

# Generador de Inducción Auto-excitado

En el presente artículo se analiza el comportamiento de tensión, frecuencia y potencia de un generador de inducción como parte de la investigación sobre Aerogeneración que se viene adelantando en la Universidad Nacional.

**HORACIO TORRES S.**  
Ingeniero Electricista  
Profesor, Universidad Nacional  
**ALVARO ANTONIO ALARCON ALARCON**  
Estudiante

## JUSTIFICACION DE LA ESCOGENCIA DEL TIPO DE GENERADOR

Teniendo en cuenta el desarrollo de la industria eléctrica nacional, el diseño del generador debe realizarse de acuerdo con los alcances de aquella, para no entrar en contradicción con la factibilidad de construcción.

Es así como una empresa multinacional alemana, ofreció su colaboración para la construcción del generador, y decidimos, de común acuerdo, partir de un motor asíncrono, jaula de ardilla, cuyas especificaciones físicas permiten un máximo de seis (6) polos para un mínimo de velocidad síncrona de 1200 RPM.

## CIRCUITO EQUIVALENTE DE DOXEY<sup>5</sup>

Para comprobar toda la teoría existente sobre el generador de inducción autoexcitado, se realizaron en los laboratorios de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional una serie de pruebas, partiendo de un motor de inducción, jaula de ardilla trifásico cuyos datos nominales son: 1 HP, 220 V, 3.6 A y 4 polos. Los parámetros de este motor fueron hallados a partir de las pruebas de vacío y de rotor frenado dando los siguientes valores:

$$\begin{aligned} r_1 &= 3.05 \text{ OHM} & r_2 &= 0.962 \text{ OHM} \\ X_1 &= 2.50 \text{ OHM} & X_2 &= 2.50 \text{ OHM} \\ & & R_0 &= 85.56 \text{ OHM} \\ X_0 &= 41.50 \text{ OHM} \end{aligned}$$

## EL FENOMENO DE AUTO-EXCITACION

Considérese el motor con las características ya citadas en cuyos terminales se le acopla un banco de condensadores de reactancia  $X_c$  por fase. La figura 2.1-1 muestra la curva de magnetización (en vacío)-curva necesaria para el análisis del funcionamiento de la máquina, ya que ella como generador auto-excitado no trabaja en un solo punto de su característica de magnetización, como veremos más adelante—, y una recta que representa la reactancia capacitiva  $X_c$ . Al accionar el eje de la máquina a una rotación constante, en vacío, el flujo residual existente en el material magnético provocará la inducción de una tensión de pequeña amplitud en los terminales de la máquina. Esta tensión hará circular una corriente en el circuito formado por los condensadores y los arrollamientos del estator; esta corriente producirá un flujo de reacción de armadura que se sumará al flujo residual. El crecimiento en el flujo hará aumentar la tensión

