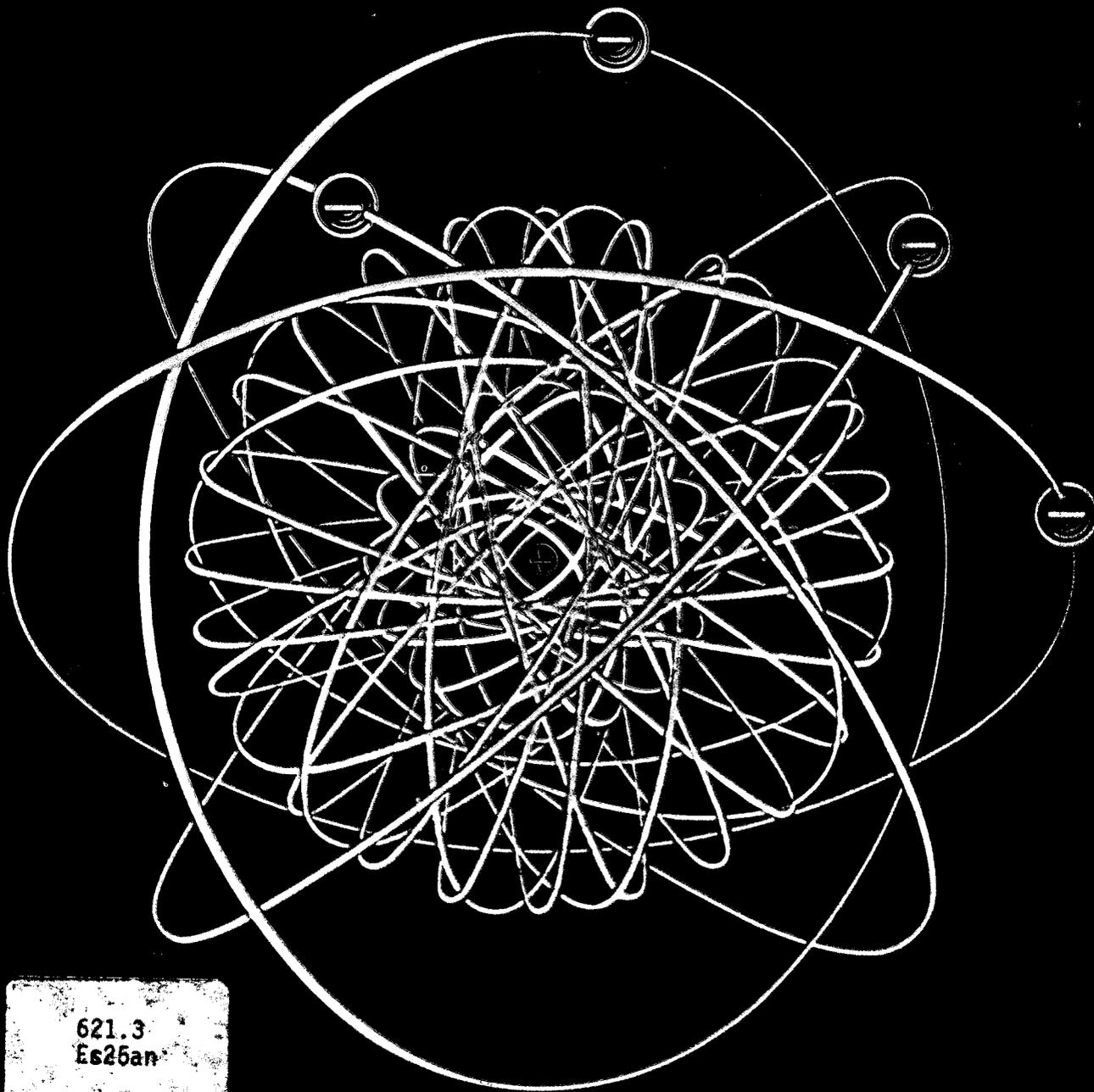


ANALES DE LAS JORNADAS EN INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA



621.3
Es25an

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
QUITO - ECUADOR

MAYO DE 1982

EDITORIAL

La presente publicación recoge los resúmenes de los trabajos presentados para las III Jornadas en Ingeniería Eléctrica y Electrónica, en Mayo de 1982, evento organizado anualmente por la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional, a fin de fomentar la difusión de los trabajos académicos y técnicos que en este campo se realizan en el Ecuador.

El intercambio de experiencias no sólo que contribuye a determinar en mejor forma el estado actual de nuestros conocimientos, sino que, lo que es más importante, va fortaleciendo una relación de solidaridad y camaradería en la comunidad científica y técnica de nuestra Patria.

En las actuales circunstancias, de acelerado desarrollo de las Ciencias Exactas y Naturales, es cada vez más difícil que esfuerzos individuales sean suficientes para alcanzar un mejor dominio de la naturaleza, haciéndose imperiosa la necesidad del trabajo en equipo y de la colaboración mutua.

