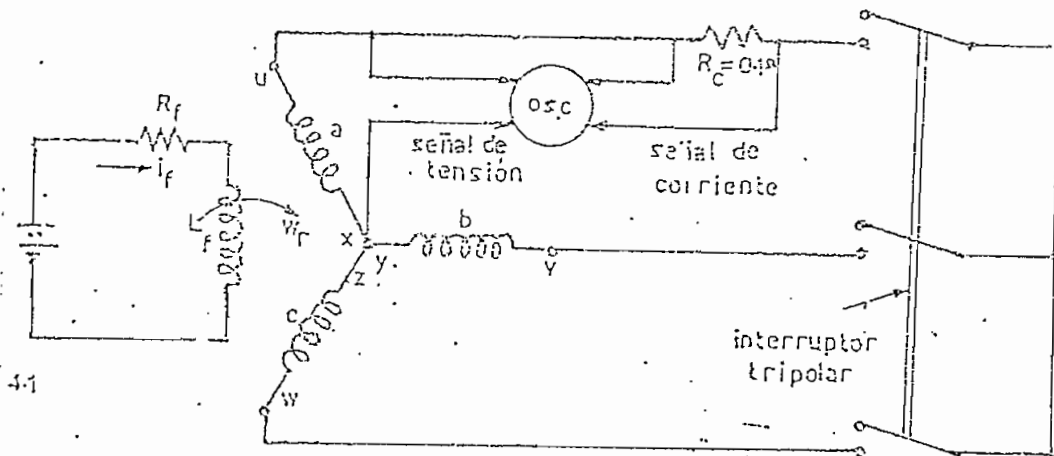
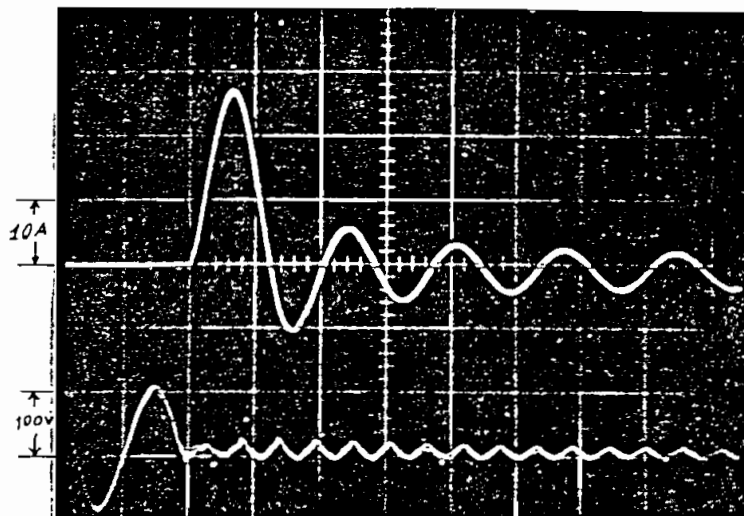
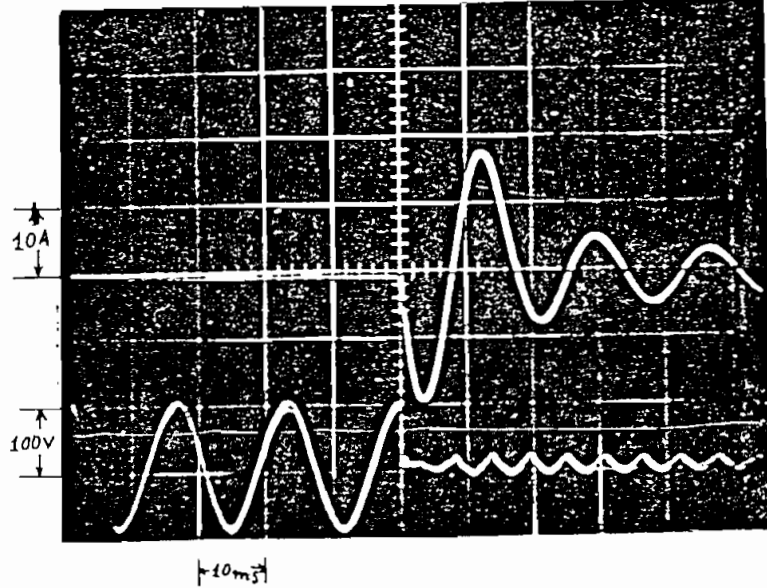


FIG. 4.1.3. Forma de conexión del equipo para experimentación del cortocircuito trifásico.

Los oscilogramas obtenidos son los que se muestran en las fotos 3 y 4, los mismos que fueron tomados para diferentes ángulos de perturbación, cabe mencionar que la alimentación de los datos en el computador y su posterior comparación fue realizada mediante los oscilogramas de la Foto 3.

En las fotos se aprecia claramente el instante en que se produce el cortocircuito, esto es, cuando el voltaje se reduce a cero, luego comienza el proceso subtransitorio de co

rriente hasta terminar en el estado estacionario.



FOTOS 3 y 4. Oscilogramas de Corriente y Voltaje de Cortocircuito en terminales de una máquina sincrónica trabajando en vacío.

4.1.3. INCREMENTO DEL VOLTAJE DE EXCITACION.

La experimentación con esta perturbación no se llevó a cabo, las razones ya fueron expuestas en la sección 3.3, además se considera que la experimentación de esta perturbación es bastante sencilla si se la compara con las demás.

4.1.4. PARAMETROS DE LA MAQUINA EXPERIMENTADA.

Como ya fue visto antes, cuando se trató sobre la simulación digital de la máquina sincrónica, son requeridos los parámetros de ésta, que comprenden: resistencias, reactancias y también la constante de inercia.

Todos los parámetros antes mencionados fueron obtenidos de la referencia 8, existiendo discrepancias en lo referente a los valores de las resistencias de campo y de los devanados de damping, valores que dependen de las constantes de tiempo y reactancias como se ve en el Cuadro 1.

RESISTENCIAS		CONSTANTES DE TIEMPO
r_{fd}	→	T'_{d_0}
r_{kd}	→	T_{d_0}''
r_{kq}	→	T_{q_0}''

CUADRO 1. Resistencia y su Constante de Tiempo correspondiente.

