

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

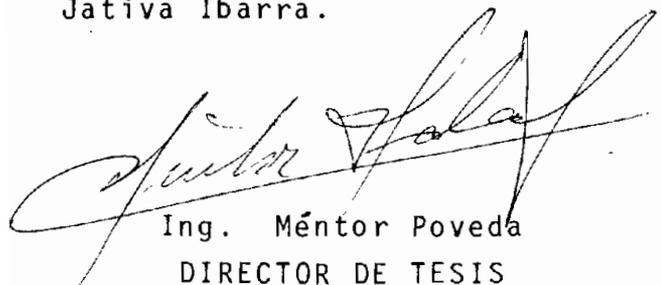
"MODELO DIGITAL DE MAQUINAS SINCRONICAS INCLUIDA
LA SATURACION"

JESUS JATIVA IBARRA

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO
DE INGENIERO EN LA ESPECIALIZACION DE
POTENCIA DE LA ESCUELA POLITECNICA
NACIONAL

DICIEMBRE, 1.981

Certifico que el presente traba
bajo ha sido elaborado en su
totalidad por el Señor Jesús
Játiva Ibarra.



Ing. Menteor Poveda
DIRECTOR DE TESIS

P R O L O G O

La necesidad de continuar el programa planteado por el Departamento de Potencia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica , para simular las componentes de un Sistema Eléctrico de Potencia funcionando dinámicamente en conjunto, impulsa a la formulación y posterior desarrollo del tema: "MODELACION DIGITAL DE MAQUINAS SINCRONICAS INCLUIDA LA SATURACION".

Existe al momento un trabajo que simula a la máquina sincrónica considerando un comportamiento lineal del hierro magnético del núcleo, basado en él y con un análisis de la saturación se implementa un método para simular este tipo de no linealidad de la máquina sincrónica.

El autor deja constancia de su más sincero agradecimiento al Ing. Méntor Poveda, Director de Tesis, con cuya valiosa colaboración se ha podido culminar con éxito el proyecto planteado.

Por el enorme apoyo prestado en el desarrollo de la Tesis, expreso mi agradecimiento a la Señora Sonia Pérez y a mi compañero Henry Cruz.

Quito, 29 de Noviembre de 1981

S U M A R I O

Se simula digitalmente a la Máquina Sincrónica para estudiarla en comportamiento dinámico. El modelo matemático implementado es el que toma como variables de estado a las concatenaciones de flujo.

Se introduce el efecto del comportamiento no lineal del hierro magnético, para lo cual es desarrollado un método que corrige las concatenaciones de flujo mutuo del eje directo.

El programa digital es probado en cinco aplicaciones de la máquina sincrónica: cortocircuito trifásico, incremento brusco del torque, incremento brusco del voltaje de excitación y pérdida de la excitación por cortocircuito del campo para acción generadora; y, arranque para acción motora.

Se comparan los resultados obtenidos por los modelos no saturados y saturados.

I N D I C E

Pág.

CAPITULO I.- MODELO MATEMATICO

1.1.	Ecuaciones de la máquina en los ejes abc	1
1.2.	Ecuaciones de la máquina en los ejes qd0	4
1.3.	Circuitos equivalentes	7
1.4.	Ecuaciones de la máquina en términos de concatenaciones de flujo por segundo como variables de estado	8
1.5.	Representación del sistema mecánico	12

CAPITULO II.- INTRODUCCION DE LA NO LINEALIDAD DEL HIERRO

2.1.	Introducción	14
2.2.	Ecuaciones en términos de concatenaciones de flujo mutuo no saturado	15
2.3.	Ecuaciones en términos de concatenaciones de flujo mutuo saturado	17
2.4.	Curva de saturación	20
2.5.	Curva para la modelación digital	22

CAPITULO III.- SIMULACION DE LA MAQUINA SINCRONICA

3.1.	Simulación en el Computador Analógico	23
3.2.	Simulación en el Computador Digital	25

3.2.1. Método de Resolución de las Ecuaciones Diferencia <u>l</u> es	25
3.2.2. Cálculo digital de la saturación	27
3.2.3. Período de Integración	28
3.2.4. Condiciones Iniciales	29
3.2.5. Programa Digital	40

CAPITULO IV.- APLICACIONES DEL PROGRAMA

4.1. Prueba de Funcionamiento	45
4.2. Cortocircuito Trifásico	46
4.3. Incremento brusco del Torque	50
4.4. Incremento brusco del voltaje de excitación	52
4.5. Pérdida de la excitación por cortocircuito del cam <u>p</u> o	55
4.6. Arranque de la máquina sincrónica	58

CAPITULO V.- COMPARACION DE RESULTADOS

5.1. Cortocircuito trifásico	60
5.2. Incremento brusco del torque mecánico	69
5.3. Incremento brusco del voltaje de excitación	77
5.4. Pérdida de la excitación por cortocircuito	84
5.5. Arranque del motor sincrónico	91

CAPITULO VI.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	98
APENDICE A: Listado del Programa	100
APENDICE B: Manual de uso del programa	101
APENDICE C: Datos de la máquina sincrónica utilizada .	106
REFERENCIAS	108

C A P I T U L O I

MODELO MATEMATICO

1.1. ECUACIONES DE LA MAQUINA EN LOS EJES abc

El modelo general de la máquina sincrónica se lo puede representar por las ecuaciones que rigen a una máquina elemental de dos polos con tres devanados en el estator, un devanado en el campo y dos devanados amortiguadores o de damping, figura 1.1-1. Estos seis devanados están acoplados magnéticamente, el acoplamiento magnético entre ellos es función de la posición del rotor. De este modo las concatenaciones de flujo para cada devanado son también una función de la posición del rotor.

Para la simulación que se desarrolla en este trabajo, se imponen las siguientes restricciones: |1|

- a) Entrehierro uniforme;
- b) Distribución simétrica de los devanados del estator, que establecen una distribución sinusoidal de las ondas de fuerza magnetomotriz en el entrehierro; y,
- c) Circuito magnético no saturable,

| | referencias.

Handwritten note:
uso de...
en el...
...

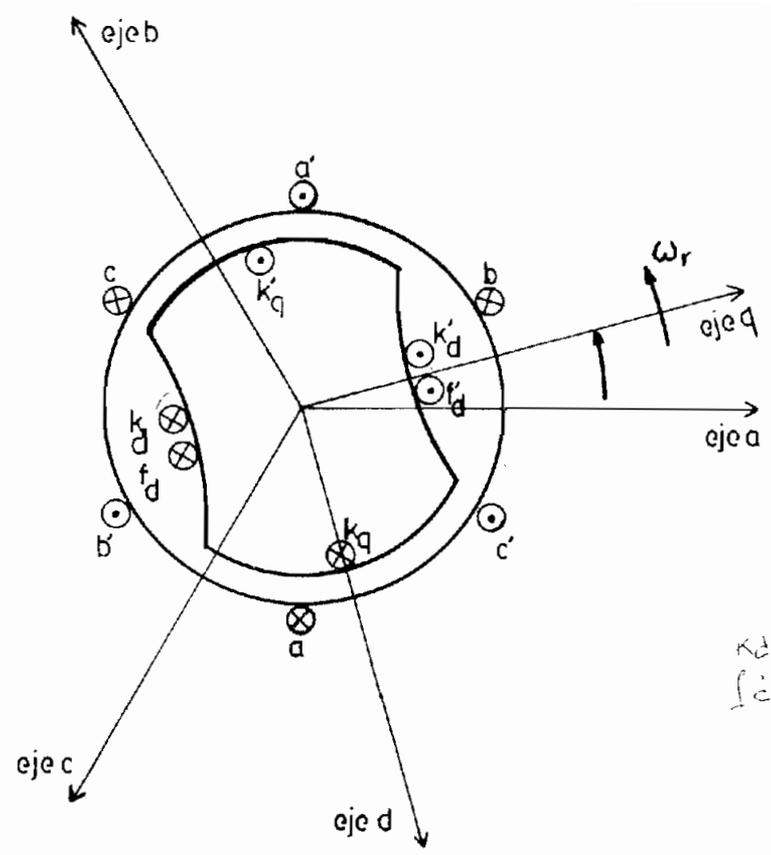


Fig. 1.1-1. Máquina Síncrona, polos salientes, 3 , 2 polos

Las concatenaciones de flujo para los seis devanados se definen en las siguientes matrices:

Estator	$\begin{vmatrix} \lambda_{as} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{cs} \end{vmatrix}$	=	$\begin{vmatrix} L_{asas} & L_{asbs} & L_{ascs} & L_{askq} & L_{askd} & L_{asfd} \\ L_{bsas} & L_{bsbs} & L_{bscs} & L_{bskq} & L_{bskd} & L_{bsfd} \\ L_{csas} & L_{csbs} & L_{cscs} & L_{cskq} & L_{cskd} & L_{csfd} \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{vmatrix}$
Rotor	$\begin{vmatrix} \lambda_{kq} \\ \lambda_{kd} \\ \lambda_{fd} \end{vmatrix}$		$\begin{vmatrix} L_{kqas} & L_{kqbs} & L_{kqcs} & L_{kqkq} & L_{kqkd} & L_{kqfd} \\ L_{kdas} & L_{kdbs} & L_{kdcs} & L_{kdkq} & L_{kdkd} & L_{kdfd} \\ L_{fdas} & L_{fdbs} & L_{fdcs} & L_{fdkq} & L_{fdkd} & L_{fdfd} \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} i_{kq} \\ i_{kd} \\ i_{fd} \end{vmatrix}$

Ecuación 1.1-1

donde la diagonal principal representa las inductancias propias de los

devanados y los elementos fuera de ella las inductancias mutuas entre los seis devanados.

Las ecuaciones de los voltajes son planteadas para la máquina funcionando como motor, las corrientes entran a los devanados del estator y la ecuación que las relaciona esta dada por $|v| = |r| \cdot |i| + |\lambda|$.

de la Fig. 1.1-1

De la fig. 1.1-2, en la cual las inductancias mutuas no se muestran para dar mayor claridad, tenemos las ecuaciones de voltaje:

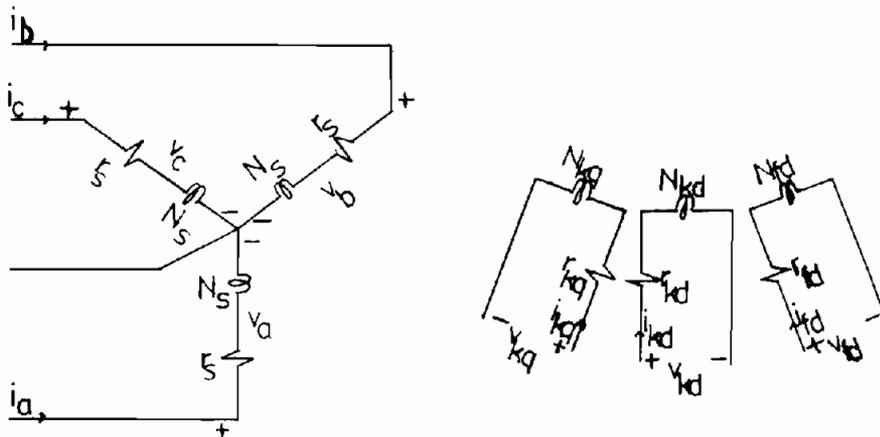


Fig. 1.1-2 Diagrama esquemático de la máquina sincrónica representada en Fig. 1.1-1.

$$\begin{array}{l}
 \text{Estator} \\
 \\
 \\
 \\
 \text{Rotor}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 v_{as} \\
 v_{bs} \\
 v_{cs} \\
 v_{kq} \\
 v_{kd} \\
 v_{fd}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{cccccc}
 r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & r_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & r_s & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & r_{kq} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & r_{kd} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{fd}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 i_{as} \\
 i_{bs} \\
 i_{cs} \\
 i_{kq} \\
 i_{kd} \\
 i_{fd}
 \end{array}
 + p
 \begin{array}{l}
 \lambda_{as} \\
 \lambda_{bs} \\
 \lambda_{cs} \\
 \lambda_{kq} \\
 \lambda_{kd} \\
 \lambda_{fd}
 \end{array}$$

Ecuación 1.1-2

La potencia instantánea viene dada por:

$$P_s = v_{as} i_{as} + v_{bs} i_{bs} + v_{cs} i_{cs} \quad (\text{Ec. 1.1-3})$$

El torque se obtiene a partir de la Potencia Electromagnética dividida por la velocidad del rotor.

1.2. ECUACIONES DE LA MAQUINA EN LOS EJES qd0

En la descripción matemática de la máquina sincrónica se logra una gran simplificación al hacer una adecuada transformación; ésta es conocida como Transformación de Park, la cual define un nuevo grupo de ejes que rotan a la velocidad angular eléctrica del rotor.

Puesto que la referencia se mueve con el rotor, las variables del rotor no sufren cambio alguno, y como se mira el comporta

Handwritten notes:
 Análisis de la máquina
 1.2.1

miento en los ejes: q y d podemos considerar que la transformación se hace de un sistema trifásico a un bifásico. Las variables del eje cero no están asociadas con la transformación y existen en la misma referencia que se producen.

Las concatenaciones de flujo en los ejes qd0 se rigen a través de:

$$\begin{array}{l}
 \text{Estator} \\
 \text{Rotor}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \lambda_{qs} \\
 \lambda_{ds} \\
 \lambda_{os} \\
 \lambda_{kq} \\
 \lambda_{kd} \\
 \lambda_{fd}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{l}
 L_{ls} + L_{aq} \quad 0 \quad 0 \quad L_{aq} \quad 0 \quad 0 \\
 0 \quad L_{ls} + L_{ad} \quad 0 \quad 0 \quad L_{ad} \quad L_{ad} \\
 0 \quad 0 \quad L_{ls} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\
 L_{aq} \quad 0 \quad 0 \quad L_{lkq} + L_{aq} \quad 0 \quad 0 \\
 0 \quad L_{ad} \quad 0 \quad 0 \quad L_{lkd} + L_{ad} \quad L_{ad} \\
 0 \quad L_{ad} \quad 0 \quad 0 \quad L_{ad} \quad L_{lfd} + L_{ad}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 i_{qs} \\
 i_{ds} \\
 i_{os} \\
 i_{kq} \\
 i_{kd} \\
 i_{fd}
 \end{array}$$

Ecuación 1.2-1

y los voltajes con la respectiva convención de signos para motor, vienen dados por las siguientes matrices:

Para el estator:

$$\begin{array}{l}
 v_{qs} \\
 v_{ds} \\
 v_{os}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{l}
 r_s \quad 0 \quad 0 \\
 0 \quad r_s \quad 0 \\
 0 \quad 0 \quad r_s
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 i_{qs} \\
 i_{ds} \\
 i_{os}
 \end{array}
 +
 \begin{array}{l}
 0 \quad p\theta_r \quad 0 \\
 -p\theta_r \quad 0 \quad 0 \\
 0 \quad 0 \quad 0
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \lambda_{qs} \\
 \lambda_{ds} \\
 \lambda_{os}
 \end{array}
 +
 p
 \begin{array}{l}
 \lambda_{qs} \\
 \lambda_{ds} \\
 \lambda_{os}
 \end{array}$$

Ecuación 1.2-2

Handwritten note:
 $v_{qs} = r_s i_{qs} + p\theta_r i_{qs} + p\lambda_{qs}$

Para el rotor:

$$\begin{vmatrix} v_{kq} \\ v_{kd} \\ v_{fd} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r_{kq} & 0 & 0 \\ 0 & r_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & r_{fd} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i_{kq} \\ i_{kd} \\ i_{fd} \end{vmatrix} + p \begin{vmatrix} \lambda_{kq} \\ \lambda_{kd} \\ \lambda_{fd} \end{vmatrix}$$

Ecuación 1.2-3

Las magnitudes de los parámetros del rotor se hallan referidas al estator por una relación de espiras, ver Ref. 9

La potencia instantánea tiene 3 componentes:

$$P_{qd0} = P_R + P_T + P_V \quad (\text{Ec. 1.2-4})$$

donde $P_R = \frac{3}{2} (r_s i_{qs}^2 + r_s i_{ds}^2 + 2r_s i_{os})$ Pérdidas resistivas (Ec. 1.2-5)

$$P_T = \frac{3}{4} p (\lambda_{qs} i_{qs} + \lambda_{ds} i_{ds} + \lambda_{os} i_{os}) \text{ Potencia de Transformación} \quad (\text{Ec. 1.2-6})$$

$$P_V = \frac{3}{2} \omega_r (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \text{ Potencia de velocidad - Potencia electromagnética.} \quad (\text{Ec. 1.2-7})$$

y el torque electromagnético se obtiene como:

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_r} = \frac{3}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (\text{Ec. 1.2-8})$$

1.3. CIRCUITOS EQUIVALENTES

Las ecuaciones correspondientes a cada eje definen el circuito equivalente respectivo, así tenemos para el eje q:

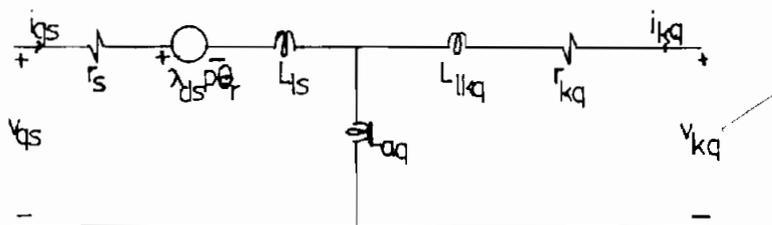


Figura 1.3-1

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \lambda_{ds} p \theta_r + p(L_{ls} i_{qs} + L_{aq}(i_{qs} + i_{kq})) \quad (\text{Ec. 1.3-1})$$

$$V_{kq} = r_{kq} i_{kq} + p(L_{lkq} i_{kq} + L_{aq}(i_{qs} + i_{kq})) \quad (\text{Ec. 1.3-2})$$

Para el eje d:

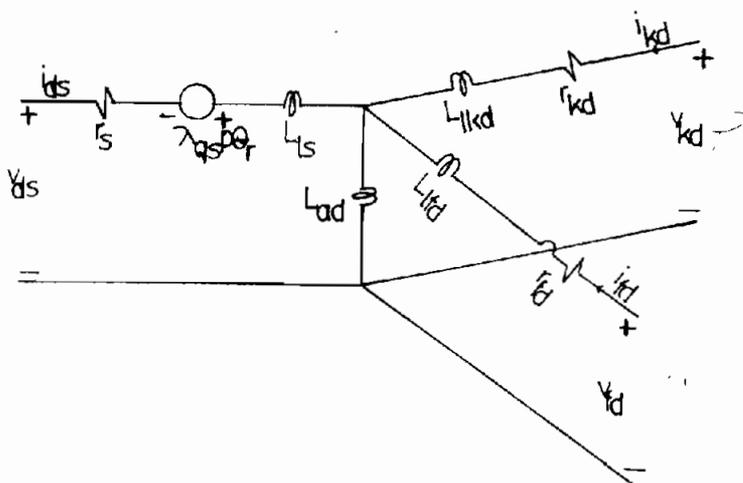


Figura 1.3-2

$$V_{ds} = r_s i_{ds} - \lambda_{qs} p\theta_r + p(L_{1s} i_{ds} + L_{ad}(i_{ds} + i_{kd} + i_{fd})) \quad (\text{Ec. 1.3-3})$$

$$V_{kd} = r_{kd} i_{kd} + p(L_{1kd} i_{kd} + L_{ad}(i_{ds} + i_{kd} + i_{fd})) \quad (\text{Ec. 1.3-4})$$

$$V_{fd} = r_{fd} i_{fd} + p(L_{1fd} i_{fd} + L_{ad}(i_{ds} + i_{kd} + i_{fd})) \quad (\text{Ec. 1.3-5})$$

Para el eje 0:

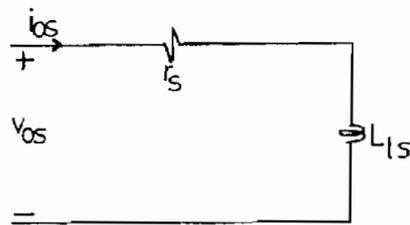


Figura 1.3-3

$$V_{0s} = r_s i_{0s} + p(L_{1s} i_{0s}) \quad (\text{Ec. 1.3-6})$$

1.4. ECUACIONES DE LA MAQUINA EN TERMINOS DE CONCATENACIONES DE FLUJO POR SEGUNDO COMO VARIABLES DE ESTADO |1|

Las concatenaciones de flujo por segundo, resultan de transformar las concatenaciones de flujo multiplicadas por la velocidad angular eléctrica, a valores en p.u.:

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

$$\psi_d = x_{1s} i_d + x_{ad}(i_d + i_{kd} + i_{fd})$$

$$\psi_{kq} = x_{1kq} i_{kq} + x_{aq}(i_q + i_{kq}) \quad (\text{Ec. 1.4-1})$$

$$\psi_{kd} = x_{1kd} i_{kd} + x_{ad}(i_d + i_{kd} + i_{fd})$$

$$\psi_{fd} = x_{1fd} i_{fd} + x_{ad}(i_d + i_{kd} + i_{fd})$$

Utilizando la relación que define las concatenaciones de flujo por segundo $\dot{\psi} = \omega_e \lambda$ y la ecuación de la velocidad angular $p\theta_r = \omega_r$, los voltajes vienen dados por:

$$v_q = r_s i_q + \frac{p}{\omega_b} \dot{\psi}_q + \psi_d \frac{\omega_r}{\omega_b}$$

$$v_d = r_s i_d + \frac{p}{\omega_b} \dot{\psi}_d - \psi_q \frac{\omega_r}{\omega_b}$$

$$0 = r_{kq} i_{kq} + \frac{p}{\omega_b} \dot{\psi}_{kq} \quad (\text{Ec. 1.4-2})$$

$$0 = r_{kd} i_{kd} + \frac{p}{\omega_b} \dot{\psi}_{kd}$$

$$v_f = r_{fd} i_{fd} + \frac{p}{\omega_b} \dot{\psi}_{fd}$$

En donde se ha reemplazado los voltajes de los devanados de damping por cero, puesto que están cortocircuitados. 

Al reemplazar las concatenaciones de flujo por segundo en las ecuaciones, se tiene un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales de primer orden, cuyas variables de estado son las corrientes. Esta modelación permite obtener directamente corrientes. Pero existe un gran inconveniente para introducir la no linealidad del hierro, pues se requiere calcular las concatenaciones de flujo por segundo en cada paso, lo que implica mayor tiempo de computación.

El otro modelo de la máquina síncrona tiene por variables de estado las concatenaciones de flujo por segundo. Resolviendo las Ec. 1.4-1 para corrientes y reemplazándolas en las ecuaciones 1.4-2, el sistema de ecuaciones diferenciales no lineales de primer orden se expresan como:

$$\frac{1}{\omega_b} |p\psi| = |v_{qdf}| + |X_{mch}| |\psi| \quad (\text{Ec. 1.4-3})$$

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

$$|v_{qdf}|^T = |v_q, v_d, 0, 0, v_f|$$

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

$$X_{mq} = \frac{1}{\frac{1}{X_{1s}} + \frac{1}{X_{aq}} + \frac{1}{X_{1kq}}}$$

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

Este modelo es conveniente para considerar el efecto de la saturación, porque todos los términos del sistema de ecuaciones son lineales, excepto para las concatenaciones de flujo mutuo de eje directo.

En la simulación digital se emplea el modelo de concatenaciones de flujo.

Considerando a la máquina conectada a un sistema trifásico simétrico, la cual da $i_0 = 0$, las demás corrientes vienen dadas por:

$$|i_{q,d}| = -\frac{1}{X_{1s}} |X_i| |\psi| \quad (\text{Ec. 1.4-4})$$

en donde:

$$|X_i| = \frac{-1}{\sqrt{3}} \begin{vmatrix} \frac{X_{mq}}{X_{1s}} - 1 & 0 & \frac{X_{mq}}{X_{1kq}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{X_{md}}{X_{1s}} - 1 & 0 & \frac{X_{md}}{X_{1kd}} & \frac{X_{md}}{X_{1fd}} \end{vmatrix}$$

A partir de i_q e i_d , se obtienen las corrientes de fase por la transformación de Park como:

$$i_a = i_q \cos \theta_r + i_d \sin \theta_r \quad (\text{Ec. 1.4-5})$$

1.5. REPRESENTACION DEL SISTEMA MECANICO |1|

El sistema mecánico representado por la velocidad angular ω_r del rotor y al torque electromagnético, está definido como :

$$\omega_r = \frac{1}{2Hp} (T_e - T_m) \quad (\text{Ec. 1.5-1})$$

$$T_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d \quad (\text{Ec. 1.5-2})$$

En donde T_m : Torque de la máquina impulsora en p.u.

H : Constante de inercia en segundos.

El ángulo de potencia se obtiene de la ecuación:

$$\delta = \frac{\omega_b}{p} (\omega_r - \omega_e) \quad (\text{Ec. 1.5-3})$$

ω_e = velocidad angular eléctrica en p.u.

Los símbolos en las ecuaciones anteriores tienen las siguientes definiciones:

r_s : resistencia de armadura

X_{ls} : reactancia de dispersión del devanado de armadura.

r_{kq} : resistencia del devanado amortiguador en el eje de cuadratura.

X_{lkq} : reactancia de dispersión del devanado amortiguador en el eje en cuadratura.

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

X_{lkd} : reactancia de dispersión del devanado del eje directo.

r_{fd} : resistencia del devanado de campo.

X_{lfd} : 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 $\frac{d}{dt}$

C A P I T U L O IIINTRODUCCION DE LA NO LINEALIDAD DEL HIERRO

2.1. En una máquina rotativa el entrehierro presente siempre predomina sobre el hierro del núcleo, por lo cual la consideración del circuito magnético lineal es una buena aproximación, como se podrá deducir en los siguientes capítulos, al contrario del transformador que no tiene entrehierro y la saturación del núcleo influye notablemente en su funcionamiento.

Al tomar en cuenta el efecto de la saturación del hierro, las inductancias de magnetización L_{ad} y L_{aq} ya no son constantes, al igual que L_{md} y L_{mq} .

Una aproximación sería corregir el valor de L_{ad} y L_{aq} a cada instante considerando la saturación, siendo un método largo y difícil.

El modelo matemático de concatenaciones de flujo muestra su conveniencia para hacer intervenir la no linealidad del hierro, debido a que todos los parámetros son constantes, menos las concatenaciones de flujo magnetizantes. En la simulación de la máquina sincrónica, sea por computador analógico o digital, esto puede realizarse calculando una función de satu

ración para ajustar ψ_{md} y ψ_{mq} a cada instante para reflejar el estado de las inductancias mutuas.

Dado que el entrehierro presente en el eje en cuadratura es mayor que en el eje directo, no se considera el efecto de la saturación, así que generalmente es necesario ajustar solamente ψ_{md} .

2.2. ECUACIONES EN TERMINOS DE CONCATENACIONES DE FLUJO MUTUO NO SATURADO

Las concatenaciones de flujo del eje directo pueden ser escritas como:

$$\psi_d = X_{ls} i_d + X_{ad}(i_d + i_{kd} + i_{fd})$$

$$\psi_{kd} = X_{lkd} i_{kd} + X_{ad}(i_d + i_{kd} + i_{fd}) \quad (\text{Ec. 2.2-1})$$

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

Se define las concatenaciones de flujo mutuo del eje directo con la ecuación 2.2-2, en la cual se tiene la reactancia de magnetización de eje directo multiplicada por las corrientes que circulan por ella. (Ver circuito equivalente del eje directo).

$$\psi_{md} = X_{ad} (i_d + i_{kd} + i_{fd}) \quad (\text{Ec. 2.2-2})$$

Reemplazando en Ec. 2.2-1

$$\psi_d = X_{ls} i_d + \psi_{md}$$

$$\psi_{kd} = X_{lkd} i_{kd} + \psi_{md} \quad (\text{Ec. 2.2-3})$$

$$\psi_{fd} = X_{lfd} i_{fd} + \psi_{md}$$

Despejando las corrientes:

$$i_d = \frac{\psi_d - \psi_{md}}{X_{ls}}$$

$$i_{kd} = \frac{\psi_{kd} - \psi_{md}}{X_{lkd}}$$

$$i_{fd} = \frac{\psi_{fd} - \psi_{md}}{X_{lfd}}$$

Reemplazando en Ec. 2.2-2

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

$$\psi_{md} = \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{ls}} + \frac{1}{X_{lkd}} + \frac{1}{X_{lfd}}} \left| \frac{\psi_d}{X_{ls}} + \frac{\psi_{kd}}{X_{lkd}} + \frac{\psi_{fd}}{X_{lfd}} \right|$$

$$\psi_{md} = X_{md} \left(\frac{\psi_d}{X_{1s}} + \frac{\psi_{kd}}{X_{1kd}} + \frac{\psi_{fd}}{X_{1fd}} \right) \quad (\text{Ec. 2.2-4})$$

2.3. ECUACIONES EN TERMINOS DE CONCATENACIONES DE FLUJO MUTUO SATURADO

Se define las concatenaciones de flujo mutuo saturado ψ_{md}^* , a partir de ψ_{md} , ajustándolo por medio de una función de la saturación DXI, de tal modo que:

$$\psi_{md}^* = X_{ad}(i_d + i_{kd} + i_{fd}) - DXI \quad (\text{Ec. 2.3-1})$$

Las corrientes considerando esta corrección están dadas por:

$$i_d = \frac{\psi_d - \psi_{md}^*}{X_{1s}}$$

$$i_{kd} = \frac{\psi_{kd} - \psi_{md}^*}{X_{1kd}} \quad (\text{Ec. 2.3-2})$$

$$i_{fd} = \frac{\psi_{fd} - \psi_{md}^*}{X_{1fd}}$$

Reemplazándolas en Ec. 2.3-1

$$\psi_{md}^* = X_{ad} \left(\frac{\psi_d - \psi_{md}^*}{X_{1s}} + \frac{\psi_{kd} - \psi_{md}^*}{X_{1kd}} + \frac{\psi_{fd} - \psi_{md}^*}{X_{1fd}} \right) - DXI$$

$$\frac{\psi_{md}^*}{X_{ad}} + \frac{\psi_{md}^*}{X_{1s}} + \frac{\psi_{md}^*}{X_{1kd}} + \frac{\psi_{md}^*}{X_{1fd}} = \frac{\psi_d}{X_{1s}} + \frac{\psi_{kd}}{X_{1kd}} + \frac{\psi_{fd}}{X_{1fd}} + \frac{DXI}{X_{ad}}$$

$$\psi_{md}^* = \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{1s}} + \frac{1}{X_{1kd}} + \frac{1}{X_{1fd}}} \left(\frac{\psi_d}{X_{1s}} + \frac{\psi_{kd}}{X_{1kd}} + \frac{\psi_{fd}}{X_{1fd}} - \frac{DXI}{X_{ad}} \right)$$

$$\psi_{md}^* = X_{md} \left(\frac{\psi_d}{X_{1s}} + \frac{\psi_{kd}}{X_{1kd}} + \frac{\psi_{fd}}{X_{1fd}} \right) - \frac{X_{md}}{X_{ad}} DXI \quad (\text{Ec. 2.3-3})$$

$$\psi_{md}^* = \psi_{md} - \frac{X_{md}}{X_{ad}} DXI \quad (\text{Ec. 2.3-4})$$

Los voltajes del eje directo son modificados a través de las corrientes:

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

$$V_d = r_s \left(\frac{\psi_d - \psi_{md}^*}{X_{1s}} \right) + \frac{p}{\omega_b} \psi_d - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_q$$

$$V_d = \psi_d \frac{r_s}{X_{1s}} + \frac{p}{\omega_b} \psi_d - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_q - \psi_{md}^* \frac{r_s}{X_{1s}} \quad (\text{Ec. 2.3-5})$$

y la ecuación de estado correspondiente, cambia a:

$$\frac{p}{\omega_b} \psi_d = V_d + \psi_q \frac{\omega_r}{\omega_b} - \psi_d \frac{r_s}{X_{1s}} + \psi_{md}^* \frac{r_s}{X_{1s}} \quad (\text{Ec. 2.3-6})$$

$$\rightarrow 0 = r_{kd} i_{kd} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{kd}$$

$$0 = r_{kd} \left(\frac{\psi_{kd} - \psi_{md}^*}{X_{1kd}} \right) + \frac{p}{\omega_b} \psi_{kd}$$

$$0 = \psi_{kd} \frac{r_{kd}}{X_{1kd}} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{kd} - \psi_{md}^* \frac{r_{kd}}{X_{1kd}} \quad (\text{Ec. 2.3-7})$$

y la ecuación de estado correspondiente cambia a:

$$\frac{p}{\omega_b} \psi_{kd} = - \psi_{kd} \frac{r_{kd}}{X_{1kd}} + \psi_{md}^* \frac{r_{kd}}{X_{1kd}} \quad (\text{Ec. 2.3-8})$$

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

$$V_f = r_{fd} \left(\frac{\psi_{fd} - \psi_{md}^*}{X_{1fd}} \right) + \frac{p}{\omega_b} \psi_{fd}$$

$$V_f = \psi_{fd} \frac{r_{fd}}{X_{1fd}} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{fd} - \psi_{md}^* \frac{r_{fd}}{X_{1fd}} \quad (\text{Ec. 2.3-9})$$

y la ecuación de estado correspondiente cambia a:

$$\frac{p}{\omega_b} \psi_{fd} = V_f - \psi_{fd} \frac{r_{fd}}{X_{1fd}} + \psi_{md}^* \frac{r_{fd}}{X_{1fd}} \quad (\text{Ec. 2.3-10})$$

Las ecuaciones de estado que gobiernan al eje en cuadratura no sufren ninguna modificación.

El sistema de ecuaciones diferenciales se resuelve por:

$$\frac{1}{\omega_b} |P\psi| = |V_{qdf}| + |\overline{X_{mch}}| |\psi| + \psi_{md}^* |X_{ms}| \quad (\text{Ec. 2.3-11})$$

donde:

$$\psi^T = \psi_q, \psi_d, \psi_{kq}, \psi_{kd}, \psi_{fd} \quad (\text{Ec. 2.3-12})$$

$$|V_{qdf}|^T = |V_q, V_d, 0, 0, V_f| \quad (\text{Ec. 2.3-13})$$

$$|X_{ms}|^T = \left| 0, \overset{f(i_m)}{r_s}, 0, \overset{f(i_m)}{r_{kd}}, \overset{f(i_m)}{r_{fd}} \right| \quad (\text{Ec. 2.3-14})$$

$$|X_{mch}| = \begin{vmatrix} \overset{\phi_r}{r_s} \frac{X_{mq}}{X_{1s}} - 1 & -\frac{\omega_r}{\omega_b} & \overset{\phi_r}{r_s} \frac{X_{mq}}{X_{1s} X_{1kq}} & 0 & 0 \\ \frac{\omega_r}{\omega_b} & -\overset{\phi_r}{r_s} \frac{r_s}{X_{1s}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{r_{kq}}{X_{1s}} \frac{X_{mq}}{X_{1kq}} & 0 & \overset{f(i_s)}{r_{kq}} \left(\frac{X_{mq}}{X_{1kq}} - 1 \right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\overset{\phi_r}{r_{kd}} \frac{r_{kd}}{X_{1kd}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\overset{f(i_s)}{r_{fd}} \frac{r_{fd}}{X_{1fd}} \end{vmatrix}$$

2.4. CURVA DE SATURACION

El comportamiento no lineal del hierro se obtiene de la curva de vacío, en la que se representa el voltaje de armadura versus corriente de excitación. Haciendo funcionar el grupo motor-generador a la velocidad nominal del generador, incrementamos la corriente de excitación, tomando a cada paso lecturas del voltaje de armadura, observando que inicialmente se tiene una relación lineal entre los dos parámetros. En un cierto valor de I_{ex} , comienza a influenciar la saturación separándose la característica de circuito abierto de la relación lineal. A este punto se lo conoce como crítico y lo co

responderá un valor de concatenaciones de flujo mutuo crítico ψ_{mdc} . El experimento se continúa hasta tener voltajes más elevados que el nominal, en los cuales la saturación es un factor muy importante.