Lo anteriormente anotado justifica plenamente nuestro agradecimiento a todos quienes han colaborado para que este evento tenga hoy un carácter Nacional, con participación de Colegas e Instituciones de diferentes regiones del País.

Ing. Alfonso Espinosa Ramón
DECANO DE LA FACULTAD DE
INGENIERIA ELECTRICA
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL



RESUMEN

Se desarrolla un modelo matemático de las máquinas de corriente continua en función de concatenaciones de flujo, para el estudio del comportamiento dinámico: como estas máquinas están afectadas directamente por la saturación magnética, se hizo imprescindible introducir este efecto, para de esta manera obtener respuestas compatibles con la realidad.

El modelo implementado es simulado en el computador digital y sus resultados son comparados con los experimentales, obteniéndose respuestas completamente satisfactorias.

MODELO MATEMATICO

El modelo seleccionado para este propósito es un modelo generalizado, denominado frecuentemente "La Máquina Primitiva" (1).

La máquina primitiva es una herramienta poderosa para el análisis de las máquinas de corriente continua, pues, contiene un mecanismo de conmutación llamado conmutador.

La máquina primitiva no corresponde exactamente a ninguna máquina real, para obtener resultados prácticos útiles, es necesario hacer algunas consideraciones:

- 1.- Circuito magnético lineal
- 2.- Entrehierro uniforme
- 3.- Distribución sinusoidal de la fuerza magnetomotriz en el entrehierro.

Muchas de las máquinas de corriente continua que se presentan en la práctica, tanto generadores como motores, poseen dos devanados uno en el estator y otro en el rotor. Como el devanado del rotor tiene el dispositivo de conmutador y escobillas, esta máquina se la puede representar fácilmente con la máquina primitiva de dos devanados (figura 1.1)

Los subíndices q, d indican los ejes en cuadratura y directo, los superíndices r, s indican el rotor y el estator respectivamente, así, V_d^s será la tensión del devanado de eje directo en el estator e i_d^s será la corriente que lo recorre.

En una máquina real de C.D. el devanado de eje directo en el estator es el devanado de campo y el devanado en cuadratura del rotor es el devanado de armadura o inducido, cuyo eje es fijo en el espacio.

ECUACIONES DE EQUILIBRIO ELECTRICO

Y MECANICO

De la máquina de dos devanados se puede determinar las ecuaciones que rigen el comportamiento de las máquinas C.D.; asu-

miendo en un principio la linealidad del circuito magnético.

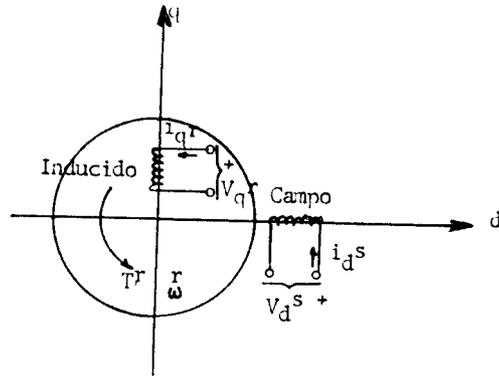


Fig. 1.1. Modelo de máquina primitiva d-q correspondiente a la máquina con dos devanados y conmutador.

Las concatenaciones de flujo serán:

$$\begin{bmatrix} \lambda_d^s \\ \lambda_q^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d^s & 0 \\ 0 & L_q^r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^s \\ i_q^r \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Las ecuaciones de los voltajes terminales son:

$$\begin{bmatrix} V_d^s \\ V_q^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_d^s + L_d^s & 0 \\ -G_{qd}^{rs} & \omega^r R_q^r + L_q^r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^s \\ i_q^r \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

El equilibrio mecánico está definido por:

$$T^r = (Jp + D) \omega^r + T_e \quad (1.3)$$

$$T_e = G_{qd}^{rs} \cdot i_q^r i_d^s \quad (1.4)$$

El coeficiente G_{qd}^{rs} tiene dimensiones en henrios y se llama inductancia rotacional del devanado en cuadratura del rotor debido a la corriente que circula por el devanado de eje directo del estator.

- λ es concatenación de flujo
- L^r autoinducción estacionaria
- i corriente
- V tensión
- R^r resistencia
- T^r es el par exterior aplicado
- J momento de inercia total del rotor
- D Es el coeficiente angular de fricción viscosa
- T_e Es el par de origen eléctrico

ω^r Velocidad angular del rotor
 P Operador lineal $\frac{d}{dt}$

A las ecuaciones anteriores se las puede poner en función de concatenaciones de flujo, en lugar de corrientes; con la finalidad de reducir el esfuerzo de computación al introducir la no linealidad de la curva de saturación magnética.

$$\text{Se define } \lambda_{ex} = G_{qd}^{rs} i_d^s \quad (1.5)$$

El término λ_{ex} se utilizará luego para la introducción de la saturación magnética.