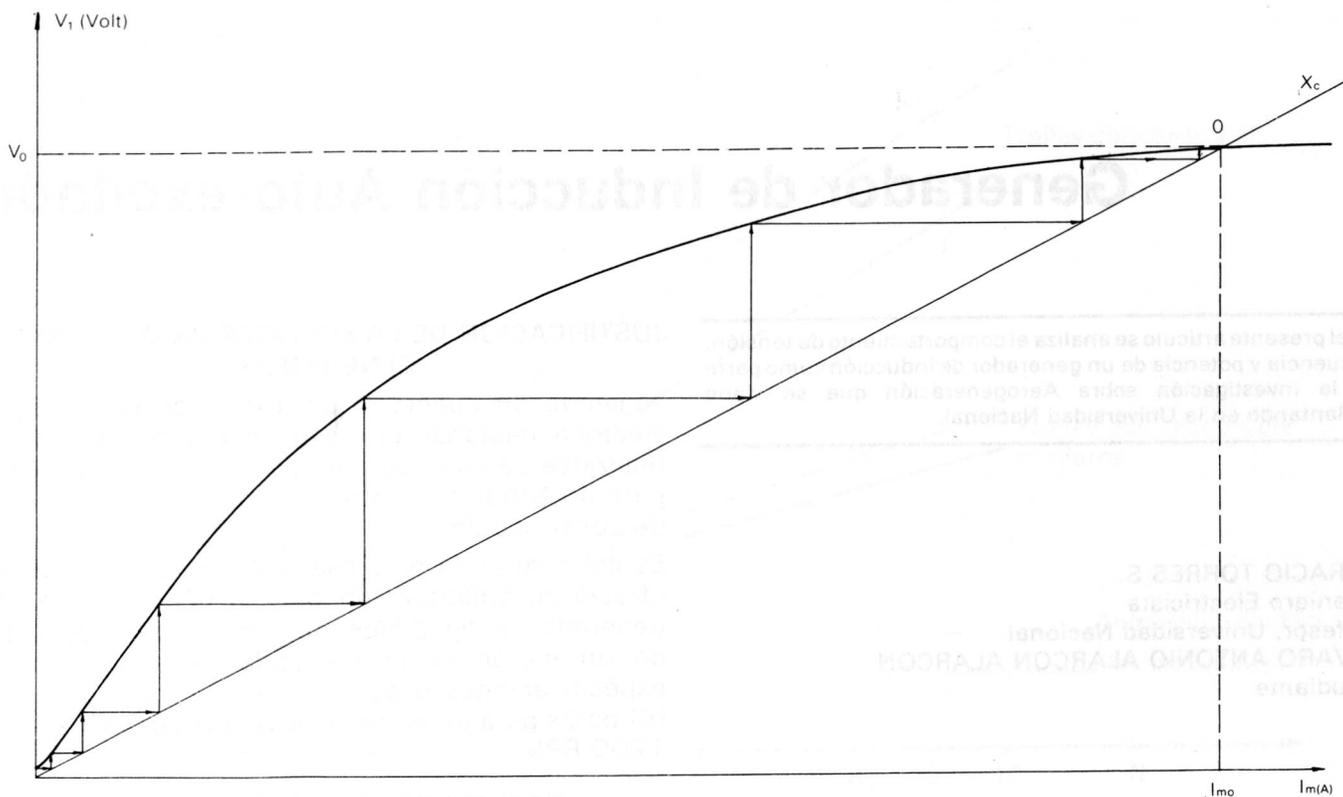
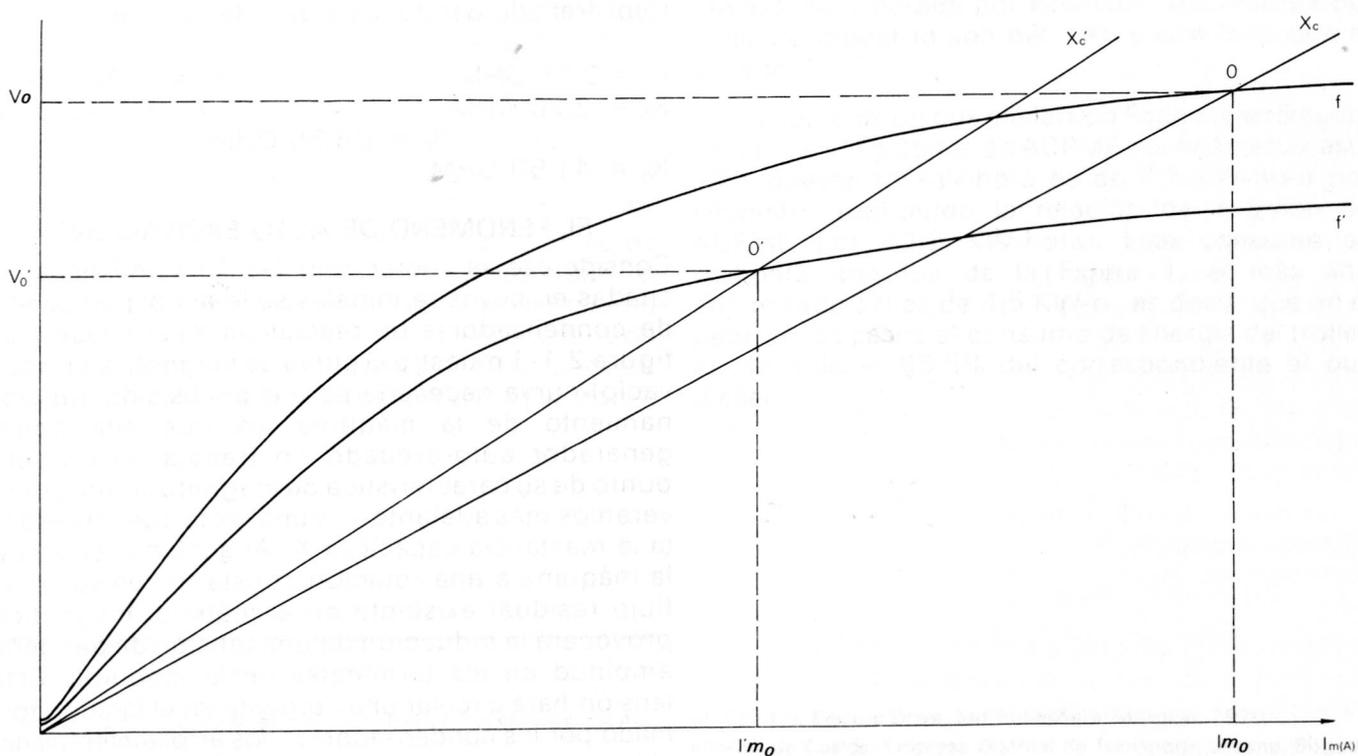