La curva $E_a = f(i_{fd})$, se construye refiriendo al estator la corriente de excitación I_{ex} medida en el rotor, por medio de una relación de espiras al cuadrado. Esta relación se logra en la parte lineal de la curva de vacío anterior. i_{fd} se tiene de la ecuación de voltaje de armadura.

$$E_a = (X_d - X_q)i_d + X_{ad} i_{fd}$$

en vacío $i_d = 0$, y $E_a = X_{ad} i_{fd}$

$$i_{fd} = \frac{E_a}{X_{ad}}$$

De la parte lineal, la relación indicada está dada por:

$$K = \frac{i_{fd}}{I_{ex}}$$

Con lo cual se puede calcular las corrientes i_{fd} para los voltajes que no mantienen la relación lineal con I_{ex} .

2.5. CURVA PARA LA MODELACION DIGITAL

Grafizando las concatenaciones de flujo mutuo saturado, se tiene una línea recta a 45° hasta llegar a ψ_{mdc} . Desde este punto comienza el efecto de la saturación.

ψ_{md} se calcula de la fórmula $\psi_{md} = X_{ad}(i_d + i_{kd} + i_{fd})$, con las restricciones de funcionamiento sin carga y en estado estable: $i_d = 0$, $i_{kd} = 0$. i_{fd} se calcula por: $I_{fd} = K i_{ex}$.

ψ_{md}^* es igual al voltaje de armadura E_a .

A partir de ψ_{mdc} , ψ_{md} y ψ_{md}^* difieren entre sí por el parámetro DXI, el mismo que a medida que se avanza por la curva, toma valores cada vez mayores.

Para la simulación digital se construye la curva DXI en función de ψ_{md}^* , en la cual se puede apreciar que DXI tiene un valor de cero hasta llegar a ψ_{mdc} , en adelante la curva es aproximada a tres rectas de diferente pendiente, que siguen con suficiente precisión al comportamiento no lineal del hierro.

C A P I T U L O I I I

SIMULACION DE LA MAQUINA SINCRONICA

Se debe destacar que el sistema de ecuaciones diferenciales que describen a la máquina son no lineales. Presentan dos tipos de no linealidades, un producto no lineal de la forma $X_i X_j$ (donde X_i y X_j son variables de estado) y las no linealidades trigonométricas $\cos \theta$ y $\sin \theta$.

El modelo escogido para la simulación puede ser resuelto tanto en forma continua, en el computador analógico, como en forma discreta en el computador digital. Se describe la simulación analógica de manera general. La simulación digital se resuelve completamente.

3.1. SIMULACION EN EL COMPUTADOR ANALOGICO [2]

Los tipos de no linealidades notados anteriormente, pueden ser convenientemente representados por componentes especiales en el computador analógico. También, el computador analógico puede ser muy útil para representar otras linealidades tales como los limitadores (en sistemas de excitación) y la saturación (en el circuito magnético).

La representación completa de una sola máquina sincrónica ocu

paría la mayor parte de un gran computador analógico. Así mientras el computador analógico está bien adaptado para el estudio dinámico de máquinas sincrónicas, está limitado para incluir problemas de una o dos máquinas con la representación completa o a un pequeño número de máquinas representadas por modelos simplificados.

El modelo más adaptable para la representación en computador analógico es el modelo de concatenaciones de flujo. Las ecuaciones diferenciales serán modificadas, sin embargo, para evitar diferenciación. Por ejemplo la ecuación de estado de la variable X_j es

$$pX_j = f_j(x, u, t)$$

donde: x_j , $j = 1, 2, \dots, n$, son las variables de estado, y u_k , $k = 1, 2, \dots, r$, son las funciones de control.

Para la simulación analógica, la ecuación puede ser escrita como:

$$X_j = \frac{\omega_B}{a} \int_0^t f_j(x, u, t) dt + X_j(0)$$

donde a es el factor escala de tiempo del computador y ω_B se requiere cuando el tiempo está en segundos.

3.2. SIMULACION EN EL COMPUTADOR DIGITAL

El computador digital resuelve las ecuaciones diferenciales en forma discreta, es decir, el dominio del tiempo está dividido en segmentos discretos de longitud Δt y las ecuaciones resueltas para cada segmento. En la figura 3.2-1 se muestra un diagrama de flujo simple del proceso.

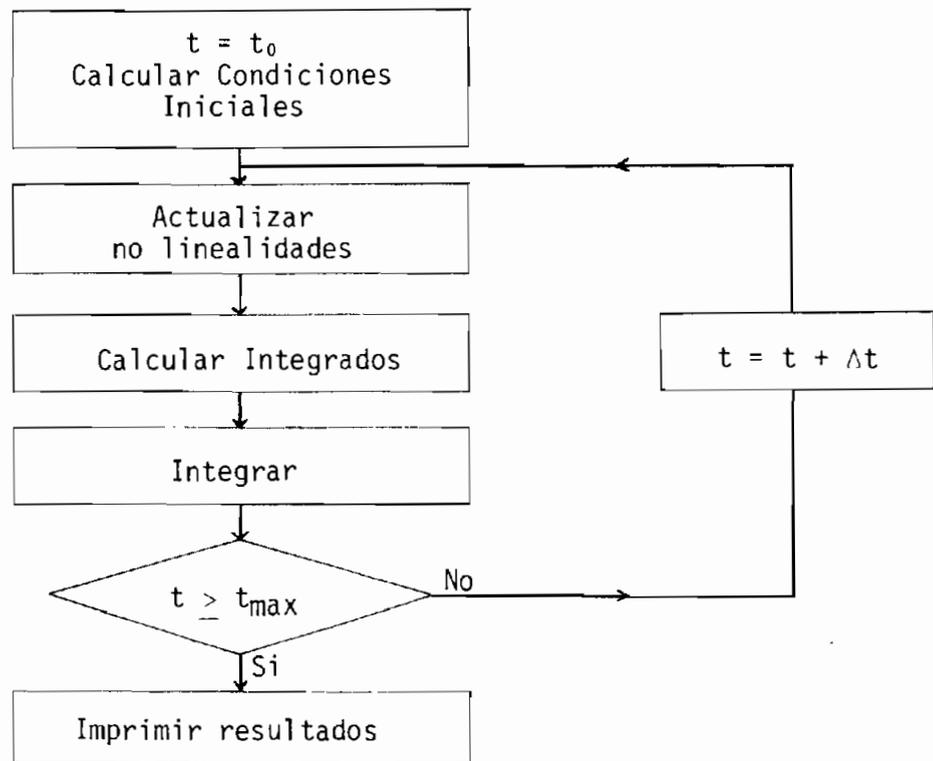


Figura 3.2-1

3.2-1. METODO DE RESOLUCION DE LAS ECUACIONES DIFERENCIALES [7]

Se utiliza el método de Runge-Kutta de cuarto orden para resolver el sistema de 7 ecuaciones diferenciales no lineales

de primer orden que representan a la máquina síncrona. Calcula un nuevo valor de las variables de estado partiendo de una condición anterior y pasa a formar parte de cualquier tipo de función matemática que evalúe los integrandos.

El algoritmo Runge-Kutta de cuarto orden para la integración de un paso de una ecuación de primer orden simple con una condición inicial apropiada, $Y_j = Y(X_j)$ se implementa para un sistema de n ecuaciones de primer orden con n condiciones iniciales,

$$Y_{ij} = V_j(X_j), \quad j = 1, 2, \dots, n$$

donde Y_{ij} es la solución de la j ésima ecuación de 3.2.1-1 en X_j . La condición inicial para el paso ceroésimo, Y_{j0} , $j = 1, 2, \dots, n$ usualmente serán conocidas exactamente.

$$\begin{aligned} \frac{dY_1}{dx} &= f_1(x, Y_1, Y_2, \dots, Y_n) \\ \frac{dY_2}{dx} &= f_2(x, Y_1, Y_2, \dots, Y_n) \\ &\vdots \\ \frac{dY_n}{dx} &= f_n(x, Y_1, Y_2, \dots, Y_n) \end{aligned} \quad \text{Ec. 3.2.1-1}$$

Consecuentemente, las condiciones iniciales para el i simo paso serán aproximaciones a las condiciones iniciales verdaderas

ras, $Y_j(X_i)$, $j = 1, 2, \dots, n$, ya que resultarán de aplicaciones del método de Runge-Kutta 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 tomadas como las condiciones iniciales del siguiente intervalo de integración.

3.2.2. CALCULO DIGITAL DE LA SATURACION

Uno de los problemas en el cálculo digital del comportamiento de la máquina sincrónica es la determinación del efecto de la no linealidad del hierro. Esto constituye un problema por cuanto la saturación es una función implícita, es decir $\psi_{md} = f(\psi_{md})$.

El parámetro en el que se ajusta la saturación ψ_{md} , es función de ψ_d , ψ_{kd} y ψ_{fd} , y éstos a su vez son funciones de ψ_{md} . Cada paso de integración, con el valor anterior de ψ_{md} se introduce la saturación, en donde evaluamos la función de saturación DXI para calcular el nuevo ψ_{md} y así continuamos. Con las últimas concatenaciones de flujo se calcula: Corrientes y torque.

Lo primero que se requiere para realizar la integración es de

linear algún medio para determinar la cantidad de saturación correspondiente al primer punto de operación dado en la curva de saturación.

En la curva $\psi_{md} = f(\psi_{md})$, se fija el punto inicial en $\psi_{md} = X_{ad}(i_d + i_{fd})$, esto permite mantener constante el voltaje terminal de la máquina sincrónica a lo largo de la simulación. Se evalúa la función de saturación para con ella ajustar la corriente de excitación i_{fd} al verdadero punto de funcionamiento. Con esta corrección se calcula las concatenaciones de flujo del campo, lo cual lleva a tener introducida la no linealidad del hierro en el punto inicial.

Las condiciones iniciales de ψ_{md} y DXI, sirven para evaluar las ecuaciones de estado en el primer subpaso del proceso de integración, para después considerar el efecto de la saturación en ψ_{md} por medio de la ecuación 2.3-3:

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

3.2.3. PERIODO DE INTEGRACION

El paso de integración se escoge para atender a dos requerimientos.

a) Representar satisfactoriamente un fenómeno transitorio de

tal forma que el paso de integración se hace mucho más pequeño que el menor período de oscilación que se espera.

- b) Evaluar las funciones con una aproximación racional. Pues si se escoge un paso muy pequeño, el tiempo de computación puede incrementarse sustancialmente y la solución tener ruido.

En el programa se utiliza períodos de integración entre 0.001 y 0.006 segundos.

3.2.4. CONDICIONES INICIALES

En todo estudio dinámico se requieren conocer las condiciones iniciales de operación. Estas incluyen corrientes, concatenaciones de flujo, fuerzas electromotrices para todos los circuitos de la máquina y el torque eléctrico. Además se requiere conocer la posición inicial del rotor con respecto al eje del sistema de referencia.

3.2.4.1. ECUACIONES EN ESTADO ESTABLE

Las ecuaciones diferenciales que describen el modelo considerado simulan el comportamiento como función del tiempo. Cuando la máquina opera en una condición de estado estable, las ecuaciones diferenciales no son necesarias, ya que todas las va-

riables son ya sea constantes o variaciones sinusoidales con el tiempo. Para esta situación las ecuaciones fasoriales son apropiadas. Es común asumir tácitamente que todas las máquinas están en condición de estado estable antes de una perturbación. A continuación se resuelven los diagramas fasoriales, esta es una parte necesaria para cualquier investigación de estabilidad.

$$\text{En estado estable: } p \psi_q = 0$$

$$p \psi_d = 0$$

$$p \psi_{kq} = 0 \quad (\text{Ec. 3.2.4-1})$$

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

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

$$\text{y } \omega_r = \omega_e$$

quedando las ecuaciones de voltaje reducidas a:

$$V_q = r_s i_q + \psi_d$$

$$V_d = \frac{r_s}{X_{1s}} (\psi_d - \psi_{md}^*) - \psi_q \quad (\text{Ec. 3.2.4-2})$$

$$V_f = \frac{r_{fd}}{X_{1fd}} (\psi_{fd} - \psi_{md}^*)$$

Expresando en forma fasorial voltajes y corrientes, se tiene

que aplicando la definición: $\underline{F}_{as} e^{-j\delta} = F_{qs} - jF_{ds}$

F puede ser voltaje, corriente, etc.

El voltaje de fase se define como:

$$\underline{V}_a e^{-j\delta} = V_q - jV_d \quad (\text{Ec. 3.2.4-3})$$

$$\underline{V}_a e^{-j\delta} = r_s I_q + X_d I_d + X_{ad} I_{fd} - jr_s I_d + jX_q I_q + X_q I_d - X_q I_d$$

la corriente de fase se define como:

$$j\underline{I}_a e^{-j\delta} = I_d + jI_q \quad (\text{Ec. 3.2.4-4})$$

Reemplazando Ec. 3.2.4-4 en Ec. 3.2.4-3:

$$\underline{V}_a e^{-j\delta} = r_s \underline{I}_a e^{-j\delta} + jX_q \underline{I}_a e^{-j\delta} + (X_d - X_q) I_d + X_{ad} I_{fd}$$

$$\underline{V}_a = r_s \underline{I}_a + jX_q \underline{I}_a + \left| (X_d - X_q) I_d + X_{ad} I_{fd} \right| e^j$$

$$\underline{V}_a = (r_s + jX_q) \underline{I}_a + \underline{E}_a \quad (\text{Ec. 3.2.4-5})$$

Donde:

$$\underline{E}_a = \left| (X_d - X_q)I_d + X_{ad} I_{fd} \right| e^{j\delta} \quad (\text{Ec. 3.2.4-6})$$

El circuito equivalente para la fase a en condición de estado estable está representado por la figura 3.2.4-1.

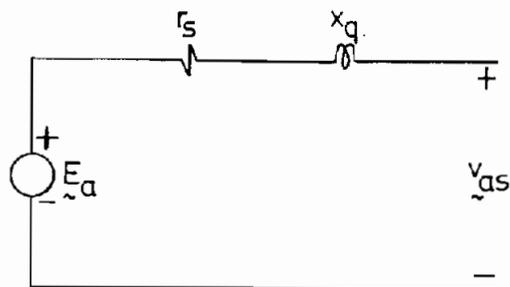


Figura 3.2.4-1

3.2.4.2. DIAGRAMAS FASORIALES

Son las representaciones diagramáticas de las ecuaciones fasoriales de voltaje y corriente de fase. Considerando la fase a, las componentes en los ejes q y d de los fasores de corriente y voltaje se combinan diagramáticamente para dar I_a y V_a en magnitud y dirección. El ángulo de fase β , entre I_a y V_a , está en el rango $0 \leq \beta \leq 360$. El valor de β es dependiente del modo de operación: motor o generador, la magnitud de la carga y el nivel de la excitación del campo. El fador I_a puede ser localizado en cualquiera de los cuadrantes q - d con el resultado que I_d e I_q puedan actuar junto con sus respectivos ejes, en sentido positivo o negativo.

Antes de proceder a construir los diagramas fasoriales apropiados a las diferentes condiciones de operación de la máquina sincrónica, es necesario determinar primero, la manera en la cual las direcciones de I_d e I_q definen la operación de la máquina.

De la expresión del torque en estado estable:

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{p}{2} \right) \left| L_{ad} i_{fd} i_q + (L_{ad} - L_{aq}) i_q i_d \right| \quad (\text{Ec. 3.2.4-7})$$

Se considera únicamente la componente cilíndrica, dominante $L_{ad} i_{fd} i_q$. Con i_{fd} siempre una cantidad positiva, se puede sacar como conclusión que:

Tomando en cuenta que las ecuaciones fueron definidas para acción motora.

i_q acción positiva, T_e es positivo y corresponde a motor.

i_q acción negativa, T_e es negativo y corresponde a generador.

Para determinar direcciones para i_d , se asume la máquina conectada a una barra infinita, en la cual tenemos V_q constante para diferentes condiciones de operación y tomando r_s despreciable:

$$V_q = (X_{ls} + X_{ad})i_d + E_a = \text{constante}$$

Donde $(X_{ls} + X_{ad})i_d$ y E_a son voltajes relacionados al devanado q, resultando del devanado d corrientes i_d e i_{fd} respectivamente; la ecuación de V_q muestra que para las posibles condiciones de trabajo en estado estable la fuerza magnetomotriz del eje d permanece aproximadamente constante. Las figuras siguientes 3.4.2-1, ilustran diagramáticamente las condiciones de f.m.m. y voltaje para magnitudes de corriente de campo sobre y bajo un valor nominal i'_{fd} , para lo cual

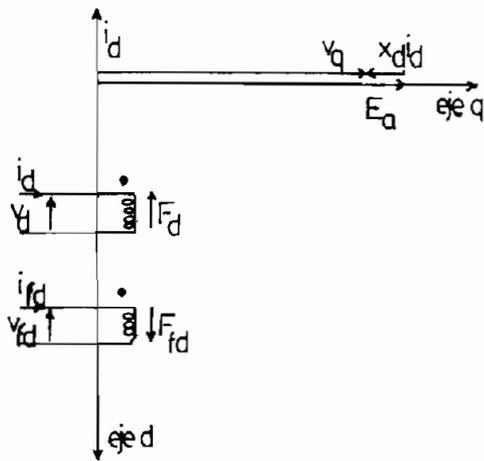
$$E_a = V_q \text{ e } I_q = 0$$

La figura 3.4.2.1

$i_{fd} > i'_{fd}$, $E_a > V_q$ Condición de sobreexcitación.
 I_d acción negativa, F_d opuesta a F_{fd} demagnetizando.
 $X_d I_d$ acción negativa sobre el eje q, se resta de E_a .

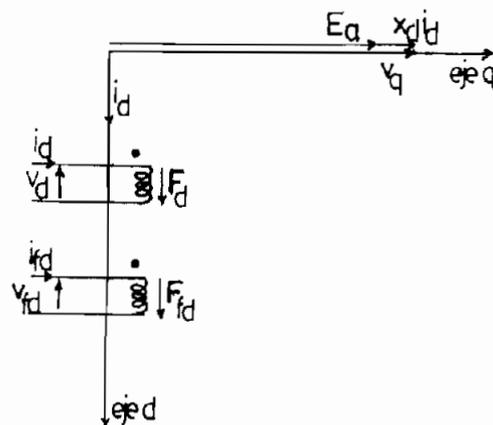
La figura 3.4.2.2.

$i_{fd} < i'_{fd}$, $E_a < V_q$ Condición de subexcitación.
 i_d acción positiva, F_d ayuda a F_{fd} : magnetizando.
 $X_d I_d$ acción positiva sobre el eje q, se suma a E_a .



V_a constante

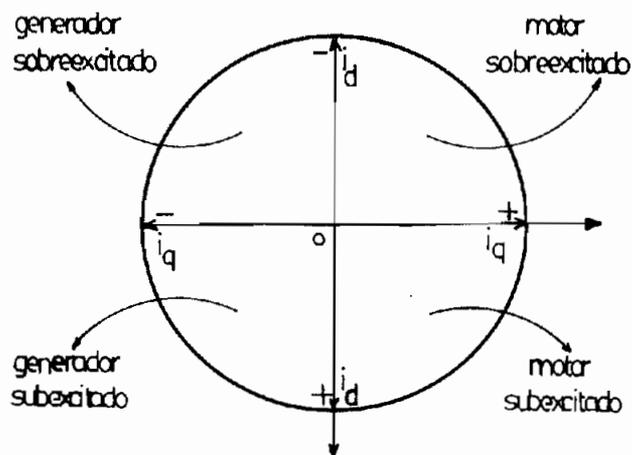
Figura 3.4.2-1.



V_a constante

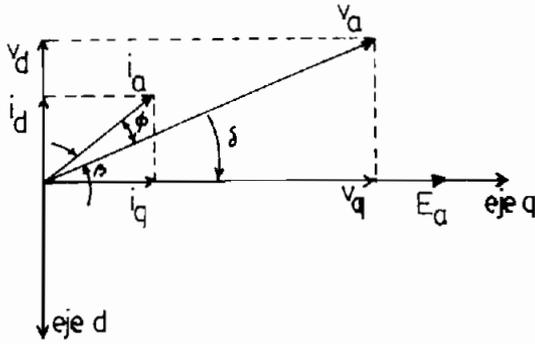
Figura 3.4.2-2.

Con las direcciones de i_d e i_q conocidas para diferentes con
diciones de operación:

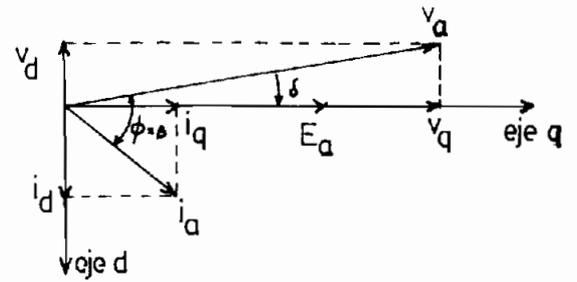


Las siguientes figuras son los diagramas fasoriales represent
tando las condiciones de los cuatro cuadrantes de la opera-

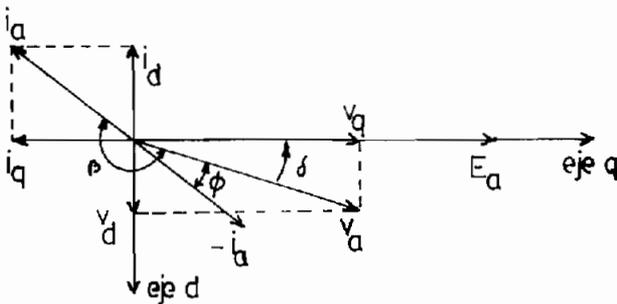
ción de la máquina sincrónica.



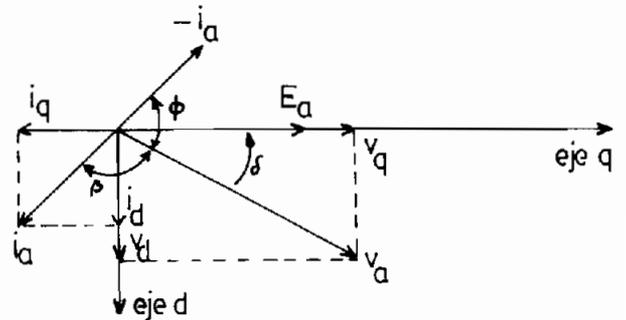
motor sobreexcitado



motor subexcitado



generador sobreexcitado



generador subexcitado

Las ecuaciones que rigen a la máquina sincrónica se generalizan para motor y generador haciendo las siguientes observa-

ciones en los diagramas fasoriales; considerando al eje del voltaje de fase como referencia:

1) El ángulo entre la corriente y el voltaje de fase, se de
fine como:

a) En caso de motor $\beta = \phi$

b) En caso de generador $\beta = \pi - \phi$

En el cual ϕ es el ángulo de factor de potencia de uso común, que puede ser en atraso (-) o en adelanto (+).

2) El ángulo de la corriente de fase respecto al voltaje in
terno de la máquina E_a , situado sobre el eje q, tanto pa
ra motor como para generador está dado por:

$$\beta = \delta + \frac{\pi}{2}$$

Los datos que se imponen para calcular las condiciones ini
ciales de i_q , i_d , i_{fd} y δ son KVA/fase, V_a , ϕ y ω_r .

Las concatenaciones de flujo iniciales se calculan en fun-
ción de las corrientes de partida, con las respectivas res
tricciones de estado estable:

$$i_{kq} = 0$$

$$i_{kd} = 0$$

De las ecuaciones 1.4.1, 2.2.2 y 2.2.3 se tiene:

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

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

$$\psi_{md} = X_{ad} (i_d + i_{fd}) \quad (\text{Ec. 3.2.4-8})$$

$$\psi_d = X_{ls} i_d + \psi_{md}$$

$$\psi_{kd} = \psi_{md}$$

$$\psi_{fd} = X_{lfd} i_{fd} + \psi_{md}$$

El voltaje de excitación inicial viene dado por:

$$V_f = r_{fd} i_{fd} \quad (\text{Ec. 3.2.4-9})$$

Para el modelo no lineal es necesario corregir el valor de la corriente i_{fd} al punto de funcionamiento real en la curva de saturación, calculado como:

$$i_{fd} = \frac{\psi_{md} + DXI}{X_{ad}} - i_d \quad (\text{Ec. 3.2.4-10})$$

y con éste evaluar los verdaderos valores iniciales de ψ_{fd} y V_f .

La posición relativa del rotor en la condición inicial se obtiene del voltaje interno de la máquina.

Para cualquier condición de funcionamiento, delta viene dado por

$$\delta = (\omega_r - \omega_e)dt + \theta_r(0) - \theta_e(0) \quad (\text{Ec. 3.2.4-11})$$

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

$$\delta = \theta_r(0) - \theta_e(0) \quad (\text{Ec. 3.2.4-12})$$

El cálculo de los voltajes V_q , V_d y el torque de la máquina impulsora T_m son calculados como sigue:

$$V_q = |V_a| \cos \delta \quad (\text{Ec. 3.2.4-13})$$

$$V_d = |V_a| \sen \delta$$

El T_m en estado estable se lo considera igual a Torque electromagnético

$$T_m = T_e$$

$$T_m = \psi_d(0) i_q(0) - \psi_q(0) i_d(0) \quad (\text{Ec. 3.2.4-14})$$

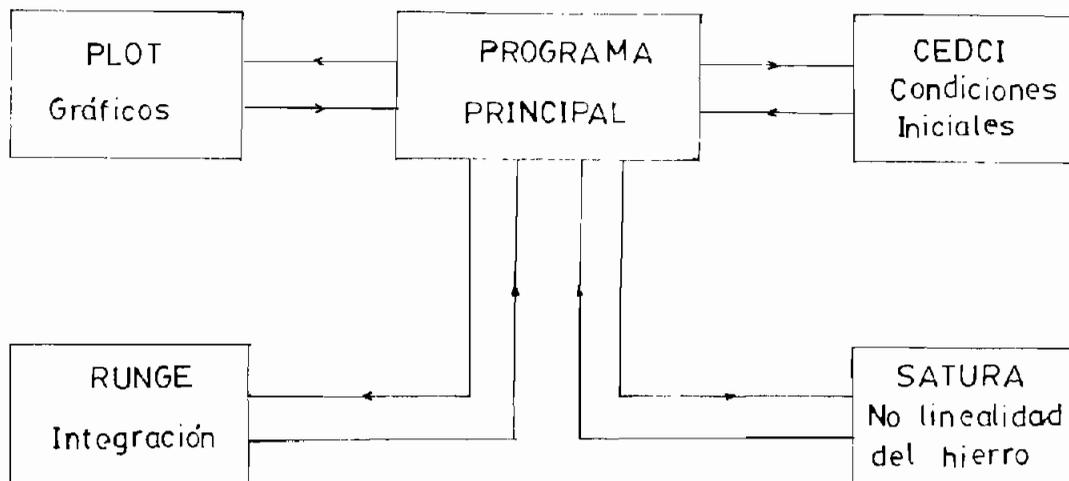
3.2.5. PROGRAMA DIGITAL

El método de concatenaciones de flujo planteadas para simular la máquina sincrónica se lleva al lenguaje FORTRAN IV y las aplicaciones en los modelos sin saturación y con saturación se corren en el computador de la Escuela Politécnica Nacional.

El programa digital consta de:

- 1) Programa Principal
- 2) Subprograma CEDCI
- 3) Subprograma RUNGE
- 4) Subprograma SATURA
- 5) Subprograma PLOT

En la Fig. 3.2.5-1 se muestra la interconexión entre las cinco componentes del programa digital.



3.2.5.1. PROGRAMA PRINCIPAL

El programa principal cumple las siguientes funciones:

- Lee los parámetros y la curva de vacío de la máquina sin crónica.
- Lee los datos que se imponen para la obtención de las con diciones iniciales, el índice que determina si es motor o generador, los índices para el tipo de perturbación y pa ra la graficación de resultados, las funciones escalón pa ra provocar perturbaciones y un índice que permite esco- ger entre el modelo no saturado y el saturado.
- Lee los factores de multiplicación y escalamiento que se emplean en PLOT y el ángulo inicial de inicio de la per- turbación.
- Llama a todos los subprogramas.
- Evalúa las derivadas del sistema de ecuaciones diferencial es.
- Calcula las corrientes y el torque electromagnético.
- Realiza todas las aplicaciones que se requieran.

- Imprime rótulos, parámetros, datos para las condiciones iniciales, condiciones iniciales.
- Imprime resultados en forma de lista y si se necesita llama al subprograma de graficación.

3.2.5.2. SUBPROGRAMA CEDCI

Esta subrutina se encarga de tres funciones:

- Evalúa los coeficientes del sistema de ecuaciones diferenciales.
- Calcula los coeficientes iniciales para la resolución del sistema de ecuaciones diferenciales.
- El torque mecánico y el voltaje de excitación que resultan de los datos impuestos.

3.2.5.3. SUBPROGRAMA RUNGE

La función RUNGE emplea el método Runge Kutta de Cuarto Orden con coeficientes de Kutta para integrar un sistema de N ecuaciones diferenciales ordinarias de Primer Orden simultáneas $f(j) = dy(j)/dx$, ($j = 1, 2, \dots n$), a través de 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 tal manera que el valor de la variable independiente (x) y los valores de la solución $y(1), y(2), \dots, y(n)$ pueden ser actualizados usando el algoritmo Runge-Kutta. Runge retorna con valor 1 para señalar que todas las derivadas ($f(j)$) sean evaluadas o 0 para señalar que el proceso de integración para el paso de ese momento es terminado. $SAVEY(j)$ se usa para guardar el valor inicial de $y(j)$ y $PHI(j)$ es el incremento de la función para la ecuación j -ésima. Como está escrito, N no puede ser mayor que 50.

3.2.5.4. SUBPROGRAMA SATURA

La subrutina SATURA, linealiza a la curva $DXI = f(\psi_{md})$ construida para la simulación digital mediante cuatro segmentos de recta. Al parámetro transferido desde CEDCI o desde el programa principal, ψ_{md} , le ubica en el respectivo segmento de recta y con la ecuación que lo define, calcula la función de saturación DXI . DXI es devuelto al programa, en el cual se ajusta el valor sin saturación de ψ_{md} hasta el punto de funcionamiento sobre la curva de saturación.

3.2.5.5. SUBPROGRAMA PLOT

La subrutina PLOT presenta los resultados en forma gráfica.

A cada uno de los gráficos acompaña un listado del comportamiento de la variable en el tiempo.

Los resultados para poder ser graficados de manera que puedan ser apreciados satisfactoriamente, se alteran por factores de multiplicación y escalamiento, los cuales son leídos como datos en programa principal. Se transfiere además el índice KD que determina el número de punto a imprimirse. ICOUNT es el contador de pasos, cuando se iguala a los pasos de integración IFREQ se tiene un nuevo punto para el gráfico.

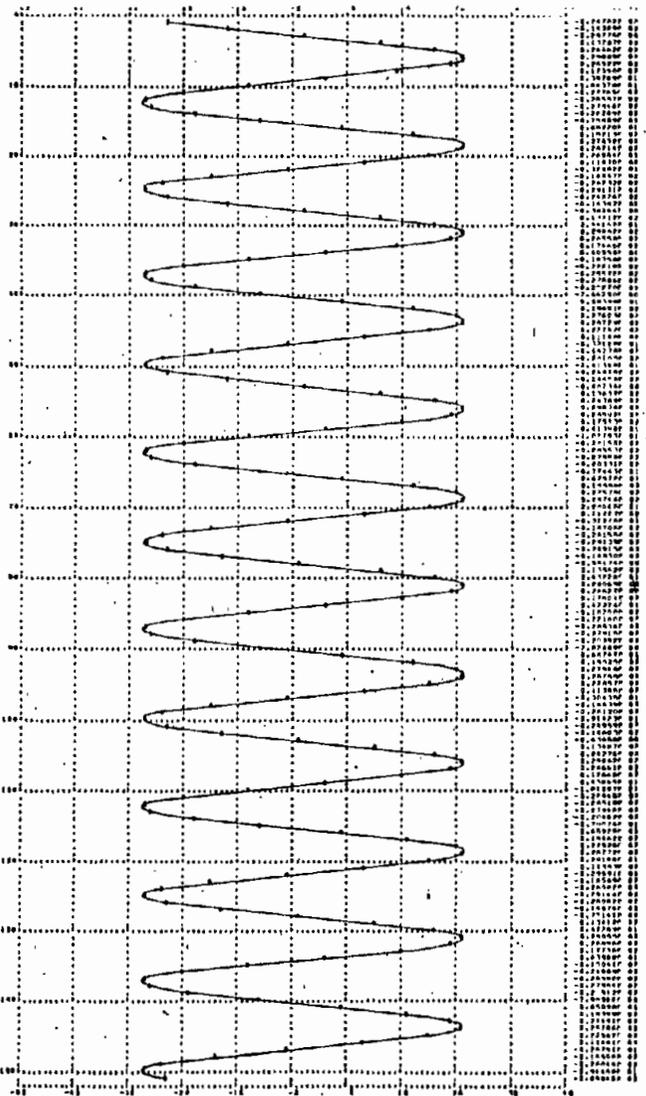
C A P I T U L O IVAPLICACIONES DEL PROGRAMA

4.1. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO

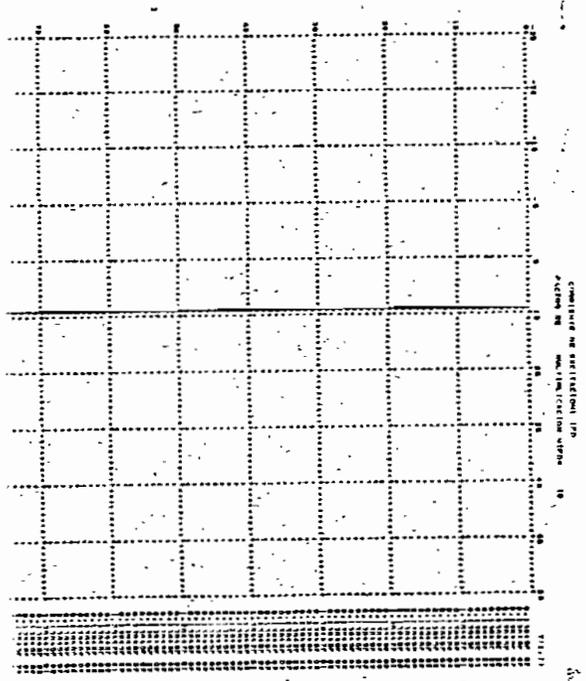
La forma más sencilla y eficiente de probar el programa desarrollado, es realizar la simulación de la máquina sincrónica operando bajo condiciones de estado estable, en el cual los resultados son conocidos. En estado estable las condiciones iniciales calculadas de los datos impuestos, deben mantenerse constantes durante el proceso de integración de las ecuaciones diferenciales. La velocidad rotórica es igual a la velocidad sincrónica y la corriente de fase, calculada en los ejes abc, es sinusoidal.

Las figuras 4.1-1, que representan los resultados gráficos de la operación en estado estable, demuestran el buen funcionamiento del programa.

La bondad del programa se verifica en el estudio del comportamiento dinámico de cinco perturbaciones, cuatro desarrolladas funcionando la máquina sincrónica como generador y una como motor. Los datos de la máquina sincrónica de polos salientes, existente en el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, que se utilizan en



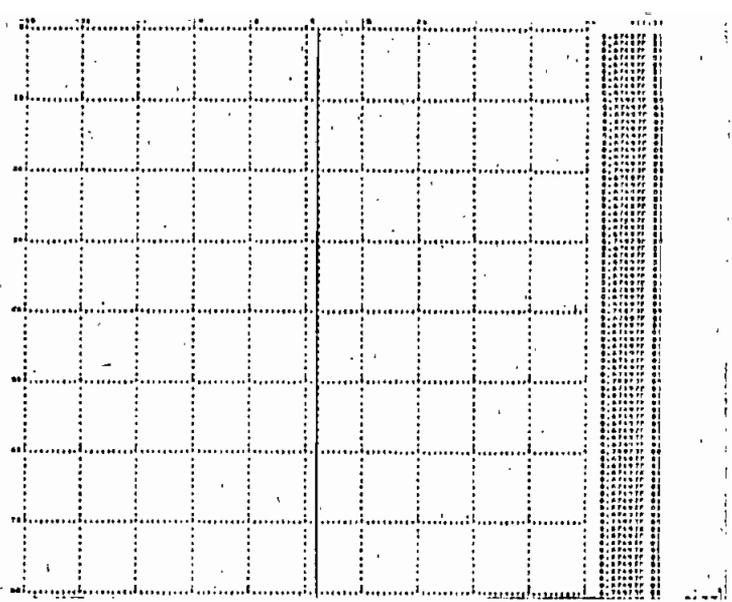
Corriente de Fase



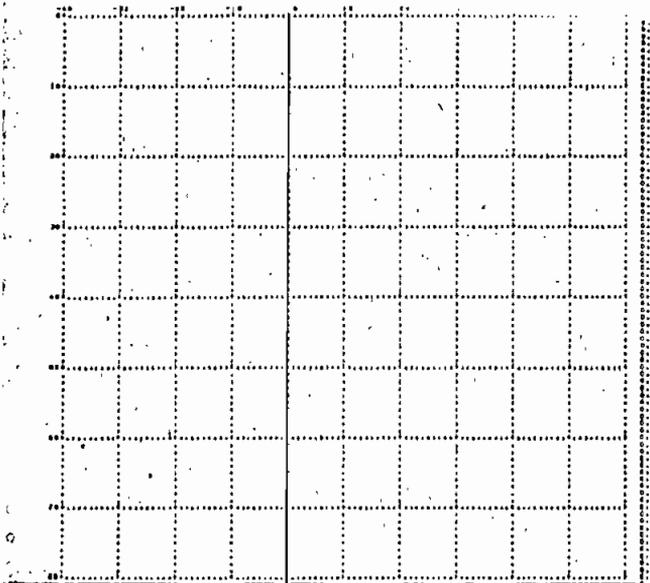
Corriente de Excitación

Figura 4.4-1

Angulo de Potencia



Desviación de la ve
locidad rotórica.