Tomando en cuenta todo lo antes mencionado se procedió de la siguiente manera:

Fueron comparados los oscilogramas de la referencia |9| (que son la fuente de la referencia |8|), con otros obtenidos experimentalmente para la obtención de parámetros de la máquina sincrónica. Se establece que, las constantes de tiempo calculadas en la tesis del Ingeniero Arguello, no tienen relación con las obtenidas de las fotos de los oscilogramas de la misma tesis, pues difieren por un factor de 3 aproximadamente, por consiguiente se determinan las constantes de tiempo representando puntos extremos en papel semilogarítmico para posteriormente calcular las resistencias con las relaciones dadas en el Apéndice A de la referencia |8| y referencia |13|, Ver Apén

dice E.

4.2. COMPARACION DE LOS RESULTADOS DEL PROGRAMA DIGITAL Y DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.

4.2.1. RESULTADOS QUE SON COMPARADOS.

En la simulación digital existe bastante flexibilidad para obtener respuestas ante la producción de cualquier perturbación; así, se tiene acceso a todas las variables de estado y también a otras funciones que son obtenidas por inter-relación de las antes mencionadas, como son: Corrientes en ejes q y d, Corrientes en el estator, torque electromagnético, Velocidad y ángulo de carga (delta). La anterior aseveración no se aplica, si, se desean obtener respuestas a perturbaciones realizadas experimentalmente puesto que no se pueden verificar ninguna de las variables del rotor tampoco existen en la Facultad métodos y dispositivos para detectar en laboratorio transitorios en torque, velocidad y ángulo de potencia. Es por la razón antes expuesta, que los resultados motivo de comparación serán los de corrientes del estator y específicamente de la fase a, ya que no son analizados en este trabajo perturbaciones asimétricas.

4.2.2. INCREMENTO BRUSCO DEL TORQUE DE LA MAQUINA IMPULSORA.

La forma como fue realizada la experimentación y la simulación fue extensamente discutida en las secciones anteriores. Ahora se presentarán los resultados del computador y los experimentales. Se aprecia en los transitorios de corriente de la figura 4.2.1, el proceso que sufre una vez producida la perturbación. Obviamente existen diferencias en los resultados, pero conviene destacar que, la respuesta obtenida en la simulación digital representa perfectamente el fenómeno real.

Se concluye que:

- El instante en que se aprecia el transitorio es aproximadamente a los 80 m seg. si se toma como origen del eje del tiempo el inicio de la pantalla del osciloscopio y el de las ordenadas de los resultados del computador digital para la experimentación y la simulación digital respectivamente.

- La corriente oscila hasta estabilizarse en el nuevo punto de operación en estado estable como se aprecia en los resultados que fueron motivo de análisis en la sección 3.1. (nótese en esta misma sección como oscilan y alcanzan los nuevos puntos de operación en estado estable, la velocidad, ángulo de potencia, y torque electromagnético) y la foto con un barrido de 50 m seg. en la sección 4.1.

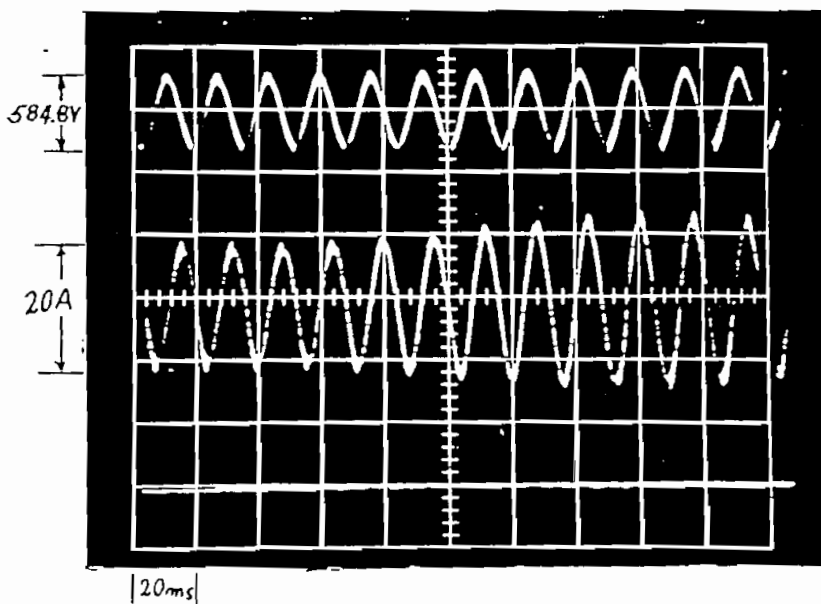
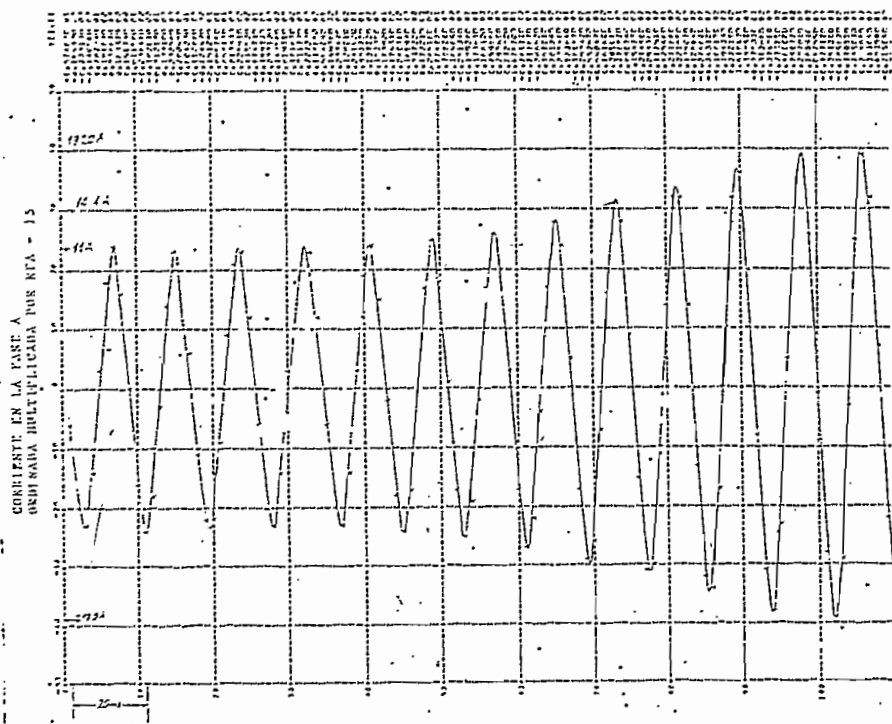


FIG. 4.2.1 Comparación de Resultados
Incremento de Torque Mecánico.

