

## PROGRAMA DIGITAL DIDACTICO PARA LA SIMULACION DEL GENERADOR DE RELUCTANCIA

Ing. Ludwing A. Ramírez Pazmiño  
PETROPRODUCCION

Ing. Luis A. Taco Villalba  
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

### RESUMEN

En el presente trabajo se presenta la simulación del generador de reluctancia construido en la EPN; se realiza el programa con el paquete MATLAB, el cual que por versatilidad facilidad en la presentación gráfica y el uso del mismo permite obtener curvas de voltaje, corriente y torque electromagnético.

Se realiza un análisis para carga R-L-C y sus respectivas combinaciones, como también en vacío y cortocircuito.

Se ha realizado varias pruebas, las cuales muestran la fiabilidad del mismo, introduciendo como datos los parámetros de la máquina como son inductancias, resistencias, número de vueltas del primario y secundario, así como las dimensiones propias del rotor y del estator.

### ABSTRACT

This work presents a simulation of the reluctance generator built in the Escuela Politécnica Nacional. This was programmed with the MATLAB computer program which has the versatility to work with graphics easily and allows one to obtain voltage or current curves and electromagnetic torque.

This program analyzes the R-L-C load (resist, inductance, capacitance) and their respective combinations, also working without load or short-circuited. After performing various tests, the program was found to be reliable. To run the program need to enter the machines parameters, such as rotor and stator dimensions, inductances, resistances and number of turns for the primary and secondary windings.

### 1.- INTRODUCCION

El generador de reluctancia fue construido tiempo atrás, se trabajo en él con fines puramente didácticos, las técnicas computacionales dan lugar a plantear alternativas de estudio en este tipo de generadores, tanto en sus dimensiones físicas como de Potencia, por lo que se ha desarrollado el programa con el fin de observar el funcionamiento y/o bondad de distintos generadores variando sus parámetros, permitiendo un conocimiento pragmático de la máquina, en la figura 1 se presenta la estructura física generador de reluctancia.

### 2.- FUNDAMENTO TEORICO

El prototipo del generador de reluctancia consta de cuatro grupos estator-rotor de doble saliencia, los rotores sujetos a un eje no poseen bobinados como otro tipo de máquinas, y estos están desfasados unos de otros.

Los rotores no poseen escobillas, la forma típica de los rotores y estatores dan lugar a que se produzca un entrehierro variable, por lo que el flujo magnético creado también es variable, produciendo una concatenación en la armadura, y por ende un voltaje generado.

En el presente trabajo se realiza la simulación considerando, un generador bifásico, cada uno de los grupos estator-rotor se los identifica con las letras w,x,y,z; los grupos estator-rotor "w-x" constituye la fase "a" y los grupos "y-z" la fase "b".

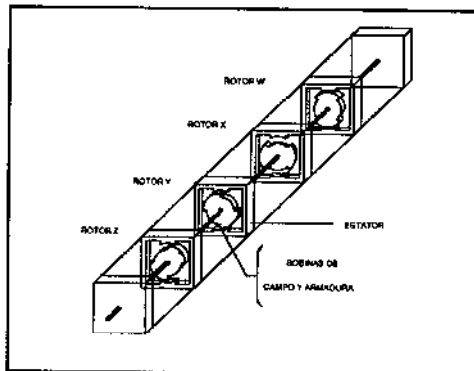


Fig.1 ESTRUCTURA FISICA DEL GENERADOR DE RELUCTANCIA

Entre los grupos "w-x" y "y-z" existe un desfase de 180° eléctricos o 90° mecánicos, esto depende de la posición física de los rotores.

En la figura 2 se presenta el circuito eléctrico equivalente y la posición relativa de los rotores, cada uno de los grupos está constituido por bobinados de campo (exterior) y armadura (interior) y se encuentran ubicados en el estator.

Planteando las ecuaciones voltamperimétricas al circuito de la figura 2, considerando el acoplamiento magnético entre cada una de las fases (a y b) con el primario se tiene:

$$v^p = (R_w^p + R_x^p + R_y^p + R_z^p) i^p + \sum_k \frac{d}{dt} [L_k^{pp}] i^p + \frac{d}{dt} (L_w^{ps} - L_x^{ps}) i_a^s + \frac{d}{dt} (L_y^{ps} - L_z^{ps}) i_b^s \quad (1)$$

$$v_a^s = (R_w^s + R_x^s) i_a^s + \frac{d}{dt} [ (L_x^{ss} + L_w^{ss}) i_a^s ] + \frac{d}{dt} [ (L_w^{ps} - L_x^{ps}) i^p ] \quad (2)$$

$$V_b^s = (R_y^s + R_z^s) i_b^s + \frac{d}{dt} (L_y^{ss} + L_z^{ss}) i_b^s + \frac{d}{dt} (L_y^{ps} - L_z^{ps}) i^p \quad (3)$$

