

Diseño y construcción de un generador de inducción para acoplarse a un molino de viento*

Una de las alternativas para proporcionar energía eléctrica a regiones apartadas del país, es el acople de un generador de baja potencia a un molino de viento.

Para esto se diseñó y construyó mediante un generador de inducción, excitado mediante condensadores, el primero de este tipo en el país como contribución al desarrollo de la industria eléctrica nacional.

Pruebas preliminares de laboratorio dieron el criterio de escogencia del banco de condensadores de excitación/7/

Como resultado se presenta su funcionamiento bajo carga, a diferentes factores de potencia, a frecuencia constante, y a velocidad constante, en pruebas de laboratorio.

HORACIO TORRES SANCHEZ,
Ingeniero Electricista,
Profesor Asistente U.N.

ALVARO A. ALARCON ALARCON,
Ingeniero Electricista U.N.

Con el aumento de los costos de energía hoy en día, el interés mundial en los equipos de generación eléctrica, que no usan los derivados del petróleo, han llegado a ocupar un primer plano en el desarrollo de nuevas tecnologías.

La naturaleza del problema que enfrentamos se puede resumir en dos aspectos:

- La concentración de generación y centros de consumo de energía del país, en la zona andina y costa atlántica, lo cual implica elevados costos de transmisión a regiones apartadas.
- El desarrollo de la industria eléctrica nacional la cual, en el área de máquinas motrices, cuenta únicamente con la fabricación de motores de inducción.

Basada en estos aspectos, la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional, por medio de grupos de investigación, busca contribuir a crear en el país una infraestructura para la actividad del diseño y construcción de máquinas motrices.

Estos antecedentes han motivado el diseño y fabricación de un generador prototipo de inducción, de las siguientes especificaciones técnicas:

Potencia nominal: 3 Kw

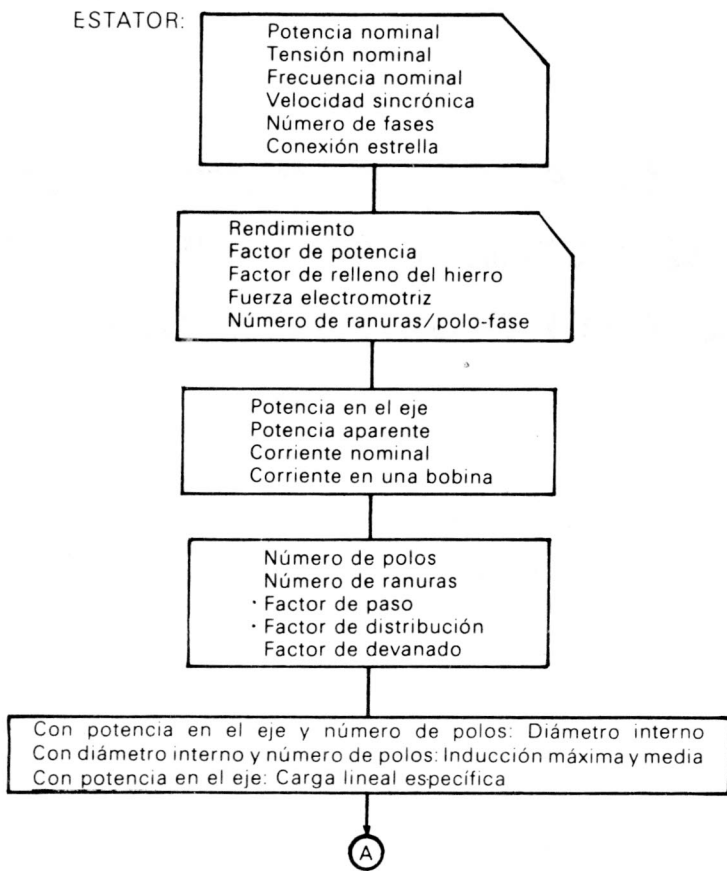
Tensión nominal: 220/127 V (estrella)