Las corrientes en función de concatenaciones de flujo son:

$$\begin{vmatrix} i_d^s \\ i_q^r \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{1}{L_d^s - G_{qd}^{rs}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q^r} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \lambda_d^s - \lambda_{ex} \\ \lambda_{dq}^r \end{vmatrix} \quad (1.6)$$

El modelo teniendo concatenaciones de flujo como variables de estado se expresa de la siguiente manera:

$$\begin{vmatrix} p \lambda_d^s \\ p \lambda_q^r \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} V_d^s \\ V_q^r \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} \frac{R_d^s}{L_d^s - G_{qd}^{rs}} & 0 \\ 0 & \frac{R_q^r}{L_q^r} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \lambda_d^s \\ \lambda_q^r \end{vmatrix} + \lambda_{ex} \begin{vmatrix} \frac{R_d^s}{L_d^s - G_{qd}^{rs}} \\ \omega^r \end{vmatrix} \quad (1.7)$$

$$\begin{vmatrix} p \omega^r \end{vmatrix} = \frac{1}{J} \begin{vmatrix} T^r - D \omega^r - \frac{G_{qd}^{rs} (\lambda_d^s - \lambda_{ex}) \lambda_q^r}{(L_d^s - G_{qd}^{rs}) L_q^r} \end{vmatrix} \quad (1.8)$$

INTRODUCCION DE LA SATURACION MAGNETICA

Los principales datos del circuito magnético relacionado con la saturación se desprenden de las características en vacío, figura 1.2.

Para introducir esta no linealidad es muy importante tener en cuenta que para condiciones de circuito abierto, la tensión de circuito abierto V_a en la línea de entrehierro es igual a:

$$V_a = G_{qd} \omega^r i_d^s$$

Por medio de (1.5)

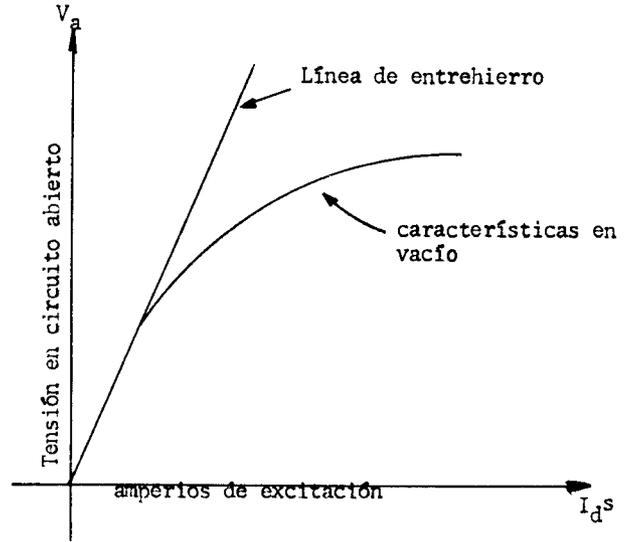


Fig. 1.2. Características en circuito abierto y línea del entrehierro.

$$\frac{V_a}{\omega^r} = \lambda_{ex} \quad \text{para la parte lineal y}$$

$$\frac{V_a}{\omega^r} = \lambda_{ex}^* \quad \text{para la parte no lineal} \quad (1.9)$$

Con ello la figura 1.2 se puede transformar en la 1.3

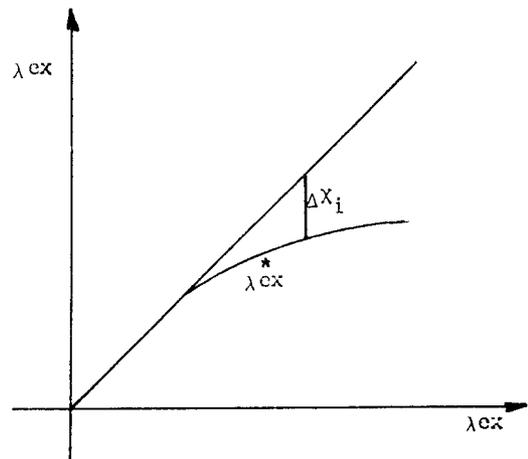


Fig. 1.3.

En la figura 1.3 para cada valor de corriente y por tanto de λ_{ex} es factible determinar Δx_i , que es la diferencia que existe entre la línea de entrehierro y el valor verdadero de la curva de magnetización siempre y cuando se sobrepase el "Codo de la curva", sino, $\Delta x_i = 0$ y $\lambda_{ex} = \lambda_{ex}^*$.

En consecuencia

$$\lambda_{ex}^* = G_{qd}^{rs} i_d^s - \Delta x_i \quad (1.10)$$

λ_{ex}^* es el valor de λ_{ex} introducida la saturación.

Como λ_d^s también es afectada por la saturación $\lambda_d^s(6)$, es necesario corregirlo a un valor λ_d^{s*} .

Sustituyendo (1.9) en (1.6) y ésta en (1.10) se tiene:

$$\lambda_{ex}^* = \frac{G_{qd}^{rs}}{L_d^s} \lambda_d^{s*} - \frac{(L_d^s - G_{qd}^{rs})}{L_d^s} \Delta x_i \quad (1.11)$$

La ecuación (1.11) se la resuelve con la ayuda de la figura 1.4, la misma que proviene de la figura 1.3.