Torque Electromagnético

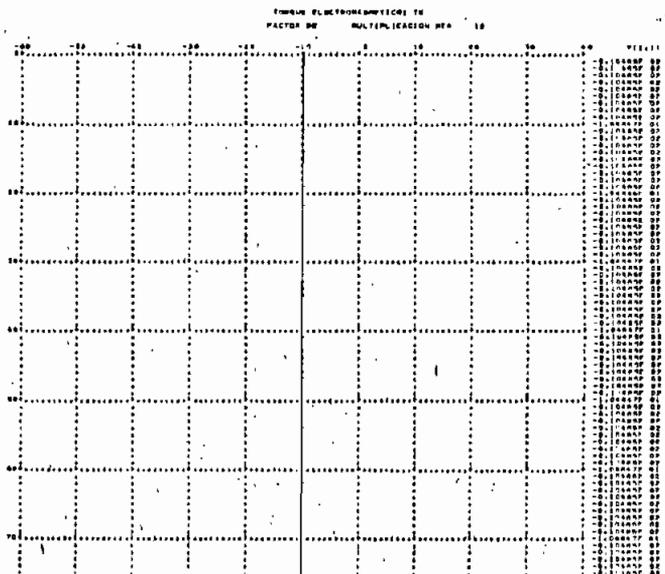


Figura 4.1-1

la simulación son tomados de la referencia 8.

Todos los casos se realizan para los modelos no saturado y saturado, analizándose las diferencias dadas por la influencia de la saturación en el próximo capítulo. Para todas las aplicaciones rigen las mismas condiciones iniciales de funcionamiento en estado estable.

Para acción de generador se analiza:

- 1) Cortocircuito trifásico.
- 2) Incremento brusco del torque.
- 3) Incremento brusco del voltaje de excitación.
- 4) Pérdida de la excitación por cortocircuito.

Para acción de motor se analiza:

- 5) Arranque.

4.2. CORTOCIRCUITO TRIFASICO

El generador antes de producirse el cortocircuito trifásico tiene por condiciones iniciales potencia aparente, voltaje y factor de potencia que llevan a un punto de funcionamiento donde el efecto de la saturación es posible apreciarlo.

El generador está conectado a una barra infinita, funcionando en estado estable y en un tiempo cualquiera, fijo, se pro

duce repentinamente el cortocircuito trifásico a los terminales de la máquina. Esta perturbación se logra haciendo que el voltaje de línea sea cero, en el programa $V_a = 0 + j0$; por lo tanto sus componentes V_q y V_d son iguales a cero. Además se data el ángulo θ_r , el cual da inicio al cortocircuito; la condición para escoger dicho ángulo es la de tener la más grave falla.

Al inicio de la perturbación, se tiene como condiciones iniciales de las ecuaciones diferenciales las variables calculadas hasta ese momento y el ángulo θ_r escogido.

Experimentalmente el cortocircuito de la máquina sincrónica puede ser estudiado con el circuito de la figura 4.2-1. El generador se conecta en estrella, la excitación desde una fuente de corriente continua. Las señales que se llevan al osciloscopio son: corriente, a través de una resistencia de 1Ω y el voltaje terminal, con la finalidad de determinar el ángulo de la perturbación, el mismo que se lleva al programa digital para ser dado como dato. Este experimento está analizado en la referencia 11, bajo condiciones que se aproximan a las de vacío.

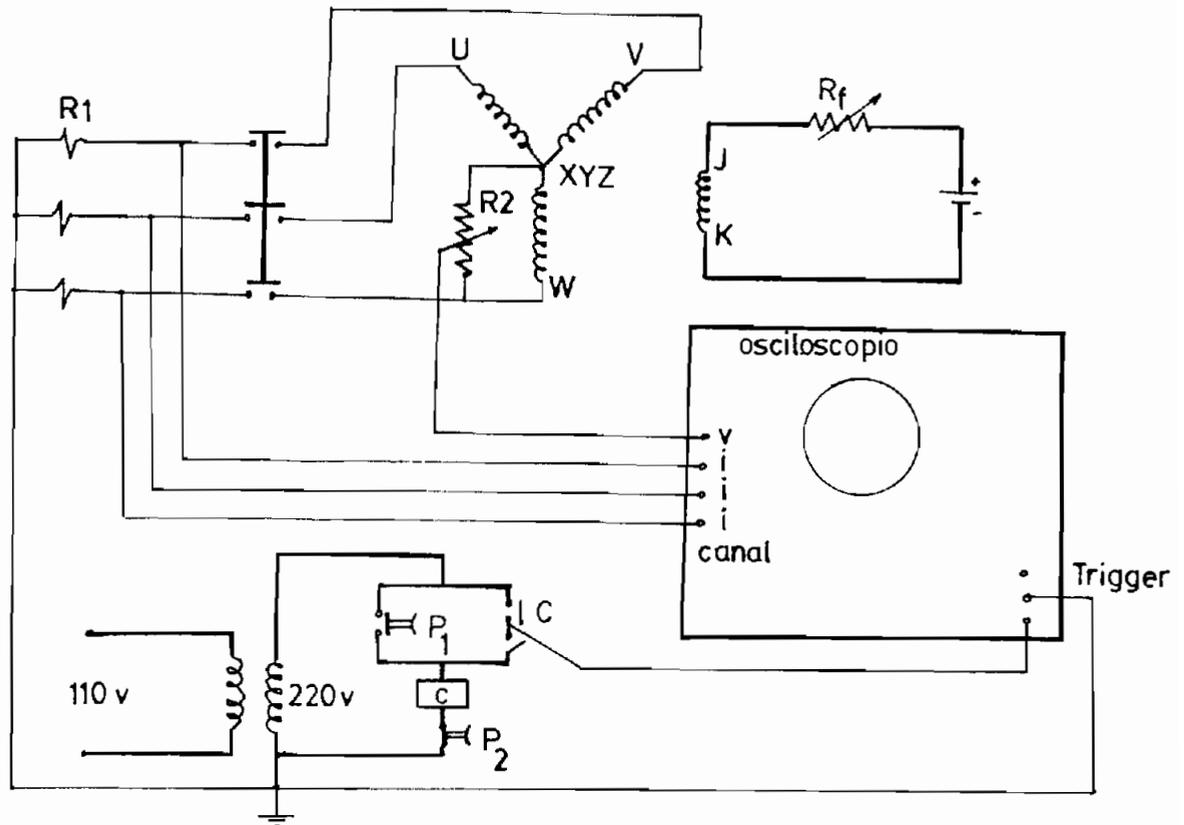


Figura 4.2-1. Conexión del equipo para experimentar el cortocircuito trifásico.

De los resultados de la simulación digital, puede observarse que la corriente de fase llega a 3.7 veces el pico positivo y a 5.0 veces el pico negativo, a los 0.004 y 0.011 segundos de producido el cortocircuito, respectivamente. En los siguientes instantes la onda se amortigua rápidamente - hasta dar la corriente de cortocircuito permanente, figura 5.1-3. La onda es asimétrica por la presencia de una componente de corriente continua que trata de mantener constante el flujo concatenado.

La corriente de campo alcanza un valor de 4 veces su valor inicial, a los 0.008 segundos de iniciada la perturbación, para después decrecer oscilando sobre una exponencial, cuya constante de tiempo está dada por su resistencia e inductancia, hasta tomar el valor de estado estable, figura 5.1-4. Esta alteración se debe a la inducción de una componente alterna a frecuencia fundamental, en los devanados del rotor, producida por el campo magnético en el entrehierro, fijo en el espacio, efecto de la componente continua de la corriente del estator.

La velocidad rotórica, primeramente sufre un decremento, dándose el fenómeno llamado "back swing", para luego acelerarse rápidamente, debido a que la energía entregada por la máquina motriz no se transfiere al sistema, sino que la mayor parte se convierte en energía cinética, lo cual se refleja en aumento de la velocidad del rotor, figura 5.1-6; y, lo restante se consume en el interior del generador.

El torque electromagnético, en estado estable tiene un valor negativo, correspondiente al funcionamiento como generador, producido el cortocircuito sube a 6 veces su valor inicial aproximadamente, en los siguientes momentos decrece - oscilando hasta estabilizarse en un valor negativo cercano a cero, siguiendo el comportamiento del generador frente a un cortocircuito, figura 5.1-7.

4.3. INCREMENTO BRUSCO DEL TORQUE

Esta aplicación se la realiza bajo las mismas condiciones iniciales que la anterior. El generador conectado a la barra infinita parte desde un punto donde las variables están influenciadas por la saturación.

El incremento brusco del torque se simula en el programa digital a través de una función escalón, haciéndose presente - en un instante cualquiera, fijo; como una suma al torque inicial. Esta perturbación, también, se refleja en el sistema electromecánico como un conjunto de transformaciones.

En el ejemplo desarrollado, al torque negativo inicial se le añada un incremento positivo, significando que la máquina impulsora entregará menor potencia. El ángulo de inicio de la perturbación se considera para la condición en la que, la corriente de fase pasa por 90° , siendo el punto más crítico.

Al inicio de la perturbación las condiciones iniciales para resolver las ecuaciones diferenciales están dadas por el cálculo de las variables hasta ese instante.

En el laboratorio esta aplicación puede ser estudiada con el equipo conectado como indica la figura 4.3-1. |8|

Las señales de respuesta son tomadas en el osciloscopio y en el analizador industrial. Las señales de corriente y voltaje se toman desde resistencias conectadas a una de las fases del estator; la señal de velocidad, desde un tacogenerador a través de un rectificador de onda completa.

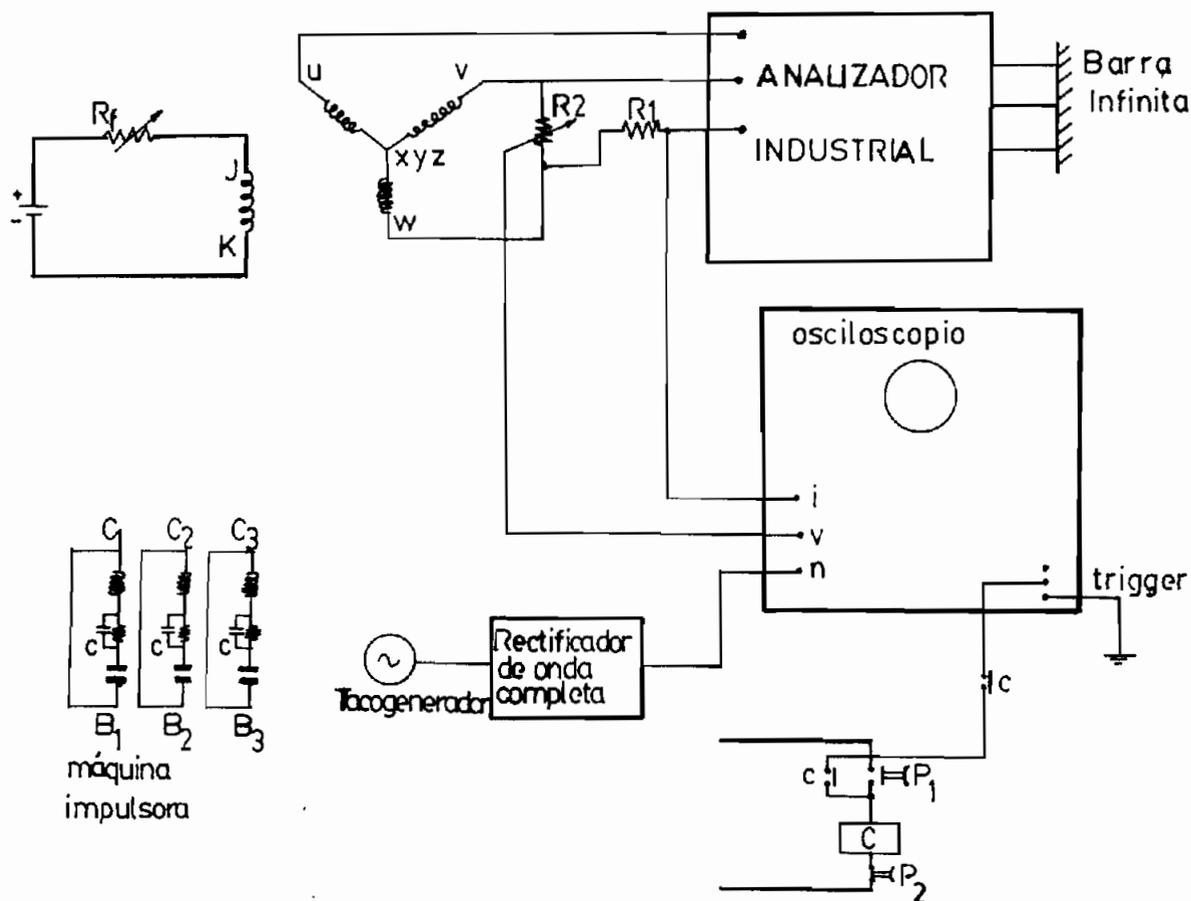


Figura 4.3-1

De los resultados obtenidos en la simulación, se deduce que la corriente de fase, inicialmente oscila bruscamente, para después irse estabilizando en un nuevo punto de funcionamiento dado por el incremento brusco del torque mecánico de la máquina impulsora. El grado de las oscilaciones dependen del

valor del incremento, figura 5.2.1.

Al producirse esta perturbación, la corriente de campo oscila sobre su valor inicial, para exponencialmente amortiguarse hasta volver a él, puesto que no se ha alterado el circuito del campo, figura 5.2.2. El ángulo delta decrece bruscamente y oscila hasta su nuevo punto de funcionamiento; al verse disminuida la potencia generada por el decremento del torque mecánico, el ángulo de potencia δ se ajusta para cumplir ese requerimiento, figura 5.2.3.

En el gráfico de la velocidad, se puede observar que frente al incremento brusco de carga, el rotor inicialmente se frena para luego oscilar sobre la velocidad sincrónica, hasta alcanzarla, figura 5.2.4. El torque electromagnético se ajusta a la perturbación, oscilando hasta tomar el valor impuesto por la suma de la función escalón, figura 5.2.5.

4.4. INCREMENTO BRUSCO DEL VOLTAJE DE EXCITACION

El incremento brusco del voltaje de excitación se estudia bajo las mismas condiciones impuestas para las otras aplicaciones. Esta perturbación provoca alteraciones en todas las variables del generador sincrónico, como se puede deducir de los resultados del programa digital.

Siendo la excitación la que gobierna el flujo de reactivos en la máquina sincrónica, al variarla se produce un ajuste de la potencia reactiva.

En el ejemplo desarrollado para esta aplicación, el incremento del voltaje de excitación se lo realiza como la suma de una función escalón, la cual entra en el programa en un instante cualquiera, fijo. La función escalón, en el ejemplo, es positiva e influencia directamente sobre las variables rotóricas. Aquí también, se da como dato θ_r para la condición más crítica de inicio de la perturbación.

Para el estudio experimental del incremento brusco del voltaje de excitación, se conecta el equipo como indica la figura 4.4-1. Estando el generador operando en estado estable se desconecta repentinamente la resistencia conectada en serie a la resistencia del campo, produciendo la subida del voltaje aplicado al devanado de excitación. |11|

Al incrementarse el voltaje de excitación, se está exigiendo mayor potencia reactiva, manteniendo constante la generación de potencia efectiva, por lo que la corriente de fase es mayor al final de la perturbación, y llega a ese valor después de un oscilamiento al inicio, Fig. 5.5-1. La corriente i_{fd} aumenta, siguiendo una función exponencial creciente, de acuerdo al incremento del voltaje aplicado al devanado

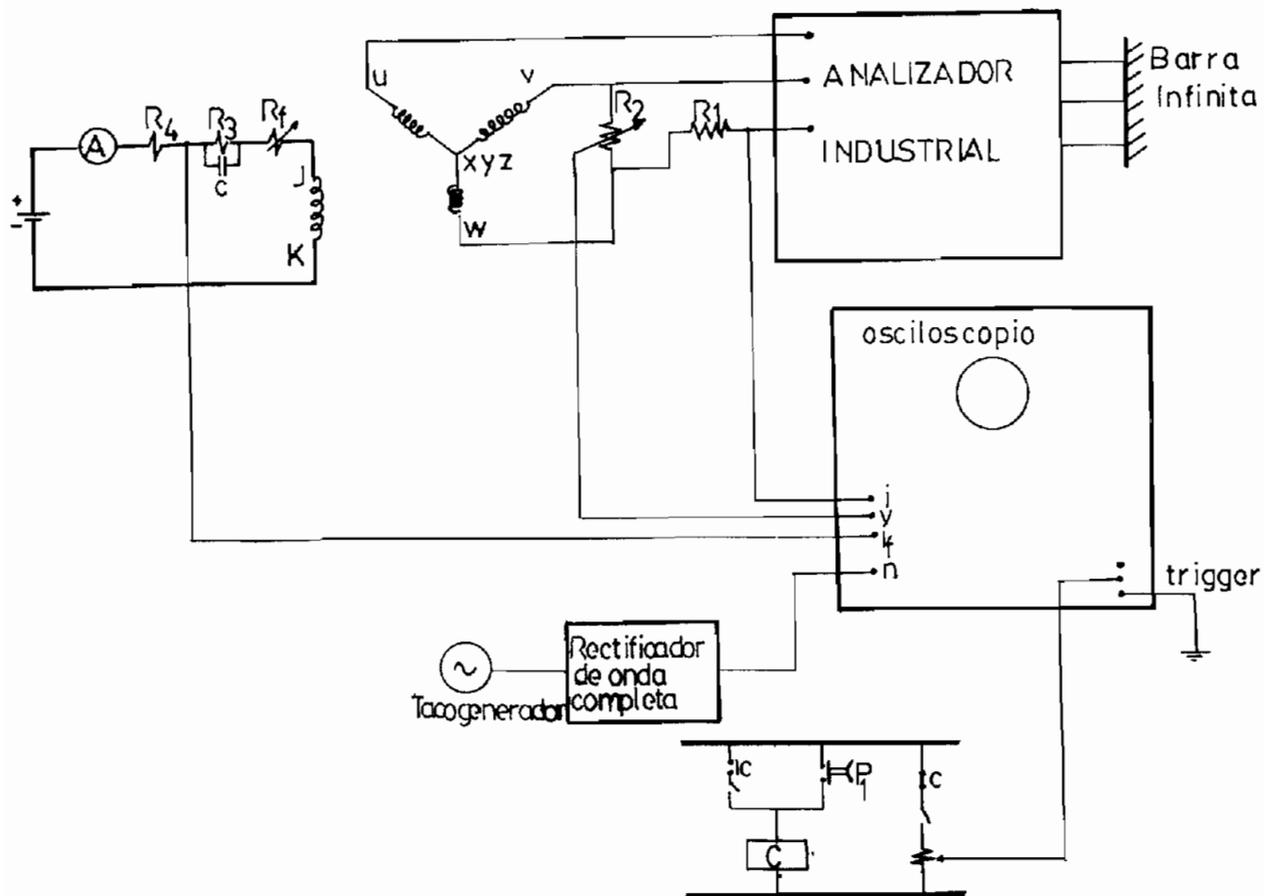


Figura 4.4-1

del campo, Fig. 5.3-2. Por el aumento de i_{fd} , el voltaje interno sube de valor, esto hace que el ángulo de potencia δ , al término de la perturbación, se encuentre disminuido, notando que llega a este nuevo punto de funcionamiento después de una oscilación amortiguada, Fig. 5.3-3.

Durante esta perturbación, la velocidad oscila alrededor de la sincrónica, para en los siguientes instantes amortiguarse hasta volver a la velocidad sincrónica, Fig. 5.3-4. El torque electromagnético tiene un comportamiento similar al de

la velocidad, por lo que pasada la perturbación llega a su punto de partida, esto sucede debido a que la potencia efectiva no ha cambiado, Fig. 5.3-5.

4.5. PERDIDA DE LA EXCITACION POR CORTOCIRCUITO DEL CAMPO

En el mismo punto de funcionamiento estable, que las otras perturbaciones, se realiza la pérdida de la excitación por cortocircuito.

De manera similar al incremento brusco del voltaje de excitación, se simula esta aplicación. La función escalón tiene un valor igual, cambiado de signo, al del voltaje de campo en estado estable, de tal forma que durante la perturbación V_f es cero.

El generador sincrónico está conectado a una barra infinita a la cual entrega potencia activa y reactiva, se produce el cortocircuito del campo y pasa de un estado de sobreexcitación a otro de subexcitación total, de modo que el sentido del flujo de la potencia reactiva se invierte. Por lo tanto el sistema suministra los reactivos al generador para su excitación. Esto sucede únicamente cuando el sistema es capaz de alimentar de potencia reactiva al generador.

En esta condición el generador sincrónico pasa a funcionar a

una velocidad superior a la sincrónica, comportándose como un generador de inducción.

Experimentalmente se puede efectuar esta perturbación con el equipo conectado como se muestra en la figura 4.5-1. [11]

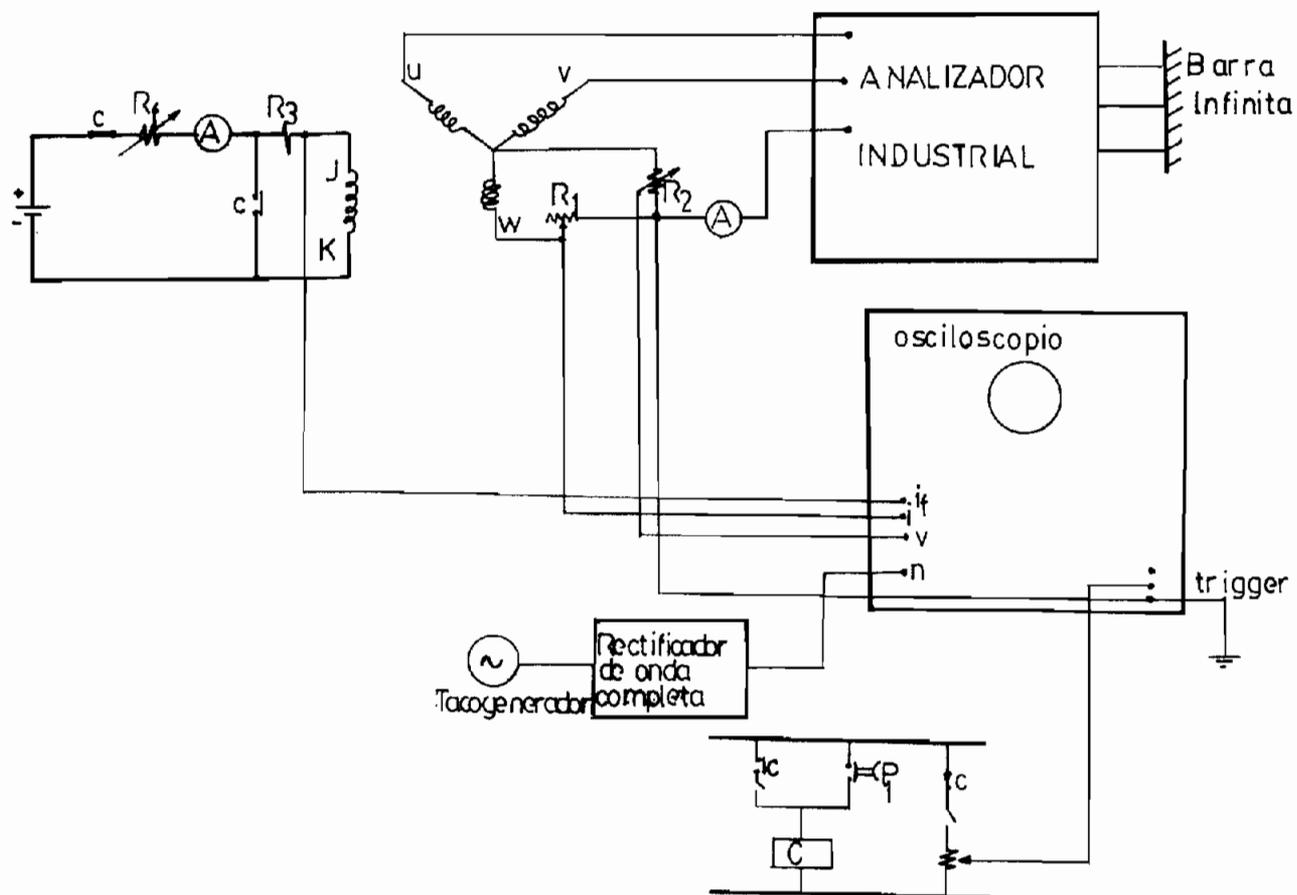


Figura 4.5-1

La corriente de fase aumenta su valor por la potencia Q que entrega el sistema al generador para suplir la falta de excitación, y oscila el tiempo que se mantenga la condición de

cortocircuito del campo, como se puede observar de los resultados del programa, Fig. 5.4-1.

La Fig. 5.4-2, muestra la corriente de campo, la misma que desciende hasta un valor pequeño, para en los siguientes instantes oscilar alrededor de cero. Se puede observar que el valor promedio en el tiempo es nulo.

El ángulo delta comienza a ascender indefinidamente, la potencia activa ya no es función de δ (generador de inducción) Fig. 5.4-3.

El generador sincrónico al pasar a funcionar como generador de inducción, lo hace a una velocidad superior a la sincrónica, Fig. 5.4-4. Por lo tanto la potencia efectiva que entrega es función del deslizamiento. El deslizamiento no es constante, debido a que la velocidad oscila constantemente sobre un valor superior a la velocidad sincrónica, y la potencia efectiva también es oscilante.

De igual modo el torque electromagnético se ve afectado, oscila constantemente en concordancia con la potencia efectiva, Fig. 5.4-5.

Todas las variables oscilan bruscamente cuando se produce esta perturbación, éste fenómeno puede explicarse debido a que

esta forma de operación responde a un punto de inestabilidad del generador sincrónico.

4.6. ARRANQUE DE LA MAQUINA SINCRONICA

El arranque de la máquina sincrónica constituye la más importante aplicación de la operación motora.

En este caso las condiciones iniciales para la resolución de las ecuaciones diferenciales son nulas, es decir, corrientes concatenaciones de flujo, velocidad rotórica, delta, voltaje de excitación y torque representan a la máquina en reposo.

Para arrancar, se impone el voltaje terminal al motor y con las condiciones iniciales nulas se entra al proceso de integración. Durante el arranque, la máquina se comporte como motor de inducción, el campo está cortocircuitado. Cuando la velocidad rotórica está cercana a la velocidad sincrónica, se conecta el voltaje al campo, con lo que se logra llegar al funcionamiento sincrónico. Este procedimiento en el computador refleja lo que prácticamente se hace para arrancar un motor sincrónico.

Al realizar el análisis del comportamiento de la corriente de fase durante el arranque, inicialmente toma valores muy altos que avanzan hasta 7 p.u., para después oscilar y en un tiempo

po de 3.9 segundos se estabiliza.

La corriente de campo comienza a oscilar alrededor de cero , formando picos muy altos que llegan hasta 3.6 p.u. y 3.3 p.u. en el lado positivo y negativo respectivamente. Esta corriente es unicamente producida por inducción. Se conecta el voltaje de excitación y rapidamente se estabiliza en el punto de funcionamiento estable, dado por la relación lineal entre éste voltaje y la resistencia del campo, Fig. 5.5-1.

La variable en la cual se aprecia mejor la forma como se produce el arranque, es la velocidad rotórica. En la Fig. 5.5-3, la velocidad parte de cero y sube rapidamente hasta un valor próximo a la velocidad sincrónica. Trata de estabilizarse - manteniendo un cierto deslizamiento, en el momento de conexión del campo se producen unas pequeñas oscilaciones, que en corto tiempo desaparecen y la máquina alcanza la velocidad sincrónica.

El comportamiento del torque electromagnético durante el arranque, puede ser estudiado en la Fig. 5.5-4. Después de oscilar bruscamente hasta la conexión del campo, bajan las oscilaciones y se estabiliza en el punto impuesto por la carga al eje.

C A P I T U L O VCOMPARACION DE RESULTADOS

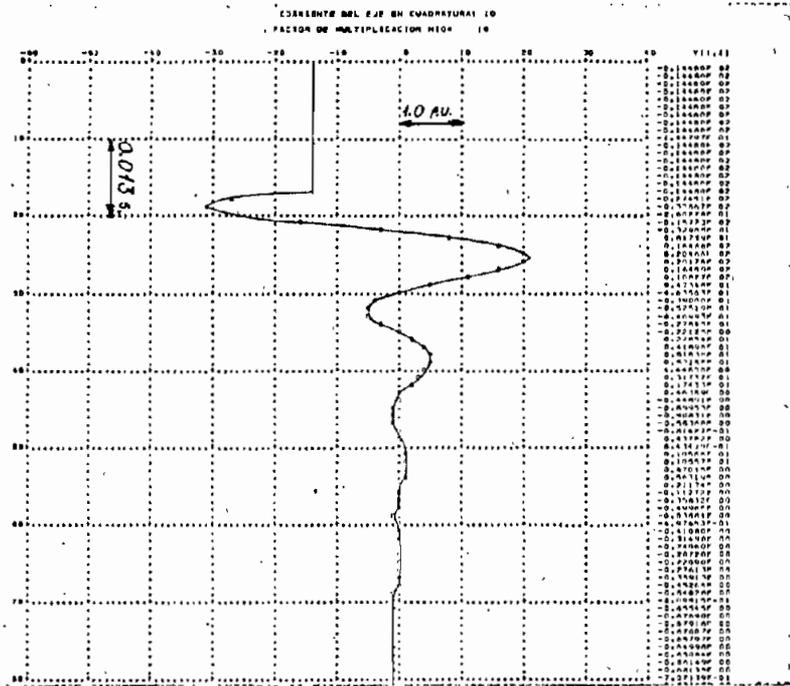
La comparación de los resultados se hace en base al modelo no saturado probado ampliamente en el laboratorio y desarrollado en la Tesis del Ing. Galo Nuñez; y al modelo no saturado desarrollado en el presente trabajo. El programa digital se modifica de aquel en referencia, calculando las condiciones iniciales de funcionamiento por complejos y tomando en cuenta que los valores base en el rotor son valores pico, por tanto no hace falta introducir el factor raíz de dos.

Las aplicaciones del programa digital estudiadas en el capítulo IV, se realizan tanto para el modelo que no incluye la saturación como para el que si considera este efecto. Ambos modelos satisfacen la prueba de estado estable. La diferencia - importante entre ellos se tiene en la corriente de campo, mayor cuando se considera la saturación, lo que incide directamente en el voltaje de excitación y en las concatenaciones de flujo del campo. Esto es lógico, debido a que en la curva de vacío, el punto de funcionamiento real está desplazado hacia la derecha del que asume un comportamiento lineal del núcleo.

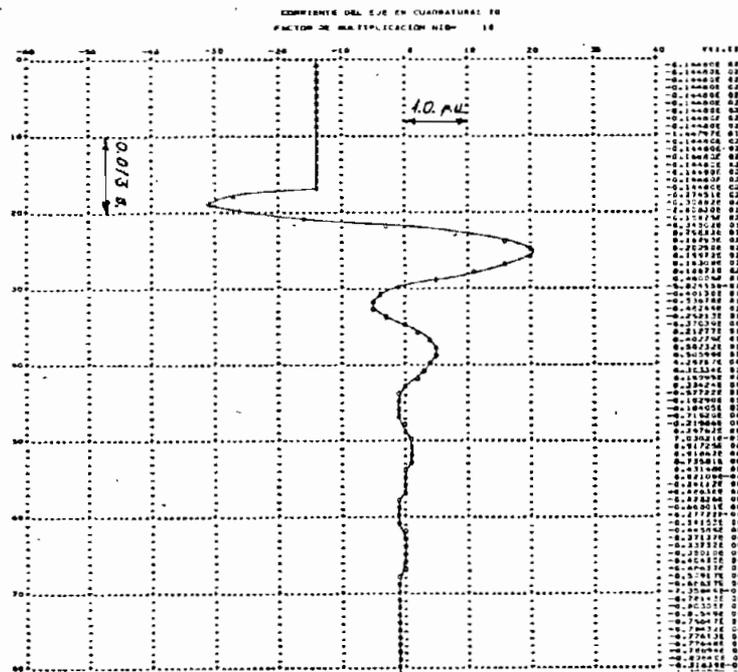
Lo anteriormente expuesto se muestra en las siguientes tablas de resultados:

5.1. CORTOCIRCUITO TRIFASICO

Simulado idénticamente para los dos modelos, se observa las siguientes diferencias: Las cantidades que se comparan son valores en p.u. El tiempo cero para los valores listados es el instante de producción de la perturbación.



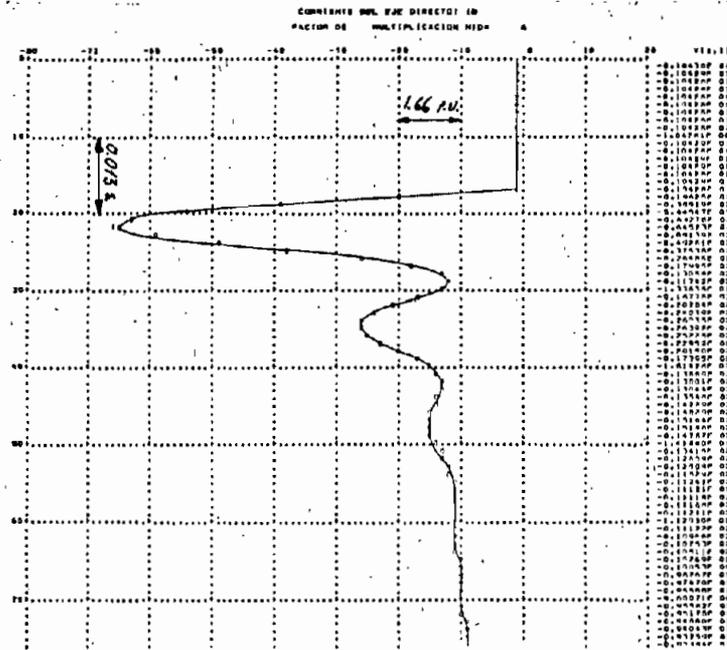
1.- Modelo no saturado



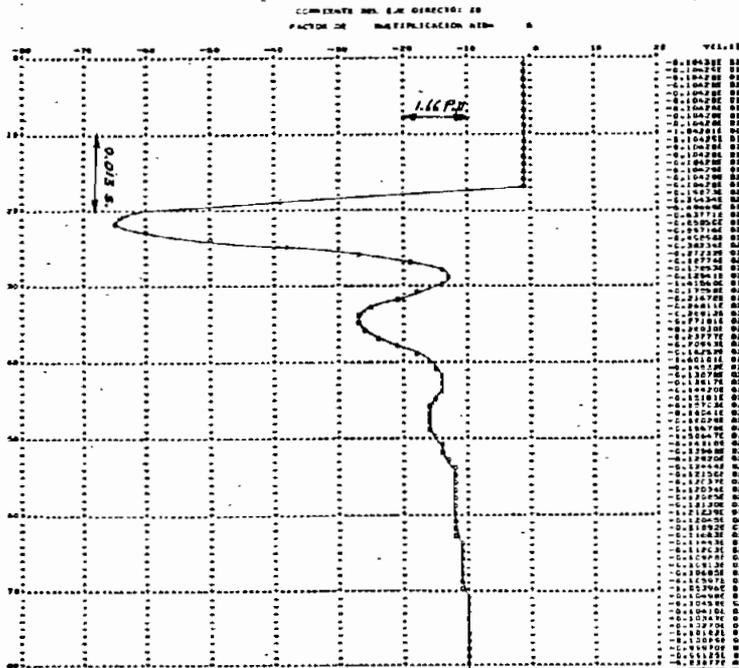
2.- Modelo saturado

Figura 5.1-1 CORRIENTE EN EL EJE EN CUADRATURA

(1)	t(seg)	(2)	t(seg)	
-1.4480	0.	-1.4480	0.	En el estado estable
-3.0867	0.004	-3.0882	0.004	Máximo negativo
2.0466	0.012	2.0250	0.012	Máximo positivo
-0.0943	0.164	-0.1063	0.161	En el cortocircuito permanente.