FIGURA 2. 1-1 Auto-exitación del generador de inducción.

inducida, la cual a su vez aumentará la corriente y así sucesivamente, mediante un proceso bastante semejante al que sucede en los motores de corriente continua en derivación (SHUNT). El

proceso continúa hasta llegar al punto de equilibrio "O" mostrado en la figura 2.1-1. Se puede verificar, para una velocidad de rotación dada del eje, que si no hay intersección bien



definida, entre la curva de vacío y la reactancia  $X_c = 1/2\pi fC$ , no sucederá la auto-excitación. Si se varía la velocidad de rotación, variará la frecuencia y, así mismo su punto de operación, como lo indica la figura 2.1-2.

**OPERACION EN CARGA**

La conversión de potencia mecánica en potencia eléctrica activa es realizada, en las máquinas de inducción, a través del deslizamiento de los campos giratorios del rotor y del estator, definido por:

$$S = (n_s - n)/n_s \quad 2.2-1$$

Cuando la máquina está en vacío ( $n_s \cong n$ ); la velocidad de sincronismo es aproximadamente igual a la velocidad de rotación del eje; en carga (S O), la velocidad síncrona depende de la velocidad de rotación del eje, del deslizamiento S y de la carga.

Si hay demanda de potencia reactiva por parte de la carga, esta tendrá que ser suplida por los condensadores.

**CÍRCUITO EQUIVALENTE**

La figura 2.3-1 muestra el circuito equivalente clásico de la máquina de inducción, en el cual se

han referido los elementos  $R_0$  y  $X_0$  a los terminales primarios. La ilustración 2.3-2 muestra el circuito equivalente de la figura 2.3-1 ampliado para representar al generador de inducción auto-excitado, con una carga inductiva ( $X_L$  y  $R_L$  en paralelo). El modelo de DOXEY /2/ parte del principio de la conservación de la energía, aplicado al balance de potencias activas. La potencia mecánica de entrada, descontadas las pérdidas por fricción y ventilación, es numéricamente igual a la potencia eléctrica de entrada en el circuito equivalente. Esta potencia sumada a la que se disipa en los diversos elementos del circuito debe ser nula. Por tanto:

Dividiendo la ecuación anterior por y recordando que resulta:

$$I_2^2 r_2 \left( \frac{1-S}{S} \right) + I_2^2 r_2 + I_2^2 r_1 + \frac{V_1^2}{R_0} + \frac{V_1^2}{R_L} \quad 2.3-1$$

Dividiendo la ecuación anterior por  $I_2^2$ :

$$\frac{(r_2 + r_1)^2 + (r_2 + r_1)R_{eq} + X_t^2}{S} = 0 \quad 2.3-2$$

donde:  $1/R_{eq} = 1/R_0 + 1/R_L$  (a) 2.3-3  
 $X_t = X_1 + X_2$  (b)