Con base en los resultados de estudios previos^{1 6 7}, se especificó el criterio de escogencia del banco de condensadores de excitación y se hicieron las pruebas de laboratorio, y se obtuvieron las siguientes características:

- Tensión vs. Potencia de salida ($f = \text{cte}$, $\text{Cos } \varphi = 1$)
- Tensión vs. Potencia de salida ($n = \text{cte}$, $\text{Cos } \varphi = 1, .8$)
- Frecuencia vs. Potencia de salida ($n = \text{cte}$, $\text{Cos } \varphi = 1, .8$)

con las cuales se dan las condiciones de funcionamiento del generador.

* Trabajo con Mención de Honor en el 8º Congreso Nacional de Ingeniería Eléctrica, Mecánica y ramas afines. Manizales, octubre de 1983.



Diseño

El diagrama de bloques de la Figura 1 representa esquemáticamente el método de diseño utilizado para el generador^{3 4 5}.

- Potencia nominal = 3.000 Watts
- Voltaje nominal = 220/127 voltios
- Número de fases = 3 fases
- Número de polos = 6 polos
- Frecuencia = 60 Hz
- Velocidad sincrónica = 1.200 RPM.

Modelo matemático

La Figura 2 muestra el circuito equivalente del generador de inducción autoexcitado, alimentando una carga inductiva (XL, RL). El modelo de Doxey¹, parte del principio de la conservación de la energía, aplicado al balance de las potencias activas en el circuito. Por tanto, del circuito de la figura 2, y después de una serie de manipulaciones algebraicas, se obtiene la ecuación:

$$(r_2/S + r_1)^2 + (r_2/S + r_1)R_e + X_i^2 = 0 \quad (1)$$

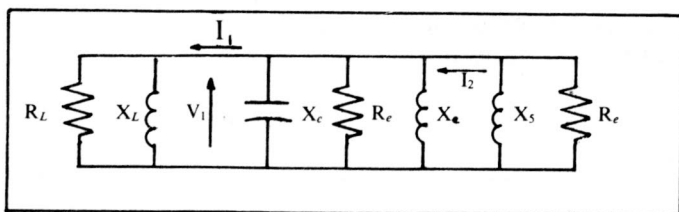
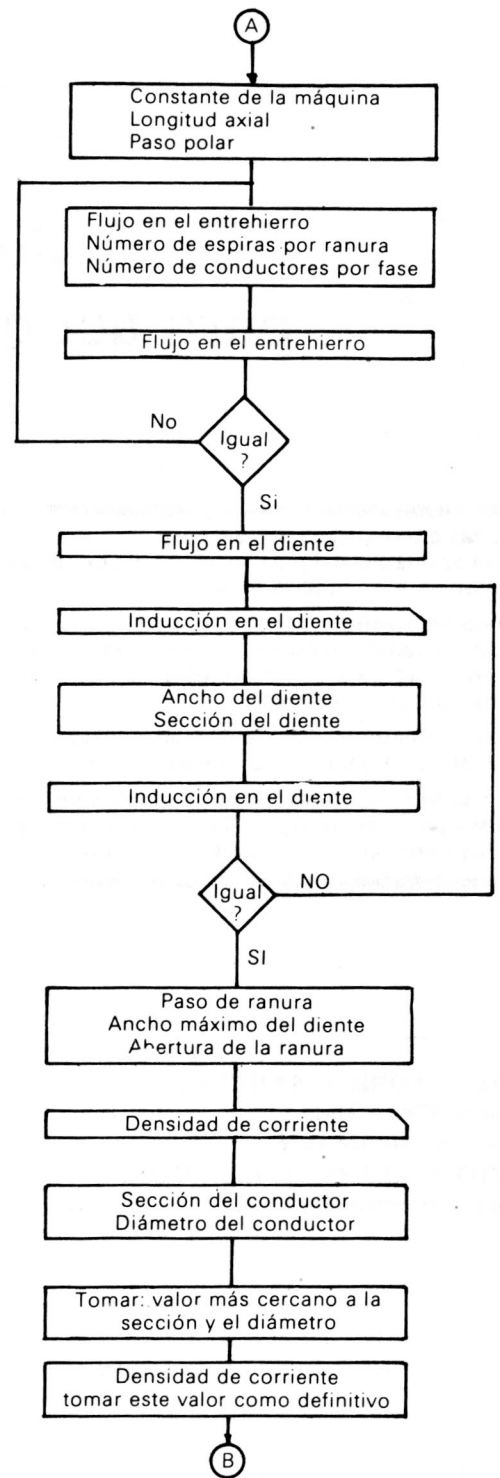