Se puede observar que no existe acoplamiento magnético entre las fases "a" y "b", debido a que están físicamente separadas. Por simplicidad se define las siguientes ecuaciones:

$$R^p = R_u^p + R_v^p + R_y^p + R_z^p \quad (4)$$

$$L^{pp} = L_u^{pp} + L_v^{pp} + L_y^{pp} + L_z^{pp} \quad (5)$$

$$L_a^{aa} = L_u^{aa} - L_v^{aa} \quad (6)$$

$$L_b^{bb} = L_u^{bb} - L_v^{bb} \quad (7)$$

$$R^s = R_u^s + R_v^s + R_y^s + R_z^s \quad (8)$$

$$L_a^{aa} = L_u^{aa} + L_v^{aa} \quad (9)$$

$$L_b^{bb} = L_u^{bb} + L_v^{bb} \quad (10)$$

reemplazando las ecuaciones 4 a 10 en 1 a 3 se tiene:

$$V^p = R^p i^p + \frac{d}{dt} (L^{pp} i^p) + \frac{d}{dt} (L_a^{ps} i_a^s) + \frac{d}{dt} (L_b^{ps} i_b^s) \quad (11)$$

$$V_a^s = R^s i_a^s + \frac{d}{dt} (L_a^{ps} i^p) + \frac{d}{dt} (L_a^{ss} i_a^s) \quad (12)$$

$$V_b^s = R^s i_b^s + \frac{d}{dt} (L_b^{ps} i^p) + \frac{d}{dt} (L_b^{ss} i_b^s) \quad (13)$$

Pero  $\Theta = w t$ , reemplazando en 11 a 13 se tiene:

$$V^p = R^p i^p + w \frac{d}{d\Theta} (L^{pp} i^p) + w \frac{d}{d\Theta} (L_a^{ps} i_a^s) + w \frac{d}{d\Theta} (L_b^{ps} i_b^s) \quad (14)$$

$$V_a^s = R^s i_a^s + w \frac{d}{d\Theta} (L_a^{ps} i^p) + w \frac{d}{d\Theta} (L_a^{ss} i_a^s) \quad (15)$$

$$V_b^s = R^s i_b^s + w \frac{d}{d\Theta} (L_b^{ps} i^p) + w \frac{d}{d\Theta} (L_b^{ss} i_b^s) \quad (16)$$

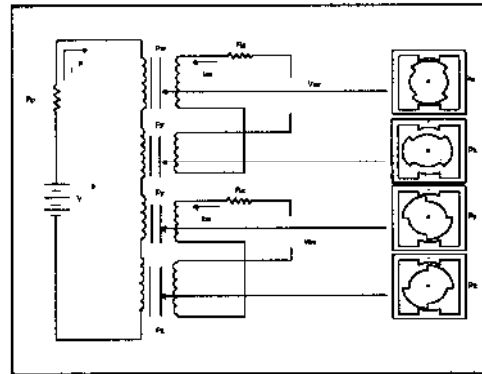


Fig. 2. CIRCUITO ELECTROMAGNETICO Y POSICION FISICA DE LOS ROTORES

Por lo que la matriz de inductancias y resistencias de las ecuaciones 14 a 16 es:

$$[L] = \begin{bmatrix} L^{pp} & L_a^{ps} & L_b^{ps} \\ L_a^{ps} & L_a^{ss} & 0 \\ L_b^{ps} & 0 & L_b^{ss} \end{bmatrix}, [R] = \begin{bmatrix} R^p & 0 & 0 \\ 0 & R^s & 0 \\ 0 & 0 & R^s \end{bmatrix}$$

Como se observa en la matriz de inductancias L el generador tiene una inductancia primaria o de campo  $L^{pp}$ , una inductancia secundaria o de armadura  $L_a^{ss}$  y  $L_b^{ss}$ , una inductancia mutua entre primario y secundario  $L_a^{ps}$ ,  $L_b^{ps}$  pero no existe acoplamiento entre las fases a, b.

Debido a esto:

- $L_a^{aa} = L_b^{bb}$  son términos constantes.
- $L^{pp}$  es término constante.
- $L_a^{ps}$  es función de la posición del rotor y es cosenoidal.
- $L_b^{ps}$  es función de la posición del rotor y es senoidal.

Por lo que se tiene:

$$L_b^{ps} = L_a^{ps}(\Theta - \pi/2)$$

Esto quiere decir que de  $L_a^{ps}$  y  $L_b^{ps}$  depende el voltaje generado como también de las inductancias mutuas; éstas son de tipo trapezoidal como se puede ver en la figura 3.

### 3.- ECUACIONES PARA CADA TIPO DE PRUEBA.

Se plantea las ecuaciones voltamperimétricas en el circuito de la figura 2, considerando que a los terminales de armadura se tiene conectada el tipo de carga a analizar, para el efecto se desarrolla las ecuaciones para carga inductiva.