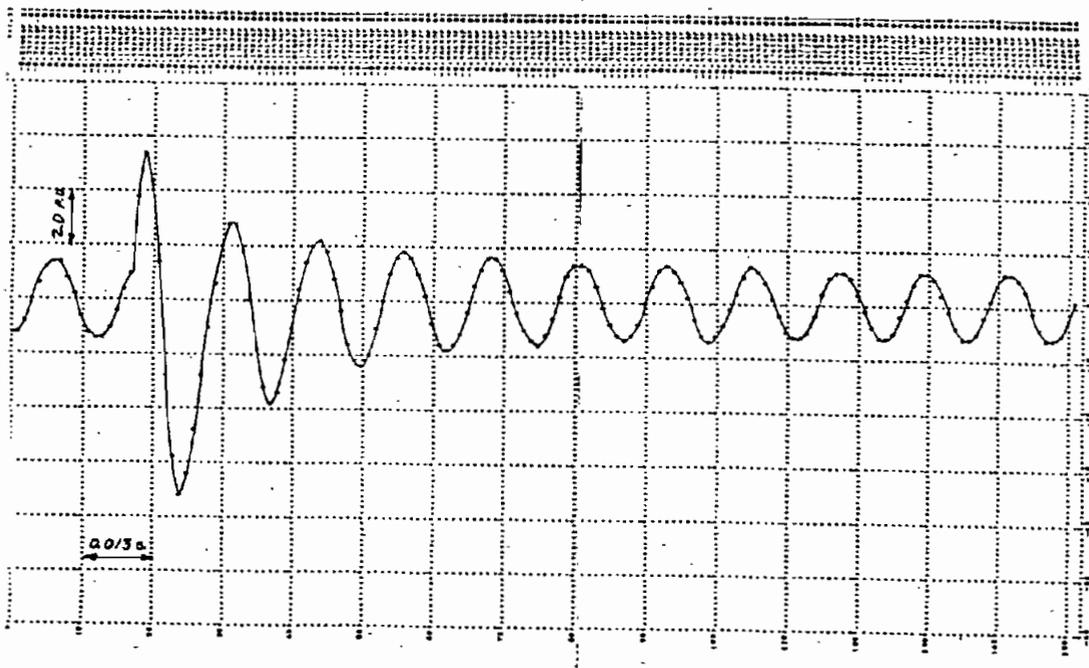
1.- Modelo no saturado



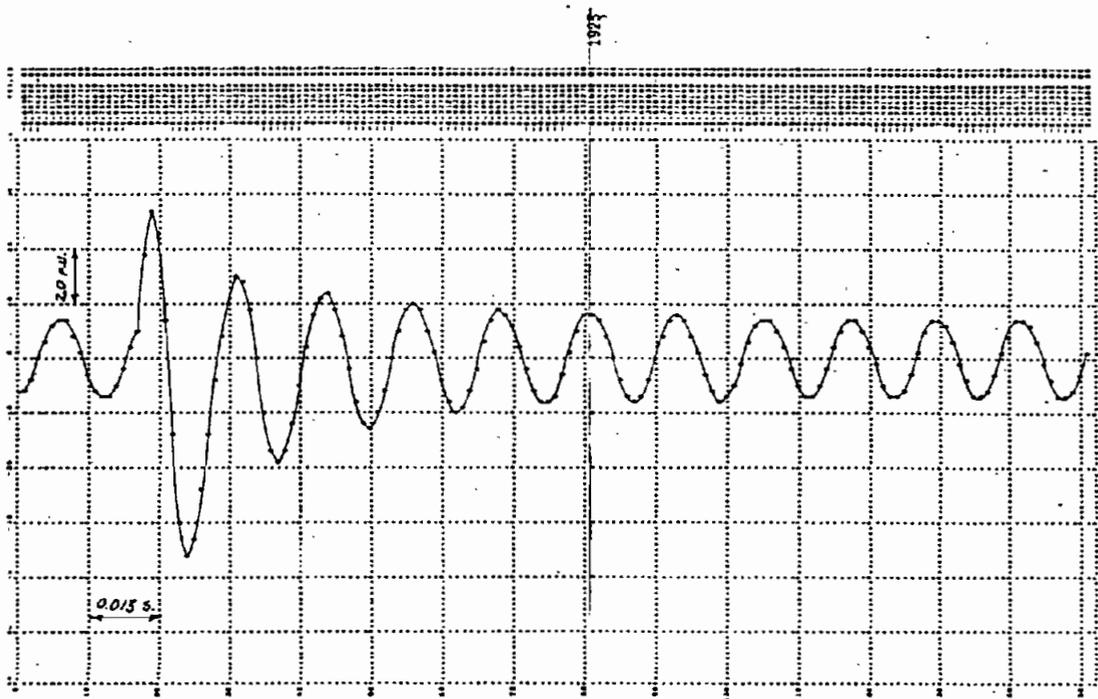
2.- Modelo saturado

Figura 5.1-2 CORRIENTE EN EL EJE DIRECTO

(1)	t(seg)	(2)	t(seg)	
- 0.1738	0.	- 0.1738	0.	En el estado estable
-10.7538	0.008	-10.8417	0.008	Máximo negativo
- 1.2908	0.18	- 1.4514	0.18	En el cortocircuito permanente.



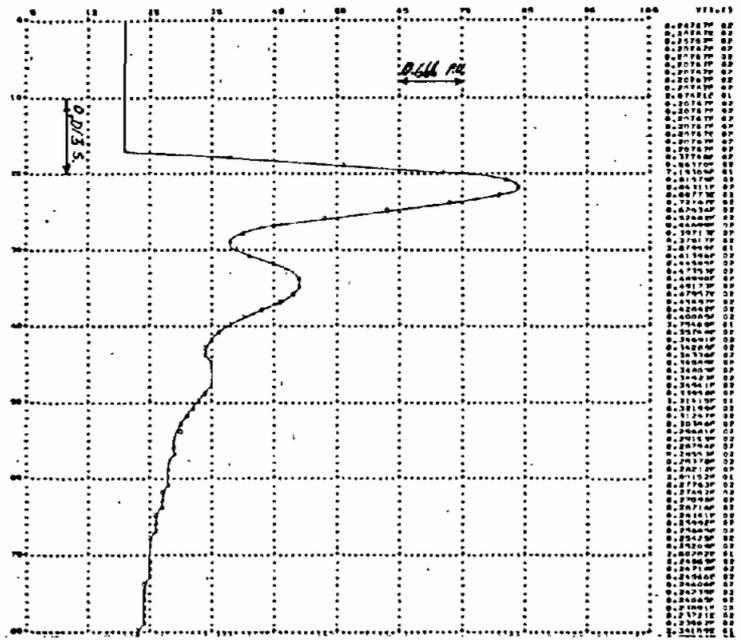
1.- Modelo no saturado



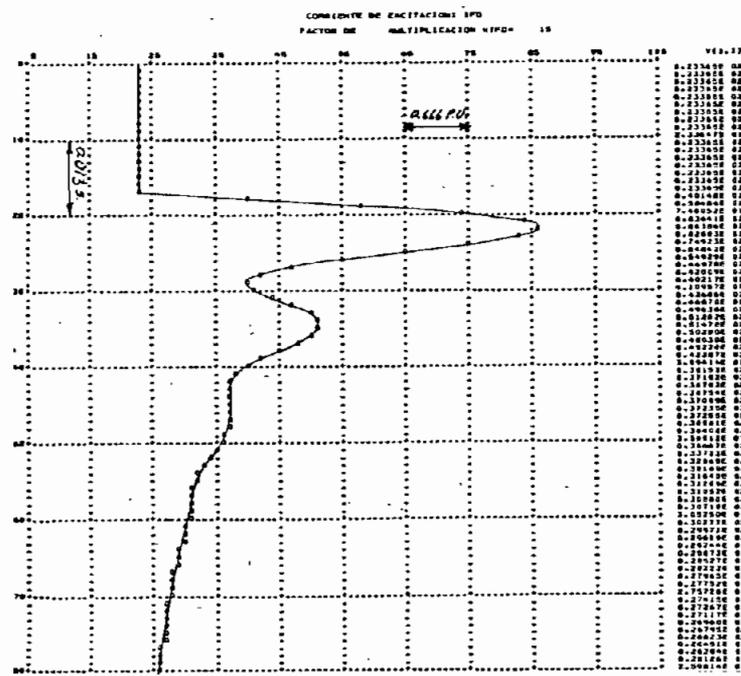
2.- Modelo saturado

Figura 5.1-3 CORRIENTE DE FASE

(1)	t(seg)	(2)	t(seg)		
1.4544	0.	1.4544	0.	Valores de pico en estado estable.	
-1.4294	0.	-1.4294	0.		
5.3088	0.004	5.3906	0.004		Pico máximo positivo.
-7.1408	0.011	-7.2468	0.011		Pico máximo negativo.
1.2881	0.168	1.4528	0.168		Valor de pico en cortocircuito permanente.
-1.2873	0.176	-1.4520	0.176		



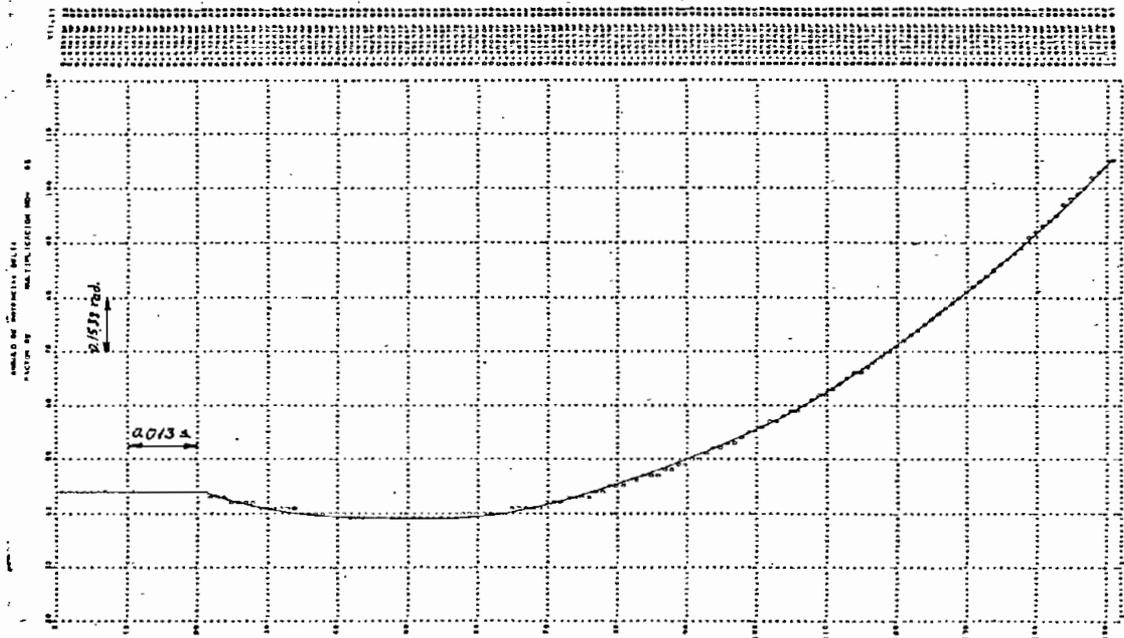
1.- Modelo no saturado



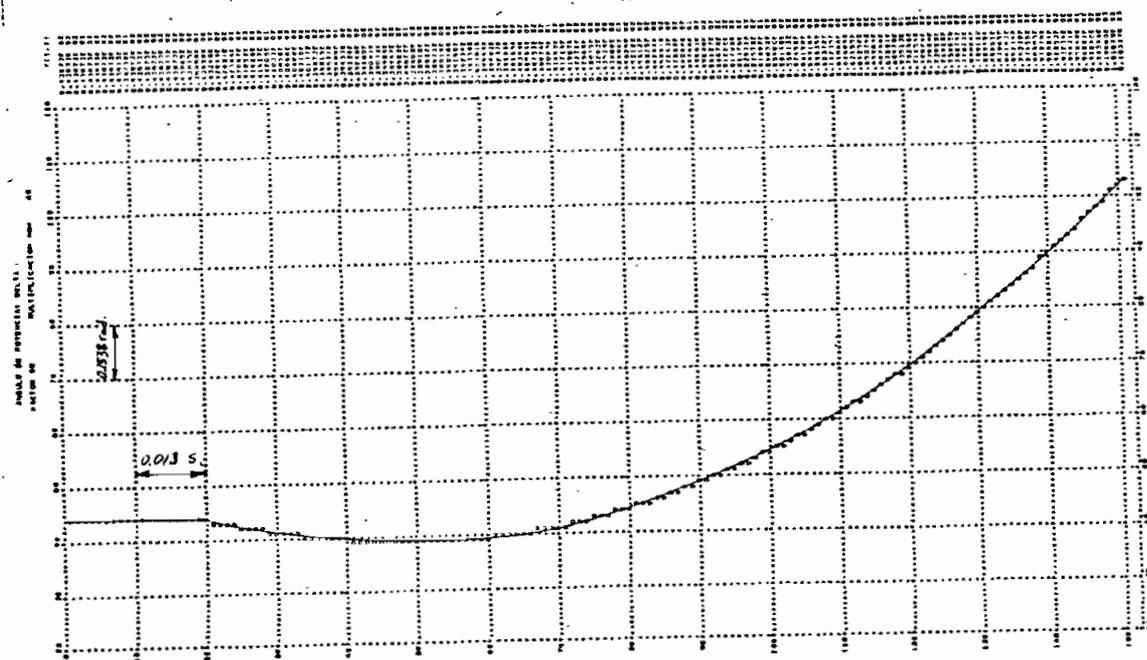
2.- Modelo saturado

Figura 5.1-4 CORRIENTE DE EXCITACION

(1)	t(seg)	(2)	t(seg)	
1.3845	0.	1.5576	0.	En el estado estable.
5.6207	0.008	5.7591	0.008	Máximo positivo.
1.3904	0.18	1.5635	0.18	En el cortocircuito permanente.



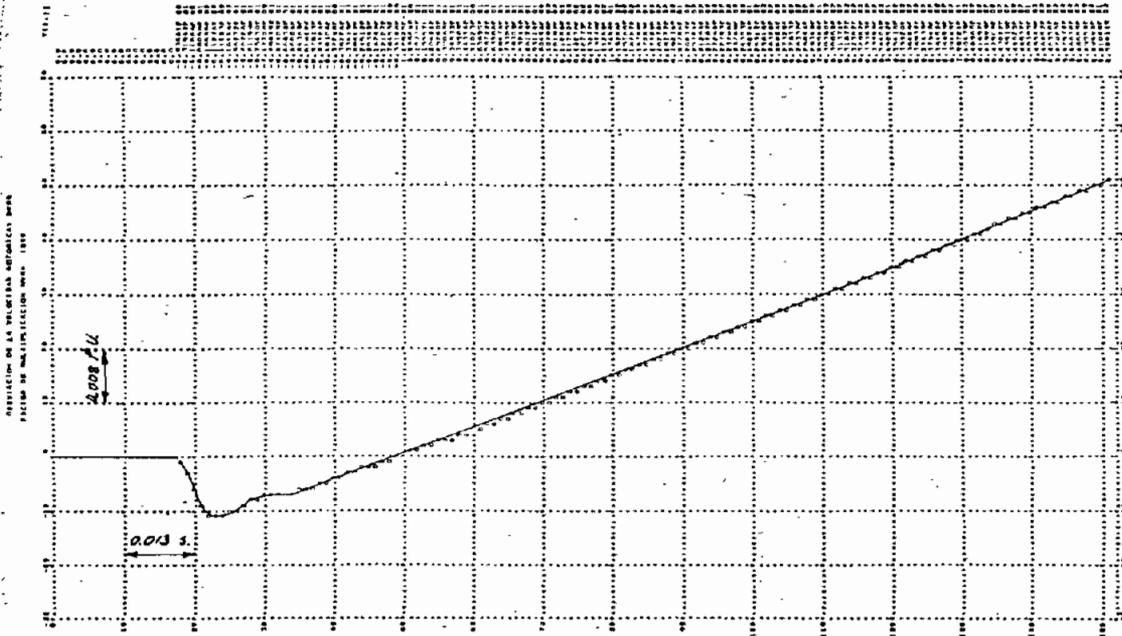
1.- Modelo no saturado



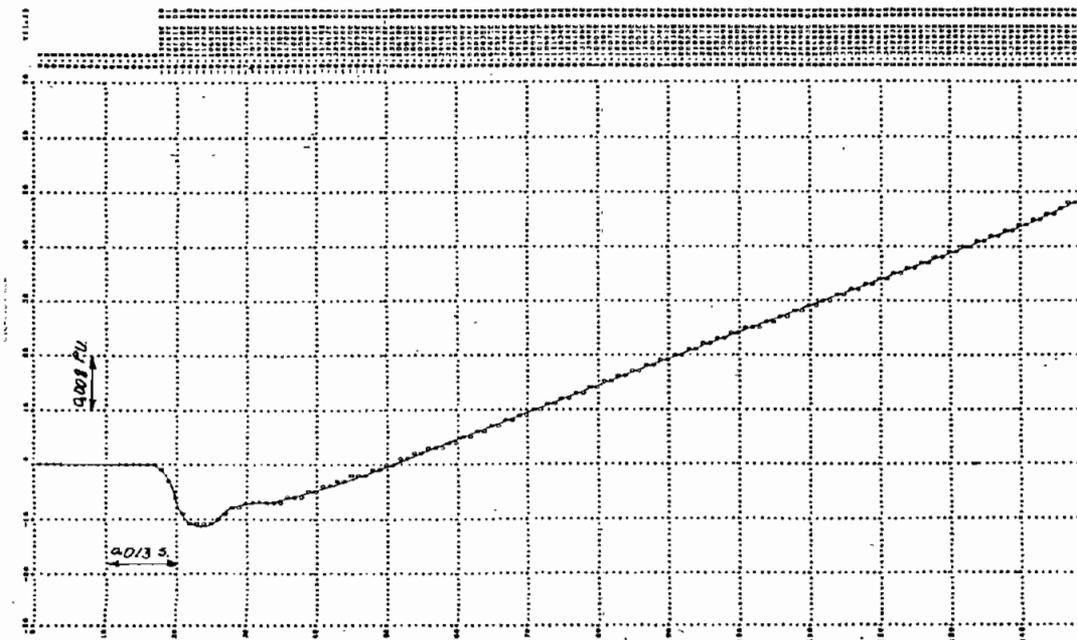
2.- Modelo saturado

Figura 5.1-5 ANGULO DE POTENCIA

(1)	t(seg)	(2)	t(seg)	
0.6750	0.	0.6750	0.	En el estado estable.
1.6230	0.18	1.5872	0.18	A un determinado tiempo, suben continuamente.



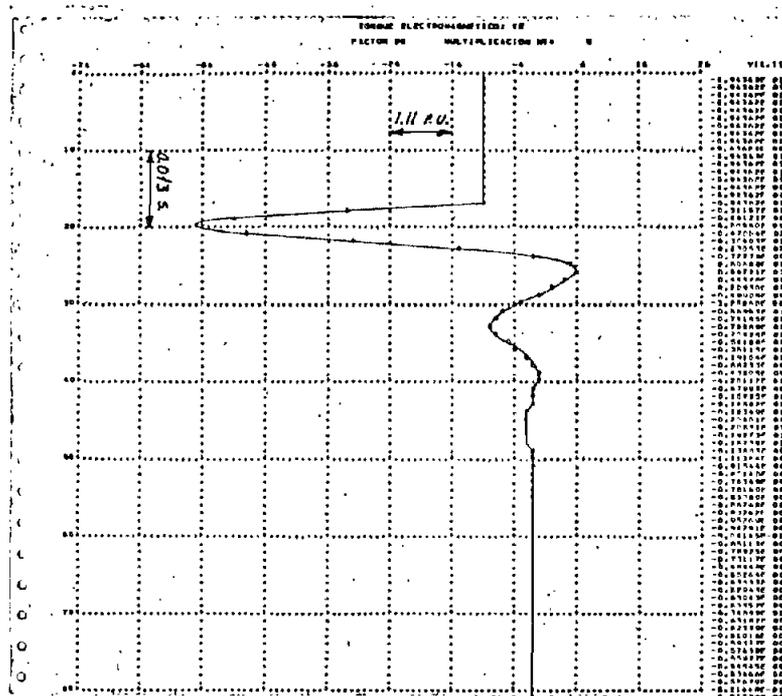
1.- Modelo no saturado



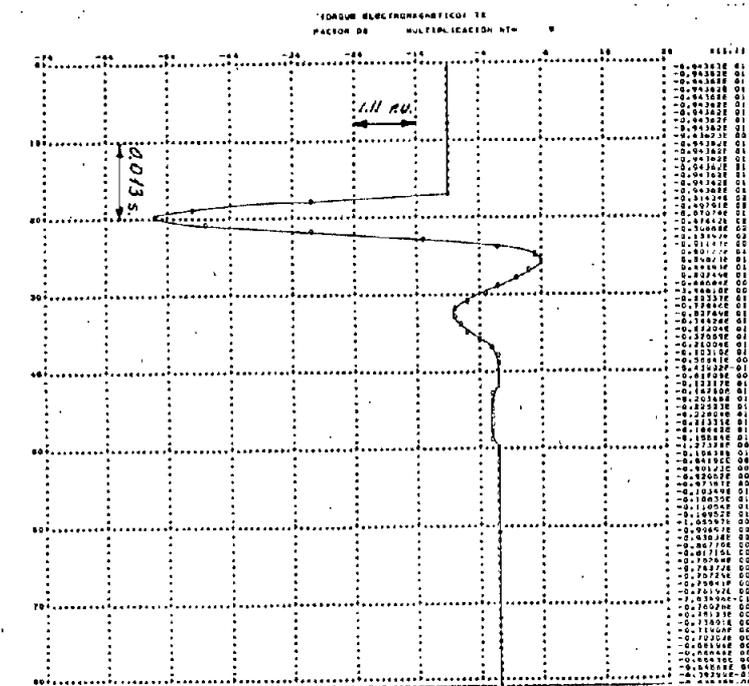
2.- Modelo saturado

Figura 5.1-6 VELOCIDAD ROTORICA

(1)	t(seg)	(2)	t(seg)	
1.	0.	1.	0.	En el estado estable.
0.9910	0.009	0.9909	0.009	Máximo negativo.
1.0405	0.18	1.0396	0.18	A un determinado tiempo suben constantemente.



1.- Modelo no saturado



2.- Modelo saturado

Figura 5.1-7 TORQUE ELECTROMAGNETICO

(1)	t(seg)	(2)	t(seg)	
-1.0485	0.	-1.0485	0.	En el estado estable
-6.1173	0.005	-6.1898	0.005	Máximo negativo.
0.6636	0.013	0.6647	0.013	Máximo positivo.
-0.0433	0.18	-0.0548	0.18	En el cortocircuito permanente.

Como se puede deducir de los datos mostrados, el modelo (2) presenta corrientes mayores: en sus picos, en el amortiguamiento y en los valores finales que definen el cortocircuito trifásico permanente.

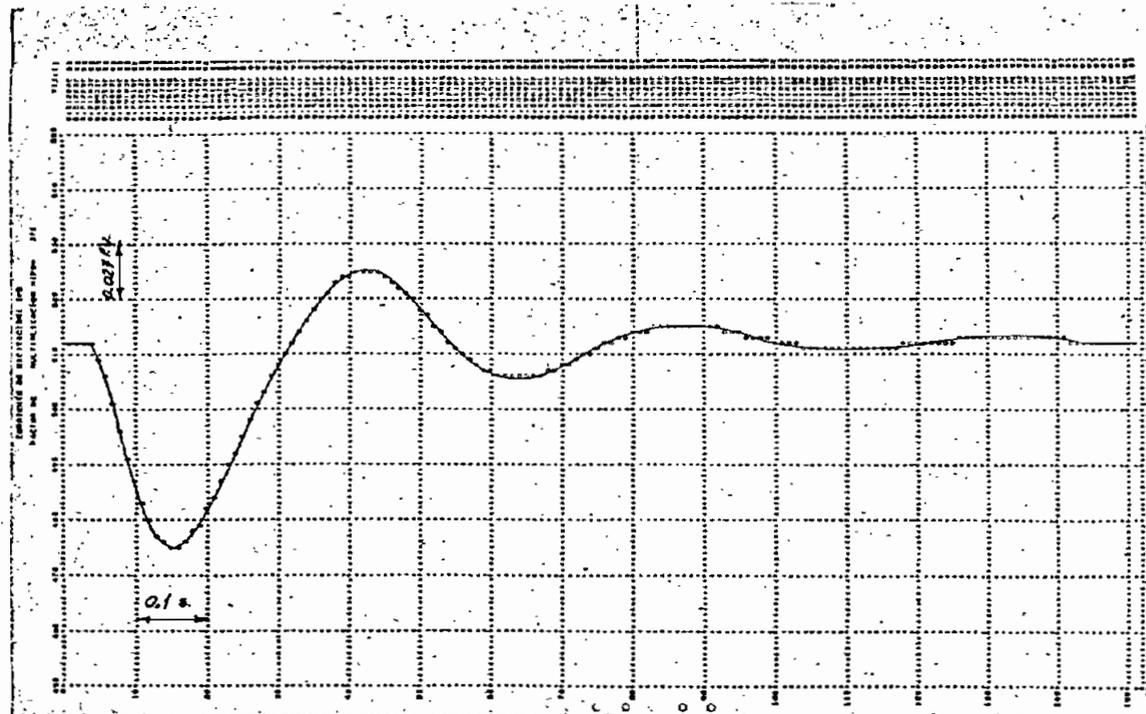
La velocidad rotórica presenta pequeñas diferencias en los dos casos, mientras que el ángulo de potencia y torque electro-magnético muestra más la influencia de la saturación. Las concatenaciones de flujo, ψ_q , ψ_d , ψ_{kq} , ψ_{kd} , ψ_{fd} también difieren, en especial las concatenaciones de flujo del campo durante el cortocircuito.

El comportamiento de las variables puede ser analizado aún más en los resultados gráficos.

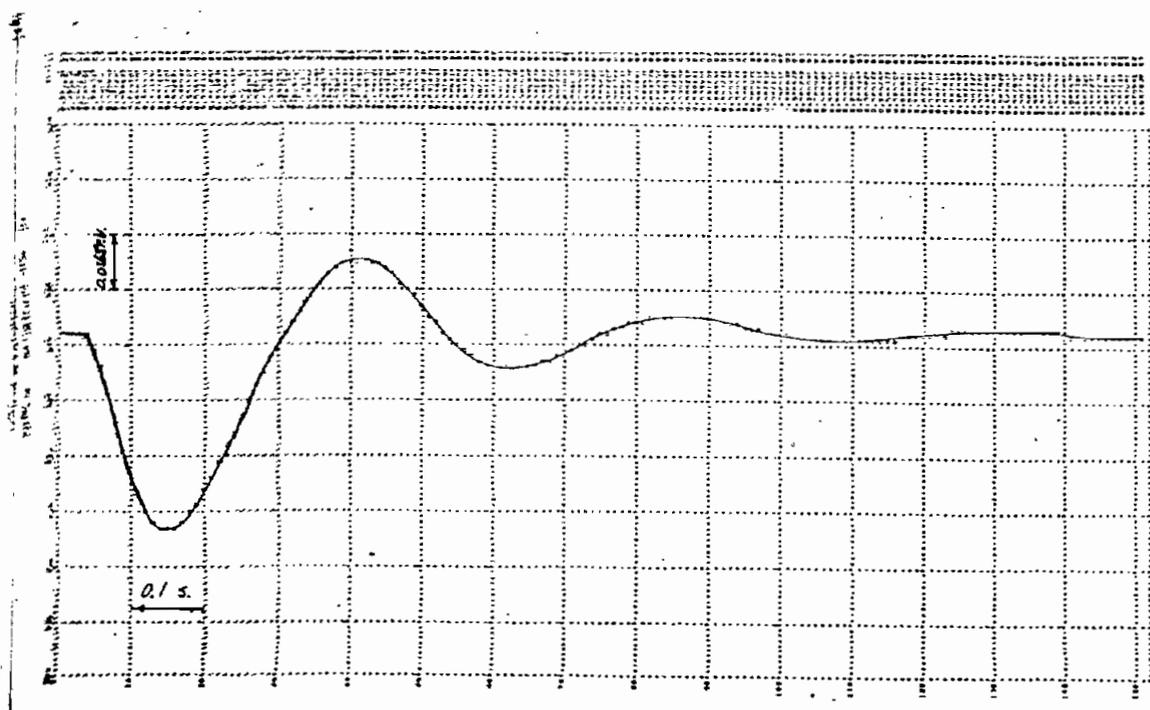
Las diferencias de los dos modelos están de acuerdo con las consideraciones hechas para el funcionamiento de la máquina sincrónica, asegurándose que el modelo que toma en cuenta la saturación magnética del hierro se acerca más a la realidad.

5.2. INCREMENTO BRUSCO DEL TORQUE MECANICO

Los valores comparados están en p.u.; al tiempo cero para los valores listados es el de producción de la perturbación y la simulación para ambos modelos es hecha con iguales datos.



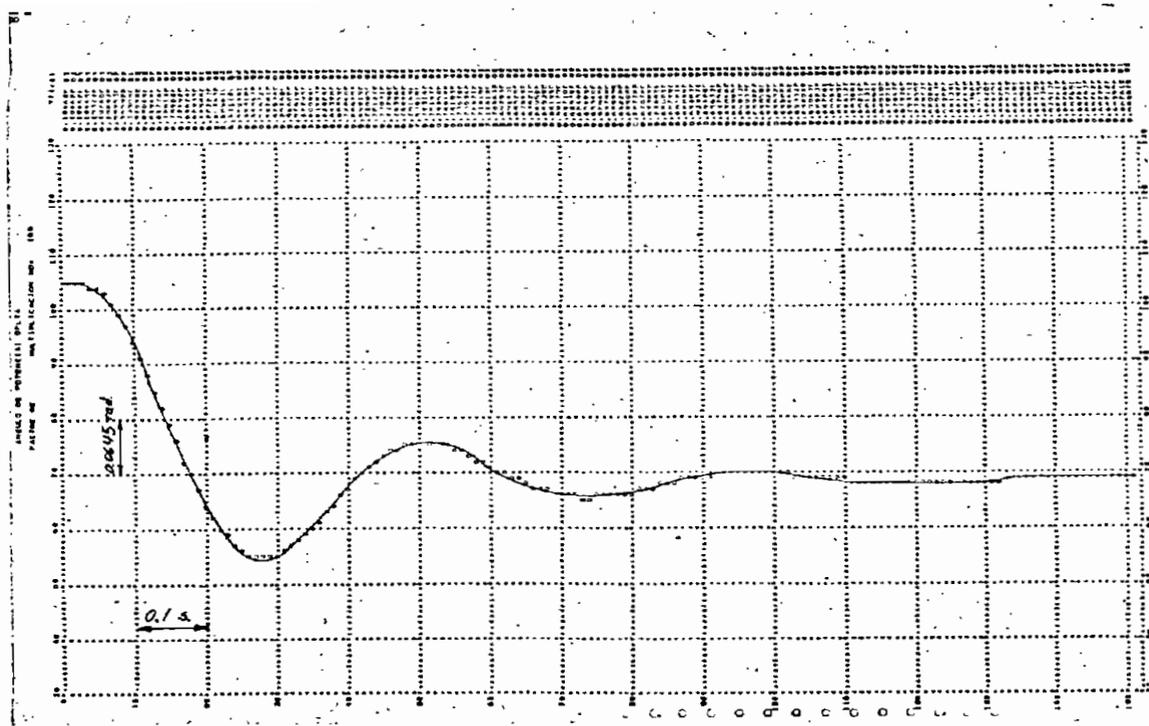
1.- Modelo no saturado



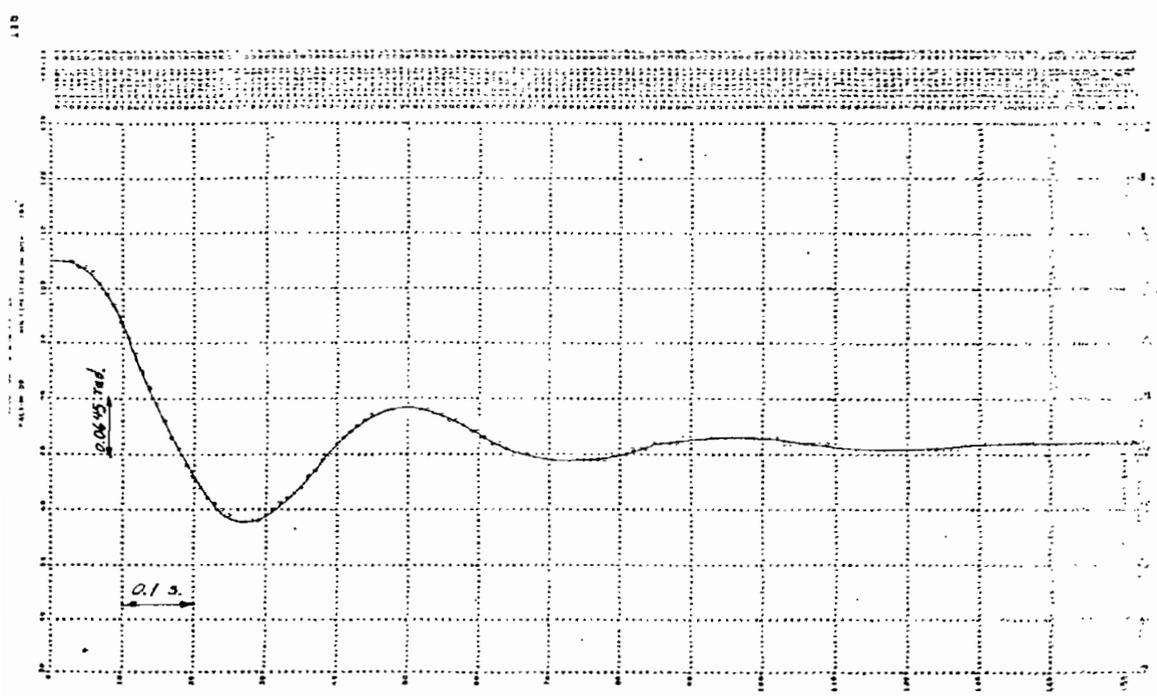
2.- Modelo saturado

Figura 5.2-2 CORRIENTE DE EXCITACION

(1)	t(seg)	(2)	t(seg)	
1.3845	0.	1.55764	0.	En el estado estable
1.28430	0.13	1.4634	0.13	Mínimo positivo
1.38503	1.40	1.55832	1.38	En camino al valor inicial.