- Las diferencias existentes entre los dos resultados de corriente son justificables si se considera que sobre los parámetros de la máquina sincrónica se investigan y desarrollan en la actualidad nuevas metodologías para su obtención, fundamentalmente en lo que se refiere a parámetros del circuito del rotor. Sobre este tópico, se recomienda la referencia [14]; en un estudio de tal referencia realizado por I.M. Canay, se analizan las causas de las discrepancias sobre el cálculo de parámetros del rotor en máquinas sincrónicas y también se provee una bibliografía relacionada con este tópico.
- Los transitorios mecánicos son relativamente lentos comparándose esta última afirmación, con resultados obtenidos incluso en máquinas de gran capacidad.

4.2.3. CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO.

Para la simulación del cortocircuito trifásico, el transitorio de corriente es el que se muestra en la figura 4.2.2. en la misma, con fines comparativos, se muestra también el transitorio conseguido experimentalmente.

Se puede concluir que:

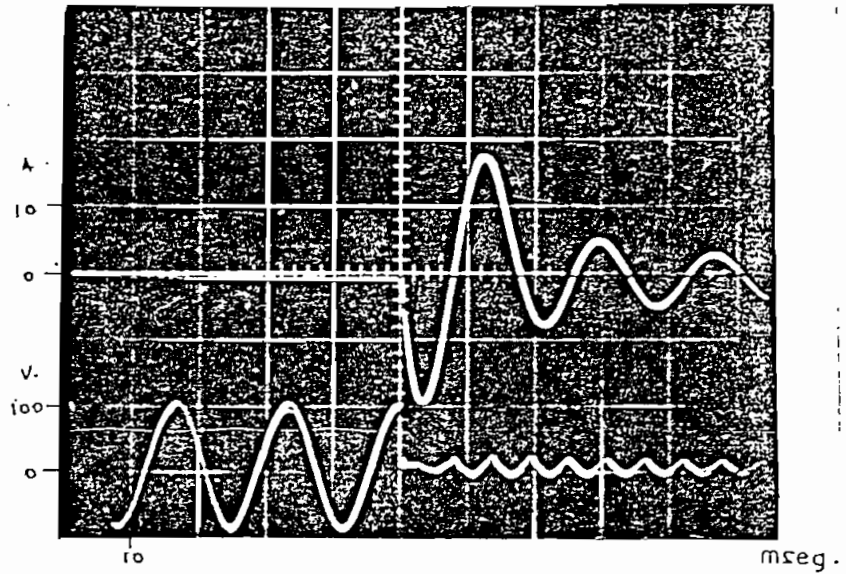
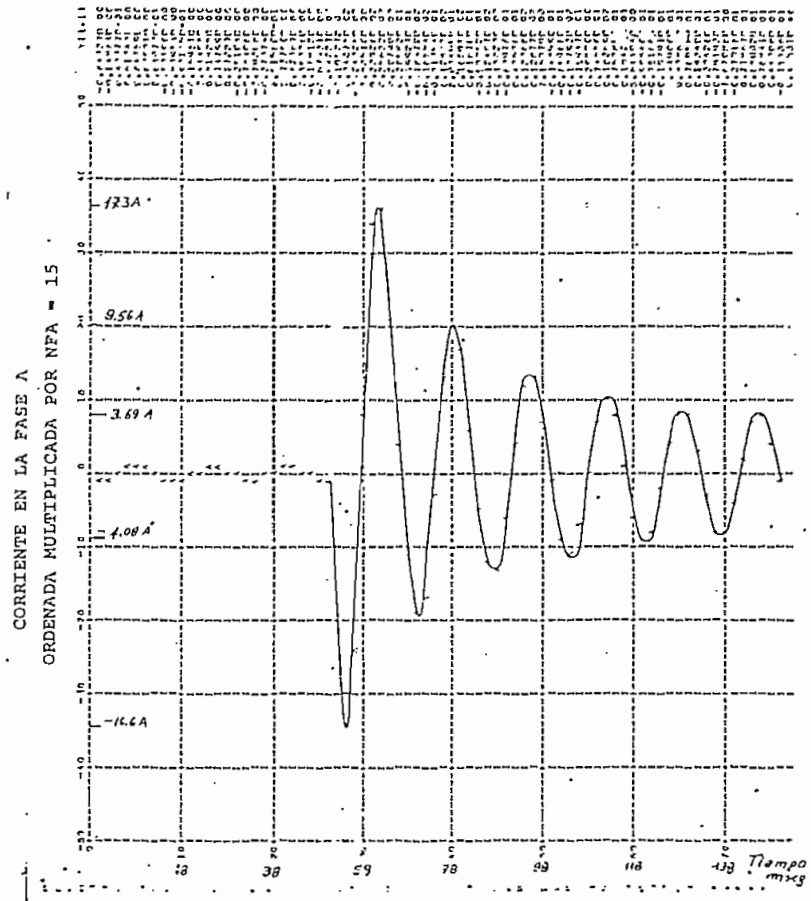


FIG. 4.2.2 Comparación de Resultados
Cortocircuito Trifásico en Terminales.

- La simulación digital representa prácticamente el fenómeno real, observándose una oscilación amortiguada (el amortiguamiento depende de las resistencias de los circuitos del rotor) con un período subtransitorio de aproximadamente 22 m seg. y un período transitorio que casi no se lo puede apreciar, observación que se aplica a los dos resultados, motivo de comparación.

- En los resultados de la simulación digital se observa claramente dos ciclos de la corriente de cortocircuito, después de la estabilización del transitorio; esto se debe a una conveniente elección del tiempo máximo en el intervalo de integración.

- Es obvio que exista diferencias entre los dos resultados, sin embargo, la justificación se encuentra explicada en la comparación del incremento brusco del torque, es decir se debe a la forma de obtención de parámetros de la máquina sincrónica, y en especial por los parámetros del rotor.

- Si son observadas las corrientes en el período pre-falla, se encuentra que en los resultados de la simulación digital existe una corriente pequeña que es la que se entrega al sistema cuando opera en estado estable, ya que como se explicó en el capítulo de las aplicaciones del programa, la simulación de la máquina en vacío se logra conside

rando trabajar la máquina sincrónica subexcitada y entre
gando una potencia muy pequeña.

* * * * *

C A P I T U L O V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El Plan de Tesis propuesto, ha sido desarrollado en la forma prevista y en la finalización del mismo, es conveniente recalcar ciertos aspectos del proyecto que se cree serán de utilidad si se tiene en mente que forme parte de un conjunto de proyectos que han sido impulsados concatenadamente en el Departamento de Potencia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica.