$$V_a^s = R^s i_a^s + w \frac{d}{d\Theta} (L_a^{ps} i^p) + w \frac{d}{d\Theta} (L_a^{ss} i_a^s)$$

pero:

$$V_a^s = -wL \frac{d}{d\Theta} i_a^s$$

por lo que:

$$V_a^s = -wL \frac{d}{dt} i_a^s - R^s i_a^s + w \frac{d}{dt} (L_a^s i_a^s) + w \frac{d}{dt} (L_a^s i_a^s)$$

despejando y dividiendo para  $w(L+L_a^s)$  se tiene:

$$-\frac{d}{dt} i_a^s - \frac{R^s}{w(L+L_a^s)} i_a^s = \frac{1}{L+L_a^s} \frac{d}{dt} L_a^s i_a^s$$

si:

$$d/d\theta i_a^s = y'$$

por lo que:

$$y' + Ay = +B \text{ sen } n\theta$$

donde:

$$A = R^s / [w(L+L_a^s)]; \quad B = I^p n a_n / (L+L_a^s)$$

La cual es una ecuación diferencial lineal de primer orden y tiene por solución:

$$y = [B/(A^2+n^2)] * (A \text{ sen } n\theta - n \text{ cos } n\theta)$$

reemplazando y simplificando se tiene:

$$i_a^s = \frac{I^p n w a_n * [R^s \text{ sen } n\theta - n w (L_a^s + L) \text{ cos } n\theta]}{R^{s^2} + [n w (L_a^s + L)]^2}$$

por lo que:

$$\frac{d}{dt} i_a^s = \frac{I^p n^2 w a_n * [R^s \text{ cos } n\theta + n w (L_a^s + L) \text{ sin } n\theta]}{R^{s^2} + [n w (L_a^s + L)]^2}$$

reemplazando se tiene:

$$V_a^s = \frac{L I^p n^2 w^2 a_n * [R^s \text{ cos } n\theta + n w (L_a^s + L) \text{ sin } n\theta]}{R^{s^2} + [n w (L_a^s + L)]^2}$$

A continuación se presenta un resumen de las ecuaciones para los distintos tipos de carga.

### 3.1 CASO VACIO

$$V_a^s = -I^p w \sum_{n=1}^{\infty} n a_n \text{ sin } n\theta$$

### 3.2 CASO CORTOCIRCUITO

$$i_a^s(\theta) = \frac{I^p w n a_n * (R^s \text{ sin } n\theta - n w L_a^s \text{ cos } n\theta)}{R^{s^2} + (n w L_a^s)^2}$$

### 3.3 CASO RESISTIVO

$$i_a^s = \frac{(I^p w n a_n) + [(R^s R^s) \text{ sin } n\theta - n w L_a^s \text{ cos } n\theta]}{(R^s R^s)^2 + (n w L_a^s)^2}$$

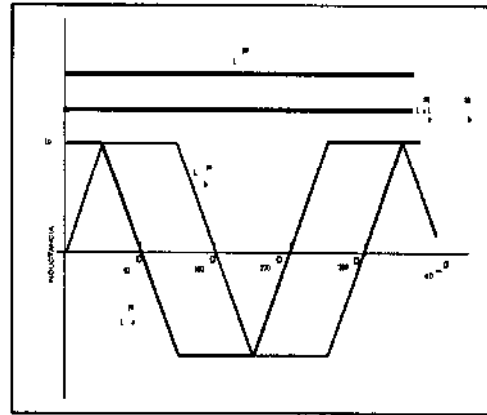


FIGURA 3. CARACTERISTICA DE LA INDUCTANCIA EN FUNCION DE LA POSICION DEL ROTOR

$$V_a^s = \frac{I^p w n R a_n * [(R^s R^s) \text{ sin } n\theta - n w L_a^s \text{ cos } n\theta]}{(R^s R^s)^2 + (n w L_a^s)^2}$$

### 3.4 CASO INDUCTIVO

$$i_a^s = \frac{I^p n w a_n * [R^s \text{ sin } n\theta - n w (L_a^s + L) \text{ cos } n\theta]}{R^{s^2} + [n w (L_a^s + L)]^2}$$

$$V_a^s = \frac{L I^p n^2 w^2 a_n * [R^s \text{ cos } n\theta + n w (L_a^s + L) \text{ sin } n\theta]}{R^{s^2} + [n w (L_a^s + L)]^2}$$

### 3.5 CASO CAPACITIVO

$$i_a^s = \frac{C [n A \text{ sin } n\theta + (B - n^2) \text{ cos } n\theta]}{A^2 n^2 + (B - n^2)^2}$$

$$V_a^s = -C [ -n A \text{ cos } n\theta + (B - n^2) \text{ sen } n\theta ] / [w C n [A^2 n^2 + (B - n^2)^2]]$$

donde:

$$A = \frac{R^s}{w L_a^s} \quad B = \frac{1}{w^2 C L_a^s} \quad C = \frac{n^2 a_n I^p}{L_a^s}$$

### 3.6 CASO R-L

$$i_a^s = \frac{I^p n w a_n * [(R^s R^s) \text{ sin } n\theta - n w (L_a^s + L) \text{ cos } n\theta]}{(R^s R^s)^2 + (n w (L_a^s + L))^2}$$

$$v_s = \frac{[I^2 \omega n a_p A] \cdot [(R \cdot A^2) \sin n\theta \cdot n \omega (L_s^* - L)] \cos n\theta}{(R \cdot A^2)^2 + [n \omega (L_s^* - L)]^2}$$

$$\frac{[I^2 \omega^2 n^2 a_p L] \cdot [(R \cdot A^2) \cos n\theta \cdot n \omega (L_s^* - L) \sin n\theta]}{(R \cdot A^2)^2 + [n \omega (L_s^* - L)]^2}$$