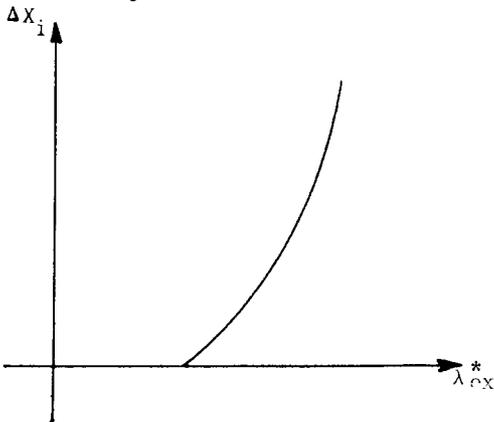


Fig. 1.4. Δx_i en función de λ_{ex}^*

Por tanto, teniendo en cuenta la saturación del hierro, las ecuaciones diferenciales fundamentales del modelo matemático quedan definidas como:

$$\begin{vmatrix} p\lambda_d^s \\ p\lambda_q^r \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} V_d^s \\ V_q^r \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} R_d^s & 0 \\ L_d^s - G_{qd}^{rs} & R_q^r \\ 0 & L_q^r \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \lambda_d^{s*} \\ \lambda_q^r \end{vmatrix} +$$

$$+ \lambda_{ex}^* \begin{vmatrix} R_d^s \\ L_d^s - G_{qd}^{rs} \\ \omega^r \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} p\omega^r \end{vmatrix} = \frac{1}{J} \begin{vmatrix} T^r - D\omega^r \end{vmatrix} - \frac{G_{qd}^{rs}(\lambda_d^{s*} - \lambda_{ex}^*)\lambda_q^r}{L_q^r(L_d^s - G_{qd}^{rs})}$$

2. PROGRAMA DIGITAL

Las ecuaciones del movimiento se obtienen con la ayuda del modelo, pero las ecuaciones mismas son no lineales y no pueden resolverse por métodos analíticos, por lo que es necesario la utilización del computador-analógico o digital (en este caso se usó el computador digital). Las ecuaciones diferenciales se las resuelve con el método de integración de RUNGE-KUTTA de cuarto orden, siguiendo el diagrama de flujo simplificado de la figura 2.1.

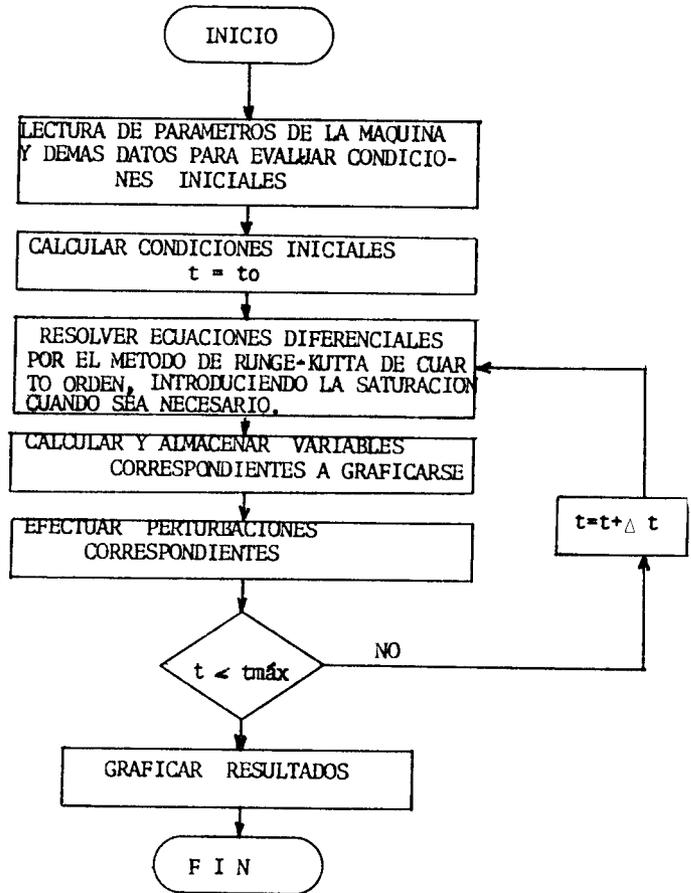


Fig. 2.1. Método de solución seguido por el programa digital.

3. APLICACIONES

El análisis incluye incremento brusco de torque en generador con excitación independiente, cortocircuito en generador derivación, arranque con carga en motor derivación e incremento brusco de carga en igual conexión, siendo tan variadas las aplicaciones se demuestra el amplísimo campo de utilización del modelo.

De igual manera, todas las perturbaciones fueron realizadas en la máquina generaliza

da Westinghouse existente en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela Politécnica Nacional; para finalmente establecer una comparación entre los resultados dados por el modelo desarrollado y los resultados experimentales.