FIGURA 2. Circuito equivalente del generador de inducción.

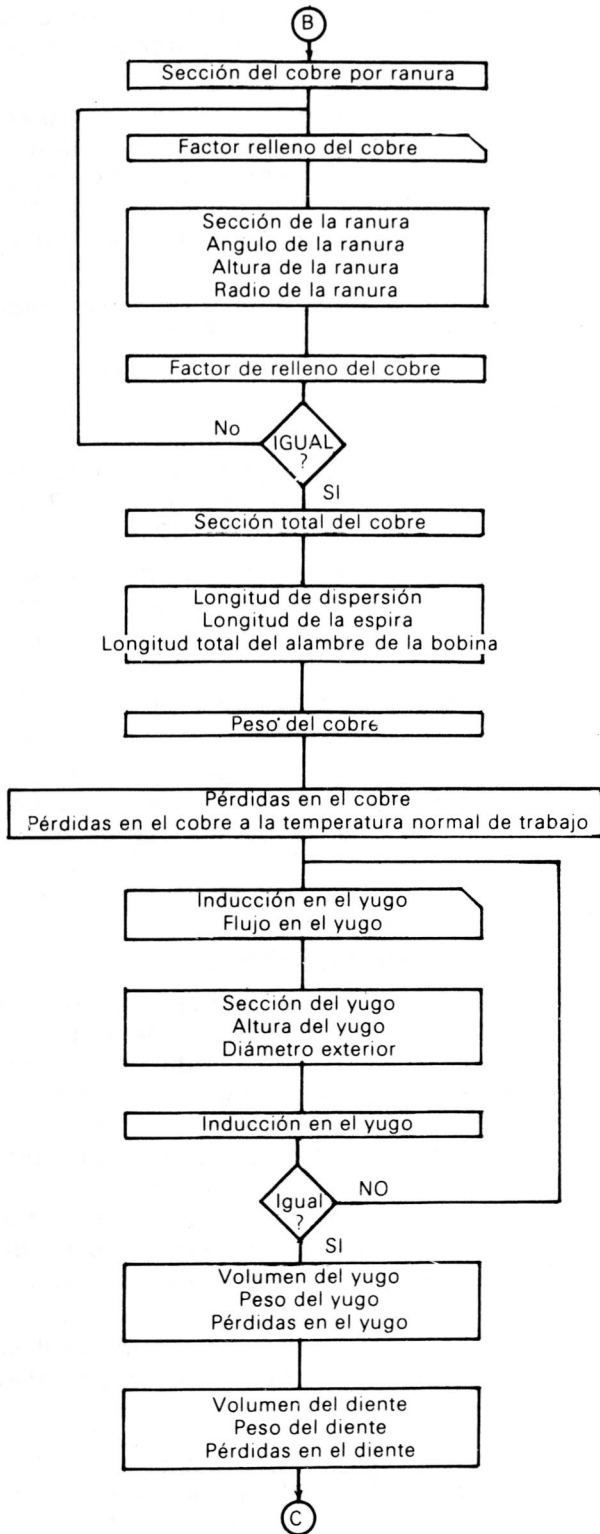


La resolución de la ecuación (1) ofrece el valor del deslizamiento. Conforme observa Doxey¹, admitiéndose que los parámetros del generador permanecen constantes, el valor del deslizamiento "s" es función apenas de la componente de la carga R_L .