3.7 CASO R-C

$$i_s = \frac{G [n A \sin n\theta + (B - n^2) \cos n\theta]}{A^2 n^2 + (B - n^2)^2}$$

$$v_s = G \frac{[R \omega C n^2 A \cdot (B - n^2) \sin n\theta + [R \omega C n (B - n^2) - n A \cos n\theta]}{\omega C n [A^2 n^2 + (B - n^2)^2]}$$

donde:

$$A = \frac{(R \cdot A^2)}{\omega L_s^{ss}} \quad B = \frac{1}{\omega^2 C L_s^{ss}} \quad G = \frac{n^2 a_p I^2 P}{L_s^{ss}}$$

3.8 CASO L-C

$$i_s = \frac{G [n A \sin n\theta + (B - n^2) \cos n\theta]}{A^2 n^2 + (B - n^2)^2}$$

$$v_s = G \frac{[B - n^2] (1 - n^2 C L \omega^2) \sin n\theta + A n (n^2 L \omega^2 C - 1) \cos n\theta}{\omega C n [A^2 n^2 + (B - n^2)^2]}$$

donde:

$$A = \frac{R^2}{\omega (L + L_b^{ss})} \quad B = \frac{1}{\omega^2 C (L + L_b^{ss})} \quad G = \frac{n^2 a_p I^2 P}{(L + L_b^{ss})}$$

3.9 CASO R-L-C

$$i_s = \frac{G [n A \sin n\theta + (B - n^2) \cos n\theta]}{A^2 n^2 + (B - n^2)^2}$$

$$v_s = G \left[ \frac{[R \omega C n^2 A \cdot (B - n^2) (1 - L \omega^2 C n^2)] \sin n\theta}{\omega C n [A^2 n^2 + (B - n^2)^2]} + \right.$$

$$\left. - G \left[ \frac{[R \omega C n (B - n^2) + A n (L \omega^2 C n^2 - 1)] \cos n\theta}{\omega C n [A^2 n^2 + (B - n^2)^2]} \right] \right.$$

donde:

$$A = \frac{(R \cdot A^2)}{\omega (L + L_b^{ss})} \quad B = \frac{1}{\omega^2 C (L + L_b^{ss})} \quad G = \frac{n^2 a_p I^2 P}{(L + L_b^{ss})}$$

y

$$a_n = \frac{8 L_o}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cdot (\cos n \frac{\pi}{4} - \cos 3 n \frac{\pi}{4})$$

Como se observa las ecuaciones dependen exclusivamente de n y L<sub>o</sub>, donde:

n es el número de términos a analizar, el cual tiene dependencia con los armónicos que presenta la máquina.

L<sub>o</sub> es el acoplamiento existente entre campo y armadura, el cual depende de las dimensiones físicas de la máquina y del número de vueltas de los bobinados de campo y armadura a saber:

$$L_o = L_a^{ps} - L_b^{ps} = \frac{N^p \cdot N^s}{R^{ps}}$$

donde:

N<sup>p</sup> es el número de vueltas del primario (campo)  
N<sup>s</sup> es el número de vueltas del secundario (armadura)

R<sup>ps</sup> es la reluctancia que presenta el generador y se define

por:

$$R^{ps} = \frac{g}{\mu_o A}$$

donde:

g es el entrehierro entre rotor y estator (m)  
A es el área común entre rotor y estator (m)  
μ<sub>o</sub> es la permeabilidad de vacío.  
donde :  
A = a<sub>o</sub> · L :

En la figura se presenta las dimensiones para dicho cálculo; por medio de deducciones geométricas se tiene:

$$a_o = d \arcsin \left( \frac{S}{d} \right)$$

4.- ECUACION DEL TORQUE ELECTROMAGNETICO

El torque electromagnético obedece a un proceso de conversión de energía mecánica recibido en el eje de la máquina transformando en energía eléctrica a terminales del generador, por efecto de la variación de la energía de campo magnética originada en la variación de la reluctancia magnética.

Debido a que la posición del rotor varía, la inductancia y las concatenaciones de flujo en la máquina también lo hacen, esto hace que cambie el torque, debido a la energía magnética que adquieren los bobinados, y la energía propia de las inductancias de la máquina.

La energía en los bobinados por lo tanto estará íntimamente ligada con la corriente y la variación de la inductancia, por lo que variará con respecto a la posición del rotor.

La ecuación del torque se presenta a continuación:

$$T = - \frac{\partial W_m}{\partial \theta} = i \frac{\partial \psi}{\partial \theta}$$

donde  $W_m$  es la energía magnética debido a los bobinados de la máquina y es igual a:

$$W_m = \frac{1}{2} i^2 L \quad (17)$$

$\psi$  son las concatenaciones de flujo que es igual a:

$$\psi = i L \quad (18)$$

donde:

$\Theta$  es el desplazamiento angular del rotor con respecto al estator,  $L$  es la inductancia en función de la variación del tiempo o de la posición del rotor.

reemplazando (18) y (19) en (17) se tiene:

$$T = -\frac{1}{2} \frac{\partial i^2 L}{\partial \Theta} - \frac{\partial i^2 L}{\partial \Theta} \quad (20)$$

Robteniendo las derivadas parciales de (20) se obtiene:

$$T = -\frac{1}{2} (2iL \frac{\partial i}{\partial \Theta} + i^2 \frac{\partial L}{\partial \Theta}) - i^2 \frac{\partial L}{\partial \Theta} + Li \frac{\partial i}{\partial \Theta} \quad (21)$$

simplificando:

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial \Theta}$$

exclusivamente de la variación de la inductancia con respecto a la posición del rotor.