La resolución de la ecuación 2.3-2 ofrece el valor

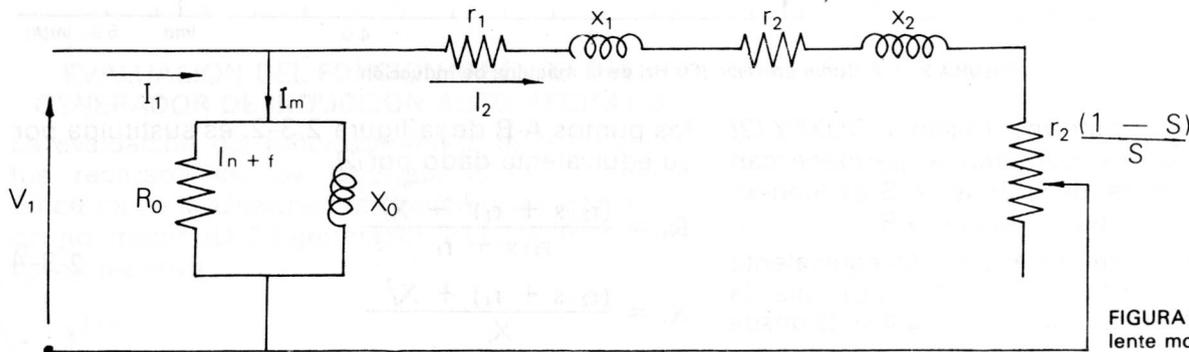


FIGURA 2.3-3. Circuito equivalente modificado según Doxey.

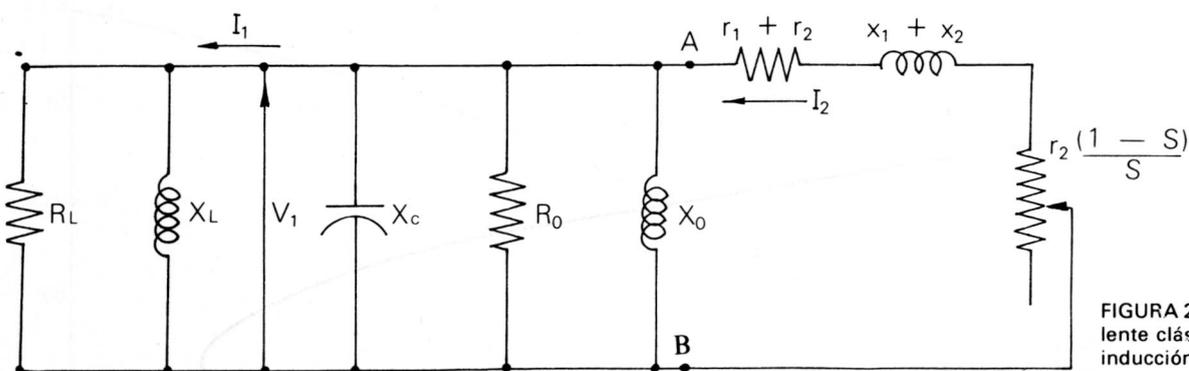


FIGURA 2.3-1. Circuito equivalente clásico de la máquina de inducción.

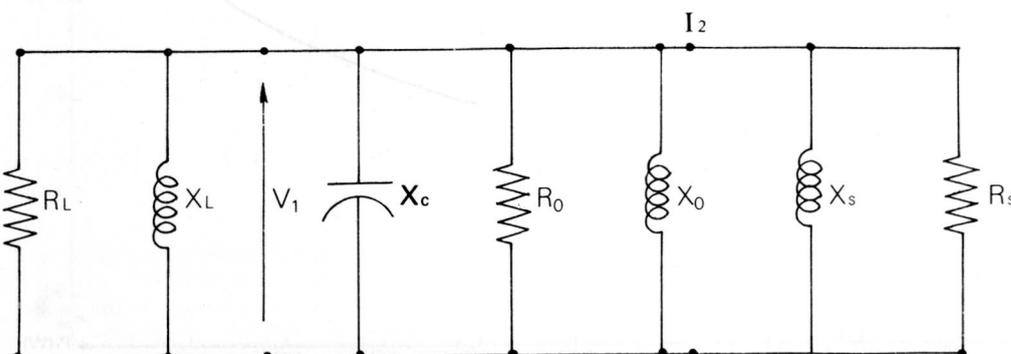


FIGURA 2.3-2. Circuito equivalente del generador de inducción auto-excitado.