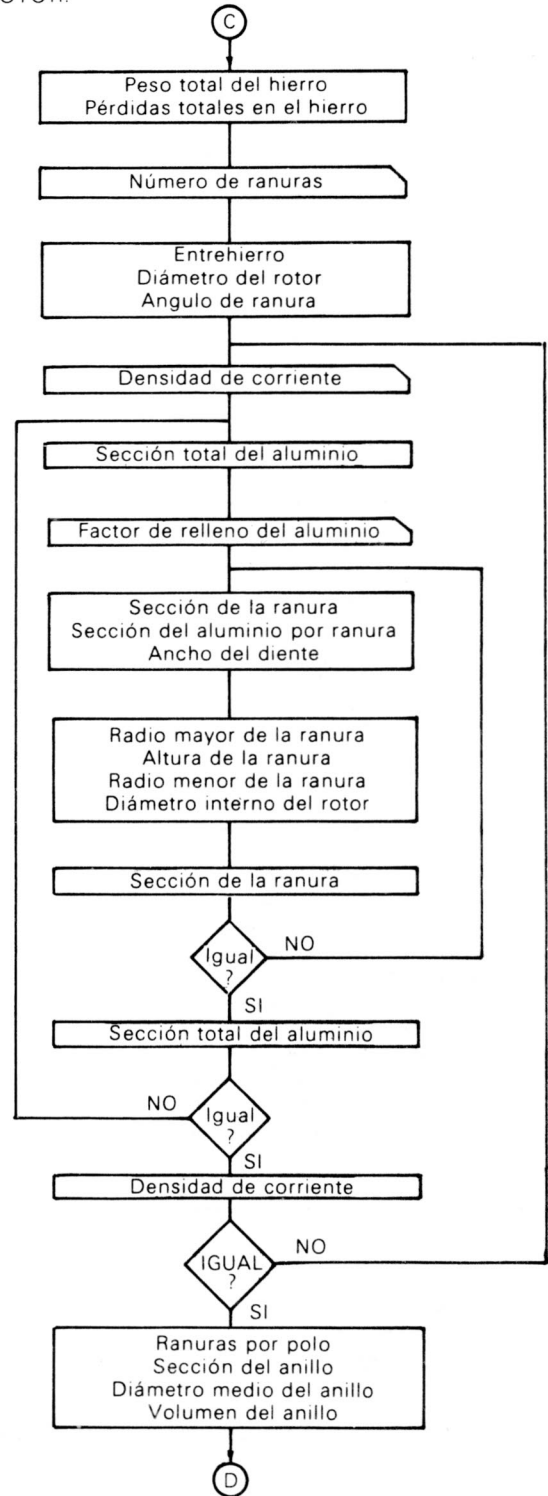
Resultados de laboratorio

La evaluación del funcionamiento del generador trifásico diseñado y construido, fue realizada en los laboratorios de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional, según el esquema de conexiones mostrado en la Fig. 3.

La Figura 4 presenta la curva de vacío a 60 Hz. Para esta frecuencia le corresponde, a la línea de



ROTOR:



entrehierro, una reactancia de $X_c = 16.11$ ohmios ($C = 164.7 \mu F$) por fase. En el caso que se usara un banco de condensadores con reactancia mayor o igual a este valor, no habría autoexcitación.

Por otro lado, para tener una regulación de tensión bastante aceptable, es necesario que el punto de equilibrio, o de operación en vacío, quede situado en la región de mayor saturación.

A partir de lo anterior, fue escogido el valor de $C = 312 \mu F$ ($X_c = 8.5$ ohmios a 60 Hz) el cual da como resultado una tensión generada en vacío de

275 V ($V_f = 158.8$ volt.).

La gráfica resultante de la tensión en función de la potencia entregada a la carga a 60 Hz y factor de potencia unitario se muestra en la Fig. 5, de donde se puede constatar que:

- La máquina puede generar una potencia máxima de 3.600 vatios, lo que corresponde al 120% de la capacidad para la cual fue diseñada.
- La caída de tensión entre vacío y plena carga es de 15.64%. Si se limita el funcionamiento para entregar una potencia de 3.000 vatios, la regulación se reduce al 10.56%.