3.1. INCREMENTO BRUSCO DE TORQUE EN GENERADOR CON EXCITACIÓN INDEPENDIENTE

Físicamente se tiene un generador de continua excitado independientemente entregando energía a una carga resistiva y absorbiendo energía de la máquina impulsora a velocidad constante. La carga resistiva es simulada en el programa de acuerdo a la Ley de Ohm; experimentalmente, se conecta una resistencia a los terminales del generador.

Repentinamente se produce un incremento de torque de la máquina impulsora lo que causa un conjunto de transformaciones en el sistema electromecánico, como se puede apreciar en los gráficos, tanto del computador como experimentales y que se exponen a continuación.

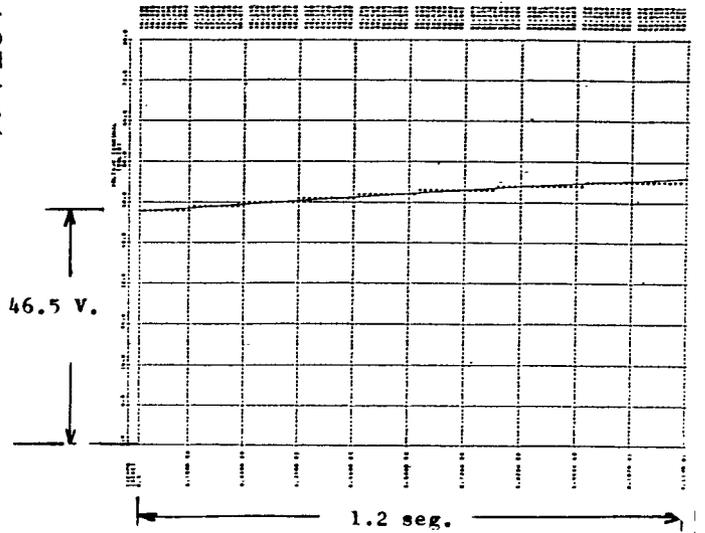
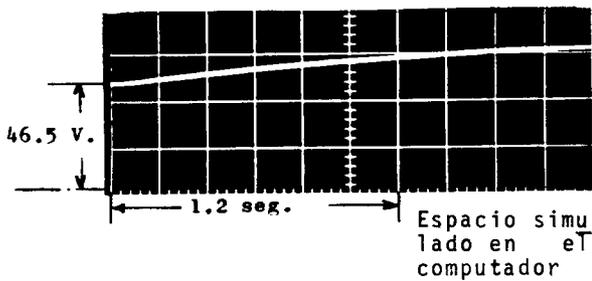


Fig. a.1. Voltaje Terminal

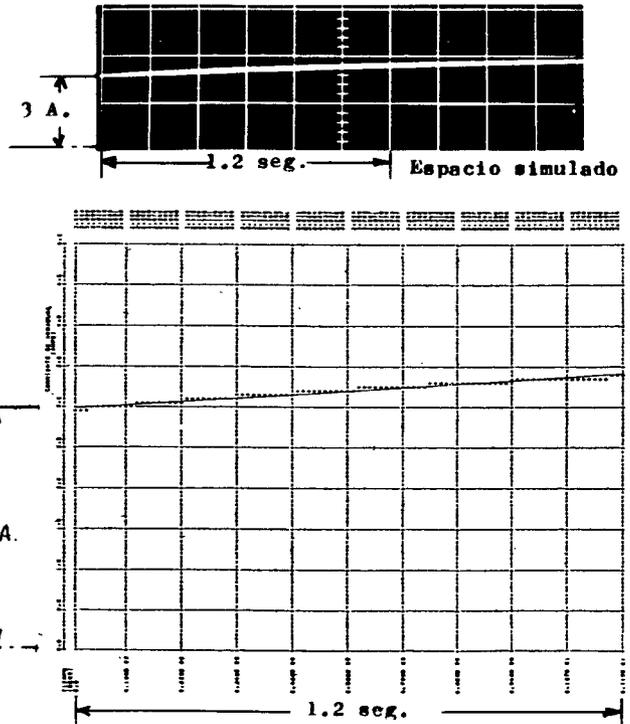
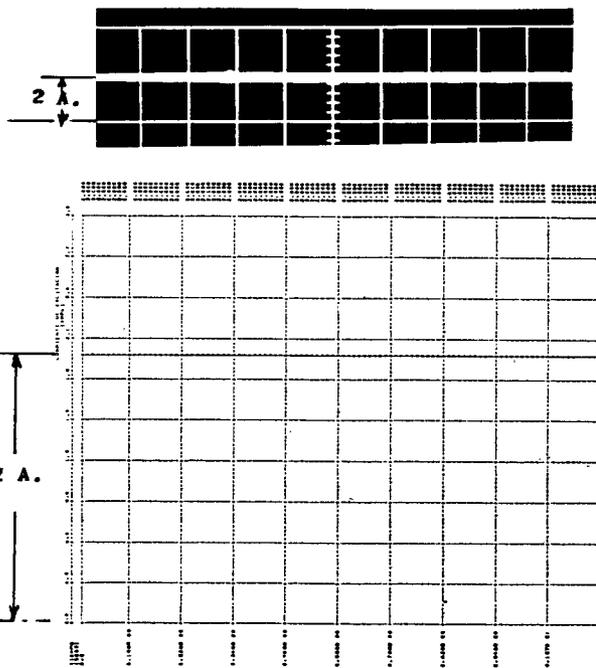