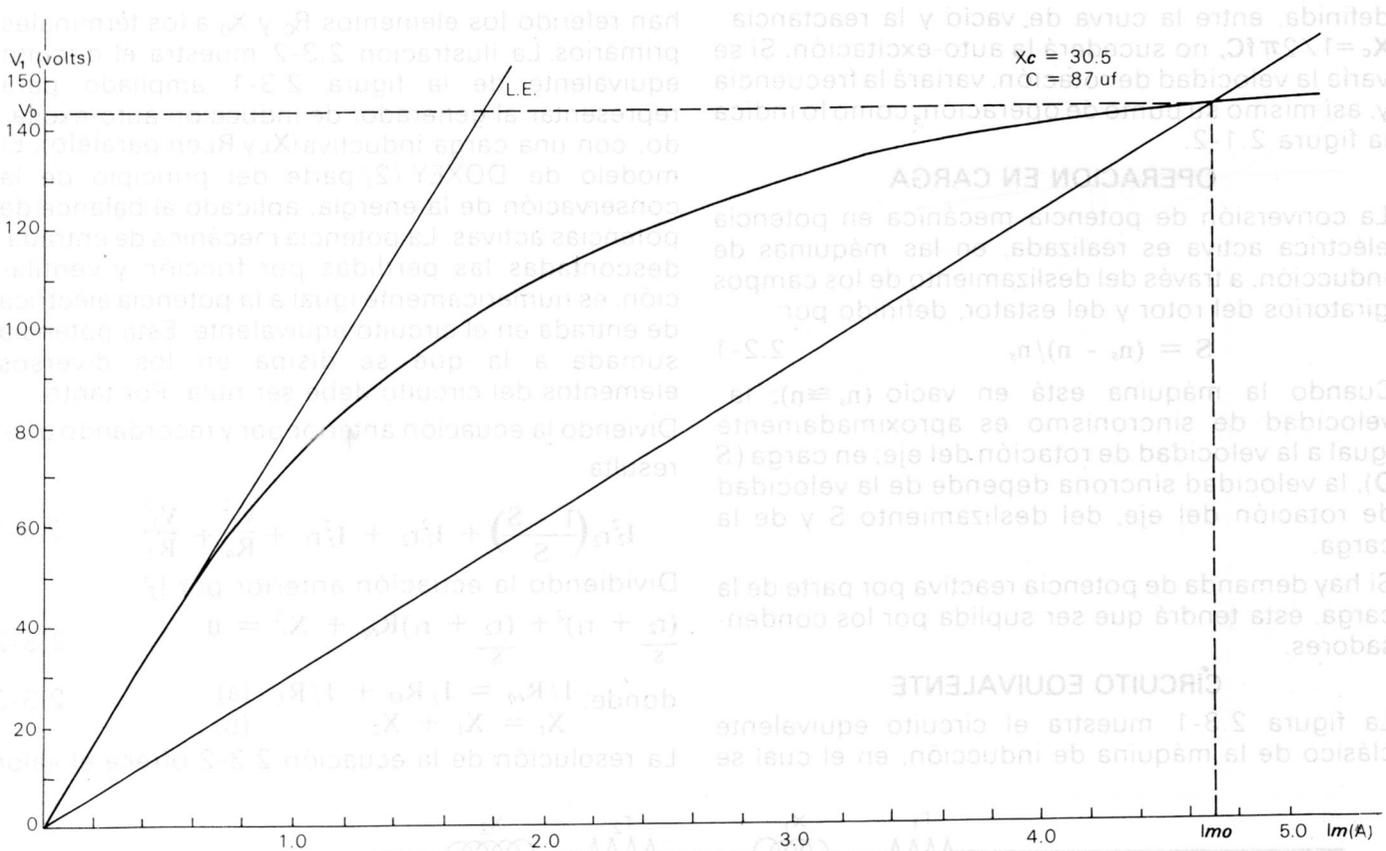


FIGURA 3. 1-1. Curva en vacío (60 Hz) de la máquina de inducción.

del deslizamiento. Conforme observa DOXEY /2/ admitiéndose que los parámetros permanezcan constantes, el valor del deslizamiento **S** es función de la componente activa de la carga **R<sub>L</sub>**.

Es conveniente representar el circuito equivalente como se indica en la figura 2.3-3 para calcular la regulación de la tensión. La impedancia vista desde

los puntos A-B de la figura 2.3-2, es sustituida por su equivalente dado por /2/:

$$R_s = \frac{(r_2/s + r_1)^2 + X_i^2}{r_2/s + r_1} \tag{2.3-4}$$

$$X_s = \frac{(r_2/s + r_1) + X_i^2}{X_i}$$

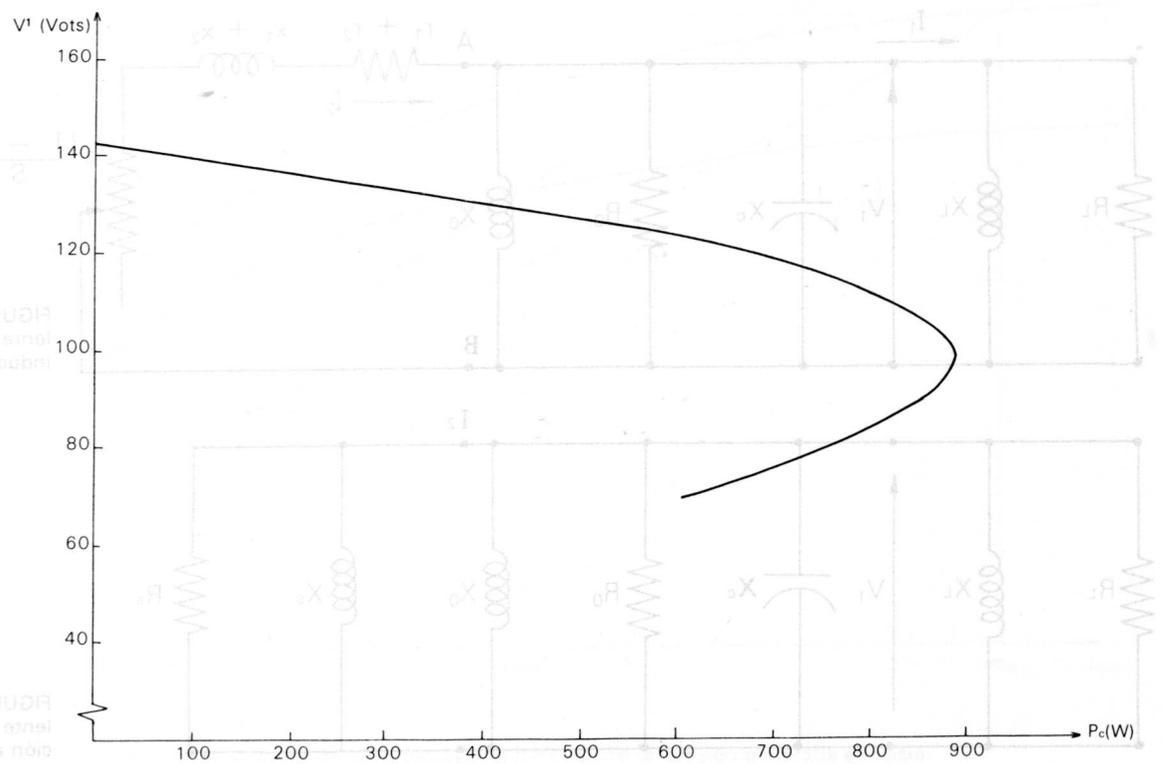


FIGURA 3. 1-2. Generador auto-excitado alimentando una carga resistiva a 60 Hz.