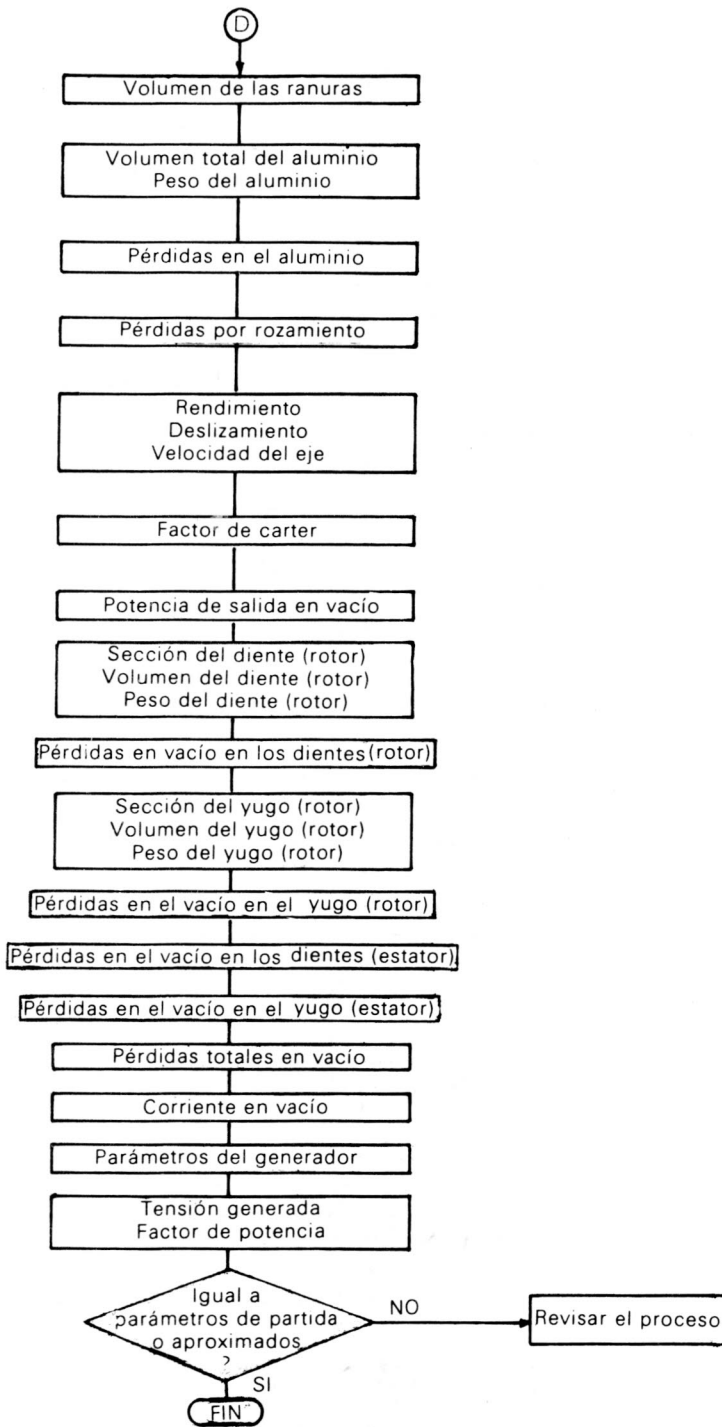


FIGURA 1. Diagrama de bloques para el diseño del generador.

La eficiencia fue calculada en cada punto de operación, dando un 89% para la potencia máxima generada.

Con base en los resultados anteriores, se puso a funcionar el generador a velocidad constante de 1.220 rpm, teniendo en cuenta la velocidad de sincronismo y el deslizamiento hallado a partir de la ecuación (1), y limitando el generador a entregar 3.000 watos.