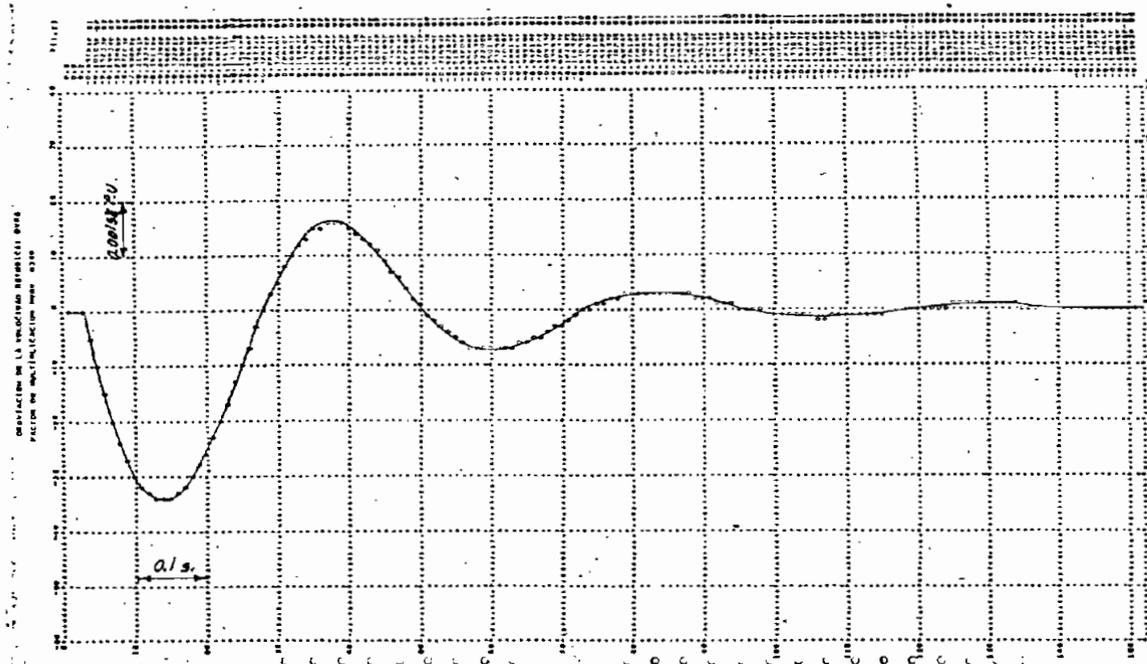
1.- Modelo no saturado



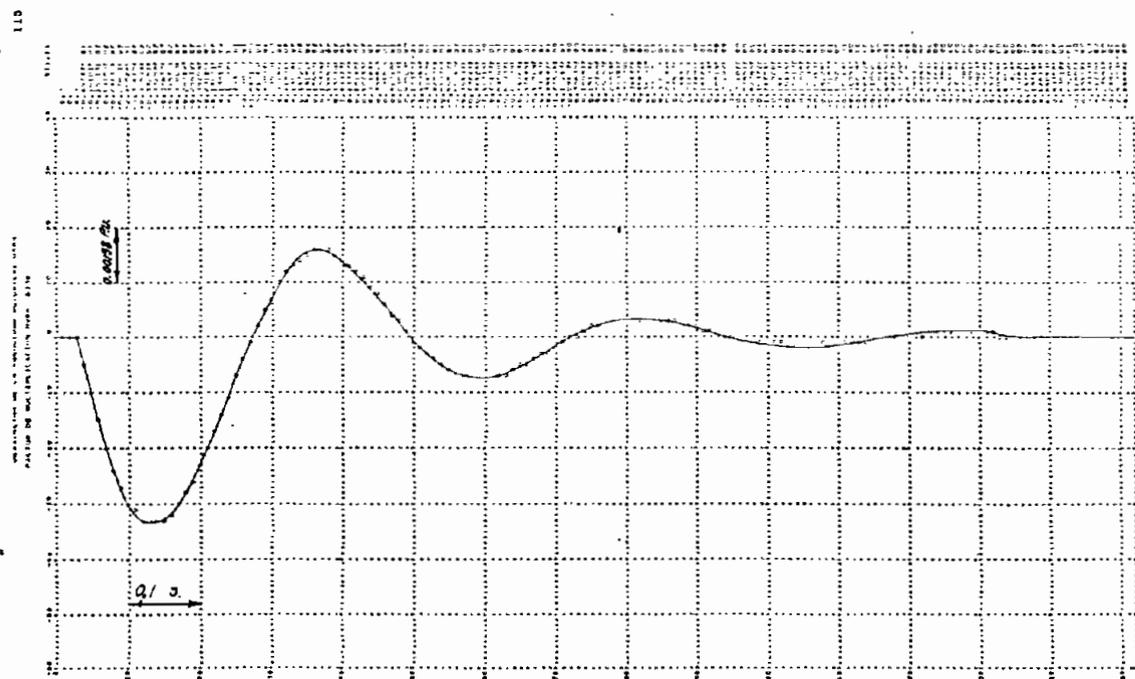
2.- Modelo saturado

Figura 5.2-3 ANGULO DE POTENCIA

(1)	t(seg)	(2)	t(seg)	
0.67497	0.	0.67497	0.	En el estado estable.
0.35272	0.26	0.37414	0.25	Mínimo positivo.
0.44295	1.48	0.46327	1.48	Nuevo punto de funcionamiento.



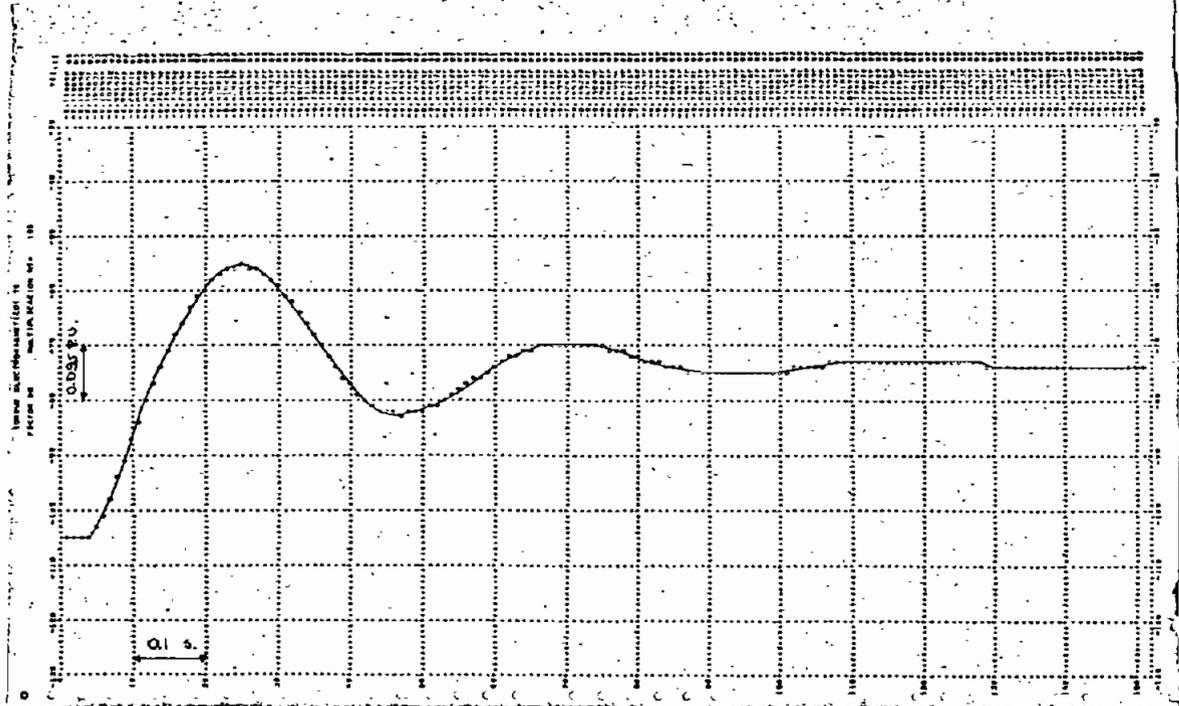
1.- Modelo no saturado



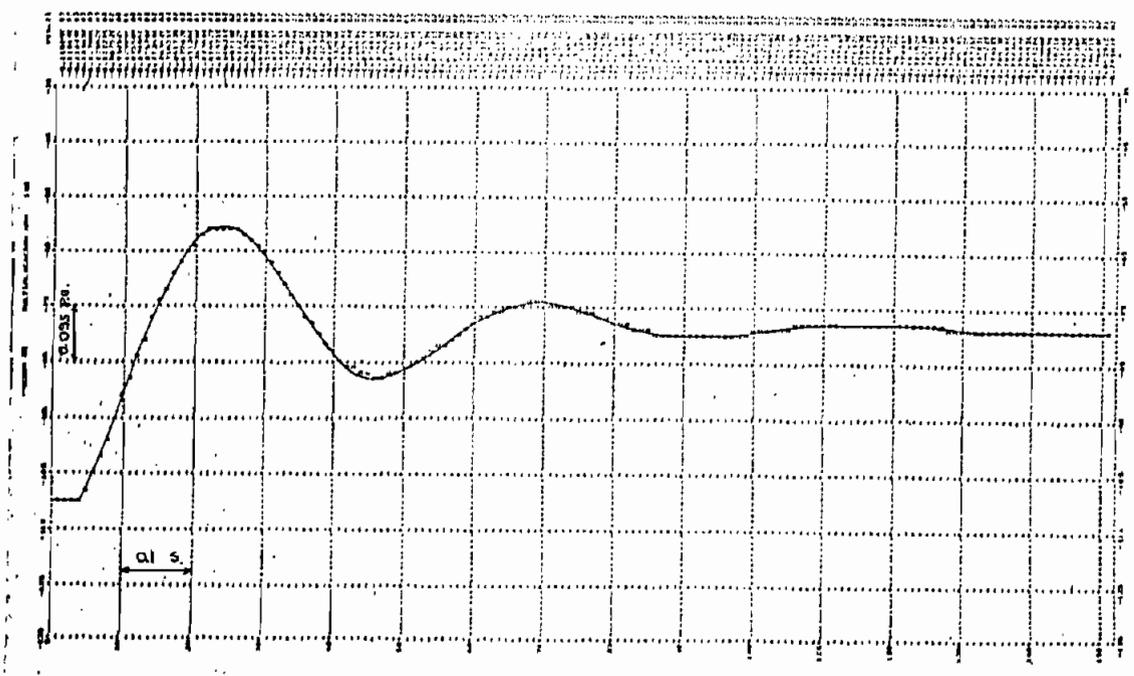
2.- Modelo saturado

Figura 5.2-4 VELOCIDAD ROTORICA

(1)	t(seg)	(2)	t(seg)	
1.	0.	1.	0.	En el estado estable.
0.99457	0.12	0.99474	0.11	Mínimo
1.00252	0.36	1.00250	0.35	Máximo
1.0000696	1.33	1.0000581	1.33	En camino a la velocidad sincrónica.



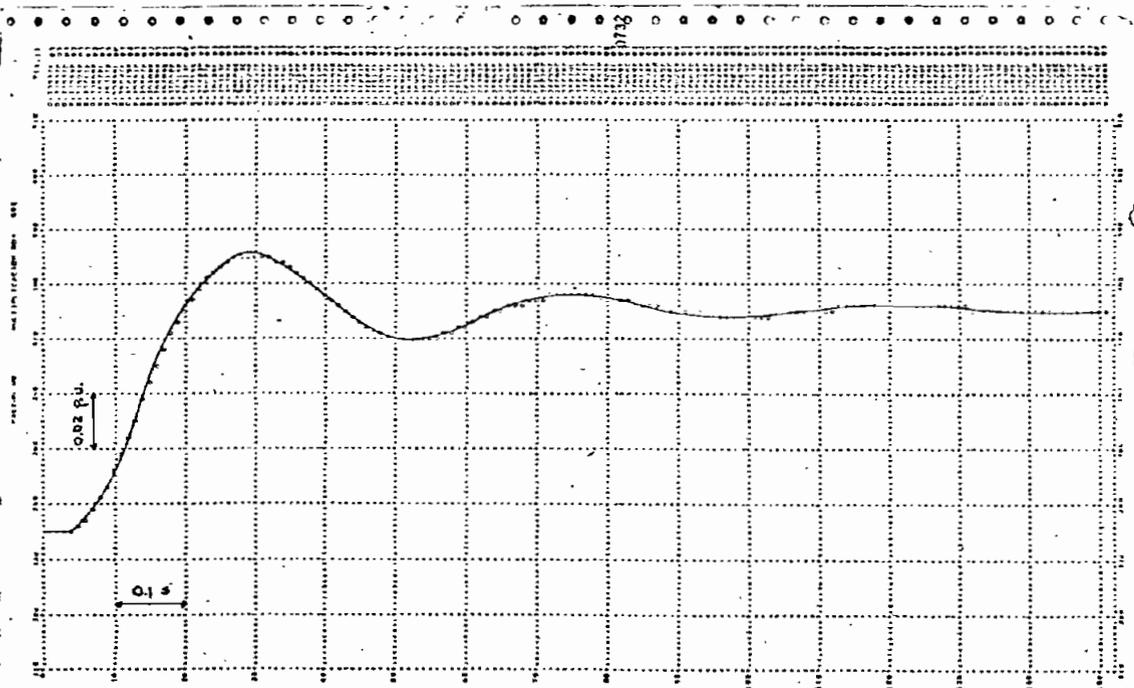
1.- Modelo no saturado



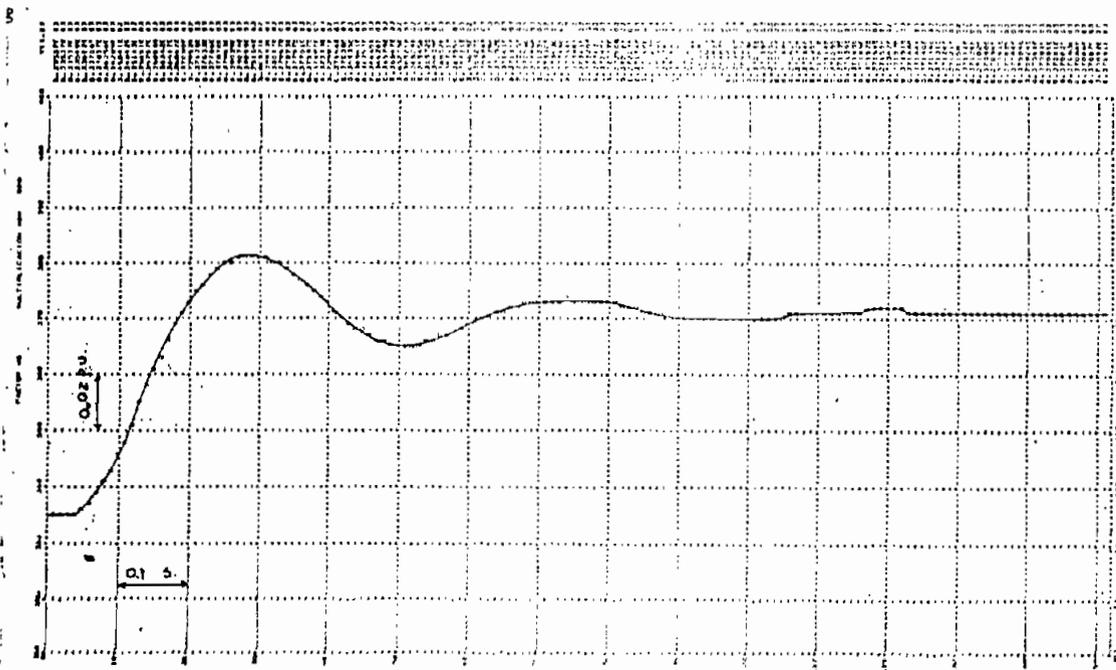
2.- Modelo saturado

Figura 5.1-5 TORQUE ELECTROMAGNETICO

(1)	t(seg)	(2)	t(seg)	
-1.04848	0.	-1.04848	0.	En el estado estable
-0.57532	0.23	-0.57744	0.22	Mínimo negativo.
-0.74867	1.48	-0.74839	1.48	Nuevo punto de funcionamiento.



1.- Modelo no saturado



2.- Modelo saturado

Figura 5.2-6 CONCATENACIONES DE FLUJO MUTUO DEL EJE DIRECTO

(1)	t(seg)	(2)	t(seg)	
0.67074	0.	0.67074	0.	En el estado estable.
0.77059	0.28	0.76208	0.27	Máximo positivo.
0.75052	1.48	0.74182	1.48	Nuevo punto de funcionamiento.

Todas las variables oscilan amortiguándose hasta llegar al nuevo punto de funcionamiento, dado por el incremento negativo del torque.

El modelo que considera la saturación presenta valores mayores en las oscilaciones de las corrientes de fase, y sus componentes de excitación, para estabilizarse de igual manera en puntos de funcionamiento más altos ya sean positivos o negativos. La corriente de excitación vuelve a su punto inicial debido a que el circuito del campo no es alterado.

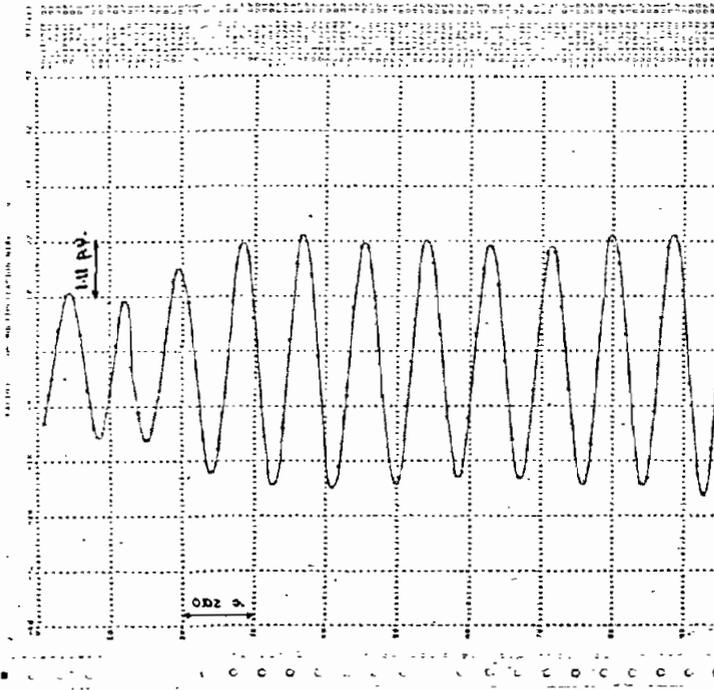
El ángulo de potencia en el modelo (2) se estabiliza en un valor más alto. La velocidad rotórica llega a la sincrónica más rápidamente en el modelo saturado. Respecto al torque electromagnético, el modelo (2) avanza más pronto al nuevo punto de funcionamiento.

Las concatenaciones de flujo también muestran la diferencia de ambos modelos, especialmente las correspondientes al campo y al flujo mutuo del eje directo.

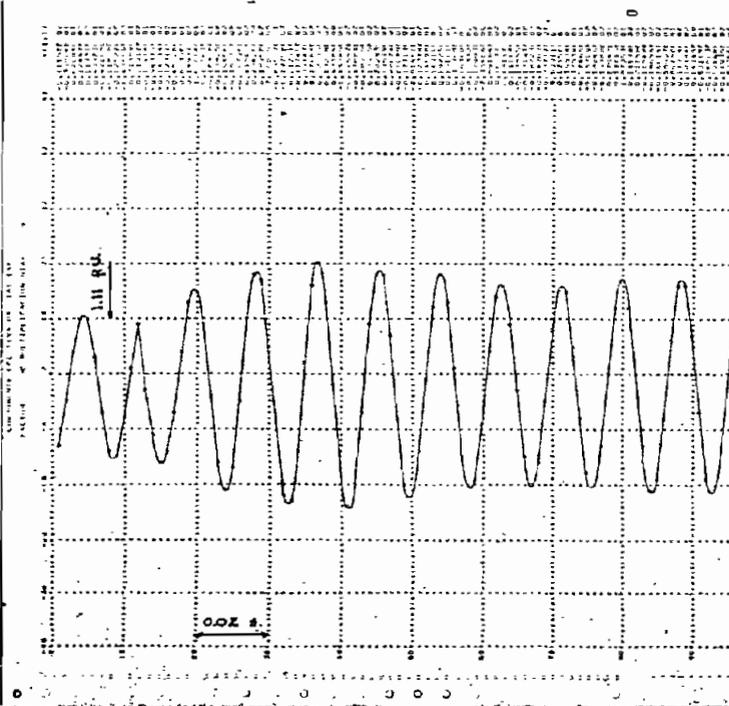
Estas diferencias se deben a las consideraciones planteadas para los dos casos, siendo el modelo (2) el que representa más exactamente al fenómeno real.

5.3. INCREMENTO BRUSCO DEL VOLTAJE DE EXCITACION

Las variables en p.u. son comparadas en los modelos no saturado (1) y saturado (2). El tiempo inicial de la perturbación - se considera como t cero para los valores listados.



1.- Modelo no

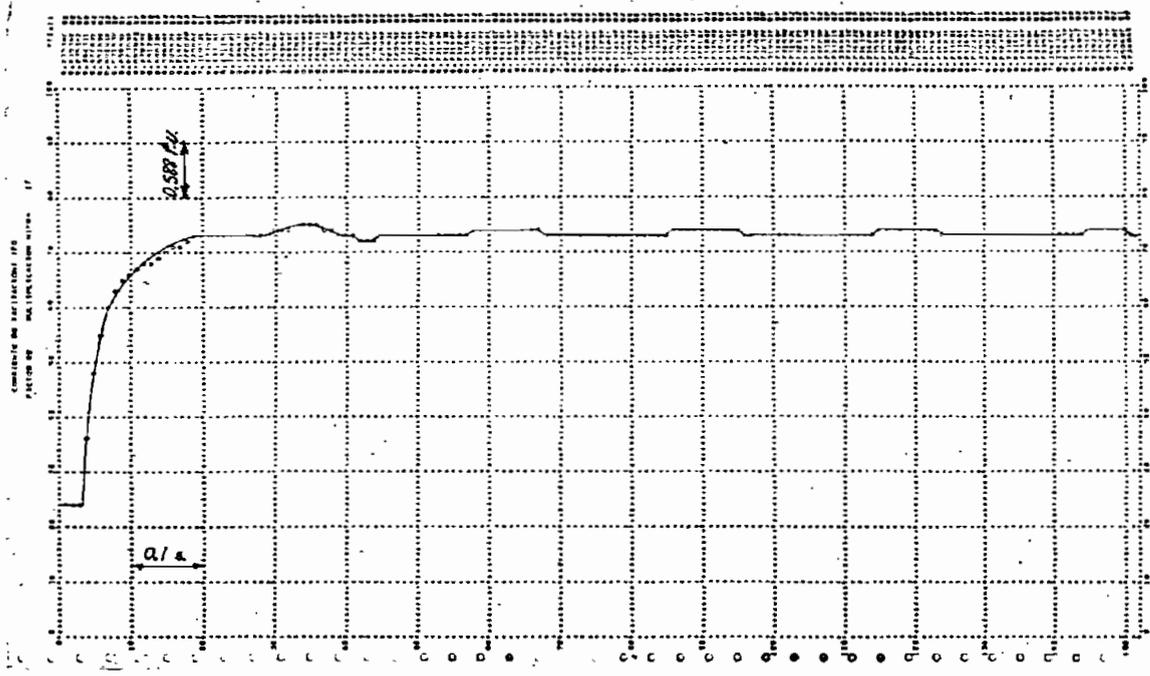


2.- Modelo sat

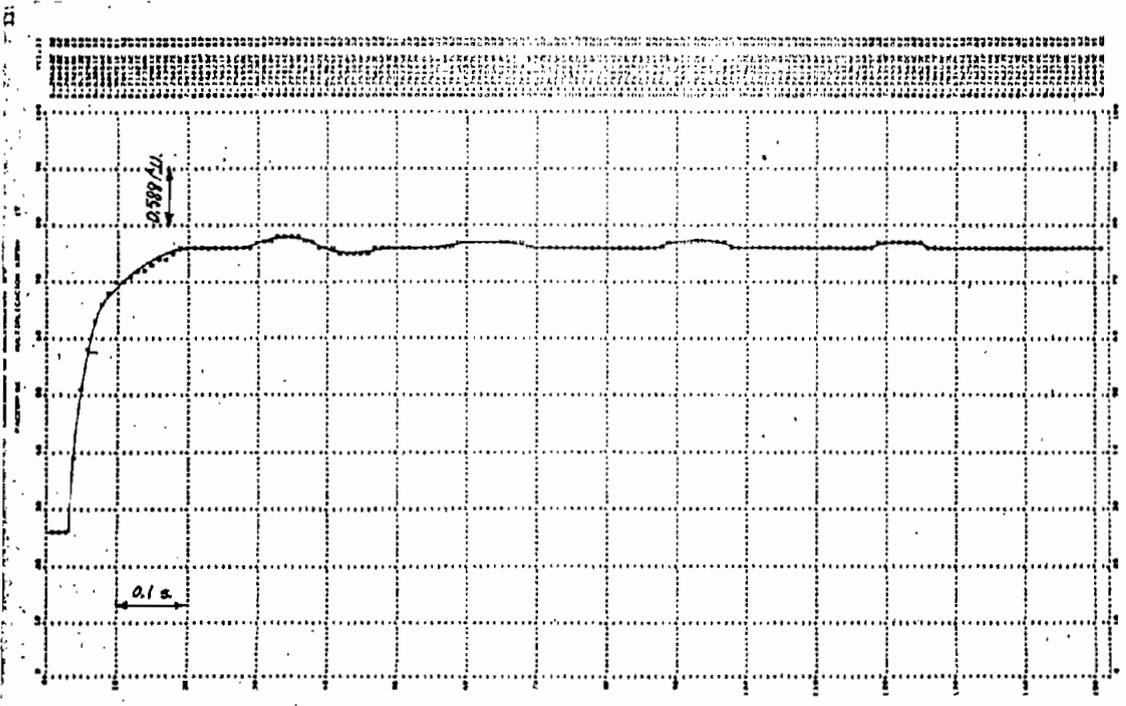
Figura 5.3-1 CORRI

(1)
 1.444
 -1.444
 3.015
 -3.068

(2)
 1.444
 -1.444
 2.742
 -2.742



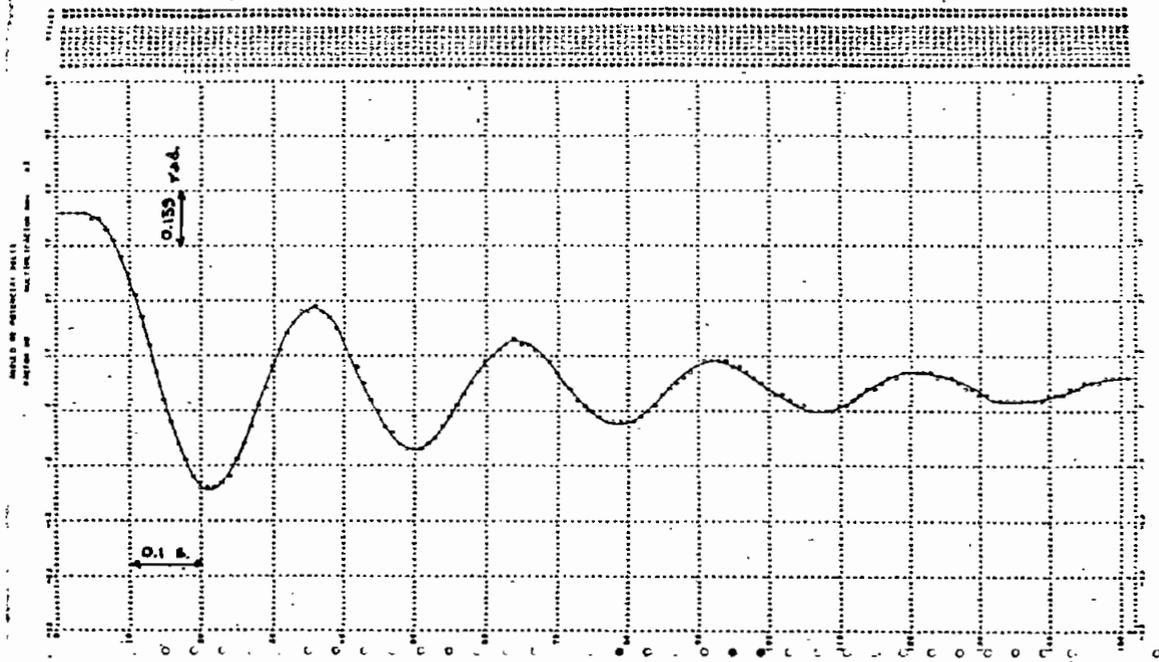
1.- Modelo no saturado



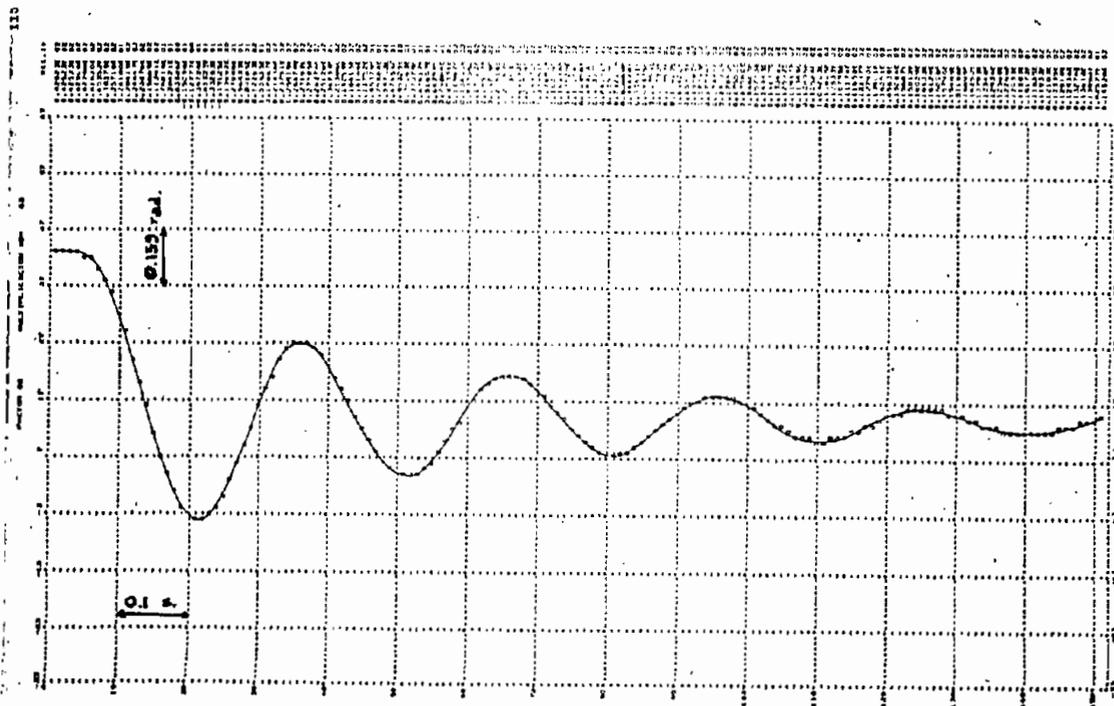
2.- Modelo saturado

Figura 5.3-2 CORRIENTE DE EXCITACION

(1)	t(seg)	(2)	t(seg)	
1.38447	0.	1.5577	0.	En el estado estable.
4.40576	0.31	4.5773	0.32	Máximo positivo.
4.3226	1.48	4.498	1.48	En camino al nuevo punto de funcionamiento.



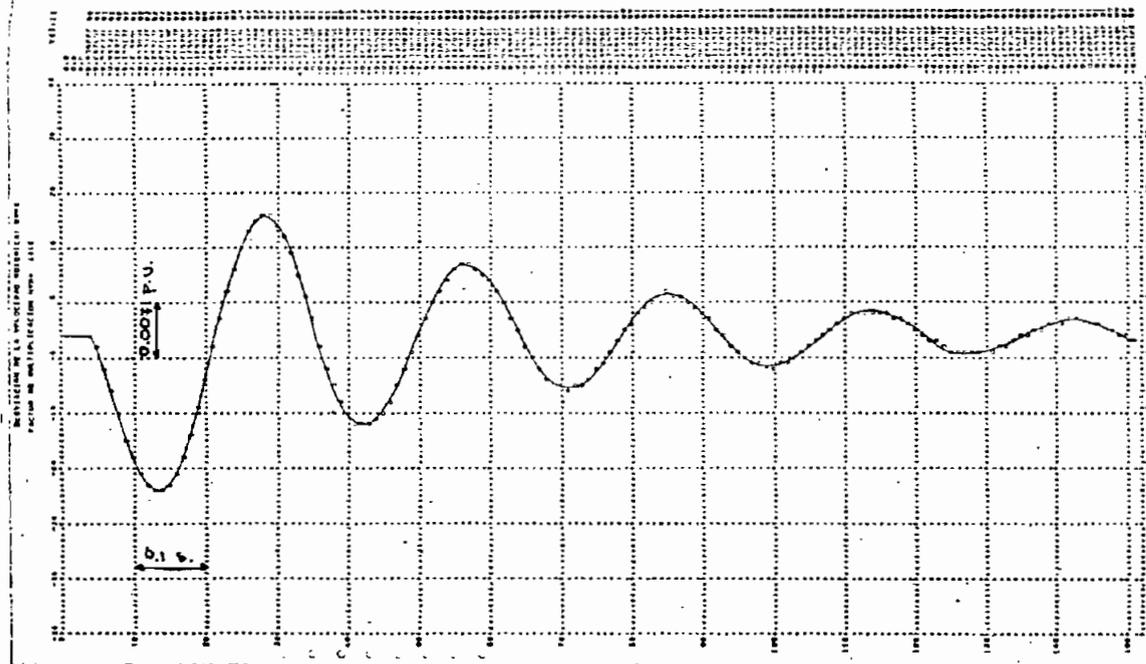
1.- Modelo no saturado



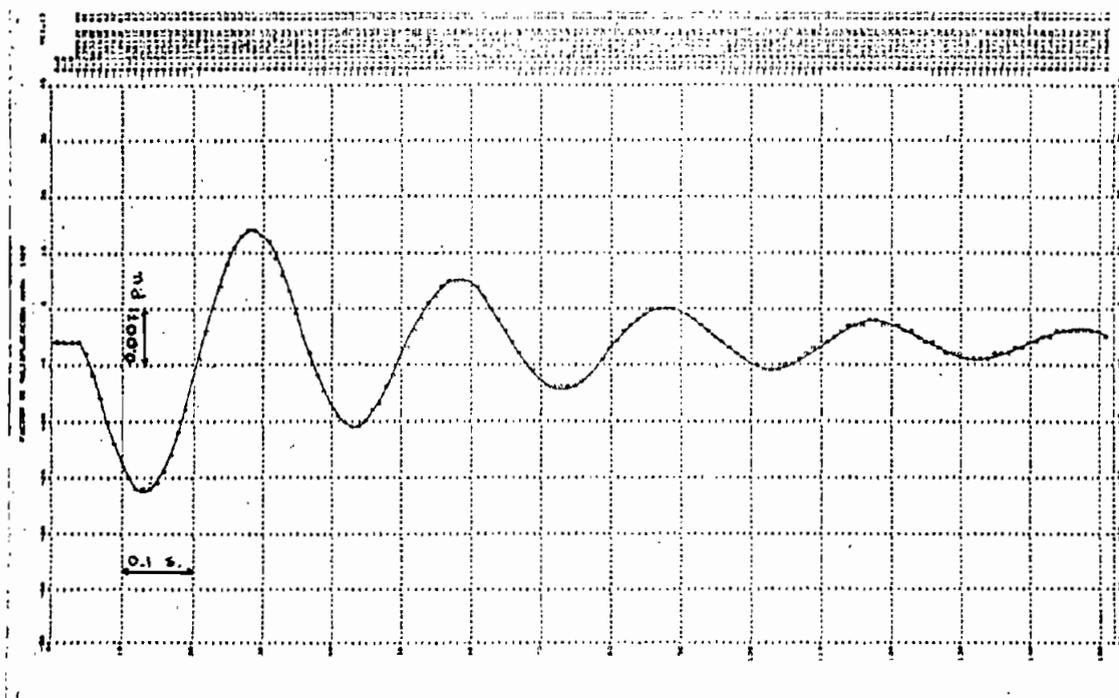
2.- Modelo saturado

Figura 5.3-3 ANGULO DE POTENCIA

(1)	t(seg)	(2)	t(seg)	
0.67497	0.	0.67497	0.	En el estado estable.
-0.11766	0.19	-0.064	0.20	Máximo negativo.
0.20119	1.48	0.23060	1.48	En camino al nuevo punto de funcionamiento.