- El desarrollo del modelo matemático, tomando a las concatenaciones de flujo como variables de estado, presenta la ventaja de poder introducir con relativa facilidad el efecto de la saturación.
- Los resultados obtenidos en los ejemplos de aplicación de la simulación digital son aceptables, comprobándose de esta manera la validez del modelo matemático planteado.
- La investigación y desarrollo que se realiza cada día en

lo referente a dispositivos de computación, se han constituído en aliados invalorable en el desarrollo de la industria eléctrica. Particularmente cabe destacar la facilidad con que se pueden maniobrar todas las variables de estado que entran en juego en la simulación digital y la no menos ventajosa forma de obtención de respuestas de un sistema físico (máquina sincrónica en este caso particular) luego de haber actuado un estímulo cualquiera (perturbación).

- Como consecuencia de las ventajas antes mencionadas, en base a estudios de la máquina sincrónica en el computador digital, se pueden mejorar los diseños de los componentes eléctricos y mecánicos de la máquina sincrónica, ya que se tiene la posibilidad de hacer investigaciones con una gama de parámetros y condiciones de operación.

- Debería desarrollarse en base a este trabajo, la simulación de la máquina sincrónica incluyendo el efecto de los reguladores de voltaje y velocidad, sobreentendiéndose que, el tópic que se ha tratado en esta tesis no es algo estacionario, sino que está sujeto a investigación y desarrollo, que si se los realiza incidirán directamente en poder alcanzar una comprensión más cabal de la máquina sincrónica considerada aisladamente y como un elemento fundamental de un gran sistema de potencia.

X

- Paralelamente con lo antes señalado, en la Facultad se debería trabajar en proyectos de investigación relacionados con nuevos métodos para determinar los parámetros de la máquina sincrónica, ya que la precisión de los resultados obtenidos en la simulación están fuertemente ligados con el grado de exactitud con el que puedan ser obtenidos aquellos.

* * * *

R E F E R E N C I A S

- 1.- Poveda Méntor, "Methods of Interfacing Synchronous Machine with Transmission Systems in a Digital Simulation" Technical Report TR-EE 76-11, Purdue University 1976.
- 2.- Anderson y Fouad, "Power System Control and Stability", Iowa State University 1973.
- 3.- Park. R.H., "Two Reaction Theory on Synchrous machines, Generalized Method of analisis Part.I", Trans. AIEE, Vol. 48, pp 716-727, July 1979.
- 4.- Carnahan B., Luther H.A.; Wilkes J., "Applied numerical methods", John Wiley and Sons, I.C., New York, 1969.
- 5.- Poveda Méntor, "Apuntes de Clases de Máquinas Eléctricas III", Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador 1979.
- 6.- Kerkman Russel, "Digital Simulation of Unbalanced Faults on Synchronous Machines", Technical Report TR-EE 36, Purdue University, 1976.
- 7.- Toapanta Milton, "Estado transitorio del motor de inducción", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, 1978.
- 8.- López José, "Análisis digital de la pérdida de excitación"

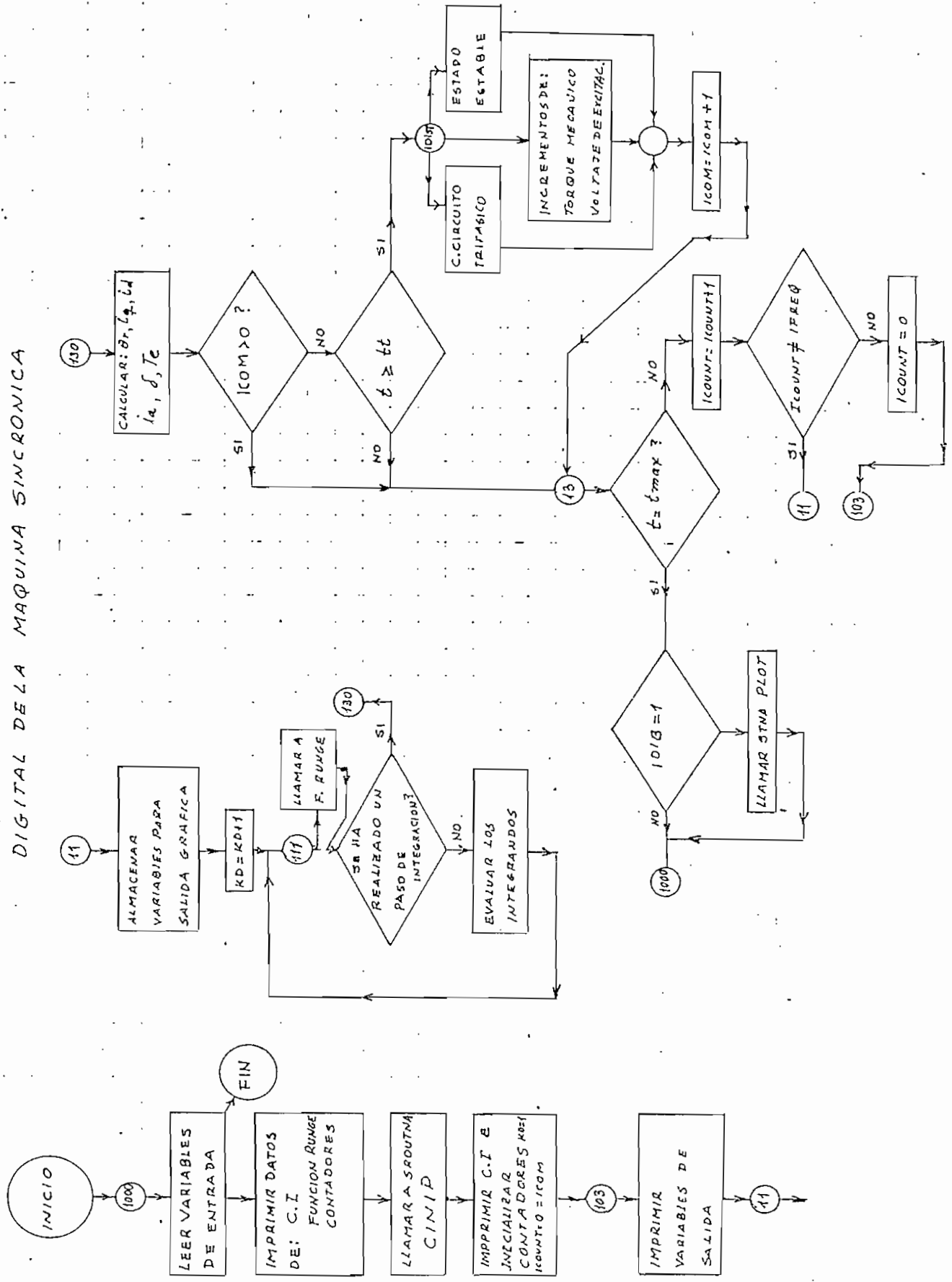
de la Máquina Sincrónica", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Noviembre 1979.