Fig. a.2. Corriente de Excitación

Fig. a.3. Corriente de Armadura

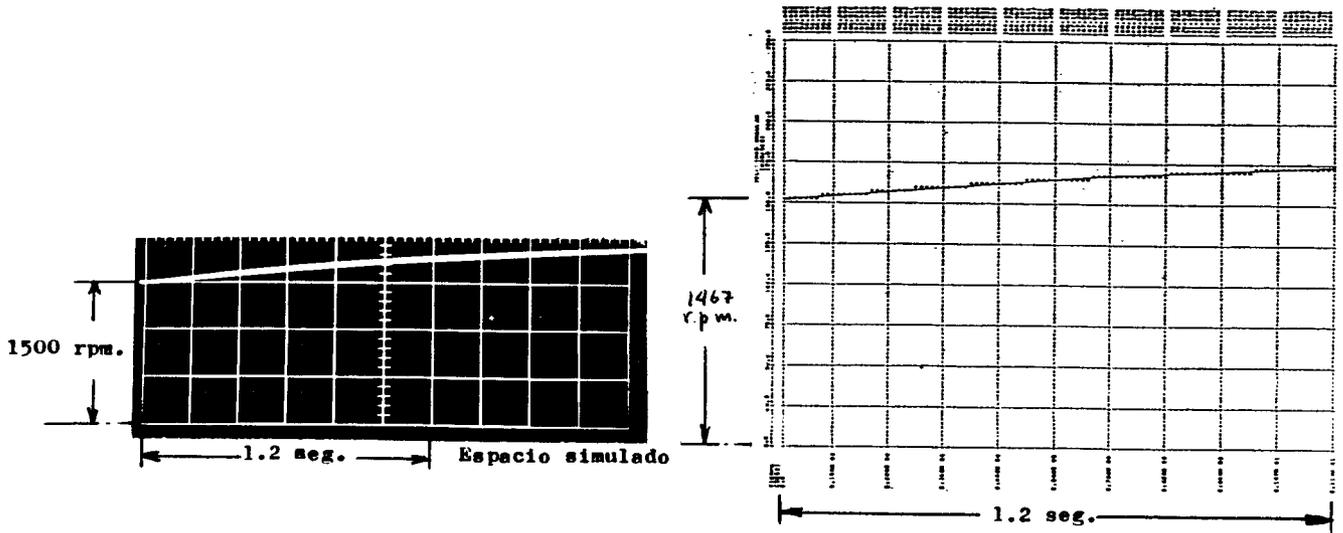


Fig. a.4. Velocidad

3.2. CORTOCIRCUITO EN GENERADOR SHUNT

La Conexión derivación (Shunt) es muy importante, pues, sin una representación a certada de la saturación no es posible obtener respuestas adecuadas, por sus características inherentemente no lineales (2).

Prácticamente, el generador se encuentra operando en vacío, luego súbitamente se

produce un cortocircuito sostenido en los terminales del mismo, lo que ocasiona fuertes variaciones en los parámetros de la máquina como se puede apreciar en los siguientes gráficos.