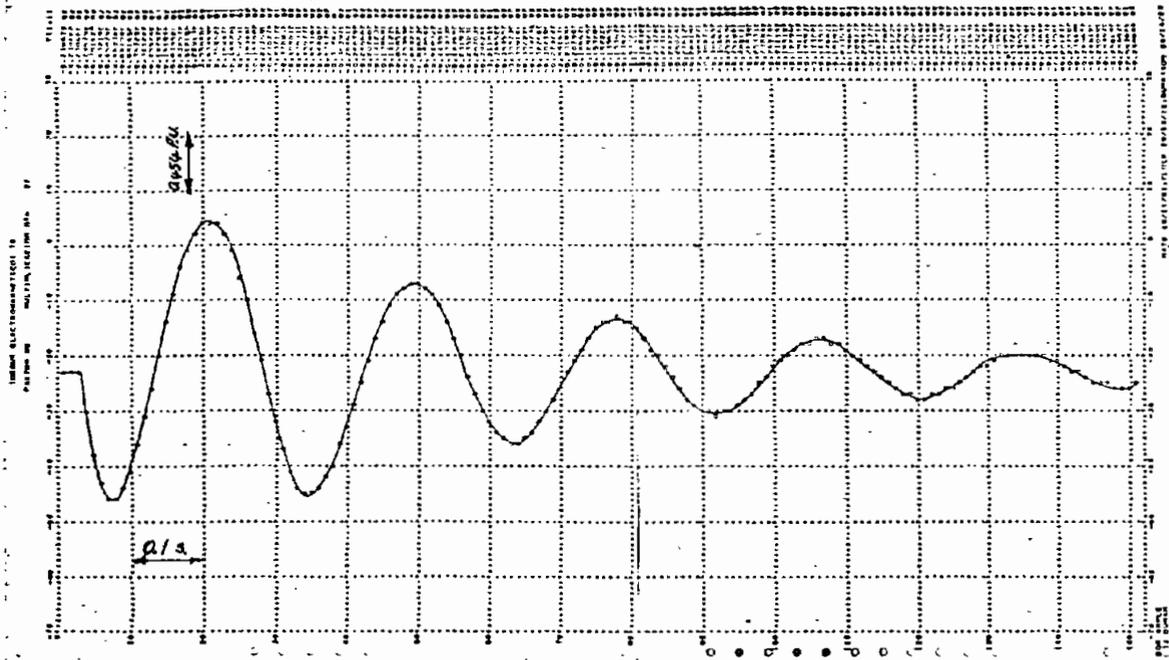
1.- Modelo no saturado



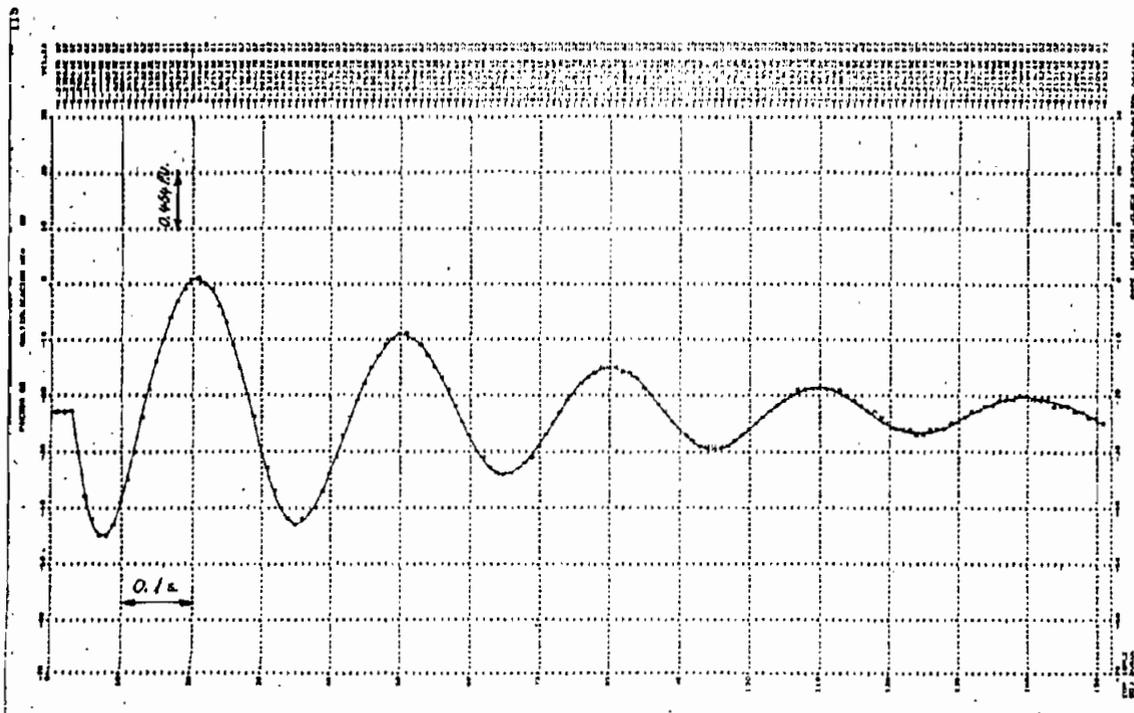
2.- Modelo saturado

Figura 5.3-4 VELOCIDAD ROTORICA

(1)	t(seg)	(2)	t(seg)	
1.	0.	1.	0.	En el estado estable.
0.97991	0.11	0.9814	0.11	Mínimo positivo.
1.01554	0.26	1.0141	0.27	Máximo positivo.
0.99961	1.48	1.00104	1.48	En camino a la velocidad sincrónica.



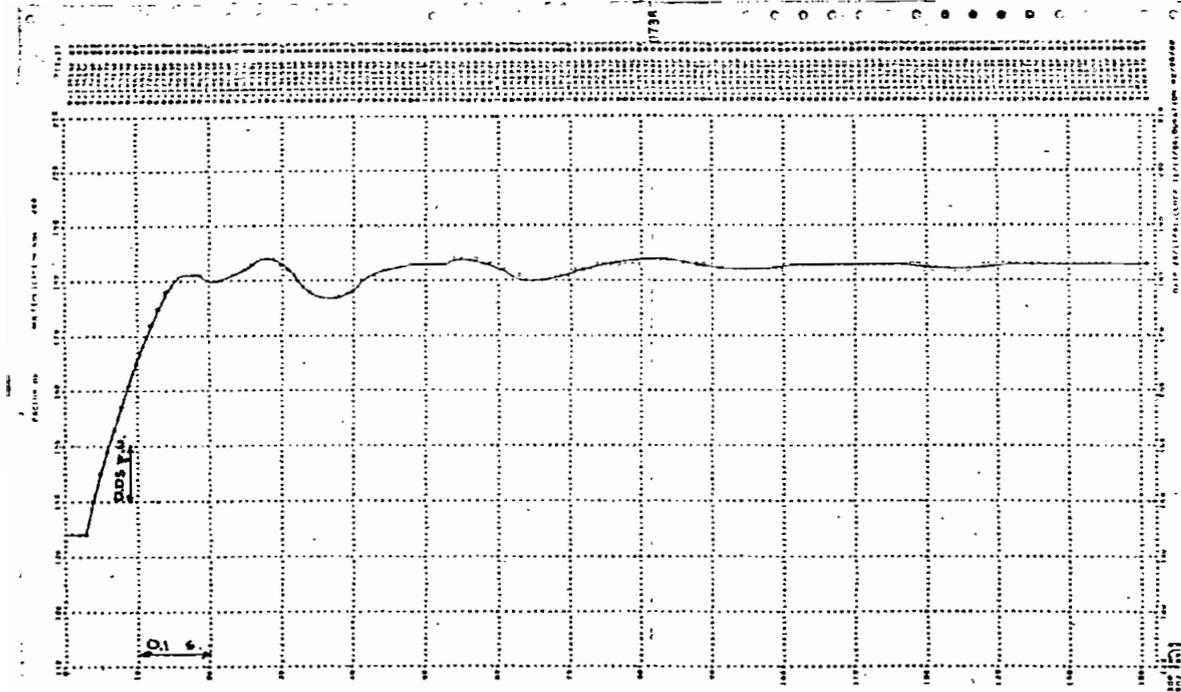
1.- Modelo no saturado



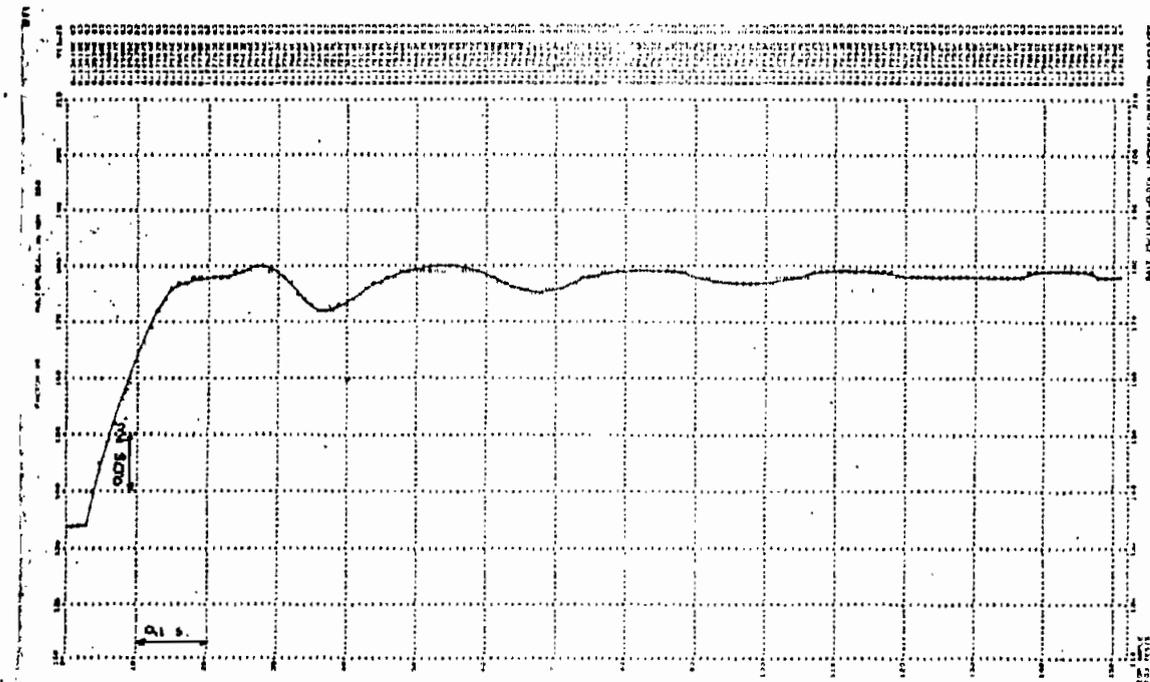
2.- Modelo saturado

Figura 5.3-5 TORQUE ELECTROMAGNETICO

(1)	t(seg)	(2)	t(seg)	
-1.0485	0.	-1.0485	0.	En el estado estable.
-2.09264	0.06	-2.04295	0.05	Máximo negativo.
0.19977	0.19	0.04585	0.19	Máximo positivo.
-1.15745	1.48	-1.11505	1.48	Cerca al nuevo punto de funcionamiento.



1.- Modelo no saturado



2.- Modelo saturado

Figura 5.3-6 CONCATENACIONES DE FLUJO MUTUO EN EL EJE DIRECTO

(1)	t(seg)	(2)	t(seg)	
0.67075	0.	0.67075	0.	En el estado estable.
0.92000	0.26	0.8988	0.26	Máximo positivo.
0.91285	1.48	0.89085	1.48	Nuevo punto de funcionamiento.

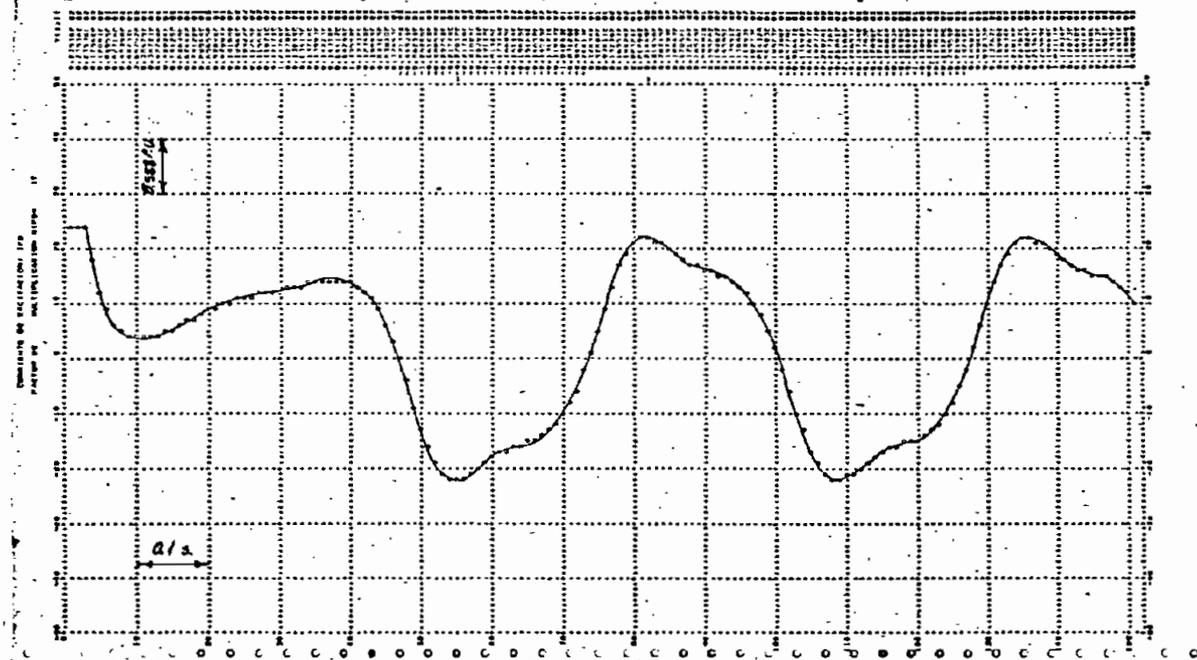
Esta perturbación provoca alteraciones en todas las variables del sistema electromecánico, las cuales oscilan en un tiempo considerable hasta estabilizarse en el nuevo punto de funcionamiento, impuesto por el incremento brusco de la excitación.

En el modelo saturado las corrientes de fase toman valores menores, llegando más pronto a alcanzar su valor final, contrariamente a lo que sucede en el (1) que alcanzan valores mayores y hasta estabilizarse pasa más tiempo. La corriente de excitación es mayor en el modelo (2), así como también el nuevo ángulo de potencia.

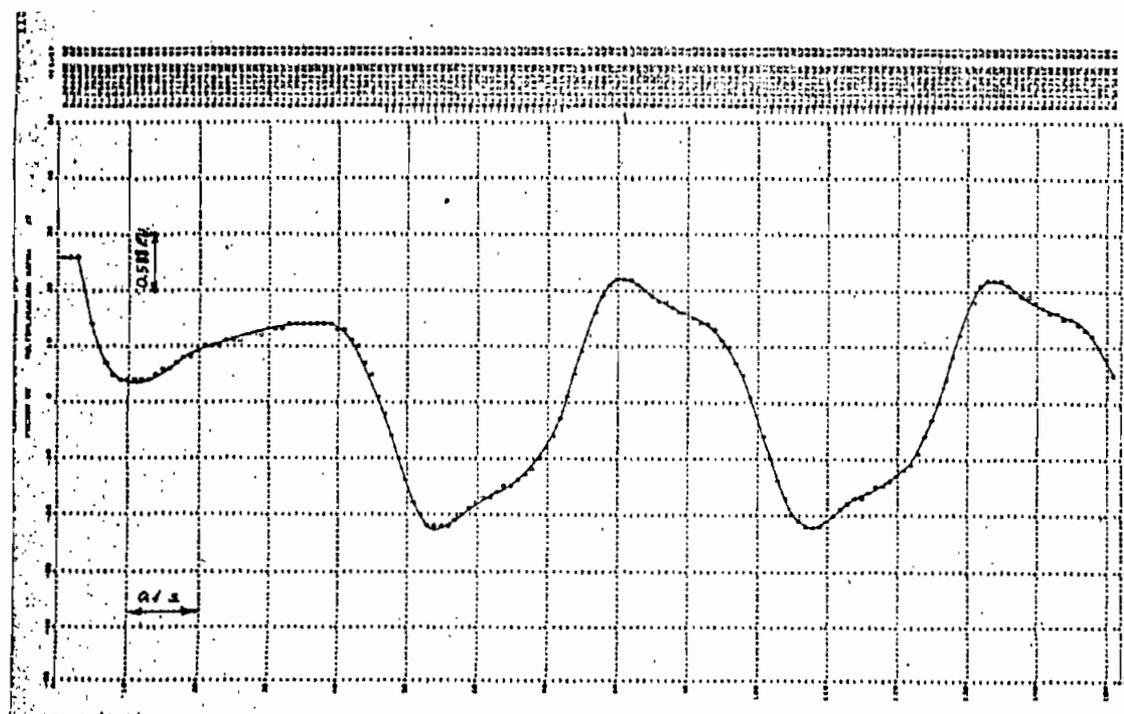
La velocidad rotórica alcanza más rápido el sincronismo en el modelo no saturado, el torque electromagnético se amortigua más rápido en este modelo siguiendo el comportamiento de las corrientes. El torque electromagnético vuelve a su punto de partida.

5.4. PERDIDA DE LA EXCITACION POR CORTOCIRCUITO

Simulada de igual forma para los dos modelos planteados, se comparan las cantidades en p.u. El tiempo cero es marcado por el inicio de la perturbación para los valores listados.



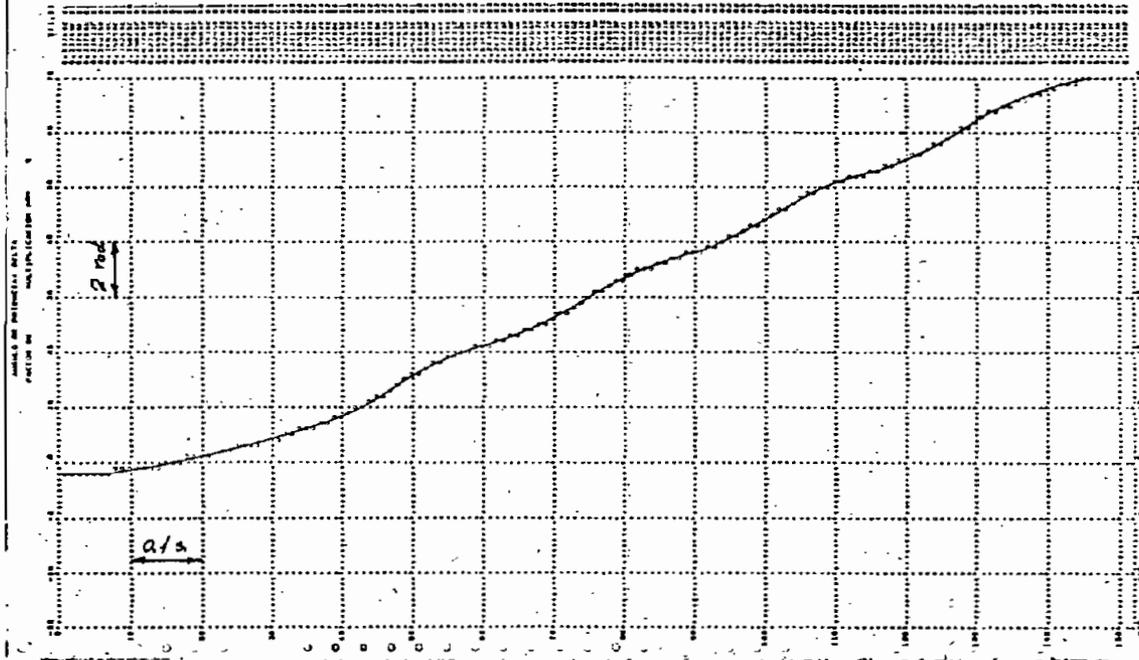
1.- Modelo no saturado



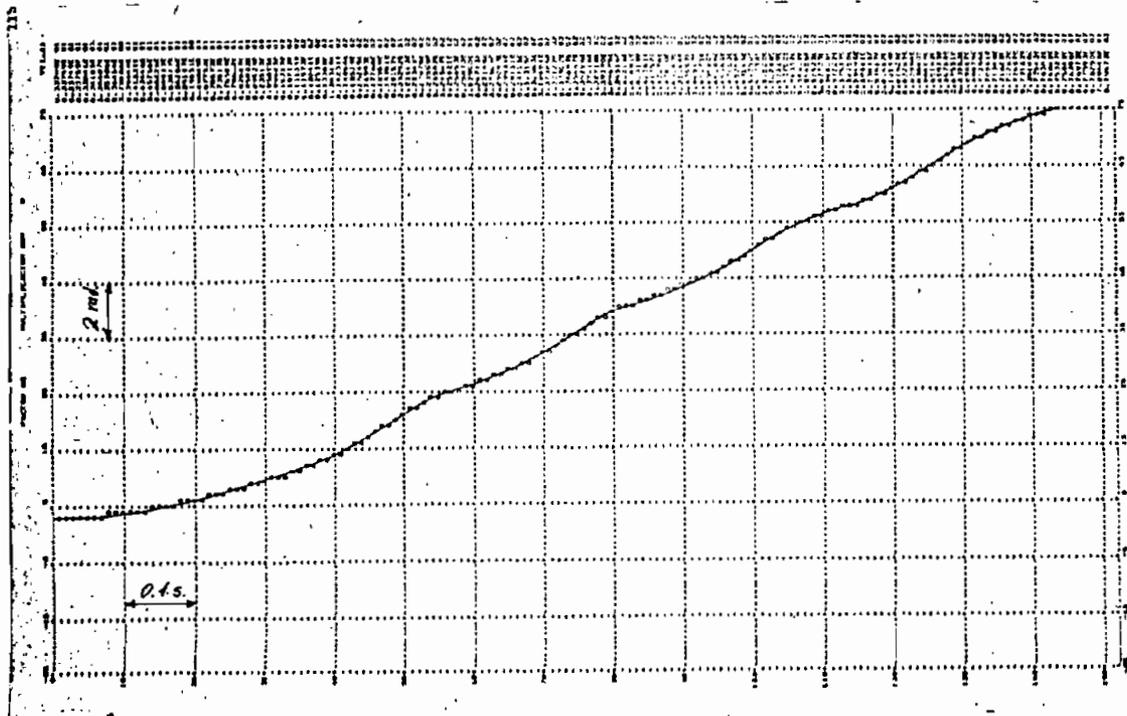
2.- Modelo saturado

Figura 5.4-2 CORRIENTE DE EXCITACION

(1)	t	(2)	t	
1.3845	0.	1.5577	0.	En el estado estable.
-1.29635	0.53	-1.316	0.52	Oscila continuamente
1.28524	0.80	1.31018	0.79	entre estos valores.



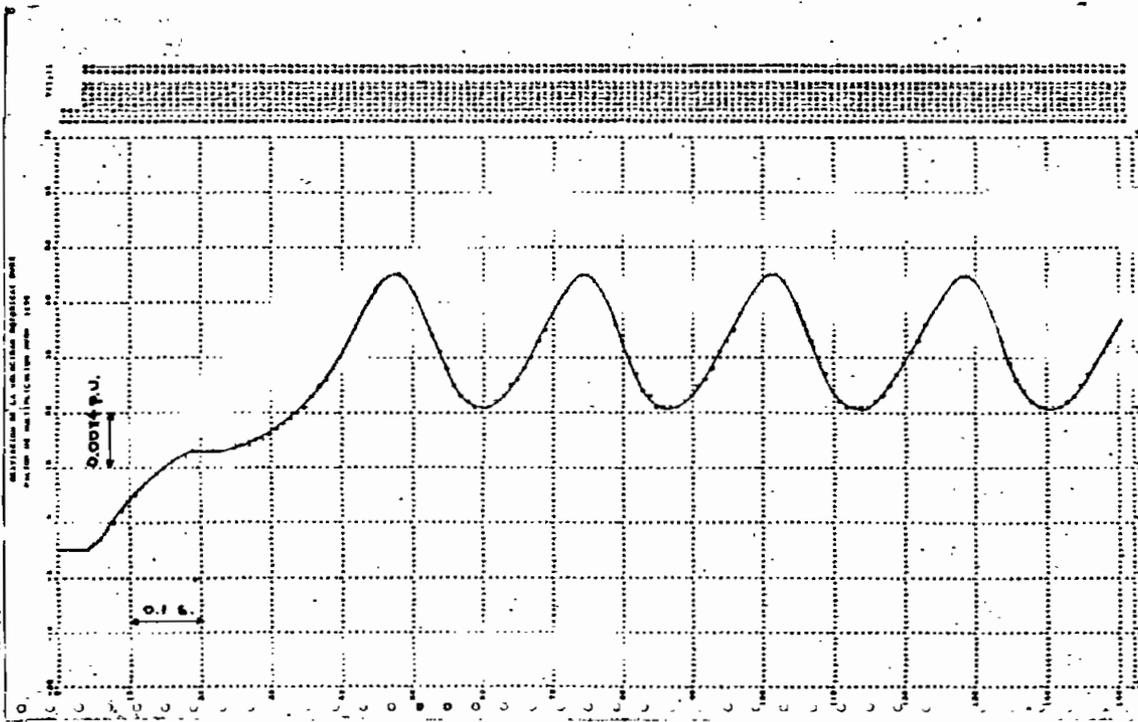
1.- Modelo no saturado



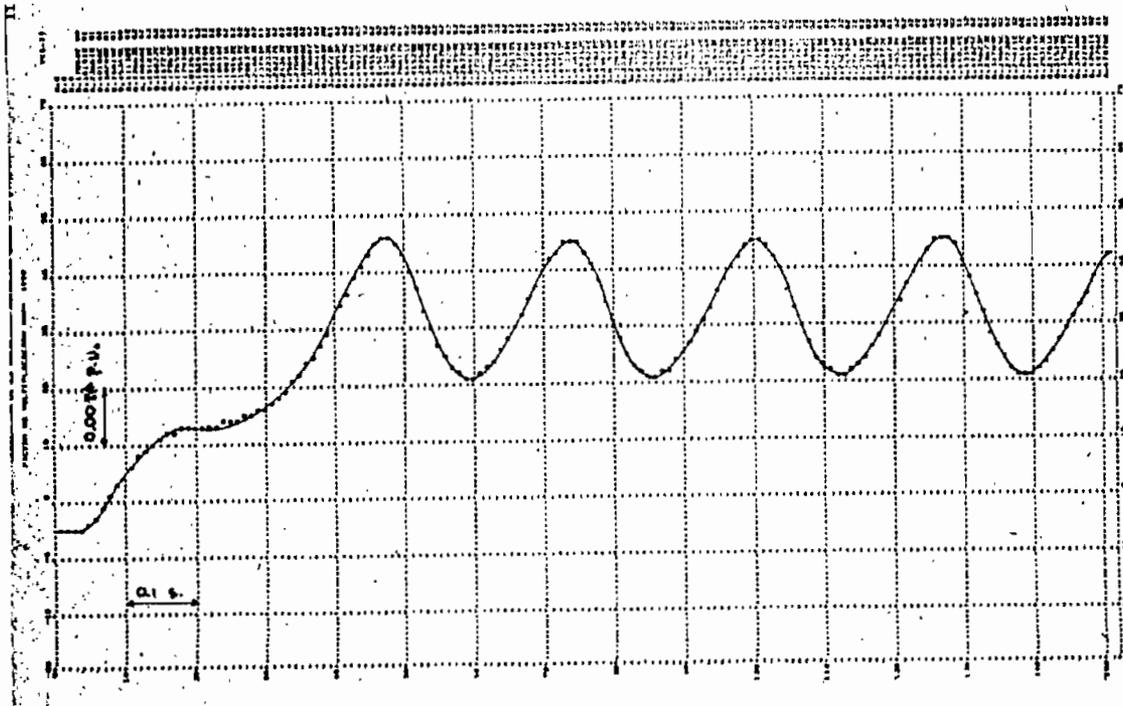
2.- Modelo saturado

Figura 5.4-3 ANGULO DE POTENCIA

(1)	t	(2)	t	En el estado estable. Sube continuamente.
0.675	0.	0.675	0.	
15.6672	1.48	15.9346	1.48	



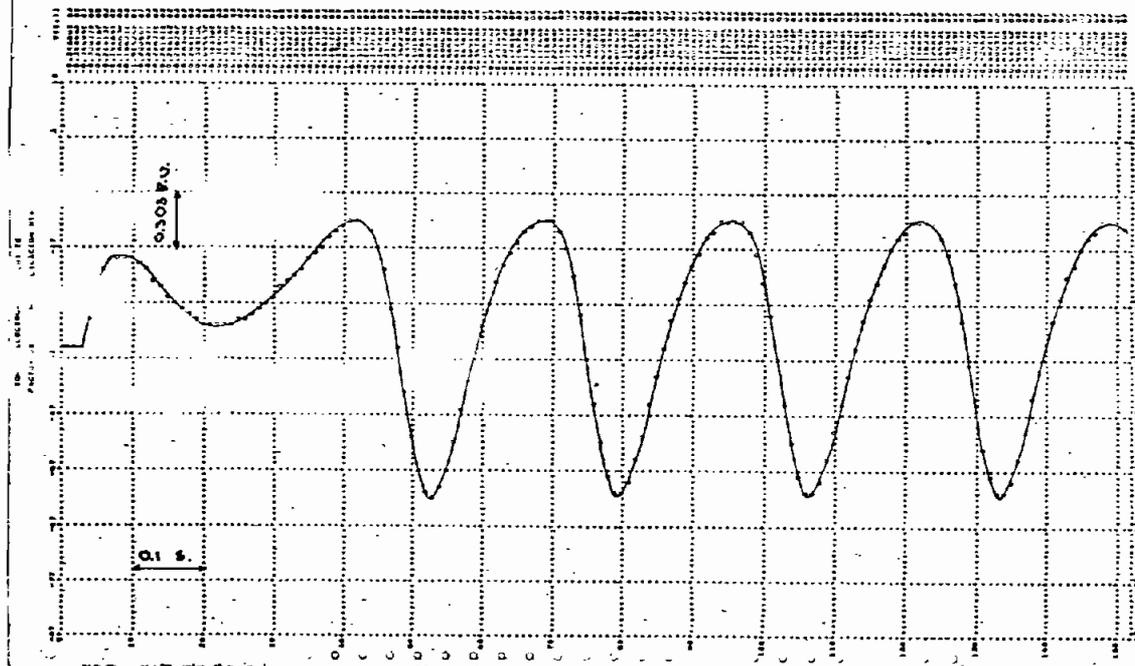
1.- Modelo no saturado



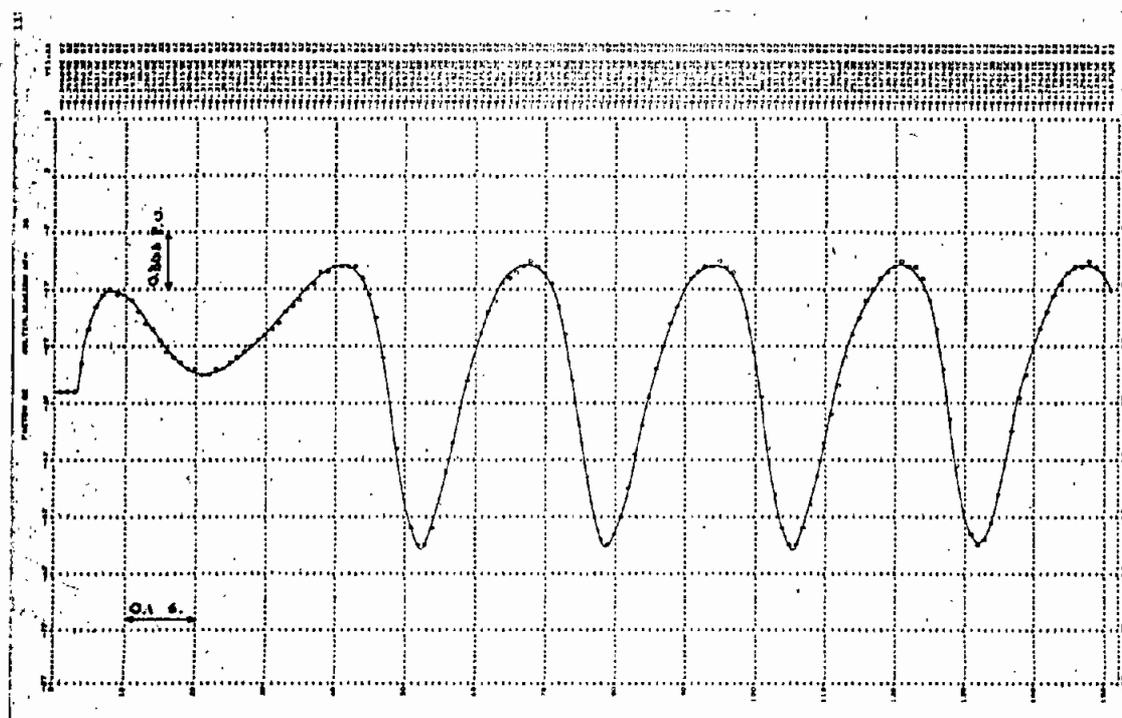
2.- Modelo saturado

Figura 5.4-4 VELOCIDAD ROTORICA

(1)	t	(2)	t	
1.	0.	1.	0.	En el estado estable
1.04223	0.46	1.04251	0.46	Oscila continuamente entre
1.02166	0.58	1.02213		estos valores



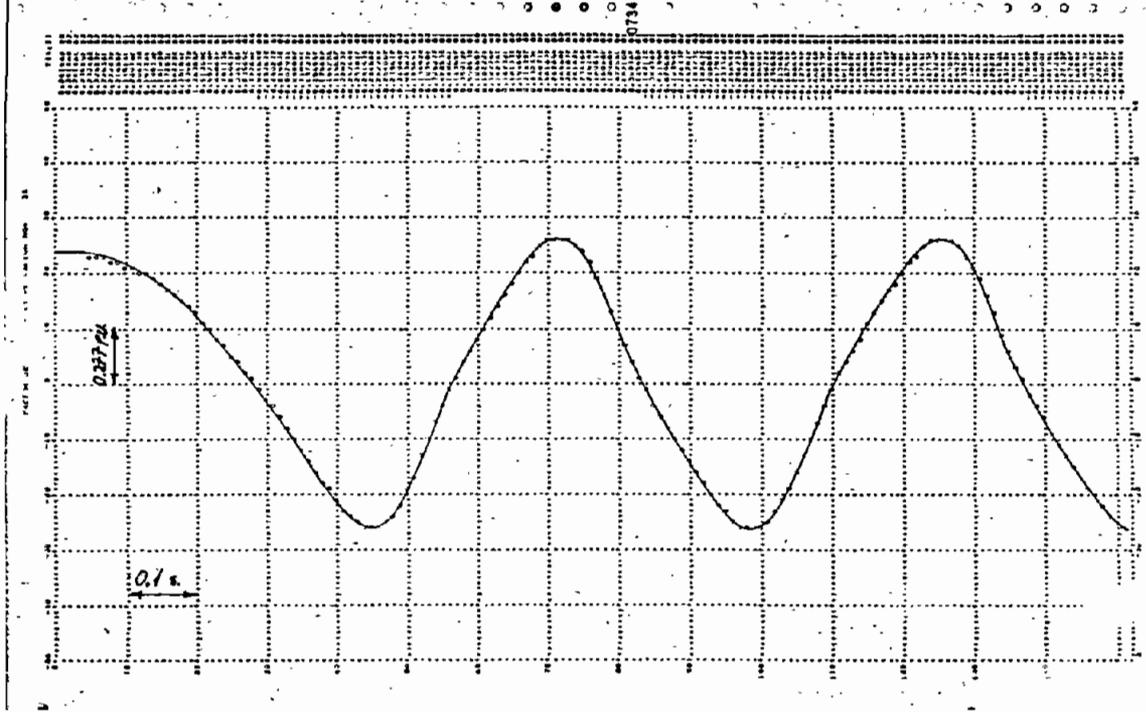
1.- Modelo no saturado



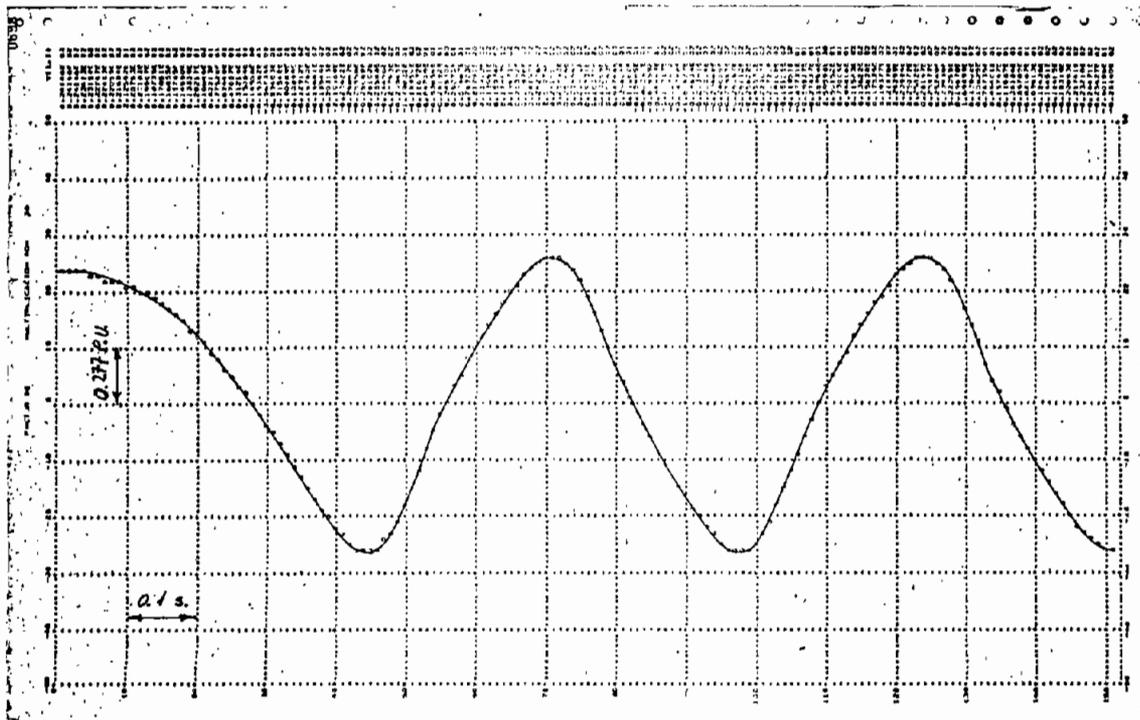
2.- Modelo saturado

Figura 5.4-5 TORQUE ELECTROMAGNETICO

(1)	t	(2)	t	En el estado estable Oscila continuamente entre estos valores.
-1.0485	0.	-1.0485	0.	
-0.37245	0.40	-0.37779	0.40	
-1.86809	0.51	-1.87527	0.51	



1.- Modelo no saturado



2.- Modelo saturado

Figura 5.4-6 CONCATENACIONES DE FLUJO MUTUO EN EL EJE DIRECTO

(1)	t	(2)	t	
0.6707	0.	0.6707	0.	En el estado estable.
-0.73489	0.43	-0.72506	0.42	Oscila continuamente
0.7350	0.70	0.72653	0.69	entre estos valores.