- 9.- Arguello Gabriel, "Método de determinación de los parámetros en régimen permanente y transitorio de una Máquina Sincrónica", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Agosto 1974.
- 10.- Krause Paul, Lipo Thomas and Carroll Dennis, "Applications of Analog and Hybrid Computation in Electric Power Systems Analysis", PROC. IEEE, July 1974, pp 994-1008.
- 11.- Dundeno Paul Prabhashankar Kundur and Schulz Richard, "Recent trend and progress in Synchronous machine modeling in the electric utility industry", PROC. IEEE, July 1974, pp 941-949.
- 12.- Cortes Manuel, "Curso moderno de máquinas eléctricas rotativas", Tomo III, Editores técnicos Asociados, Barcelona.
- 13.- Adkins Bernard, "The general theory of electrical machines", CHAPMAN Editions, Londres 1962.
- 14.- I.M. Canay "Causes of discrepancies on Calculation of rotor quantities and exact equivalent diagrams of the Synchronous machine, Power Apparatus and Systems, IEEE, Vol. pas 88, pp 1114 - 1120.

A P E N D I C E . A

DIAGRAMA DE FLUJO DE LA SIMULACION DIGITAL

DIAGRAMA DE FLUJO DE LA SIMULACION
DIGITAL DE LA MAQUINA SINCRONICA




```

0014      PRINT 3#                               0017
0015      WRITE(8,666)
0016      CONTINUE
0017      PRINT 4#,T,V(1),V(7), (COR(L),L=1,4)      0024
0018      11 CONTINUE                               0025
0019      DDVGE=V(6)-VP(1)
0020      CFA(1,KD)=CCF(3)*NFA
0021      DFC(1,KD)=DDVGE*NV
0022      DPA(1,KD)=COP(4)*NT
0023      DPA(1,KD)=V(7)*ND
0024      COTV=COP(1)*CPASF
0025      WRITE(4,545)T,COTV
0026      CONTINUE
0027      K0=K0+1
C----- LLAMAR A LA FUNCION PUNGE-KUTTA DE CUARTO ORDEN 0036
0028      K=KUNGE(7,V,F,T,H)                        0037
C----- SIEMPRE QUE K=1 SE CALCULAN LAS DERIVADAS 0038
0029      IF(K.NE.1) GO TO 132                       0039
C-----
0030      VEF=V(1)/VFL0
0031      VD=VEF*DCOS(V(7))
0032      VE=VEF*DSIN(V(7))
C----- SE EVALUAN LAS FUNCIONES
0033      F(1)=V(1)*DCOS(V(7))+C(1)*V(1)-VELR*V(2)*V(6)+P(3)*V(3) 0046
0034      F(2)=V(1)*DSIN(V(7))+VELR*V(1)*V(6)+P(4)*V(2)+P(5)*V(4)+P(6)*V(5) 0047
0035      F(3)=V(2)*V(1)+P(3)*V(3) 0048
0036      F(4)=V(2)*V(2)+P(4)*V(4)+P(11)*V(5) 0049
0037      F(5)=VELR*VEF*F(2)+V(2)*F(13)+V(4)+P(14)*V(5) 0050
0038      F(6)=V(2)*V(2)+V(2)*P(12)+V(2)*V(7)-P(13)*V(1)*V(4)-P(20)*V(1)+ 0051
0039      + V(5)-P(14)*P(15)
0040      F(7)=VELR*V(6)-1.000
0041      3344 CONTINUE
0042      GO TO 111
C----- SE HA ALCANZADO EL TIEMPO MAXIMO SI 0 NO 0056
0043      C----- 0057
0044      C----- 0058
0045      C----- 0059
0046      C----- 0060
0062      130 TETR=V(7)+VELP*NT+TFC
0063      COP(1)=V(15)*V(1)+P(19)*V(3) 0062
0064      COP(2)=P(16)*V(2)+P(18)*V(4)+P(20)*V(5) 0063

```

```

DIS FORTRAN IV 360N-ED-479 7-A          MAINPGM          DATE 10/12/81          TIME 20.38.20          PAGE 0022
0065      COP(1)-COP(1)=DCOS(T,PR)+COP(2)*DSIN(TETP) 0064
0066      COP(4)=V(2)*COP(1)-V(1)*COP(2) 0065
C=====
0067      IF(1.COP.GT.0) GO TO 13 0066
C=====
0068      IF(T.CE.TC) GO TO 7777 0067
0069      GO TO 13 0068
0070      C----- PRODUCCION DE DISTURBIOS===== 0071
0071      C----- 0072
0072      C----- 0073
0073      7777 GO TO (101,102,13),IDIST 0074
0074      101 D(1)=P(1)*0.0 0075
0075      PRINT 3345 0076
0076      ICM=1 0077
0077      GO TO 13 0078
0078      102 CONTINUE 0079
0079      PRINT 3000 0080
0080      IM =TV+TINC 0081
0081      PRINT 3346 0082
0082      PRINT 1111,P(1),TM,TT 0083
0083      ICM=1 0084
0084      TCC=TFI 0085
C----- PRODUCCION DE DISTURBIOS===== 0086
0085      C----- 0087
0086      C----- 0088
0087      C----- 0089
0088      11 CONTINUE 0090
0089      IF(T.LE.TMAX) GO TO 1500 0091
0090      GO TO 1500 0092
0091      PRINT 777, IDIST, TINC 0093
0092      PRINT 551, TFI 0094
C----- SE CUMPLIAN LAS VARIABLES DE SALIDA, CORRIENTES, TORQUE VELOCIDAD (TA 0095
0093      IC (IMP,NC,1) GO TO 1000 0096
C===== 0097
0094      C===== AQUI SE LLA VA A LA SUBROUTINA FIGURA 0098
0095      C----- 0099
0096      PRINT 401,NFA 0100
0097      CALL PLCT(CFA,1,KD,NACFA) 0101
0098      CALL PLCT(NV 0102
0099      CALL PLCT(DDG,1,KD,NAKVF) 0103
0100      PRINT 401,ND 0104