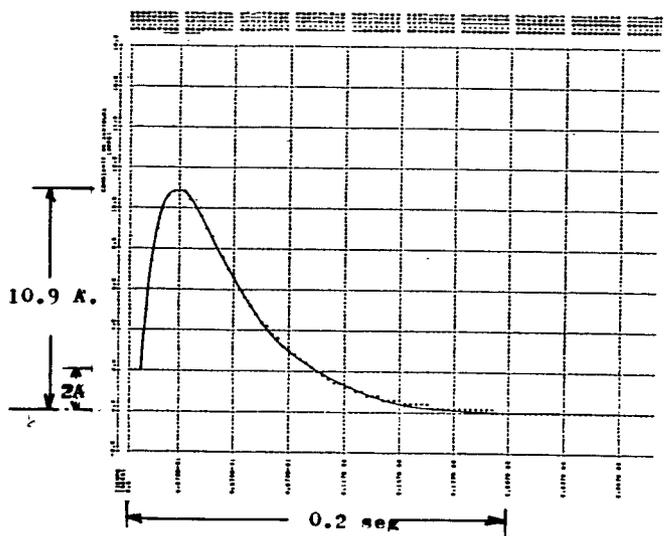
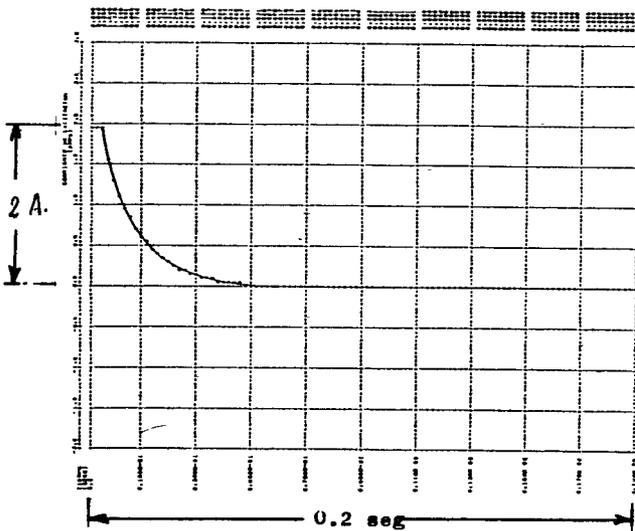
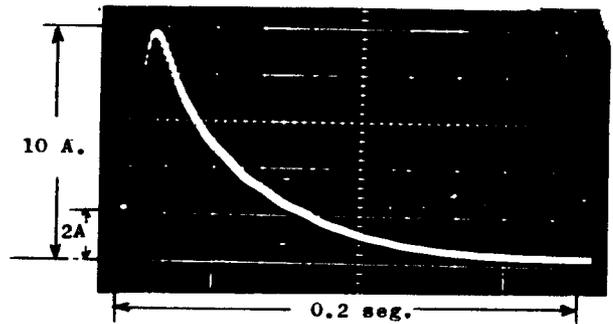
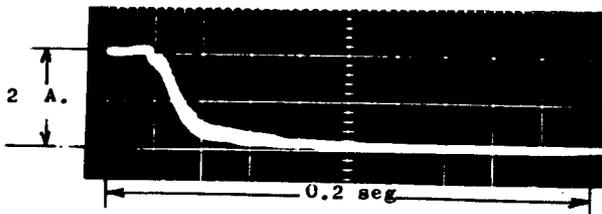


Fig. b.1. Corriente de Excitación

Fig. b.2. Corriente de Armadura

3.3. ARRANQUE CON CARGA EN MOTOR SHUNT

Uno de los más representativos casos del comportamiento dinámico es el arranque y más aún si es con carga. Al incluir la carga es necesario simularla en el programa digital. (6).

En el Laboratorio la carga mecánica es un generador acoplado al motor Shunt, este generador entrega energía a una carga resistiva.

Antes de arrancar la máquina se encuentra - desenergizada, luego se conecta una tensión en los terminales para que esta arranque, - en el programa este mismo efecto se consigue mediante una función paso.

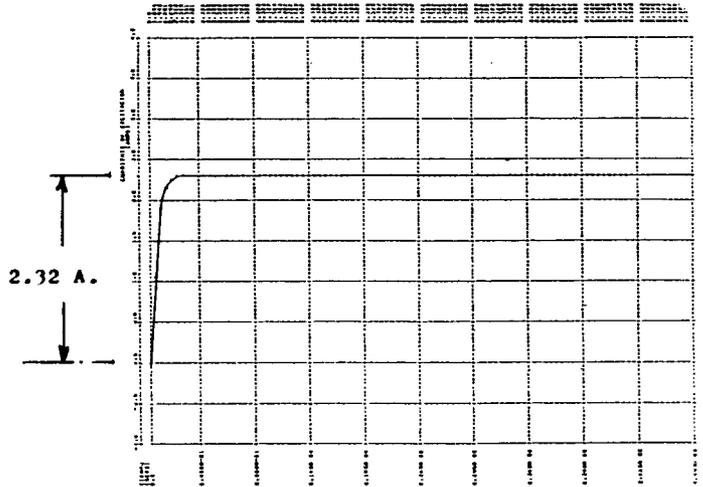
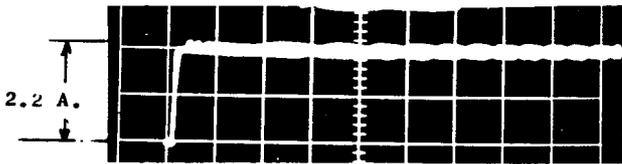