En la ecuación (22) se observa que el torque depende

Multiplcanda y dividiendo por  $dt$  en (22) y ordenando se tiene:

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial \Theta}{\partial t} \quad (23)$$

pero  $d\Theta/dt = 2\pi W_n$

donde  $W_n$  es la velocidad del rotor en rev/seg. sustituyendo en (23) se obtiene:

$$T = \frac{1}{4\pi W_n} i^2 \frac{\partial L}{\partial t} \quad (24)$$

En esta ecuación se ve la influencia de la variación de la inductancia con respecto al tiempo, la dependencia de la velocidad del rotor, la influencia en el torque de la corriente de los bobinados.

### 5.- DESCRIPCION GENERAL DEL PROGRAMA

Para la simulación digital de la máquina de reluctancia funcionando como generador y motor se seleccionó por su versatilidad el paquete computacional MATLAB, aplicando a las ecuaciones planteadas anteriormente.

El programa viene en un diskette de 3 1/2" de alta densidad, posee un archivo llamado "RELUC" y bajo ésta mismo nombre

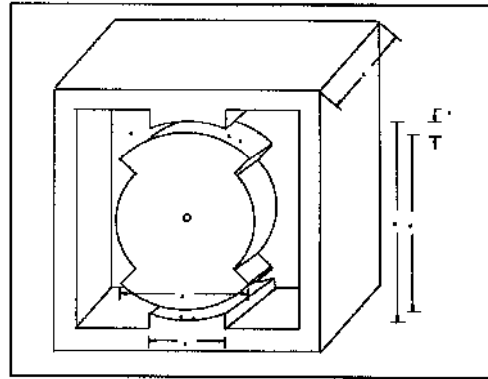


FIGURA 4. OBTENCION DE  $L_{\theta}$  A PARTIR DE LAS DIMENSIONES DEL GENERADO

corre el programa para la simulación. El programa necesita de coprocesador matemático para trabajar, o algún tipo de emulador, el que verifica el programa, si no se dispone digitar "EMBT/L", se necesita como mínimo de 640 Kb de memoria RAM, al programa es ejecutado en una PC/IBM o compatibles.

Una vez cargado "RELUC", se carga el graficador del DOS el que sirve para imprimir los gráficos con Print Screen, y luego carga al programa MATLAB, que es el programa básico para la simulación.

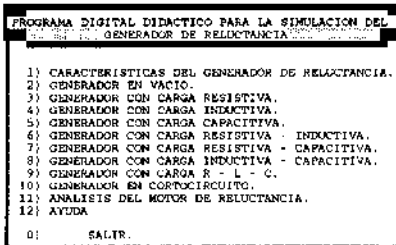
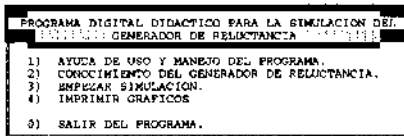
Posteriormente del ingreso al programa de simulación aparece una pantalla de presentación del trabajo y espera 10 seg para continuar, y luego se tiene una pantalla con las opciones de:

- Ayuda de uso y manejo del programa, el cual da información de este con mayor énfasis y posibles cambios en la estructura de gráficos que se desee hacer posteriormente.
- Conocimiento del generador de reluctancia, realiza un resumen del principio de funcionamiento de la máquina como de su estructura.
- Empezar simulación, tiene varios temas a tratar como son el análisis del generador en cortocircuito, vacío, como motor y todas las combinaciones de carga R,L,C, como también las características básicas de funcionamiento por efecto de las inductancias de campo y armadura dadas por el número de espiras de las bobinas, lo que influye notablemente en el acoplamiento entre campo y armadura.

A estos subprogramas se entra con el número indicado y se introduce los datos de la máquina en valores reales.

- Imprimir gráficos, el programa genera los gráficos con la extensión ".MET" que pueden ser impresos fuera del programa si se tiene un computador XT ó AT con pantalla monocromática, caso contrario basta con presionar "Print Screen" o a su vez si se desea mayor calidad de gráficos se puede pasar a la opción de imprimir gráficos, los que se imprimirán una vez realizada la(s) simulación (es) y posteriormente se borrarán.

Cabe mencionar que los gráficos se van almacenado en forma seriada es decir en orden de creación, y de igual manera serán impresos.



Para salir tanto de los subprogramas como del programa general se presiona el número cero y luego aparece el símbolo "x" el que representa el programa matlab y para salir de este se digita "quit" o se presiona "Ctrl Z" y sale al DOS del computador.

El programa consta de archivos del tipo "nombre .m" donde nombre toma los distintos casos a analizar, y son los subprogramas de análisis de la máquina de reluctancia, estos archivos son llamados por el programa MATLAB el instante en que se ejecuta y encuentra en nombre.