El cortocircuito del campo provoca oscilaciones continuas de todas las variables del sistema electromecánico. Se presentan diferencias entre el modelo no saturado y el saturado, apreciándose la influencia de la saturación magnética del hierro.

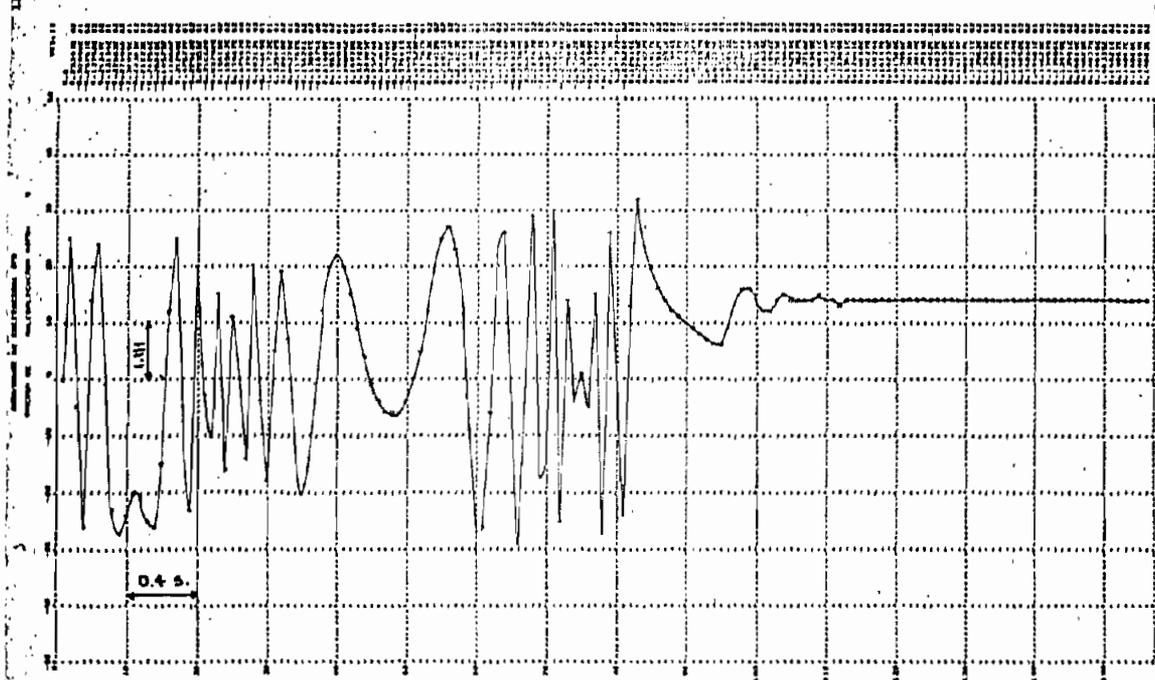
Las corrientes son mayores en el modelo (2), aún perdiendo la excitación, la no linealidad del hierro se manifiesta en todas las variables, haciendo que oscilen entre valores mayores.

El comportamiento de la velocidad rotórica y del torque electromagnético es bastante similar en los dos modelos, las pequeñas diferencias existentes se deben a la consideración hecha.

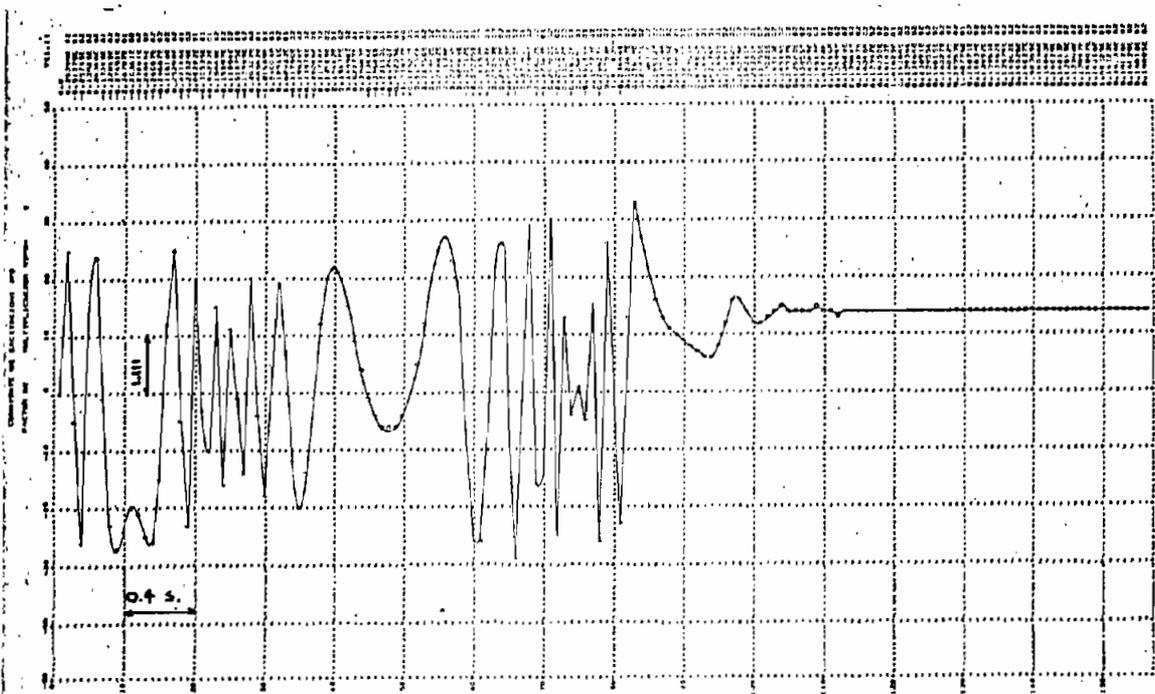
Las concatenaciones de flujo, de igual manera, mantienen diferencias en los dos modelos. En esta perturbación, el comportamiento de todas las variables se caracteriza por las oscilaciones continuas, muy parecidas en ambos casos.

5.5. ARRANQUE DEL MOTOR SINCRONICO

Al tiempo cero la máquina no se halla funcionando, todas las variables tienen como punto de partida 0. p.u.. El arranque, para los modelos no saturado y saturado se lo hace conectando el mismo voltaje terminal.



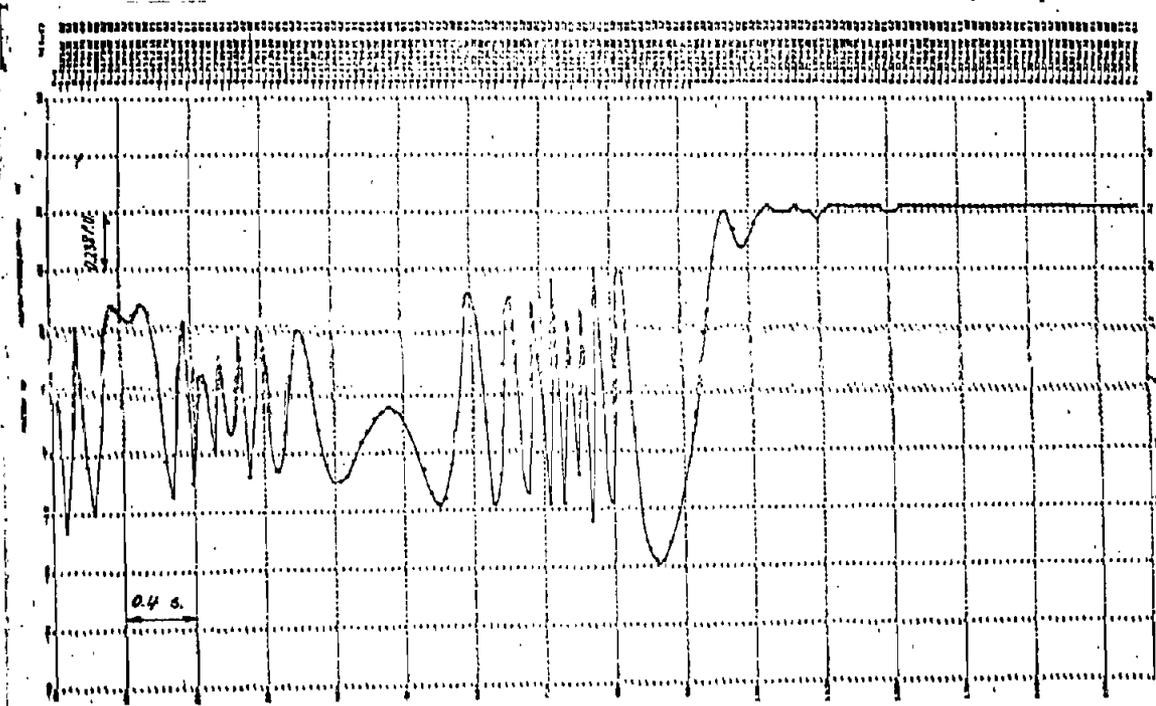
1.- Modelo no saturado



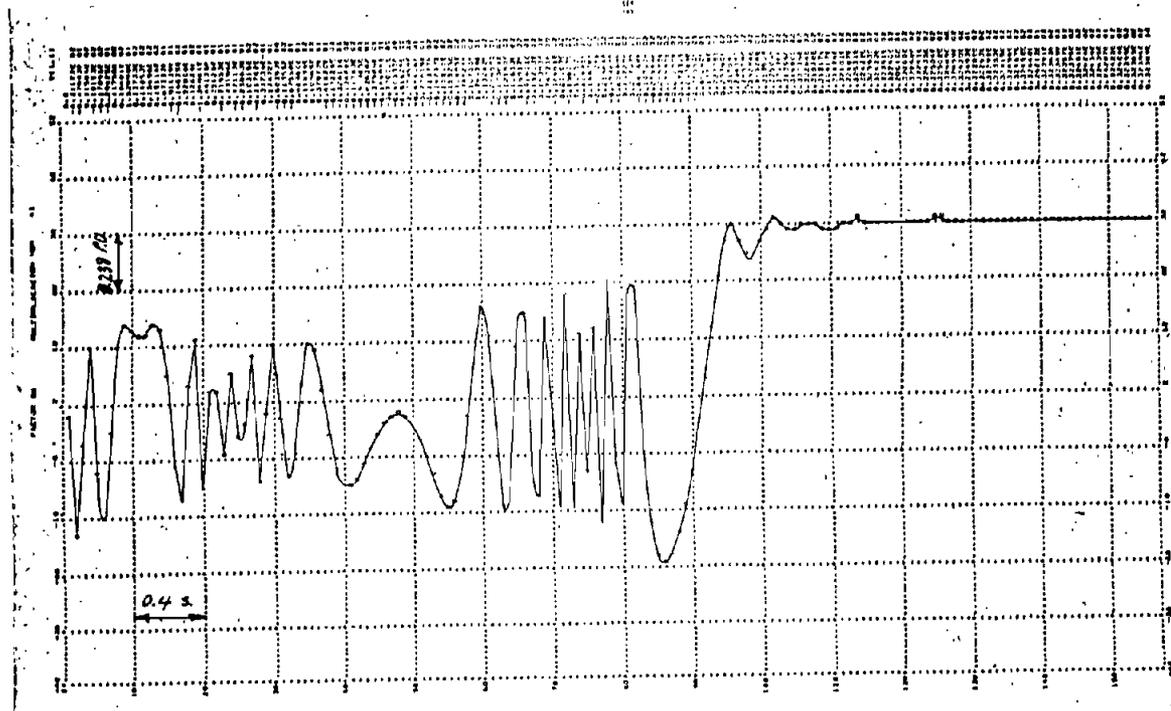
2.- Modelo saturado

Figura 5.5-1 CORRIENTE DE EXCITACION

Llega a su valor final, estable, después de oscilar idénticamente en ambos modelos. Hay muy poca diferencia entre los dos casos. El valor de estado estable al que alcanzan es de 0.-1556.



1. Modelo no saturado

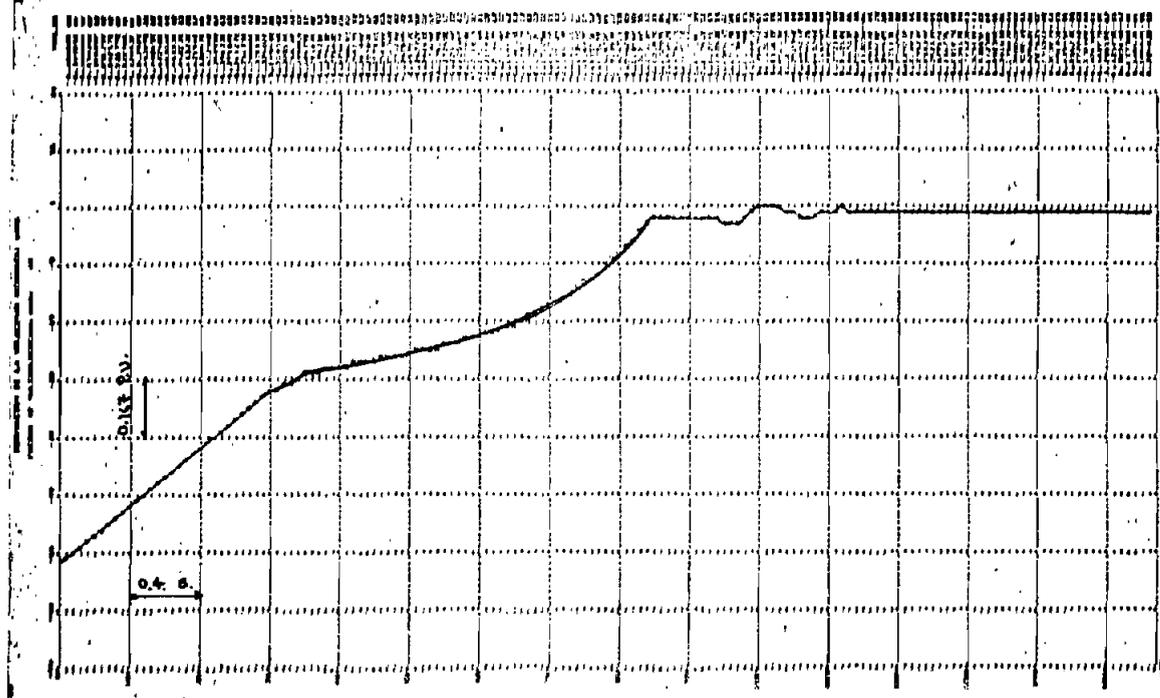


2. Modelo saturado

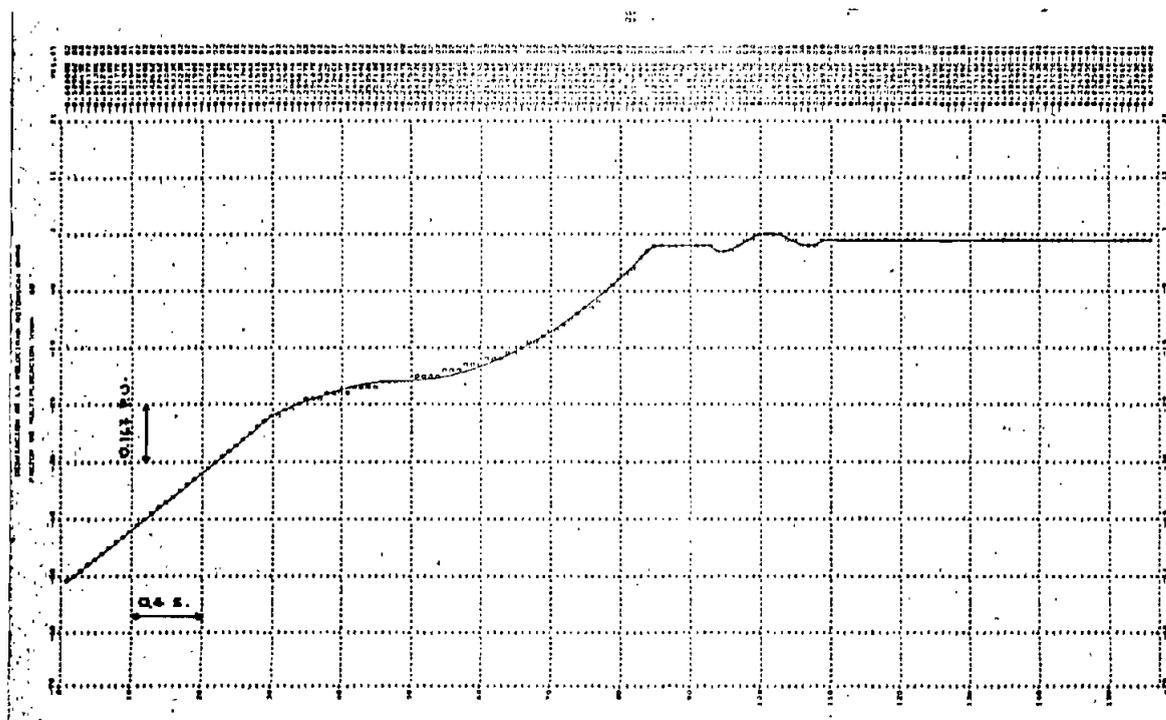
Figura 5.5.2. CONCATENACIONES DE FLUJO MUTUO EN EL EJE DIRECTO

0.80688	5.04	0.79273	5.04
0.80473	6.24	0.78998	6.24

Al término del arranque.



1.- Modelo no saturado

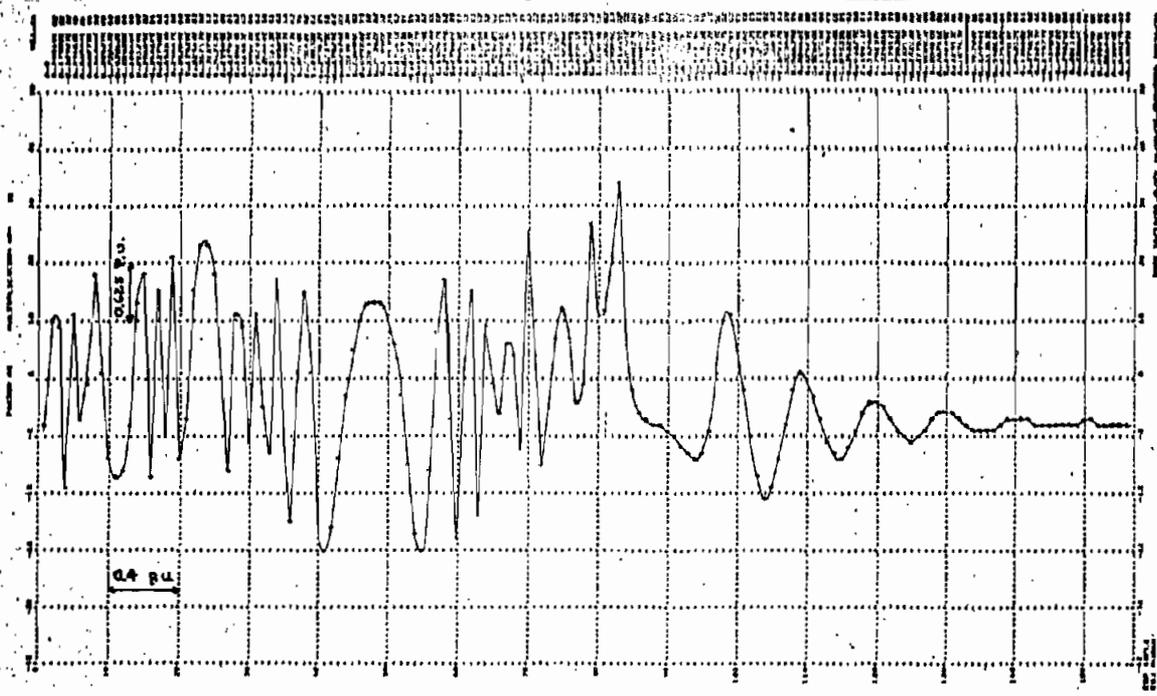


2.- Modelo saturado

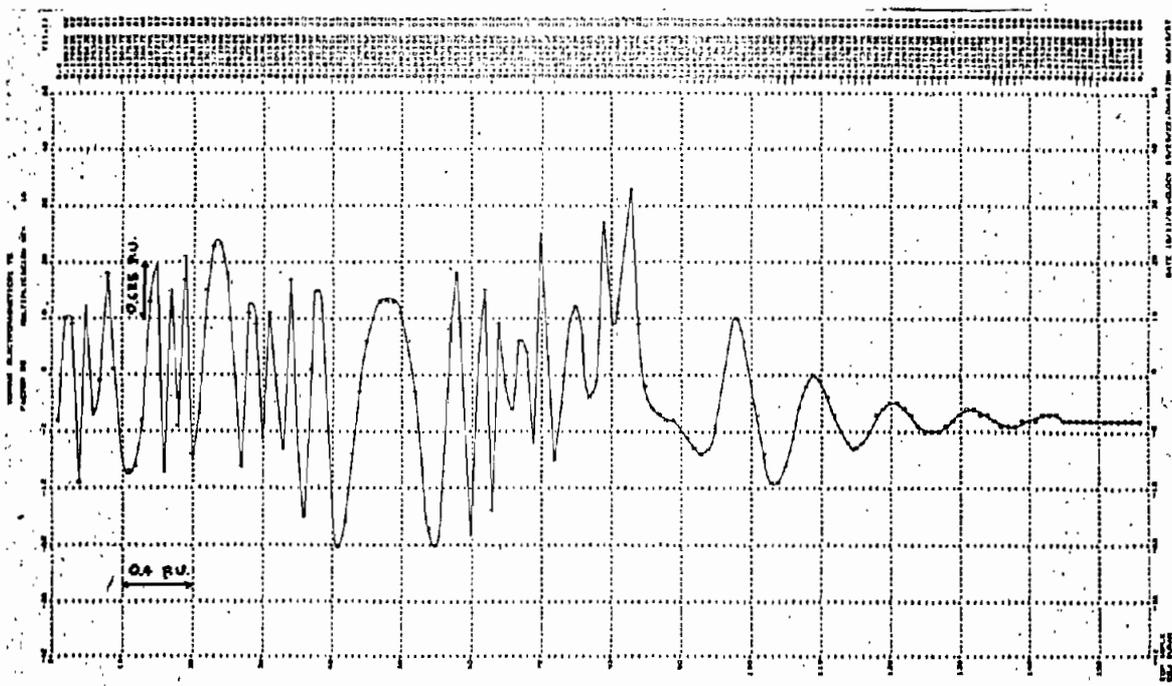
Figura 5.5-3 VELOCIDAD ROTORICA

La forma de onda en los primeros segundos es idéntica. A los 3.5 segundos, se puede observar diferencias:

(1)	t(seg)	(2)	t(seg)	V_f	
0.97949	3.72	0.97671	3.72	0.	Sin excitación
0.96997	3.84	0.97064	3.84	0.02654	Con excitación
1.01877	4.08	1.01606	4.08	0.02654	Con excitación
1.00007	6.24	1.00 5	6.24	0.02654	Al término del arranque.



1. Modelo no saturado



2. Modelo saturado

Figura 5.5-4 TORQUE ELECTROMAGNETICO

0.06638	5.6	0.00482	5.6	A diferentes tiempos
0.03374	6.0	-0.00732	6.0	
0.00993	6.16	0.02821	6.16	

Durante el arranque se observan diferencias entre el modelo no saturado y el saturado, estas se atribuyen únicamente al efecto de la no linealidad del hierro. Todas las variables difieren en valores pequeños, debido a que la carga impuesta al eje es bastante pequeña.

Es de notarse que el sincronismo en ambos casos se alcanza en un tiempo aproximado de 4.36 segundos, cuando el voltaje de excitación es conectado.

C A P I T U L O V ICONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelo matemático desarrollado para la simulación digital de la máquina sincrónica, basado en las concatenaciones de flujo como variables de estado presenta una gran facilidad para introducir no linealidades. Y en un menor tiempo de computación respecto a otros métodos. En este trabajo, específicamente, se ha implementado la no linealidad debida a la saturación magnética del hierro, obteniéndose resultados lógicos que están en concordancia con el real funcionamiento.

Se demuestra que en las máquinas rotativas y especialmente - en la máquina sincrónica, del hierro magnético y el entrehierro presente, éste último es predominante, aún en el eje directo. Es así como en el eje en cuadratura se considera que no está presente la saturación.

De los resultados de las cinco aplicaciones desarrolladas, se concluye que considerar el comportamiento lineal del hierro magnético es una buena aproximación. Teniendo como limitante el voltaje terminal, el mismo que si está muy por encima del valor nominal llevará a tener resultados alejados del funcionamiento real.

Para tener valores más exactos es recomendable considerar el efecto de la saturación sobre el codo de la curva de saturación.

Haciendo muestreos de condiciones de operación y parámetros de la máquina sincrónica en el computador digital pueden ser desarrollados componentes mecánicos y eléctricos para el diseño y construcción con mayor exactitud.

Se recomienda utilizar el programa digital implementado en este trabajo, para continuar con la simulación de la máquina sincrónica vista como un componente dinámico de un sistema de potencia, para lo cual es necesario desarrollar modelos matemáticos de los reguladores de velocidad y voltaje; y, de los sistemas de excitación.

REC 030303

```
TTTT NN NN 000000 000000 55555555
TTTT NNN NN 00000000 00000000 55555555
TT NNNN NN 00 00 00 00 55
TT NNNNN NN 00 00 00 00 55
TT NN NNNNN 00 00 00 00 5555555
TT NN NNNN 00 00 00 00 55555555
TT NN NNN 00 00 00 00 55
TT NN NN 00000000 00000000 55555555
TT NN NN 000000 000000 555555
```

```
MM MM SSSSSS YY YY NN NN CCCCCC
MMM MMM SSSSSSSS YY YY NNN NN CCCCCCCC
MMMMMMMM SS SS YYY YY NNNN NN CC CC
MMMMMMMM SS YYYYYY NNNNN NN CC
MM MM MM SSSSSSSS YYY NN NNNNN CC
MM MM SSSSSSS YY NN NNNN CC
MM MM SS YY NN NNN CC CC
MM MM SSSSSSSS YY NN NN CCCCCCCC
MM MM SSSSSS YY NN NN CCCCCC
```

EJECUCION FECHA: 27/11/81 HORA:

EXEC PROC=SSFLE
 OPTION LINK
 ACTION CANCEL,NOMAP,F2
 EXEC FFORTAN

2FLE1
 2FLE2
 2FLE6

OS FORTRAN IV 360N-FO-479 3-8

OPTIONS IN EFFECT

LOAD =4
 DECK NO
 LIST YES
 LISTX NO
 EBCDIC

OS FORTRAN IV 360N-FO-479 3-8 MAINPGM DATE 27/11/81 TIME 09.34.09 PAGE 00

```
0001 COMPLEX IA,VA,EA,Z
0002 REAL KVA,IA,X,IA,Y,IQ,ID,IFD
0003 INTEGER RUNGE
0004 DIMENSION F(7),V(7),CIA(5),AIQM(5,550),AIDM(5,550),AIFDM(5,550),
.DELTAM(5,550),DVRSM(5,550),TMM(5,550),PSIQM(5,550),PSIDM(5,550),
.AINAM(5,550)
0005 COMMON IA,VA,EA,KVA,IA,X,IQ,ID,IFD,VF,VAEB,P(20),RS,RKQ,RKD,RFD,
.XLS,XAQ,XAD,XLKQ,XLKD,XLFD,PSIQ,PSID,PSIKQ,PSIKD,PSIFD,TM,PHI,
.DELTA,XMD,XCAD,PSIMO,I,IDIST
0006 8 ← COMMON/PSATZ PSIMDC, P1,P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8,ISAT
0007 READ(1,10) RS,RKQ,RKD,RFD,XLS,XAQ,XAD,XLKQ,XLKD,XLFD,HMAQ,VAERI
0008 WRITE(3,11) RS,RKQ,RKD,RFD,XLS,XAQ,XAD,XLKQ,XLKD,XLFD,HMAQ
0009 READ(1,5) PSIMDC,P1,P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8
0010 20 HEAD(1,3,END=30) VAEB,VA,PHI,KVA,I,TMAX,H,IFREQ,IFPLOT,IDIST,TINC,
.VF INC,TPERT,ISAT
0011 READ(1,4) NSA,NIQ,NID,NIFD,NSQ,NSD,NVR,ND,NT,NAQ,NQO,NDO,NFO,NW,
.NADO,NTD,NP,NPSQ,NPSD,AEI
0012 6 ↓ WRITE(3,22) I,KVA,VA,PHI,VAEB,H,ISAT
CALCULAR CONDICIONES INICIALES
```

```

016 V(1) = PSIQ
017 V(2) = PSID
018 V(3) = PSIKQ
019 V(4) = PSIKD
020 V(5) = PSIFD
021 V(6) = VAERI
022 V(7) = DELTA
023 CIA(1) = IQ
024 CIA(2) = ID
025 CIA(3) = IAX
026 CIA(4) = TM
027 CIA(5) = IFD
028 ICOM = 0
029 GO TO 46
C
030 ARRANQUE
031 DO 1 I=1,7
032 1 V(I) = 0.0
033 DO 2 I=1,5
034 2 CIA(I) = 0.0
035 DXI = 0.0
036 PSIND = 0.0
037 TM = 0.01
038 VF = 0.0
039 ICOM = 1
040 WRITE(3,34) IDIST
041 34 FORMAT(4(/),56X,'ARRANQUE'//56X, IDIST= ID, I2)
042 46 T = 0.0
043 ICDUNT = 0
044 TEC = 0.0
045 KD = 1
046 IF(IDIST.EQ.3) GO TO 24
047 GO TO 25
048 24 WRITE(3,26)
049 GO TO 21
C
050 25 WRITE(3,27)
051 ASIGNAR VALORES A MATRICES DE GRAFICACION
052 21 CONTINUE
053 AIQM(1,KD) = CIA(1)*NIQ
054 AIDM(1,KD) = CIA(2)*NID
055 AIMAM(1,KD) = CIA(3)*NSA
056 AIFDM(1,KD) = CIA(5)*NIFD
057 PSIQM(1,KD) = V(1)*NSQ
058 PSIDM(1,KD) = V(2)*NSD
059 DELTAM(1,KD) = V(7)*ND
060 TMM(1,KD) = CIA(4)*NT
061 DVRS = V(6)-VAERI
062 DVRSM(1,KD) = DVRS*NVR
063 KD = KD+1
C
064 EVALUAR LAS DERIVADAS METODO DE RUNGE KUTTA
065 7 K = RUNGE(7,V,F,T,H)
066 IF(K.NE.1) GO TO 8
067 VAN = CABS(VA)
068 VQ = VAN*COS(V(7))
069 VD = VAN*SIN(V(7))
070 F(1) = VAEB*VQ+P(1)*V(1)-VAEB*V(2)*V(6)+P(2)*V(3)
071 F(2) = VAEB*VD+VAEB*V(1)*V(6)+P(3)*V(2)+VAEB*PSIND*P(10)
072 F(3) = P(4)*V(1)+P(5)*V(3)

```

0073
0074
0075
0076

```
      / (26*HMA0)  
      F(7) = VAEB*(V(6)-1.)  
6     CALL SATURA(PSIMD,XMD,XAD,DXI)  
      PSIMD = XMD*((V(2)/XLS)+(V(4)/XLKD)+(V(5)/XLFD))-(XMD/XAD)*DXI  
      GO TO 7  
C  
      CALCULAR LAS CORRIENTES IQ ID IFD Y EL TORQUE  
8     CIA(1) = P(8)*V(1)+P(9)*V(3)  
      CIA(2) = (V(2)-PSIMD)/XLS  
      TETA = V(7) +VAEB*T+TEC  
      CIA(3) = CIA(1)*COS(TETA)+CIA(2)*SIN(TETA)  
      CIA(4) = V(2)*CIA(1)-V(1)*CIA(2)  
      CIA(5)=(V(5)-PSIMD)/XLFD  
      IF (IDIST.NE.6) GO TO 47  
      IF(V(6).LT.0.9) GO TO 47  
      VF = 0.02654  
      TM = 0.01  
47    CONTINUE  
      IF(ICOM.GT.0) GO TO 13  
      IF(T.GE.TPERT) GO TO 14  
      GO TO 13
```

0091

C
C
C

```
      DISTURBIOS  
      1 2 3 4 5 6  
14    GO TO(15,16,13,17,18,13),IDIST  
      PROVOCAR CORTOCIRCUITO TRIFASICO  
15    VA = CMPLX(0.,0.)  
      ICOM = 1
```

0092
0093
0094
0095
0096

C

```
      TEC = AE1  
      *WRITE(3,29)TPERT,IDIST,AE1  
      GO TO 13  
      PROVOCAR INCREMENTO BRUSCO DEL TORQUE  
16    TM = TM+TINC  
      ICOM = 1  
      TEC = AE1  
      WRITE(3,31) TM,TINC,TPERT,IDIST,AE1  
      GO TO 13
```

0097
0098
0099
0100
0101

C

```
      PROVOCAR INCREMENTO BRUSCO DEL VOLTAJE DE EXCITACION  
17    VF = VF+VFINC  
      ICOM = 1  
      TEC = AE1  
      WRITE(3,32) VF,VFINC,TPERT,IDIST,AE1  
      GO TO 13
```

0102
0103
0104
0105
0106

C

```
      PROVOCAR PERDIDA DE EXCITACION POR CIRCUITO ABIERTO  
18    VF = -P(15)*XAD*((VD+V(6)*V(1))/XLS-V(2)*P(13)-V(4)*P(14)+  
      .PSIMD*(P(13)+P(14))) + VF  
      ICOM = 1  
      TEC = AE1  
      WRITE(3,33) VF,TPERT,IDIST,AE1
```