Fig. c.1. Corriente de Excitación

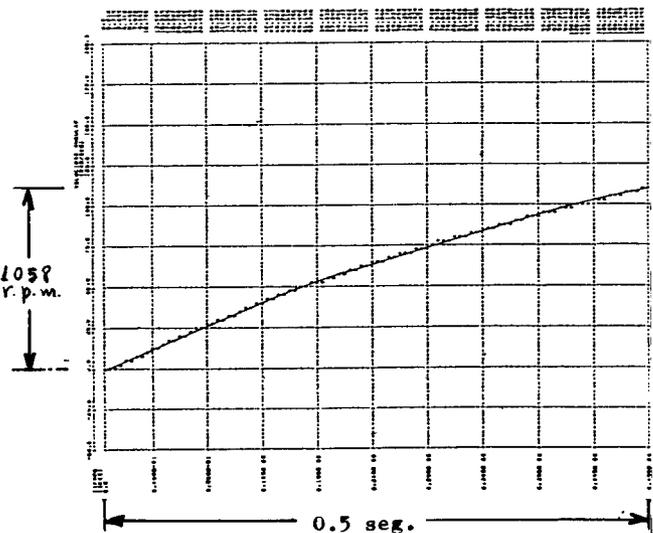
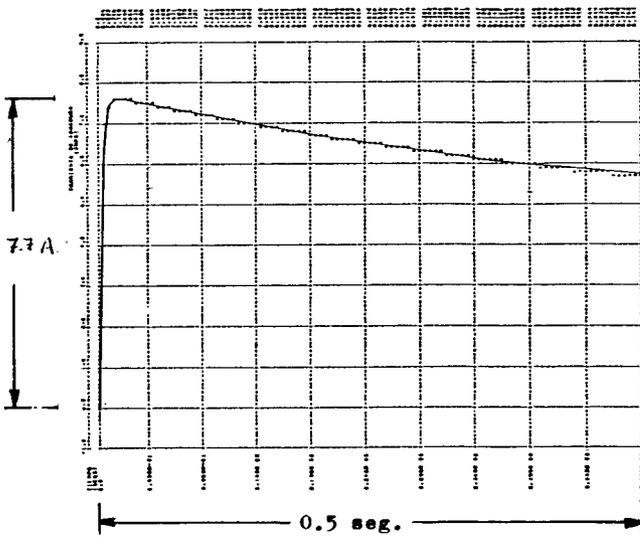
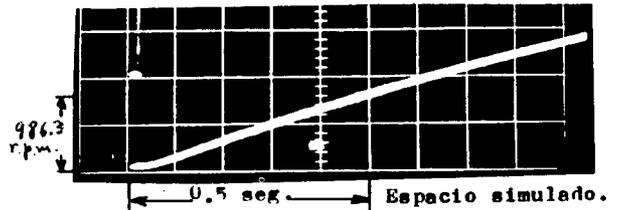
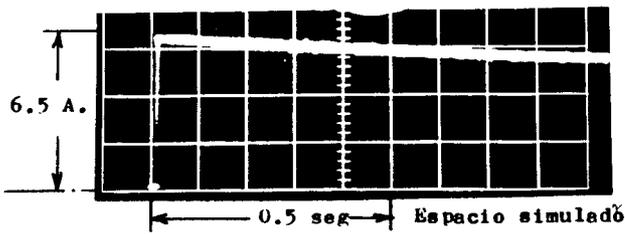


Fig. c.2. Corriente de Armadura

Fig. c.3. Velocidad

El incremento brusco de carga en motor - Shunt puede verse en la referencia (6).

CONCLUSIONES

El introducir la saturación magnética ayuda poderosamente a la buena respuesta del modelo, pues, las máquinas de continua están afectadas fuertemente por la no linealidad de la saturación.

Al desarrollar el modelo en función de concatenaciones de flujo, el esfuerzo matemático para encontrar fórmulas y métodos para resolverlos es mayor, pero es compensado con la disminución del tiempo de computación. Utilizando concatenaciones de flujo como variables de estado, la saturación es incluida directamente; en oposición a lo que ocurre en los modelos basados en corrientes, en los cuales, en cada paso de integración se debe encontrar el flujo magnético, introducir la saturación luego volver a corrientes.

El modelo, que usa la "máquina primitiva" - como base; incluida la saturación, asegura la aplicación de variadas conexiones de las máquinas de continua, sea esta excitación - independiente, derivación o serie, tanto para generador como para motor.

El hecho de haber experimentado las perturbaciones en regiones no lineales de la curva de saturación y de haber conseguido respuestas similares en el computador, cumpliendo las mismas condiciones, comprueba la veracidad del método desarrollado en este trabajo.

REFERENCIAS

1. Meisel Jerome, "Principios de Conversión de Energía Electromecánica", McGraw - Hill, Madrid, 1966
2. Thaler G.J y Wilcox M.L., "Máquinas Eléctricas", Limusa, México, 1974
3. Anderson and Fouad, "Power System Control and Stability, Iowa State University, 1973
4. Saunders Robert, "Measurement of D.C. - Machine Parameters", AIEE Trans on Power Apparatus and System, Vol. 70, pp. 700 - 706, 1951
5. Yablon A. and Appelbaum J., "Transient Analysis of a D.C. Series Motor (Linear versus Nonlinear Models)", IEEE - Trans on Industrial Electronics and Control Instrumentation, Vol IECI - 28 pp. 120 - 125, May 1981
6. Sandoval Handel, "Comportamiento Dinámico de Máquinas de Corriente Continua incluida la saturación magnética", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, 1981.

POVEDA MENTOR. Biografía ver en Anales de las Jornadas en Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Vol. Nº 2, 1981.



SANDOVAL, HANDEL. Nació en Quito, el 28 de Enero de 1958, obtuvo su Bachillerato en el Instituto Nacional Mejía (1975). Estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional, título de Ingeniero Eléctrico (1981). Actualmente colabora con la Compañía de Consultas y Montajes Electromecánicos NACYMEC.