Posee archivos "gnombre.m" que son los comandos para la impresión de gráficos de alta calidad, creados anteriormente, los que pueden ser impresos exclusivamente aquellas computadoras que poseen monitores a colores; caso contrario se dispone de archivos del tipo "nombre.bat" los que se ejecutan desde el directorio RELUC de acuerdo a la tabla que se da en el programa, estos gráficos tienen la característica de borrador, pero pueden ser cambiado al tipo calidad final si se cambia "depsd" por "depsf". El programa es totalmente iterativo y realiza la suma de "n" términos para lo que en el programa crea matrices de ceros en el que se almacena los resultados de los gráficos, con esto se saca los valores máximos, mínimos, medios, por el subprograma "MEAN.M".

Posee varios archivos complementarios básicos propios del paquete matlab como son:

CHKLIST.CPS; GAEPSON.COM; G P P . E X E ;  
 GRAFTABL.COM; GRAPHICS.COM; HGC.DRV;  
 MATLAB.BAT; MATLAB.HPL PCMATLAB.OVL;  
 EM87.COM; GRAPH.BAT; GRAPHICS.PRO;  
 PCMATLAB.EXE.

Todo archivo con extensión ".M" es ejecutable en matlab y puede ser llamado con el nombre si se está en la condición "x" de matlab por ejemplo:

La simulación de vacío tiene el archivo "FVACIO.M" y de acuerdo al menú para ejecutar se realiza presionando "3" o puede digitar "fvacio" desde el menú o desde matlab propiamente, en caso que se salga por alguna falla a matlab.

Otro tipo de archivos con extensión .m son llamados como subrutinas al programa RELUC, si se ejecutan en matlab obtendrá error, éstos realizan cálculos de integrales, derivadas, datos típicos, presentación de logotipos, resultados y datos.

Posee archivos bajo distintos nombres, con la extensión .bat los

que son los archivos para impresión de gráficos en computadores con pantalla monocromática.

En términos generales los resultados obtenidos tanto del programa como de laboratorio son satisfactorios, ciertas variaciones del programa se considera debido a los siguientes tópicos:

- 1.- Resistencias e inductancias diferentes en la construcción del generador ( no simétricas).
- 2.- Limitación de instrumentos adecuados para medir tanto los voltajes y corrientes con el verdadero valor RMS debido a la forma de onda propia de cada uno de los casos analizados en laboratorio, datos que sirven para la simulación.
- 3.- De acuerdo a las ecuaciones presentadas anteriormente depende mucho la forma de onda, del sumatorio de los términos enésimos, para lo cual se ajusta el programa para  $n=10$  dando resultados considerablemente buenos.
- 4.- Se presenta las características del generador de reluctancia y el número de términos para analizar (pasos de integración), este efecto influye en los valores de las inductancias del generador.
- 5.- En el programa se pide el número de vueltas tanto para el campo como para la armadura, los que dan una aproximación de las inductancias de armadura, que es lo que se necesita para realizar la simulación en cada caso.
- 6.- Se observa en cargas tipo inductivas que se produce diferentes formas de onda como de magnitudes por fase y se producen estas por la deficiencia del acoplamiento entre campo y armadura y posiblemente al flujo magnético generado pero no aprovechado totalmente por efecto de los rotores que por su construcción no son prácticamente idénticos como se esperaría.
- 7.- Para carga LC se observa formas de onda triangulares, tendiendo a ser sinusoidales, este efecto se da por un predominio de la carga capacitiva frente a la inductiva, tanto de la carga como de la máquina. Presenta variaciones en las formas de onda de corrientes y voltajes debido a una inestabilidad para este tipo de carga.
- 8.- En carga RLC se observa variaciones de corriente y voltaje por fase, debido a que las impedancias de los bobinados de armadura tratan en mayor o menor forma de anularse ( $X_L - X_C = 0$ ) con las cargas, como no se lo logra totalmente se logra totalmente esta variación.

A continuación se presenta resultados experimentales obtenidos en laboratorio para distintos tipos de carga, velocidad, y corriente de campo, como también aquellos obtenidos de la simulación digital.

| DATOS DE ANALISIS PARA CARGA RESISTIVA |               |
|--|---------------|
| Isen                                   | = 0.553 A     |
| Isen                                   | = 0.259 A     |
| Isa                                    | = 0.00702 A   |
| Isb                                    | = 10.5 A      |
| Is                                     | = 2.4 A       |
| velocidad del motor                    | = 1800 r.p.m. |
| numero de polos                        | = 2           |
| frecuencia de excitacion               | = 50 Hz       |
| fs                                     | = 0.1         |
| fsb                                    | = 0.0973      |

INDICENTE DE DESARROLLO

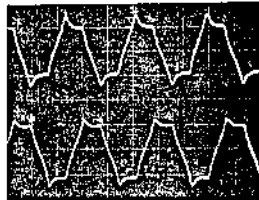


Figura Nº 5 Gen. en Cortocircuito

| DATOS DE ANALISIS PARA CARGA RESISTIVA |               |
|--|---------------|
| Isen                                   | = 0.257 A     |
| Isen                                   | = 0.259 A     |
| Isa                                    | = 0.00695 A   |
| Isb                                    | = 10.5 A      |
| Is                                     | = 2.4 A       |
| velocidad del motor                    | = 1800 r.p.m. |
| numero de polos                        | = 2           |
| frecuencia de excitacion               | = 50 Hz       |
| fs                                     | = 0.1         |
| fsb                                    | = 0.0973      |