```

```

0034  CALL PR.FT (OPRA, LK0, NAGEA)
0035  CALL PR.GT(TIUA, LKD, NATOR)
0037  GO TO 1000
0039  ICOUNT=ICOUNT+1
1500  SF (WOPR) L05 PRESU.FADDS
C----- SF (FPR) GR. FC 11
          ICOUNT=
          GT )
0039  F00001(11)C, ACX, TOAPARETPOS DE LA MAQUINA, //, 5X, 'G5=', F10, 5, 5X, 'X
0100  *L5=1, F10, 5, 5X, 'RKO=', F10, 5, 5X, 'LKO=', F10, 5, 5X, 'PK0=', F10, 5, 5X,
0121  *Y LKO=, F10, 5, 5X, 'RPU=', F10, 5, 5X, 'XLFB=', F10, 5, 5X, 'XAD=', F10, 5, 5X,
0132  *XAD=, F10, 5, 5X, 'H5=', F10, 5,
          F00001(12)C, 5, 12, 'P10, 5, 213, 'E5, 'PFA, 'J)
          F00001(13)C, 'BX, 'TSEG', '11X, 'WRCON', '11X, 'DELTA (RAD)', '9X, 'TIRPU)',
          *11X, 'ID(0)', '11X, 'TATOU)', '11X, 'TEIPU)', 'J)
          F00001(11)C, '2017, 5)
          F00001(10)C, '5, //, 'P10, 5)
          F00001(9)C, '5X, F6, 5, 'Y, F6, 2)
          F00001(8)C, '5X, F6, 5, 'Y, F6, 2)
          F00001(7)C, '29X, 'DATOS PARA CALCULAR CONDICIONES INICIALES', //, 32X,
          *VLR=, F10, 4, 5X, 'VA=', F10, 4, 5X, 'FE=', F10, 4, 5X, 'KVA=', F10, 4, 5X, 'IK
          *HE', F10, 3, 5X, 'IDAFS DE LA FUNCION PUNTO', //, 25X, 'TMAX=', F10, 5, 5X,
          *HE', F10, 3, 5X, 'IDAFS DE LA FUNCION PUNTO', //, 25X, 'TMAX=', F10, 5, 5X,
          *F10, 4, 5X, 'V1=', F10, 4, 5X, 'V2=',
          *F10, 4, 5X, 'V3=', F10, 4, 5X, 'V4=', F10, 4, 5X, 'V5=', F10, 4, 5X, 'V6=',
          *F10, 4, 5X, 'V7=', F10, 4, 5X, 'V8=', F10, 4, 5X, 'V9=', F10, 4, 5X, 'V10=', F10, 4
          *A FOR NEO=', (F777)

```

```

0110 444 F00001(17)C, '015, 5)
0111 F00001(17)C, '50X, 'INIST=', '13, '5X, 'TING=', F10, 5)
0112 F00001(13)C, 'P15, 5)
0113 F00001(13)C, 'P15, 5)
0114 F00001(13)C, 'P15, 5)
0115 F00001(13)C, 'P15, 5)
0116 F00001(13)C, 'P15, 5)
0117 F00001(13)C, 'P15, 5)
0119 844 F00001(13)C, 'P15, 5)
          *A FOR NEO=', (F777)

```

```

DOS FORTRAN IV SAON-F0-470 3-R MAINPGM DATE 10/02/41 TIME 20.38.20 PAGE 0003
0119 444 F00001(17)C, '015, 5)
0120 844 F00001(17)C, '50X, 'INIST=', '13, '5X, 'TING=', F10, 5)
0121 844 F00001(13)C, 'P15, 5)
0122 844 F00001(13)C, 'P15, 5)
0123 844 F00001(13)C, 'P15, 5)
0124 844 F00001(13)C, 'P15, 5)
0125 844 F00001(13)C, 'P15, 5)
0126 844 F00001(13)C, 'P15, 5)
0127 844 F00001(13)C, 'P15, 5)
          *A FOR NEO=', (F777)
          END

```


INCREMENTO BRUSCO DEL TORQUE MECANICO

PARAMETROS DE LA MAQUINA

RS= 0.02690 XLS= 0.04146 RKO= 0.04039 XLKO= 0.24437 PKD= 0.02703
XLKQ= 0.08204 RFD= 0.01704 XLFD= 0.13498 XAQ= 0.30701 XAD= 0.55403 HS= 1.65000

DATOS PARA CALCULAR CONDICIONES INICIALES

VELR= 376.9900 VA= 0.5271 FI= 1.3259 KVA= 0.5890 IND= 2

DATOS DE LA FUNCION RUNGE

TMAX= 1.00000 H= 0.00200 IFREQ= 2 IDIB= 1 VAE=2.00

CONDICIONES INICIALES

V1= -0.0951 V2= 0.7509 V3= -0.0838 V4= 0.8154
V5= 1.2242 TM= -0.3529 V7= 0.0714 VRIN= 1.0000 I0= -0.2728 ID= -1.5566

A P E N D I C E C

MANUAL DE USO DEL PROGRAMA SIMULACION DIGITAL
DE LA MAQUINA SINCRONICA

C.1. METODO DE SOLUCION

El algoritmo de solución consta de un programa principal, dos subrutinas y una función. El proceso de operación es el siguiente:

1.- Se leen los siguientes datos:

- Parámetros de la máquina sincrónica.
- Indicadores
- De operación de la máquina conectada a la barra infinita
- Para la función Runge.

2.- Subrutina CINIP, calcula los coeficientes de las ecuaciones diferenciales y condiciones iniciales.

3.- Subrutina PLOT, se utiliza para obtener resultados gráficos.

4.- Función RUNGE, se utiliza para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales no lineales que describen el comportamiento del sistema electromecánico.

C.2. NOMENCLATURA

En el desarrollo del programa se ha empleado la siguiente-

te nomenclatura:

1.- VARIABLES DE ENTRADA

<u>SIMBOLO</u>	<u>DESCRIPCION</u>
FI	Angulo de Factor de potencia.
H	Tamaño del paso de integración
HS	Constante de inercia de la máquina en seg.
IND	Indicador, si es (1) la máquina trabaja como motor, si es (2) la máquina es un generador en el cálculo de condiciones iniciales.
IFREQ	Contador que indica la frecuencia con que se imprimen los resultados.
IDIB	Indicador: si es (1) salen resultados gráficos, si es diferente a (1) no existe salida gráfica.
IDIST	Indicador: si es (1) la máquina sufre cortocircuito, si es (2) incremento brusco del <u>tor</u> que de la máquina impulsora, (3) operación en estado estable.
KVA	Potencia aparente.
NFA NEQ NED NET ND NV	Factores de multiplicación para obtener <u>resul</u> tados gráficos de corrientes de fase, en el eje q, eje d, torque, ángulo de potencia, velocidad del rotor respectivamente.