Con esta rotación el generador produce en vacío una tensión de 281 voltios a 60.5 Hz.

Los resultados obtenidos son mostrados en las figuras 6 y 7.

Se observa en la Fig. 6 la variación de la tensión en función de la potencia entregada a la carga, con factor de potencia 1. Se verifica que entre 0 y 3.000 watos la tensión cae cerca del 22.42%.

A factor de potencia de .8, la potencia máxima generada es de 2.400 watos, lo que equivale al 80% de la potencia de diseño, para una regulación de tensión de 28.82%.

La eficiencia a factor de potencia 1 es del 86.66%, mientras que a factor de potencia .8 es de 84.78%.

En la Fig. 7 se tiene la variación de la frecuencia en función de la potencia entregada a la carga. Para factor de potencia 1, la frecuencia cae de 60.5 a 59.75 Hz, entre vacío y 3.000 watos. A factor de potencia .8, la frecuencia varía de 60.5 a 59.66 Hz, desde vacío a 2.400 watos.

CONCLUSIONES

Los resultados del presente trabajo son de tipo técnico y no económico, por tratarse de un prototipo y su costo dependerá de un estudio de mercado. Sin embargo, considerando que el diseño y la fabricación se hicieron con base en un motor de inducción —jaula de ardilla— de producción nacional, los costos para producción en serie y de mayores potencias, es rentable, bien sea en acople directo a un molino de viento —que fue la idea inicial— o para acople a turbina en una pequeña microcentral hidráulica.

Nuestro siguiente paso en la investigación es llevar la máquina a saturación, para una mejor regulación

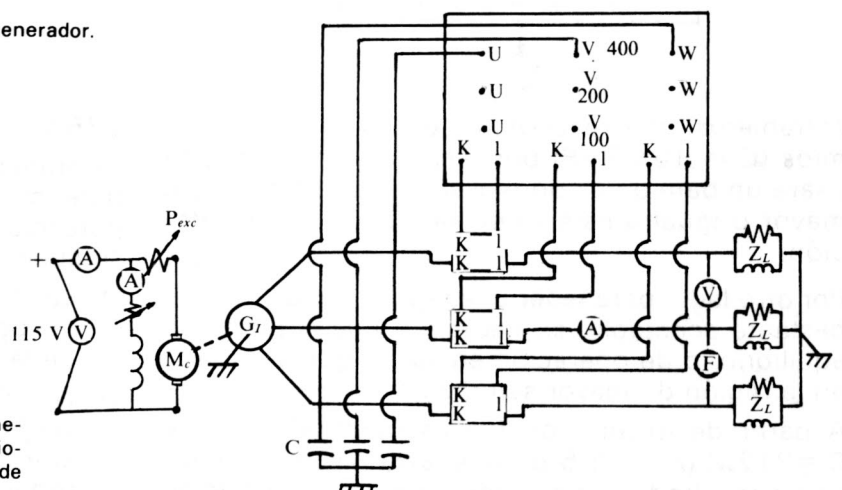


FIGURA 3. Esquema de conexiones para evaluar el funcionamiento del generador de inducción.