INDICENTE DE DESARROLLO

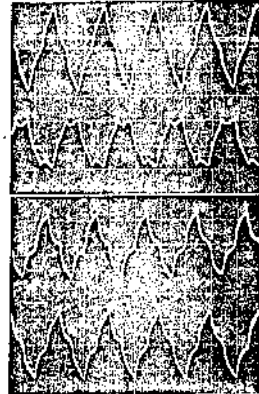


Figura Nº 7 Gen. Carga Resistiva

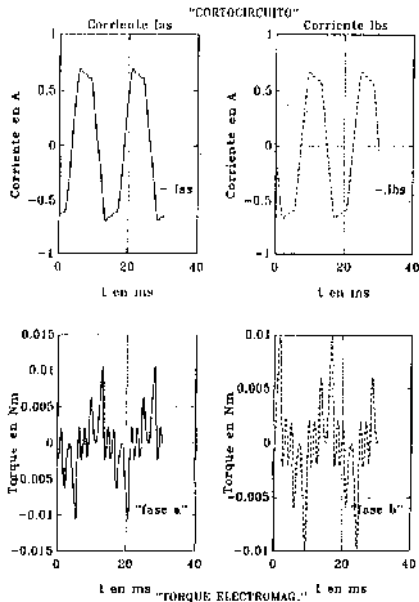


Fig. Nº 5 Simulación en Cortocircuito

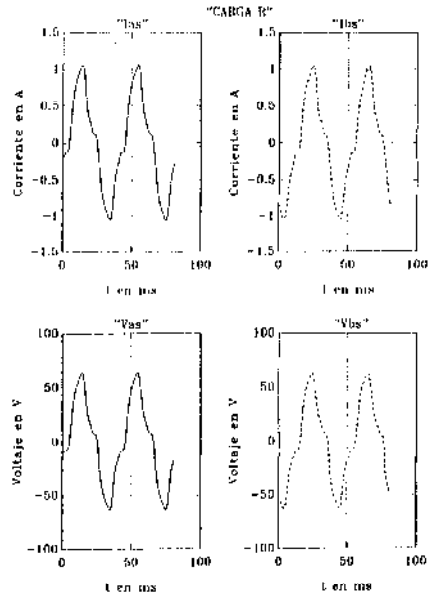


Figura Nº 8 Simulación Carga Resistiva

INDICE DE ANALISIS PARA CARGA INDUCTIVA

$I_{rms} = 0.254 \text{ A}$   
 $I_{peak} = 0.254 \text{ A}$   
 $I_{avg} = 0.00000 \text{ A}$   
 $eb = 30.5 \text{ u}$   
 $LE = 4 \text{ A}$   
 velocidad del mouse = 1000 x p.p.s.  
 tamaño de pantalla = 0  
 frecuencia de muestreo = 100 Hz.  
 $t_{carga} = 0.5 \text{ ms}$   
 $f_{pico} = 50.00000$   
 $f_{fwhm} = 0.00000$

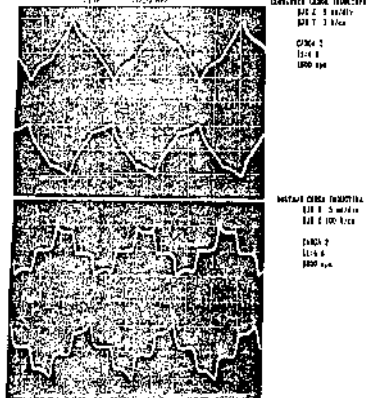


Figura N°9 Gen. Carga Inductiva

INDICE DE ANALISIS PARA CARGA CAPACITIVA

$I_{rms} = 0.254 \text{ A}$   
 $I_{peak} = 0.254 \text{ A}$   
 $I_{avg} = 0.00000 \text{ A}$   
 $eb = 30.5 \text{ u}$   
 $LE = 2.0 \text{ A}$   
 velocidad del mouse = 1000 x p.p.s.  
 tamaño de pantalla = 0  
 frecuencia de muestreo = 50 Hz.  
 $t_{carga} = 0.5 \text{ ms}$   
 $f_{pico} = 0.186$   
 $f_{fwhm} = 0.176$