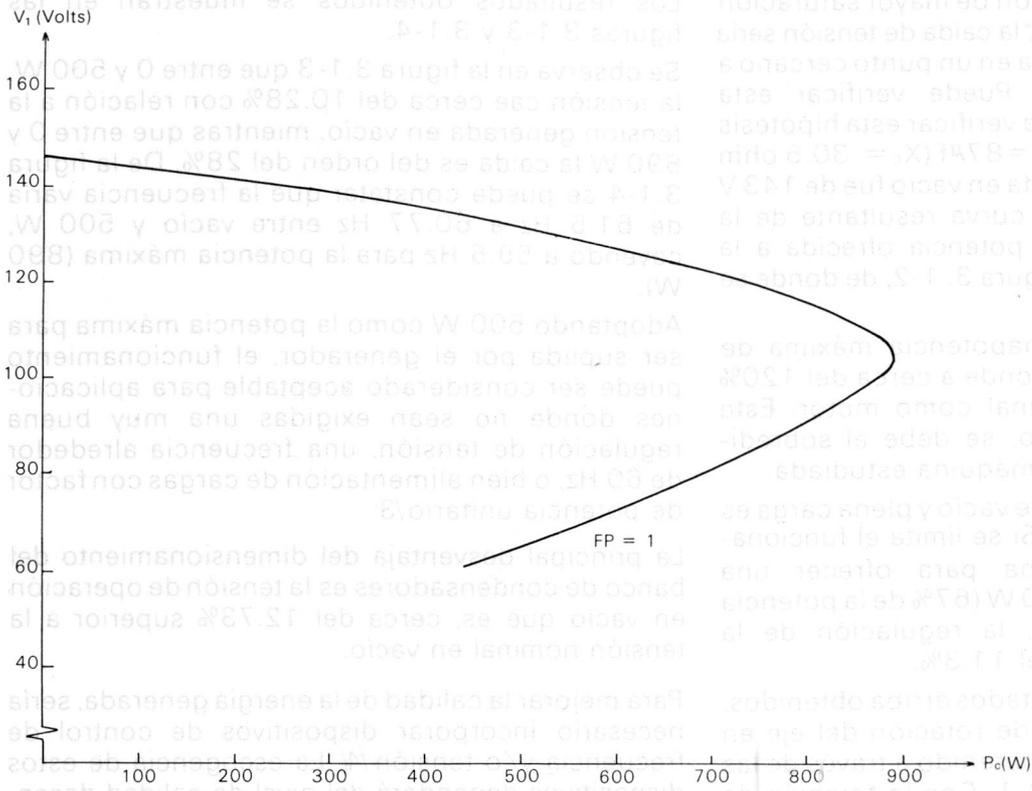


FIGURA 3. 1- 3. Variación de la tensión en función de la potencia activa ofrecida a la carga a  $n = 1860$  RPM.

**EVALUACION DEL FUNCIONAMIENTO DEL GENERADOR DE INDUCCION AUTO-EXCITADO**

La evaluación del funcionamiento de la máquina, fue realizada en los laboratorios de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional, a partir de un grupo motor (D.C.)-generador (G.I.), alimentando carga resistiva.

**DIMENSIONAMIENTO DE LOS CONDENSADORES DE EXCITACION**

La ilustración 3.1-1 muestra la curva en vacío (60 Hz) de la máquina. A la línea del entrehierro le corresponde una reactancia  $X_c = 79.4 \text{ ohm}$  ( $C = 33.4 \text{ f}$ ) por fase.