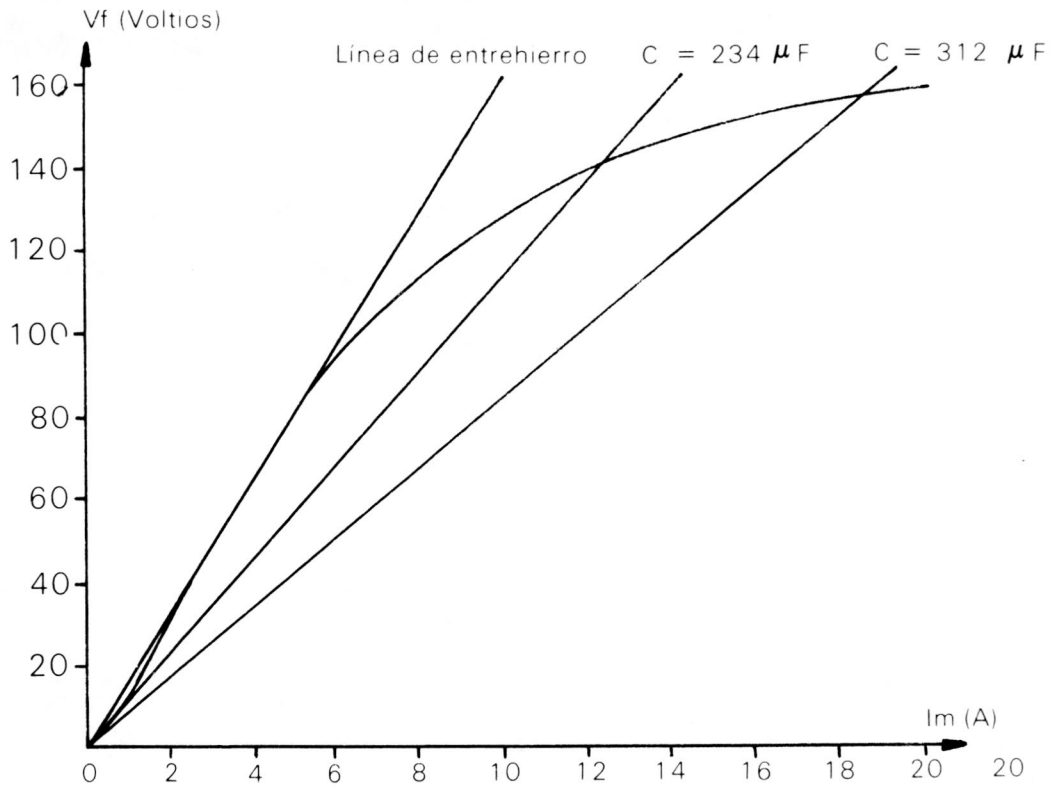


FIGURA 4. Curva de vacío a 60 Hz del generador de inducción.