0108
0109
0110
0111
0112

C

```
13    IF(T.LE.TMAX) GO TO 19  
      KD = KD/NP  
      GRAFICAR VARIABLES DE SALIDA  
      IF(IFPLOT.NE.1) GO TO 20  
      WRITE(3,35) NIQ  
      CALL PLOT(AIQM,1,KD,NQQ)  
      WRITE(3,36) NID  
      CALL PLOT(AIDM,1,KD,NDD)  
      WRITE(3,37) NSA  
      CALL PLOT(AIMAM,1,KD,NAQ)  
      WRITE(3,38) NIFD  
      CALL PLOT(AIFDM,1,KD,NFO)  
      WRITE(3,39) NSQ
```

0113
0114
0115
0116
0117
0118
0119
0120
0121
0122

0127
0128
0129
0130
0131
0132
0133
0134
0135
0136
0137
0138

```
CALL PLOT(DELTA,1,KD,NADO)  
WRITE(3,43) NVR  
CALL PLOT(DVRSMA,1,KD,NW)  
WRITE(3,42) NT  
CALL PLOT(TMM,1,KD,NTD)  
GO TO 20  
19 ICOUNT = ICOUNT+1  
IF(ICOUNT.NE.IFREQ) GO TO 7  
ICOUNT = 0  
GO TO 21  
10 FORMAT(8F10.5/4F10.5)  
11 FORMAT(1HC,27X,66('-'//4(27X,1('|'),66X,1('|')//),27X,1('|'),4X,
```

0139
0140
0141
0142

0143

0144
0145

0146
0147

0148

0149

0150

```
.'SIMULACION DIGITAL DE LA MAQUINA SINCRONA',19X,1('|')/2(27X,  
.1('|'),66X,1('|')//),27X,1('|'),6X,'-INTRODUCCION DEL EFECTO DE LA  
.NO LINEALIDAD DEL HIERRO',5X,1('|')/27X,1('|'),66X,  
.1('|')/27X,1('|'),6X,'-ANALISIS DINAMICO',42X,1('|')/27X,1('|'),  
.66X,1('|')/27X,1('|'),6X,'-MODELOS LINEAL Y NO LINEAL',33X,1('|')/  
.4(27X,1('|'),66X,1('|')//),28X,66('-'//),6(/),49X,'PARAMETROS DE LA  
.MAQUINA'//7X,'RS=',F10.5,5X,'RKQ=',F10.5,5X,  
. 'RKD=',F10.5,5X,'RFD=',F10.5,5X,  
. 'XLS=',F10.5,5X/6X,'XAQ=',F10.5,5X,'XAD=',F10.5,4X,'XLKQ=',F10.5,  
.4X,'XLKD=',F10.5,4X,'XLFD=',F10.5,4X,'HMAQ=',F10.5)  
3 FORMAT(F10.5,(F10.5,F10.5),2F10.5,12,2F10.5,3I2/3F10.5,12)  
4 FORMAT(13I6/6I6,F10.5)  
5 FURMAT(F10.5/8F10.5)  
22 FORMAT(4(/),39X,'DATOS PARA CALCULAR LAS CONDICIONES INICIALES'  
.//39X,'I=1: ACCION MOTORA; I=2: ACCION GENERADORA'//25X,'I=',I2/  
.25X,'KVA=',F10.5,6X,'VA=',(F10.5,F6.3),5X,'PHI=',F8.5,5X,'VAEB=',  
.F10.5/25X,'H=',F10.5,7X,'ISAT=',I2)  
23 FORMAT(4(/),51X,'CONDICIONES INICIALES'///  
.25X,'IA=',(F10.5,F10.5),18X,  
. 'IQ=',F10.5,8X,'ID=',F10.5,7X,'IFD=',F10.5/23X,'PSIQ=',F10.5,5X,  
. 'PSID=',F10.5,5X,'PSIKQ=',F10.5,5X,'PSIKD=',F10.5,5X,'PSIFD=',  
.F10.5/25X,'TM=',F10.5,4X,'DELTA=',F10.5,5X,'VAERI=',F10.5,8X,  
. 'VF=',F10.5)  
26 FORMAT(1HC,48X,'OPERACION EN ESTADO ESTABLE',6(/),2X,'T',4X,'PSIQ'  
.5X,'PSID',5X,'PSIKQ',4X,'PSIKD',4X,'PSIFD',5X,'WR',6X,'DELTA',5X,  
. 'IQ',7X,'ID',7X,'IAX',6X,'TE',7X,'IFD',5X,'PSIMD',//)  
27 FORMAT(1HC,46X,'OPERACION EN ESTADO TRANSITORIO',6(/),2X,'T',4X,  
. 'PSIQ',5X,'PSID',5X,'PSIKQ',4X,'PSIKD',4X,'PSIFD',5X,'WR',6X,'DELT  
.A',5X,'IQ',7X,'ID',7X,'IAX',6X,'TE',7X,'IFD',5X,'PSIMD',//)  
28 FORMAT(F5.3,12F9.4,F8.3)  
29 FORMAT(4(/),50X,'CORTOCIRCUITO TRIFASICO'//44X,'ANALISIS DE LAS VA  
.RIABLES DE SALIDA'//5X,'TPERT=',F10.5,5X,'IDIST=',I2,5X,  
. 'AEI=',F10.5)  
31 FORMAT(4(/),47X,'INCREMENTO BRUSCO DEL TORQUE'//44X,'ANALISIS DE  
.LAS VARIABLES DE SALIDA'//5X,'TM=',F10.5,5X,'TINC=',F10.5,5X,  
. 'TPERT=',F10.5,5X,'IDIST=',I2,5X,'AEI=',F10.5)  
32 FORMAT(4(/),40X,'INCREMENTO BRUSCO DEL VOLTAJE DE EXCITACION'//  
.44X,'ANALISIS DE LAS VARIABLES DE SALIDA'//5X,'VF=',F10.5,5X,  
. 'VFINC=',F10.5,5X,'TPERT=',F10.5,5X,'IDIST=',I2,5X,'AEI=',F10.5)  
33 FORMAT(4(/),40X,'PERDIDA DE EXCITACION POR CIRCUITO ABIERTO'//5X,  
. 'VF=',F10.5,5X,'TPERT=',F10.5,5X,'IDIST=',I2,5X,'AEI=',F10.5)  
34 FORMAT(1HC,35X,'CONDICIONES DE FLUJO DEL EJE EN CUADRATURA:PSI  
.A'//5X,
```

```

0154 37 FORMAT(1HC,44X,'COMPONENTE EFECTIVA DE IA: IAX'//44X,'FACTOR
      DE MULTIPLICACION NIA=',I6//)
0155 38 FORMAT(1HC,49X,'CORRIENTE DE EXCITACION: IFD'//49X,'FACTOR DE
      MULTIPLICACION NIFD=',I6//)
0156 35 FORMAT(1HC,45X,'CORRIENTE DEL EJE EN CUADRATURA: IQ'//45X,'FACTOR
      DE MULTIPLICACION NIA=',I6//)
0157 36 FORMAT(1HC,48X,'CORRIENTE DEL EJE DIRECTO: ID'//48X,'FACTOR DE
      MULTIPLICACION NID=',I6//)
0158 41 FORMAT(1HC,50X,'ANGULO DE POTENCIA: DELTA'//50X,'FACTOR DE
      MULTIPLICACION ND=',I6//)
0159 42 FORMAT(1HC,49X,'TORQUE ELECTROMAGNETICO: TE'//49X,'FACTOR DE
      MULTIPLICACION NT=',I6//)
      → 43 FORMAT(1HC,42X,'DESVIACION DE LA VELOCIDAD ROTORICA: DVRS'//42X,
          'FACTOR DE MULTIPLICACION NVR=',I6//)
0160 30 STOP
0161 END

```

DS FORTRAN IV 360N-FO-479 3-8 MAINPGM DATE 27/11/81 TIME 09.34.09 PAGE 00

DS FORTRAN IV 360N-FO-479 3-8 CEDCI DATE 27/11/81 TIME 09.35.19 PAGE 00

```

0001 SUBROUTINE CEDCI
0002 COMPLEX IA,VA,EA,Z
0003 REAL KVA,IAX,IAY,IQ,IFD
0004 COMMON IA,VA,EA,KVA,IAX,IQ,IFD,VF,VAEB,P(20),RS,RKQ,RKD,RFD,
      XLS,XAQ,XAD,XLKQ,XLKD,XLFD,PSIQ,PSID,PSIKQ,PSIKD,PSIFD,TM,PHI,
      DELTA,XMD,XCAD,PSIMD,I,IDIST
0005 COMMON/PSAT/ PSIMDC, P1,P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8,ISAT
      C COEFICIENTES DE LAS ECUACIONES DIFERENCIALES
0006 XMQ = 1./(((1./XAQ)+(1./XLKQ)+(1./XLS)))
0007 XMD = 1./(((1./XAD)+(1./XLKD)+(1./XLFD)+(1./XLS)))
0008 XCAD = 1./(((1./XAD)+(1./XLKD)+(1./XLS)))
0009 P(1) = VAEB*RS*((XMQ/XLS)-1.)/XLS
0010 P(2) = VAEB*RS*XMQ/(XLKQ*XLS)
0011 P(3) = -VAEB*RS/XLS
0012 P(4) = VAEB*RKQ*XMQ/(XLKQ*XLS)
0013 P(5) = VAEB*RKQ*((XMQ/XLKQ)-1.)/XLKQ
0014 P(6) = -VAEB*RKD/XLKD
0015 P(7) = -VAEB*RFD/XLFD
0016 P(10) = RS/XLS
0017 P(11) = RKD/XLKD
0018 P(12) = RFD/XLFD
      C COEFICIENTES DE LA CORRIENTE IQ
0019 P(8) = (1.-(XMQ/XLS))/XLS
0020 P(9) = -XMQ/(XLKQ*XLS)
      C COEFICIENTES DE LA CORRIENTE ID
0021 P(16) = (1.-(XMD/XLS))/XLS
0022 P(17) = -XMD/(XLKD*XLS)
0023 P(18) = -XMD/(XLFD*XLS)
      C COEFICIENTES DE LA CORRIENTE IFD
0024 P(19) = -XMD/(XLFD*XLKD)
0025 P(20) = (1.-(XMD/XLFD))/XLFD
      C COEFICIENTES DEL VOLTAJE VFCA
0026 P(13) = RS/(XLS**2.)
0027 P(14) = RKD/(XLKD**2.)
0028 P(15) = (1.-(XCAD/XLS)-(XCAD/XLKD))
0029 IF(IDIST.EQ.6) RETURN
      C CONDICIONES INICIALES
0030 Z = CMPLX(RS,XLS+XAQ)
0031 GO TO (1,2),I
0032

```

```

0030 IAY = KVA*SIN(BETA)/CABS(VA)
0031 IA = CMLPX(IAX,IAY)
0032 EA = VA-Z*IA
0033 DELTA = ATAN(AIMAG(EA)/REAL(EA))
0034 22 IQ = CABS(IA)*SIN(BETA-DELTA+1.570796)
0035 ID = CABS(IA)*COS(BETA-DELTA+1.570796)
0036 IFD = (CABS(EA)-{XAD-XAQ}*ID)/XAD
0037 PSIQ = (XAQ+XLS)*IQ
0038 PSIKQ = XAQ*IQ
0039 PSIMQ = XAD*(ID+IFD)
0040 12 PSID = XLS*ID+PSIMQ
0041 PSIKD = PSIMQ
0042 14 CALL SATURA(PSIMD,XMD,XAD,DXI)
0043 IFD=(PSIMD+DXI)/XAD-ID
0044 PSIFD = XLFD*IFD +PSIMD
0045 TM = PSID*(P(8)*PSIQ+P(9)*PSIKQ)-PSID*(PSIMD)/XLS
0046 VF = RFD*IFD
0047 RETURN
0048 END

```

```

0001 FUNCTION RUNGE(N,Y,F,X,H)
0002 INTEGER RUNGE
0003 DIMENSION PHI(50),SAVEY(50),Y(N),F(N)
0004 DATA M/0/
0005 M=M+1
0006 GO TO (1,2,3,4,5),M
0007 RUNGE=1
0008 RETURN
0009 1 ----PASO 1
0010 DO 22 J=1,N
0011 SAVEY(J)=Y(J)
0012 PHI(J)=F(J)
0013 Y(J)=SAVEY(J)+0.5*H*F(J)
0014 X= X+0.5*H
0015 RUNGE=1
0016 RETURN
0017 2 ----PASO 2
0018 DO 33 J=1,N
0019 PHI(J)=PHI(J)+2.0*F(J)
0020 Y(J)=SAVEY(J)+0.5*H*F(J)
0021 RUNGE=1
0022 RETURN
0023 3 ----PASO 3
0024 DO 44 J=1,N
0025 PHI(J)=PHI(J)+2.0*F(J)
0026 Y(J)=SAVEY(J) + H*F(J)
0027 X=X+0.5*H
0028 RUNGE=1
0029 RETURN
0030 4 ----PASO 4
0031 DO 55 J=1,N
0032 Y(J)=SAVEY(J)+((PHI(J)+F(J))*H/6.0
0033 M=0
0034 RUNGE=0
0035 RETURN
0036 END

```


APENDICE BMANUAL DE USO DEL PROGRAMA

B-1. NOMENCLATURA

a) Variables de entrada.-

SIMBOLO	DESCRIPCION
RS	Resistencia de armadura.
RKQ	Resistencia del devanado amortiguador del eje en cuadratura.
RKD	Resistencia del devanado amortiguador del eje <u>di</u> recto.
RFD	Resistencia del devanado de campo.
XLS	Reactancia de dispersión del devanado de armadura.
XAQ	Reactancia de magnetización del eje cuadratura.
XAD	Reactancia de magnetización del eje directo.
XLKQ	Reactancia de dispersión del devanado amortiguador del eje en cuadratura.
XLKD	Reactancia de dispersión del devanado amortiguador del eje directo.
XLFD	Reactancia de dispersión del devanado de campo.
HMAQ	Constante de inercia de la máquina.

SIMBOLO	DESCRIPCION
VAERI	Velocidad inicial del rotor.
PSIMDC	Concatenaciones de flujo mutuo del eje directo crítico.
P(I), I=1,8	Coefficientes de las ecuaciones de recta, que aproximan a la curva de vacío de la máquina sincrónica.
ISAT	Indice para escoger el modelo: 0 para el modelo no saturado y 1 para el modelo saturado.
VAEB	Velocidad angular eléctrica base.
VA	Voltaje terminal fase-neutro.
PHI	Angulo del factor de potencia.
KVA	Potencia aparente monofásica.
I	Indice para escoger el tipo de funcionamiento: 1 para motor y 2 para generador.
TMAX	Tiempo máximo de observación del fenómeno.
H	Paso de integración de las ecuaciones diferenciales.
HREQ	Contador de frecuencia de pasos de integración.
HPLOT	Indice para obtener resultados: 0 para listados y 1 para listados y gráficos.
IDIST	Indice para producir las perturbaciones: 1, para el cortocircuito; 2, para el incremento brusco del torque; 3, para el estado estable; 4, para el incremento brusco del voltaje de excitación; 5, para la pérdida de excitación por cortocircuito.

SIMBOLO	DESCRIPCION
TINC	Valor de la función escalón para el incremento brusco del torque.
VFINC	Valor de la función escalón para el incremento brusco del voltaje de excitación y para la pérdida de excitación por cortocircuito.
TPERT	Tiempo de inicio de la perturbación.
NSA, NIQ, NID, NIFD	Factores de multiplicación de las corrientes de fase, en el eje en cuadratura, en el eje directo y de excitación para los resultados gráficos.
NSQ, NSD, NVR, ND, NT	Factores de multiplicación: de las concatenaciones de flujo en el eje en cuadratura y en el eje directo, de la desviación de la velocidad rotórica, del ángulo de potencia y del torque electromagnético.
NAO, NQ, NDO, NFO, NW,	
NADO, NTO, NP, NSPQ, NSPD	Valor de la escala superior de los gráficos para las corrientes de fase, en el eje en cuadratura, en el eje directo, de excitación; para la desviación de la velocidad rotórica, el ángulo de potencia, el torque electromagnético, y; las concatenaciones de

SIMBOLO	DESCRIPCION
AEI	<p>flujo en el eje en cuadratura y en el eje directo.</p> <p>Angulo eléctrico inicial de la perturbación.</p>
b) Variables de salida.-	
CIA(I), I=1,5	<p>Vector que almacena las corrientes en el eje en cuadratura, en el eje directo, de fase; el torque electromagnético; y, la corriente de fase.</p>
V(I), I=1,7	<p>Vector que almacena las concatenaciones de flujo en el eje en cuadratura, en el eje directo, en los devanados de damping la velocidad rotórica; y, el ángulo de potencia.</p>
AIQM, AIDM, AIFDM	<p>Valores modificados de las corrientes para ser graficados.</p>
DELTAM, DVRSM, TMM	<p>Valores modificados del ángulo de potencia, de la desviación de la velocidad rotórica y del torque electromagnético.</p>
PSIQM, PSIDM, AIMAM	<p>Valores modificados de las concatenaciones de flujo y de la corriente de fase.</p>

B-2 FORMA DE PROPORCIONAR LOS DATOS AL PROGRAMA

Todos los datos que se proporcionan estan en p.u., a excepción de la velocidad angular; la forma de suministrarlos se muestra en el siguiente esquema.

APENDICE CDATOS DE LA MAQUINA SINCRONICA UTILIZADA

C-1

Marca: SIEMENS

Trifásica, Polos Salientes y Devanados de Damping.

S = 3.5 KVA

V = 230 V (en delta)

I = 8.7 amp.

f = 60 Hz.

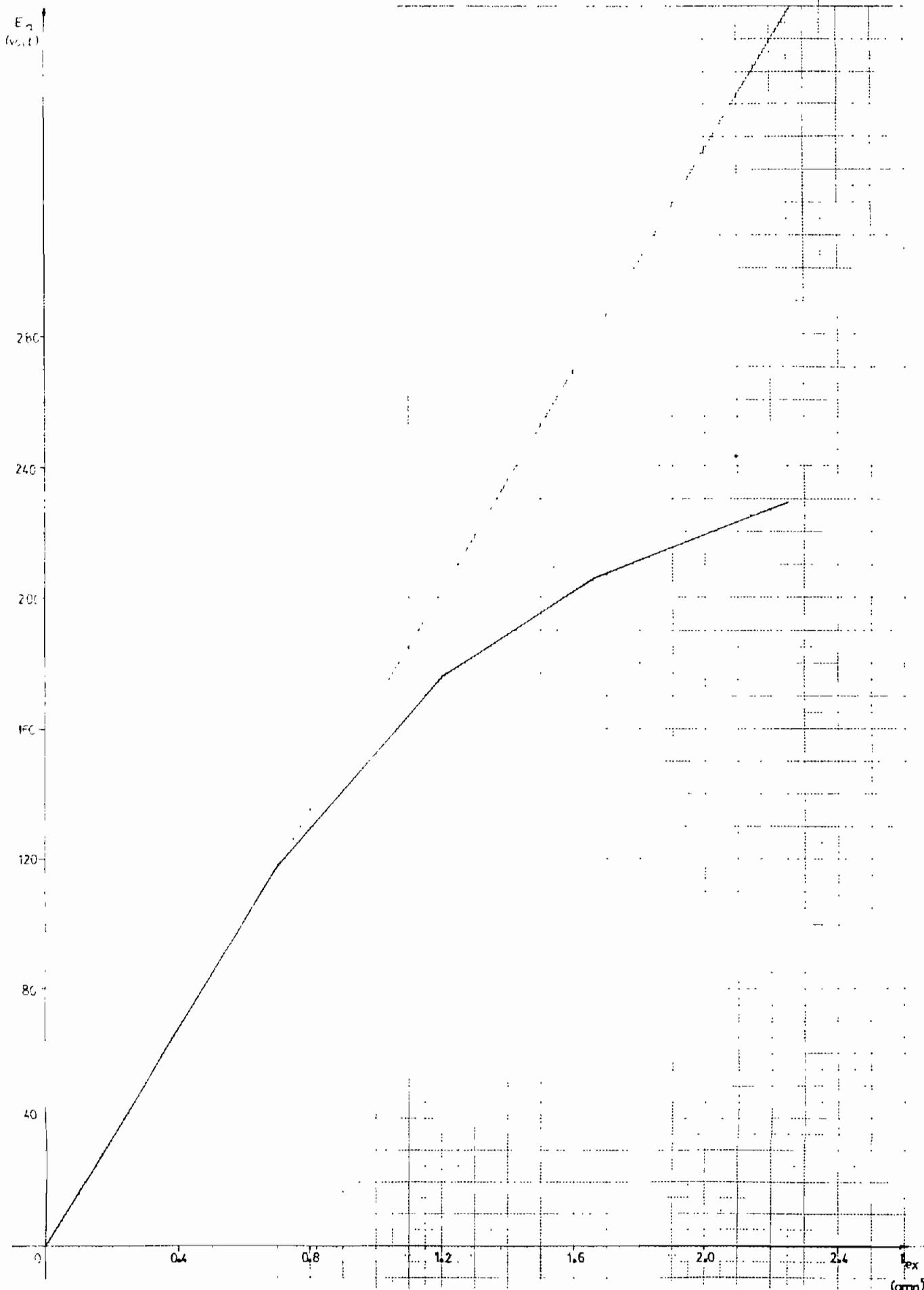
 $V_{exc} = 110$ V. $f_p = 0.8$

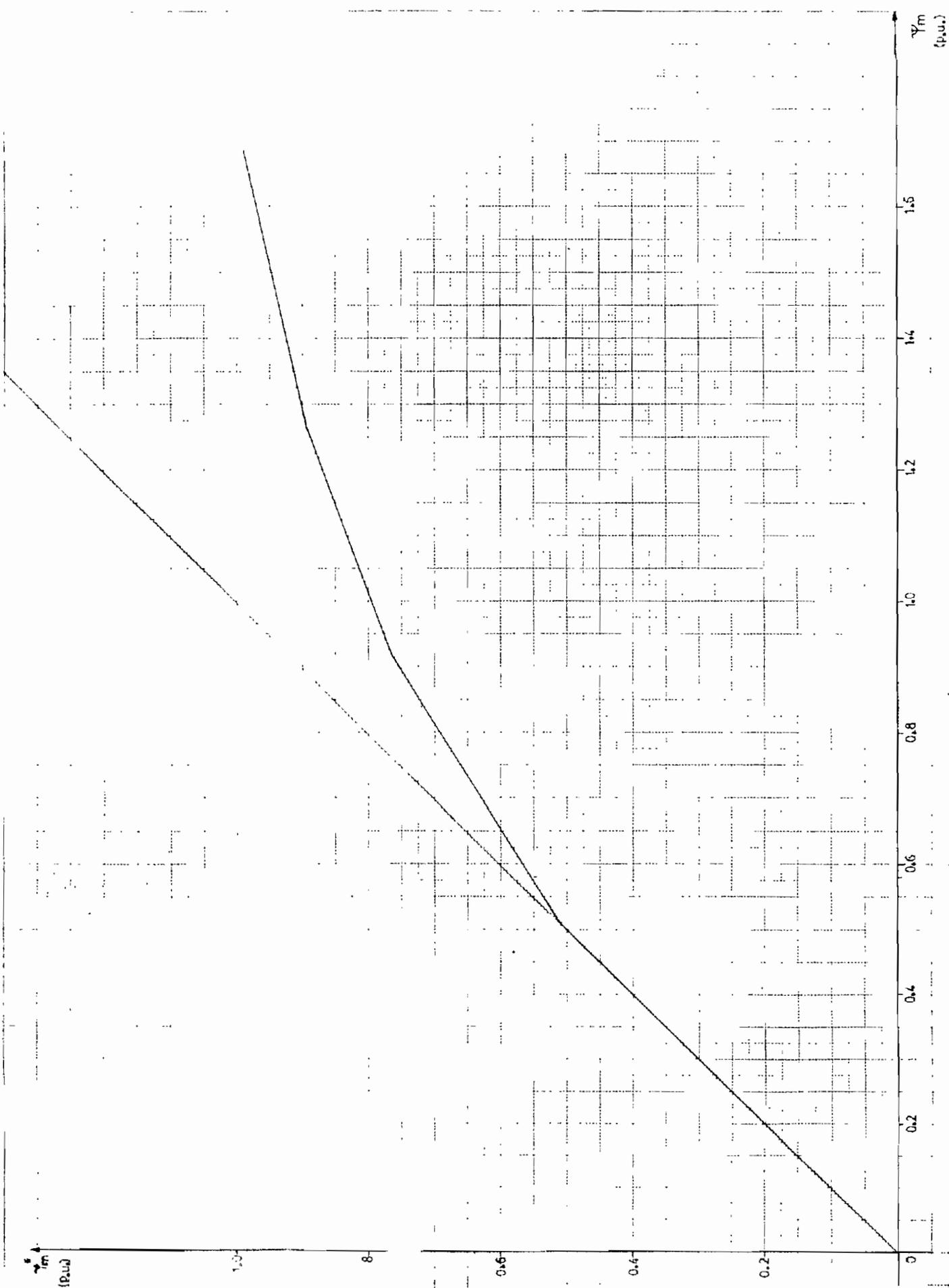
C-2 VALORES BASE.

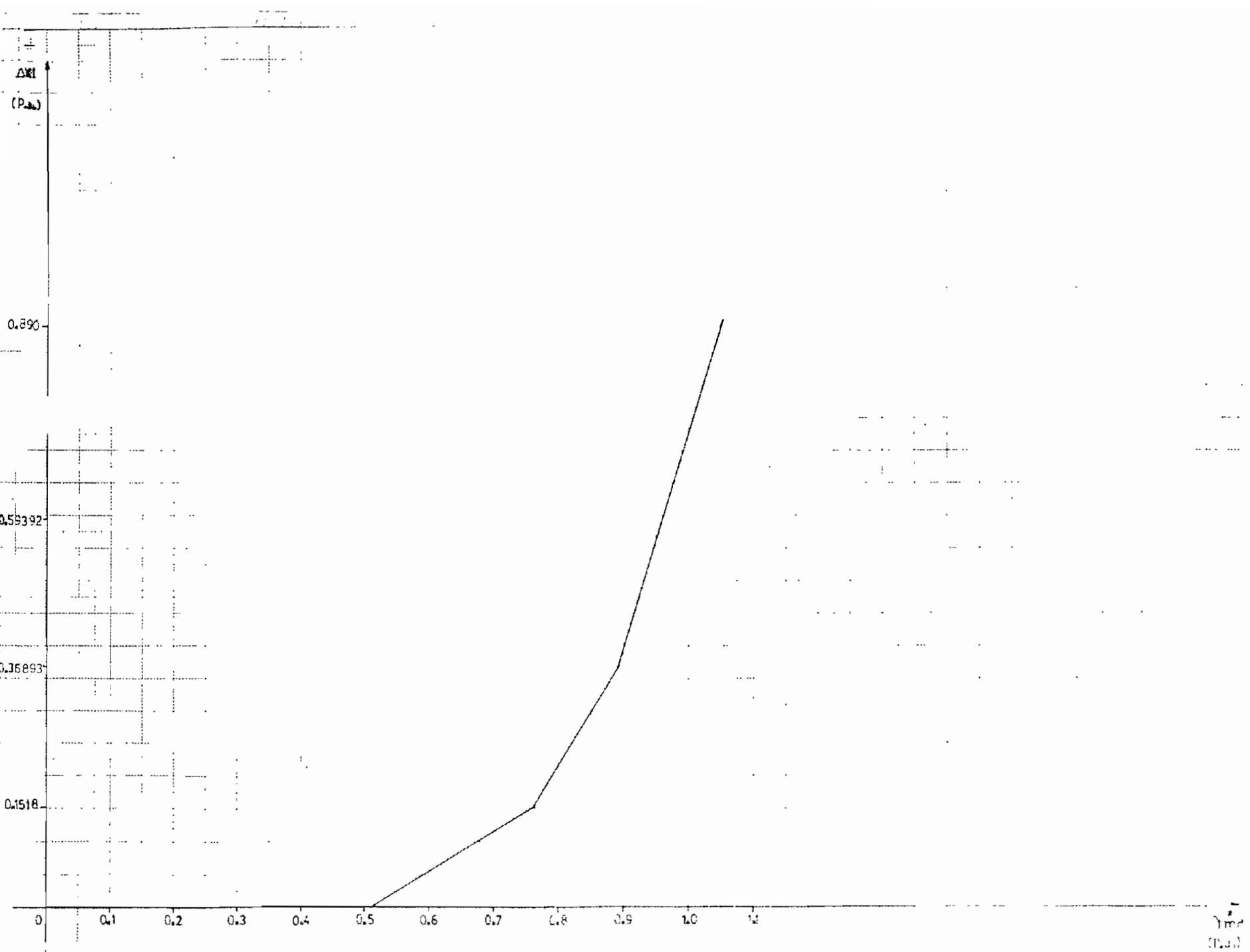
 $V_B (f-n) = 230$ V. $KVA_B = 3.5$ KVA

C-3 DATOS PROPORCIONADOS AL PROGRAMA

Los datos del ejemplo se ajustaron para tener funcionando a la máquina sincrónica en un punto donde es posible apreciar el efecto de la saturación magnética. A continuación se muestran los resultados en forma de lista de variables, obteni-







I= 2
 AV= 1.16978 VA= 0.0008 0.0 PHI= 0.55880 VAB= 376.0000
 N= 0.00133 15AT= 1

1943.

CONDICIONES INICIALES

IAN= -1.23909 -0.76910 IOM= -1.44788 IOP= 1.08765
 PSIO= -0.50458 PSID= 0.66353 PSIKO= -0.44448 PSIKO= 0.67780 PSIPD= 0.67780
 TR= -1.04880 DELTA= 0.67807 VACR= 1.00000 VAP= 0.02884 PSIPD= 0.55049

OPERACION EN ESTADO ESTABLE

T	PSIO	PSID	PSIKO	PSIKO	PSIPD	VR	DELTA	IO	ID	IAN	TE	IPD	PSIKO
.0	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-1.2391	-1.0488	1.0876	0.671
.001	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-1.0488	-1.0488	1.0876	0.671
.003	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-0.7184	-1.0488	1.0876	0.671
.004	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	0.6683	-1.0488	1.0876	0.671
.005	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	1.2531	-1.0488	1.0876	0.671
.007	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	1.4544	-1.0488	1.0876	0.671
.008	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	1.5281	-1.0488	1.0876	0.671
.009	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	0.0000	-1.0488	1.0876	0.671
.011	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	0.1080	-1.0488	1.0876	0.671
.012	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-0.8218	-1.0488	1.0876	0.671
.013	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-1.1133	-1.0488	1.0876	0.671
.016	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-1.4284	-1.0488	1.0876	0.671
.018	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-1.3920	-1.0488	1.0876	0.671
.017	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-1.0108	-1.0488	1.0876	0.671
.019	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-0.3700	-1.0488	1.0876	0.671
.020	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	0.3401	-1.0488	1.0876	0.671
.021	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	0.9087	-1.0488	1.0876	0.671
.023	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	1.3016	-1.0488	1.0876	0.671
.024	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	1.4367	-1.0488	1.0876	0.671
.026	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	1.1349	-1.0488	1.0876	0.671
.027	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	0.0000	-1.0488	1.0876	0.671
.028	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-0.1466	-1.0488	1.0876	0.671
.029	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-0.6489	-1.0488	1.0876	0.671
.031	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-1.1118	-1.0488	1.0876	0.671
.032	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-1.4866	-1.0488	1.0876	0.671
.033	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-1.2413	-1.0488	1.0876	0.671
.030	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-0.7181	-1.0488	1.0876	0.671
.036	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-0.0181	-1.0488	1.0876	0.671
.037	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	0.6686	-1.0488	1.0876	0.671
.038	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	1.2288	-1.0488	1.0876	0.671
.040	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	1.4541	-1.0488	1.0876	0.671
.041	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	1.3970	-1.0488	1.0876	0.671
.043	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	0.8733	-1.0488	1.0876	0.671
.044	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	0.0000	-1.0488	1.0876	0.671
.046	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-0.8178	-1.0488	1.0876	0.671
.047	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-1.1165	-1.0488	1.0876	0.671
.048	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-1.4866	-1.0488	1.0876	0.671
.049	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-1.3923	-1.0488	1.0876	0.671
.051	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-1.0138	-1.0488	1.0876	0.671
.052	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-0.3481	-1.0488	1.0876	0.671
.053	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	0.3420	-1.0488	1.0876	0.671
.055	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	0.9088	-1.0488	1.0876	0.671
.056	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	1.3801	-1.0488	1.0876	0.671
.057	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	1.6368	-1.0488	1.0876	0.671
.059	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	1.1374	-1.0488	1.0876	0.671
.060	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	0.6574	-1.0488	1.0876	0.671
.061	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-0.1406	-1.0488	1.0876	0.671
.063	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-0.6269	-1.0488	1.0876	0.671
.064	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-1.3088	-1.0488	1.0876	0.671
.065	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-1.4567	-1.0488	1.0876	0.671
.067	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-1.0436	-1.0488	1.0876	0.671
.068	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-0.7228	-1.0488	1.0876	0.671
.069	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-0.8234	-1.0488	1.0876	0.671
.071	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	0.6610	-1.0488	1.0876	0.671
.072	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	1.2148	-1.0488	1.0876	0.671
.073	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	1.4538	-1.0488	1.0876	0.671
.076	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	1.3209	-1.0488	1.0876	0.671
.078	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	0.8767	-1.0488	1.0876	0.671
.077	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	0.2078	-1.0488	1.0876	0.671
.080	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-0.6140	-1.0488	1.0876	0.671
.081	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-1.1070	-1.0488	1.0876	0.671
.082	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-1.4277	-1.0488	1.0876	0.671
.083	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-1.3948	-1.0488	1.0876	0.671
.084	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-1.0168	-1.0488	1.0876	0.671
.085	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-0.3672	-1.0488	1.0876	0.671
.087	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	0.3370	-1.0488	1.0876	0.671
.088	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	0.9704	-1.0488	1.0876	0.671
.089	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	1.3708	-1.0488	1.0876	0.671
.091	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	1.4372	-1.0488	1.0876	0.671
.092	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	1.1402	-1.0488	1.0876	0.671
.093	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	0.8613	-1.0488	1.0876	0.671
.095	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-0.1564	-1.0488	1.0876	0.671
.096	-0.50458	0.66353	-0.44448	0.67780	0.6610	1.0000	0.6780	-1.4480	-0.1738	-0.8294	-1.0488	1.0876	0.671

1944

R E E R E N C I A S

- 1.- POVEDA MENTOR, "Methods of Interfacing Synchronous Machine with Transmission Systems in a Digital Simulation ", Technical Report TR-EE 76-11, Purdue University, 1976.
- 2.- ANDERSON AND FOUAD, "Power System Control and Stability", Iowa State University Press, 1977.
- 3.- D. O'KELLY AND S. SIMONS, "Introduction to Generalized Electrical Machine Theory", Mc Graw Hill Publishing Company Limited, London, 1968.
- 4.- KIMBARK EDWARD WILSON, Sc.D., "Power System Stability", Vol. III, 3^{ra}. Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, - 1964.
- 5.- FITZGERALD A. E., KINSLEY CHARLES JR, KUSKO ALEXANDER , "Electric Machinery", 3^{ra}. Ed., Mc Graw Hill Book Company, New York, 1971.
- 6.- PARK R. H., "Two Reaction Theory of Synchronous Machines, Generalized Method of Analysis-Part. I", Trans. AIEE, vol. 48, pp 716-727, Julio, 1929.
- 7.- CARNAHAN B., LUTHER H. A., WILKES J., "Applied Numerical

Methods", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1969.

- 8.- NUÑEZ GALO, "Simulación digital de la máquina sincrónica para comportamiento dinámico", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Marzo, 1981.
- 9.- LOPEZ JOSE, "Análisis digital de la pérdida de excitación de la máquina sincrónica" Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Noviembre, 1979.
- 10.- MATSCH LEANDER, "Máquinas electromagnéticas y electromecánicas", 1^{ra}. Ed., Representaciones y servicios de Ingeniería, S.A., México, 1972.
- 11.- LABORATORIO DE MAQUINAS ELECTRICAS, "Pérdida de excitación de un Generador Sincrónico. Determinación de las constantes de una máquina sincrónica", Escuela Politécnica Nacional, Quito, Octubre, 1979.