Se puede raciocinar que si el punto de operación

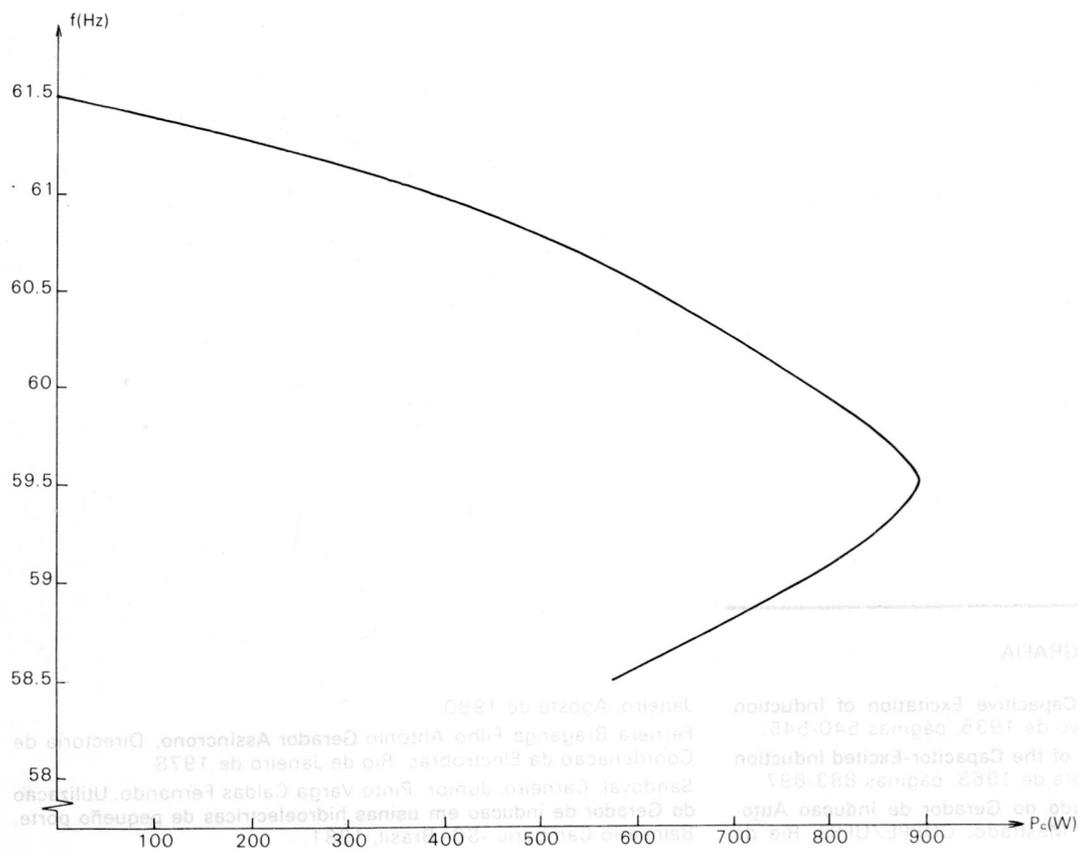


FIGURA 3. 1-4. Variación de la frecuencia en función de la potencia activa ofrecida a la carga a  $n = 1860$  RPM.

en vacío quedase en la región de mayor saturación de la característica en vacío; la caída de tensión sería menor que cuando funciona en un punto cercano a la línea del entrehierro. Puede verificarse esta hipótesis en la línea del entrehierro. Para verificar esta hipótesis fue escogido el valor de  $C = 87 \mu\text{f}$  ( $X_c = 30.5 \text{ ohm}$  a 60 Hz); la tensión generada en vacío fue de 143 V (F-T). Con este criterio la curva resultante de la tensión, en función de la potencia ofrecida a la carga, es mostrada en la Figura 3. 1-2, de donde se puede constatar que:

- La máquina genera una potencia máxima de 890 W, la cual corresponde a cerca del 120% de su capacidad nominal como motor. Este porcentaje, tan elevado, se debe al sobredimensionamiento de la máquina estudiada.
- La caída de tensión entre vacío y plena carga es del orden del 31.45%. Si se limita el funcionamiento de la máquina para ofrecer una potencia máxima de 500 W (67% de la potencia nominal como motor), la regulación de la tensión es del orden del 11.3%.

En función de los resultados arriba obtenidos, fue fijada la velocidad de rotación del eje en  $N = 1.860 \text{ RPM}$ ; valor obtenido a través de las ecuaciones 2.3-2 y 2.2-1. Con la rotación de 1.860 RPM, la máquina produce una tensión en vacío de 146 V (F-T).

Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 3.1-3 y 3.1-4.

Se observa en la figura 3.1-3 que entre 0 y 500 W, la tensión cae cerca del 10.28% con relación a la tensión generada en vacío, mientras que entre 0 y 890 W la caída es del orden del 28%. De la figura 3.1-4 se puede constatar que la frecuencia varía de 61.5 Hz a 60.77 Hz entre vacío y 500 W, cayendo a 59.5 Hz para la potencia máxima (890 W).

Adoptando 500 W como la potencia máxima para ser suplida por el generador, el funcionamiento puede ser considerado aceptable para aplicaciones donde no sean exigidas una muy buena regulación de tensión, una frecuencia alrededor de 60 Hz, o bien alimentación de cargas con factor de potencia unitario/3/.

La principal desventaja del dimensionamiento del banco de condensadores es la tensión de operación en vacío que es, cerca del 12.73% superior a la tensión nominal en vacío.

Para mejorar la calidad de la energía generada, sería necesario incorporar dispositivos de control de frecuencia y/o tensión/4/. La escogencia de estos dispositivos dependerá del nivel de calidad deseado, teniendo en cuenta los costos y la complejidad de la instalación.

#### BIBLIOGRAFIA

- Basset, E. B. and Potter F. M. **Capacitive Excitation of Induction Generators**, AIEE Transaction, mayo de 1935, páginas 540-545.
- B.C. Doxey **Theory and Application of the Capacitor-Excited Induction Generator**, The Engineer, noviembre de 1963, páginas 893-897.
- Pinto Caldas Fernando. **Um Estudo do Gerador de Inducao Auto-Excitado e Aplicacoes**, These de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Agosto de 1980.

Janeiro, Agosto de 1980.

- Ferreira Braganga Filho Antonio **Gerador Assíncrono**, Directoria de Coordenacao da Electrobras, Rio de Janeiro de 1978.
- Sandoval, Carneiro, Junior, Pinto Varga Caldas Fernando. **Utilizacao do Gerador de inducao em usinas hidroelectricas de pequeno porte**. Balneario Camboriu -SC- Brasil, 1981.