NACFA NACEQ NACED NATOR NADEA NARWE	Contadores que indican la ubicación del cero en el eje de las ordenadas para las variables definidas anteriormente.
NPIM	Seleccionador de puntos para gráficos.
RS RFD RKQ RKD	Resistencias de los devanados del estator, campo, damping, en el eje q, damping en el eje d respectivamente.
TEI	Angulo eléctrico inicial
TMAX	Límite superior del dominio del tiempo.
TT	Instante en que se produce la perturbación en seg.
TINC	Incremento de torque de la máquina impulsora.
VAE	Velocidad angular eléctrica.
VELB	Velocidad angular eléctrica base.
VA	Voltaje de la barra infinita.
VRIN	Velocidad inicial del rotor.
XLS XAQ XAD XLKQ KLKD XLFD	Reactancias de la máquina sincrónica, guardan la misma denominación que los parámetros <u>defi</u> nidos en el capítulo uno.

2.- VARIABLES DE SALIDA

La salida de resultados comprende: Corrientes de fase, eje q, eje d; torque electromagnético, velocidad del rotor, ángulo de potencia. Se ha empleado la siguiente nomenclatura:

<u>SIMBOLO</u>		<u>DESCRIPCION</u>
COR(L)	L = 1,4	Corrientes y torque electromagnético.
V(J)	J = 1,7	Variables integradas en el algoritmo Runge Kutta.

Además de las variables mencionadas se obtienen:

- a) Datos para calcular las condiciones iniciales.
- b) Datos de la función Runge.
- c) Condiciones iniciales (concatenaciones de flujo, ángulo delta, velocidad del rotor).

C.3. FORMA DE PROPORCIONAR LOS DATOS AL PROGRAMA

Todos los datos a excepción de la velocidad angular eléctrica base y la constante de inercia que están en (rad/seg) y (seg) respectivamente; están en por unidad. La forma en que están suministrados los datos se muestra en el esquema uno.

A P E N D I C E D

CARACTERISTICAS DEL EQUIPO EMPLEADO
EN LA EXPERIMENTACION

D.1. EQUIPO EMPLEADO EN LA EXPERIMENTACION Y SUS CARACTERISTICAS.

1 Motor de Inducción

Marca: SIEMENS

Trifásico

V = 220 V en delta

I = 18 A

Kw = 4.1

f = 60 Hz

RPM = 2100

1 Osciloscopio

Marca: TEKTRONIX

Type 5649 Storage oscilloscope with auto erase 4 canales.

1 Cámara fotográfica para osciloscopio

Marca: TEKTRONIX

Rollo ASA 3000

1 Analizador Industrial

Marca: SIEMENS

1 Estroboscopio AC

Marca: GENERAL RADIO

Tipo 1531

- 1 Tacogenerador
Marca: YEW
Tipo 2611
- 2 Transformadores de relación 1/1 con fines de aislamiento
- 1 Amperímetro CC 5-20 A
- 1 Voltímetro AC 260, 130, 65 V
- 3 Reóstatos de 3.3 Ω , calibrados en 1 Ω .
- 1 Reóstato de 3.3 Ω , calibrado en 1 Ω .
- 1 Reóstato de 294 Ω para señal de voltaje.
- 1 Reóstato de 357 Ω para control del campo de la máquina sincrónica.
- 2 Pulsantes.
- 1 Contactor 220 V, AC
- 3 Terminales para llevar señales al osciloscopio.
- 1 Puente rectificador de onda completa.

A P E N D I C E E .

VALORES BASE

CORRECCION DE PARAMETROS

E.1. VALORES BASE

Los valores base seleccionados son:

$$V_{Bfn} = 230 \text{ V}$$

$$KVA_B = 3.5 = \text{KVA nominales de la máquina.}$$

$$I_B = \frac{KVA}{3 V_{Bfn}} = \frac{3500 \text{ VA}}{3 \times 230 \text{ V}}$$

$$I_B = 5.0725 \text{ A}$$

$$im_B = 5.0725 \times \sqrt{2} = 7.1735 \text{ |A|}$$

E.2. DATOS DE OPERACION DEL SISTEMA

A continuación serán indicados los valores de las magnitudes más importantes que fueron medidas antes de la producción de la perturbación (y después como es para el caso del incremento brusco del torque de la máquina impulsora) en forma experimental.

E.2.1. INCREMENTO DEL TORQUE.

a) Antes de la perturbación

$$V_{rs} = 292.38 \text{ V}_{\text{pico}}$$

$$V_a \text{ pu} = \frac{292.38}{230 \times \sqrt{3} \times \sqrt{2}} = 0.5190$$

$$S = \sqrt{500 + 2000} = 2061.55 \text{ VA}$$

$$\text{KVA}_{\text{pu}} = \frac{2061.55}{3500} = 0.5890$$

$$\phi = \text{tg}^{-1} \frac{2000}{500} = 1.3258 \text{ radianes}$$

$$\text{Torque}_1 = \frac{500}{188.4956} = 2.6526 \text{ N.m}$$

$$\text{Torque}_{\text{pu}_1} = \frac{26526 \times 376.99}{3500} = 0.2857$$

b) Después de la perturbación

$$\text{Torque}_2 = \frac{2850}{188.49} = 15.1197 \text{ N.m}$$

$$\text{Torque}_{\text{pu}_2} = \frac{15.1197}{3500} \times 376.99 = 1.63$$

$$S = \sqrt{2000 + 2850} = 3481.76 \text{ VA}$$

E.2.2. CORTOCIRCUITO TRIFASICO.

$$V_{apu} = 0.4952$$

$$KVA_{pu} = 0.0078$$

$$\phi = 0.1129 \text{ radianes}$$

NOTA: El ángulo ϕ se ha calculado atendiendo al requerimiento de operación en vacío de la máquina sincrónica. Esto es

$$E_a \approx V_a$$

E.3. CORRECCION DE LAS CONSTANTES DE TIEMPO.