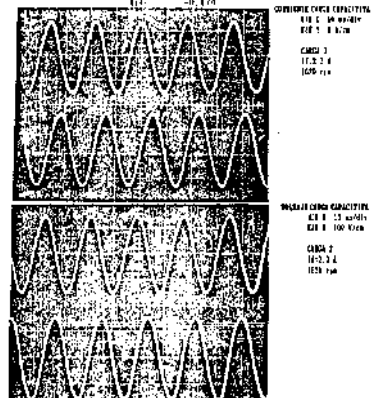


Figura N°11 Gen. Carga Capacitiva

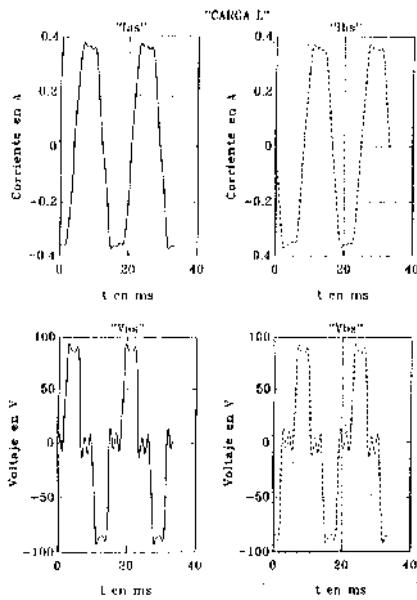


Figura N°10 Simulación Carga Inductiva

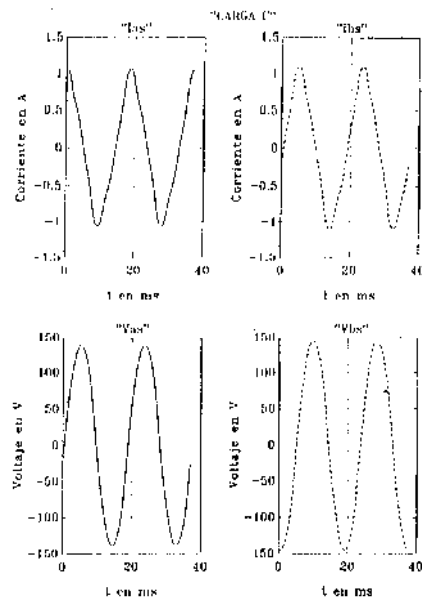


Figura N°12 Simulación Carga Capacitiva



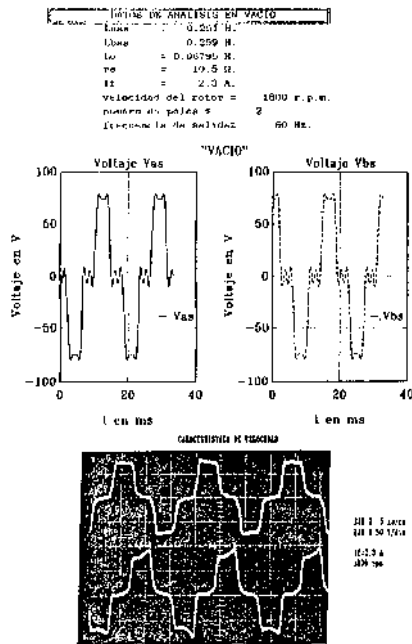


Figura Nº 13 Gen. y Simulación en Vacío

**CONCLUSIONES**

De acuerdo a las ecuaciones encontradas la generación de voltaje depende exclusivamente de la inductancia de acoplamiento entre campo y armadura. La reluctancia está directamente relacionada con el número de vueltas que tenga los bobinados de campo y armadura e inversamente a la inductancia de estos. La posición de los bobinados de campo y armadura deben ser colocados adecuadamente, es decir la armadura internamente y el campo exteriormente. El voltaje generado como la frecuencia son directamente proporcionales a la velocidad, como a la corriente de campo. Para cargas resistivas e inductivas se presenta un flujo desmagnetizante en cambio para cargas de capacitivas es magnetizante. La regulación de voltaje es mala, este efecto se debe a la presencia del campo desmagnetizante que se presenta en el eje magnético del flujo principal (efecto reacción de armadura). El torque electromagnético es inversamente proporcional a la velocidad del rotor. El rendimiento es bajo del 60%, se pueda mejorar si la resistencia de campo y armadura es baja. El desfase entre fases depende de la posición física relativa de los rotores.

**REFERENCIAS**

- [1] KOCH W.H.,NASAR S.A., "A New Two- Phase Reluctance Generator For Dc Loads", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, No.5 September/October 1974.
- [2] KOCH W.H.,NASAR S.A., "Reluctance DC Generator With Feedback and Dampner Loop for Output Enhancement", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94, No.6, November/December 1975.
- [3] UNNEWEHR L.E., KOCH W.H. "A Axial Air-Gap Reluctance Motor for Variable Speed Applications", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS No. , 1973.
- [4] ONG C.M.,LIPO T.A. "Steady-State Analysis of a Current Source Inverter/Reluctance Motor Drive Part I : Analysis", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96 No. 4, July/ Augus, 1977.
- [5] TOINGA V.F., "Prototipo de un Generador de Reluctancia", EPN, Quito 1985.

**BIOGRAFIA**

**ING. LUDWING RAMIREZ P.**

Nació en Quito el 22 de Junio de 1962. Obtuvo el título de Bachiller en Humanidades Modernas, en las especializaciones de físico - Matemático, Químico-Biologo en el Instituto Nacional Mejía. Sus estudios superiores los realizó en la Escuela Politécnica Nacional, obteniendo el Título de Ingeniero en Sistemas Eléctricos de Potencia en 1983. Actualmente presta sus servicios en PETROPRODUCCION, Distrito Oriente en el campo, Shushufindi en el Departamento de Turbinas, en calidad de Técnico en Mantenimiento.

**ING. LUIS TACO V.**

Nació en Ambato el 25 de Marzo de 1946. Obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico, en la Escuela Politécnica Nacional en Diciembre de 1975. Desde el año 1973 ha laborado en el Departamento de Potencia de la EPN, donde actualmete es Profesor Principal a tiempo completo.