La causa para realizar la corrección de estas constantes fue ya explicada en el capítulo cuatro, sección 1.4.

Los valores de las constantes de tiempo encontradas luego de hacer la representación de la corriente de cortocircuito en papel semilogaritmico (ver gráfico 1) son:

$$T_d' = 27 \text{ m seg.}$$

$$T_d'' = 11 \text{ m seg.}$$

$$T_a = 21 \text{ m seg.}$$

Acerca del valor de T_q'' es necesario aclarar que se con-

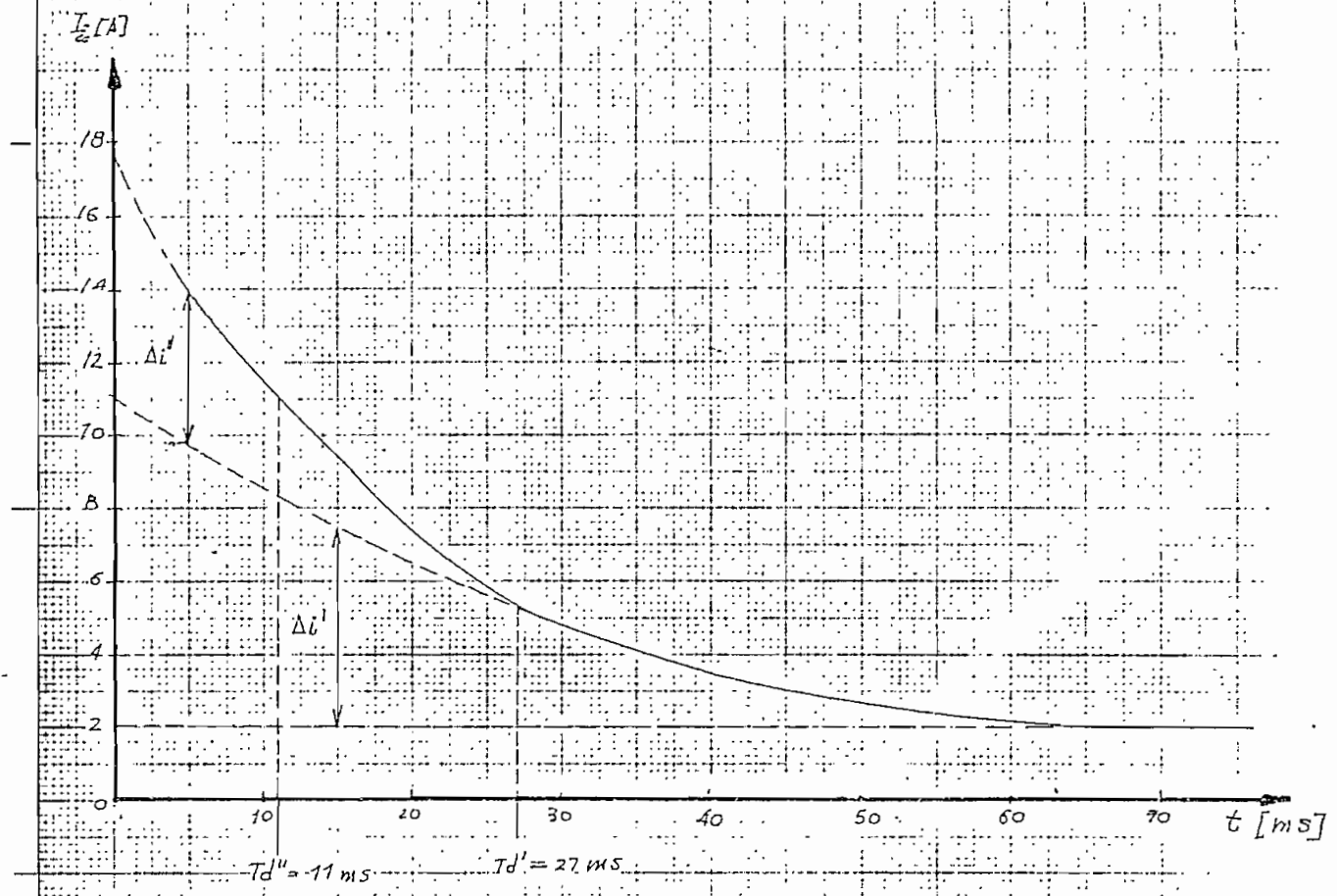


Gráfico No. 1

Gráfico que representa las envolventes de la curva de corriente de cortocircuito y sus componentes subtransitoria, transitoria, y de estado permanente, en función del tiempo.

sidera al valor calculado en la tesis del Ingeniero Arguello, por un factor de 3. El motivo es que todas las demás constantes de tiempo en el eje directo difieren en un factor de tres aproximadamente. Con la consideración anterior se tiene que:

$$Tq'' = \frac{55.3}{3} = 18.43 \text{ m seg.}$$

Las constantes de tiempo de circuito abierto para el eje directo son $|13|$:

$$Td_0' = \frac{Td' \ xd}{xd'}$$

$$Td_0'' = \frac{xd}{xd''} \frac{Td' \ Td''}{Td'} \quad (E.3-1)$$

$$Tq_0'' = \frac{xq}{xq''} Tq''$$

En las ecuaciones E.3-1, las reactancias no son objeto de discrepancia y son los valores dados en la ref. |8| obteniéndose los siguientes valores numéricos para las constantes de tiempo:

$$Td_0' = 27 \times \frac{27}{6.8} = 107.21 \text{ m seg.}$$

$$T_{d0}'' = \frac{27}{40} \frac{27}{T_{d0}'} \frac{11}{11} = 18.70 \text{ m seg.}$$

$$T_{q0}'' = \frac{15.8}{8.05} T_q'' = 36.31 \text{ m seg.}$$

Teniendo ya el valor numérico de las constantes de tiempo se procede a calcular las resistencias de los devanados de dam ping; son los valores siguientes:

$$r_{fd} = 0.7729 \Omega$$

$$r_{kd} = 1.2257 \Omega$$

$$r_{kq} = 1.8315 \Omega$$

Si $Z_B = 45.34 \Omega$, los valores en pu de las resistencias antes calculadas en Ω son:

$$r_{kd} = 0.02703 \text{ pu}$$

$$r_{fd} = 0.017046 \text{ pu}$$

$$r_{kq} = 0.04039 \text{ pu}$$

Es con estos valores de resistencias junto con las reacc-tancias y constante H que se alimenta al programa digital y se obtienen los resultados vistos en el capítulo 4.