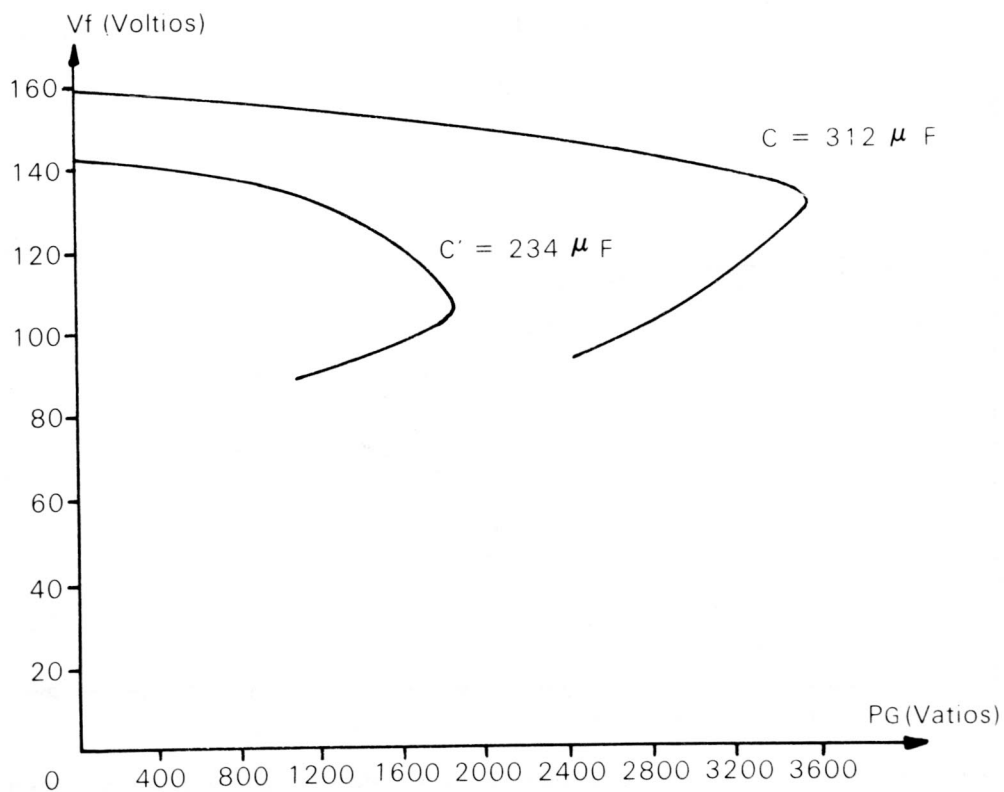


FIGURA 5. Generador de inducción autoexcitado alimentando carga resistiva (60 Hz).

de tensión a velocidad variable, considerando el aumento en las pérdidas en vacío y, por consiguiente, la reducción del rendimiento.

BIBLIOGRAFIA

- 1 B.C. Doxey, "Theory and application of the capacitor-excited induction generator", The Engineer, november, 1963.
- 2 E. B. BASSET, F. M. Potter, "Capacitive excitation of induction generators", AIEE Transaction, may, 1935.
- 3 Corrales Martín, Juan. "Cálculo industrial de Máquinas Eléctricas", Universidad Politécnica de Barcelona, 1976.
- 4 "Escuela del técnico electricista", Tomo VI, Editorial Labor, 1968.

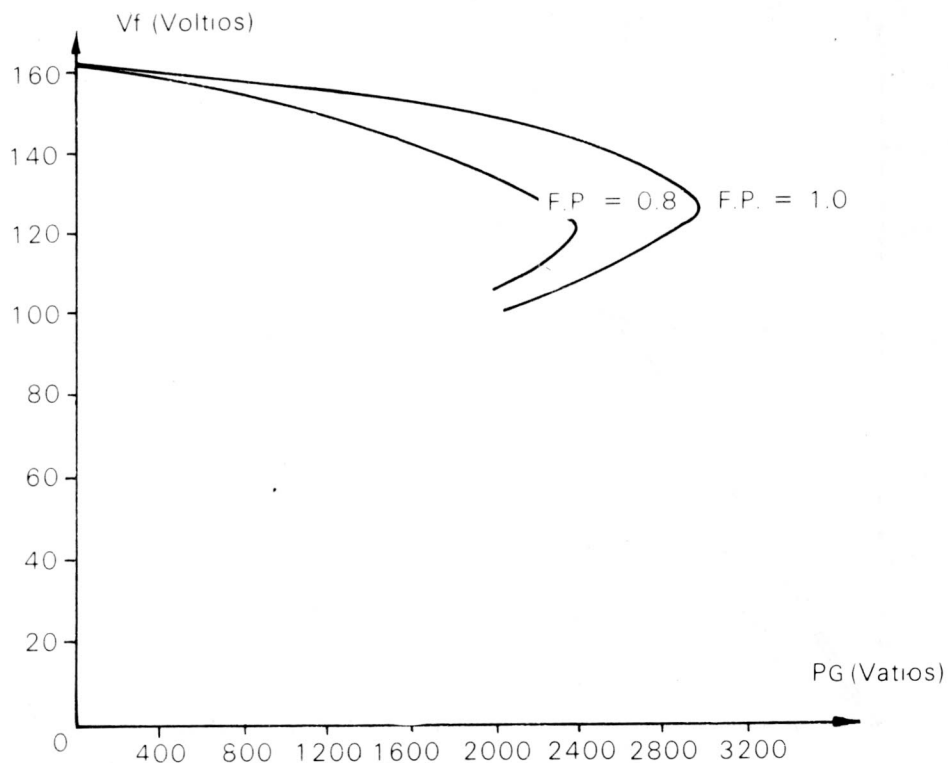


FIGURA 6. Variación de la tensión en función de la potencia activa ofrecida a la carga, a velocidad constante: $n = 1.200 \text{ rpm}$.

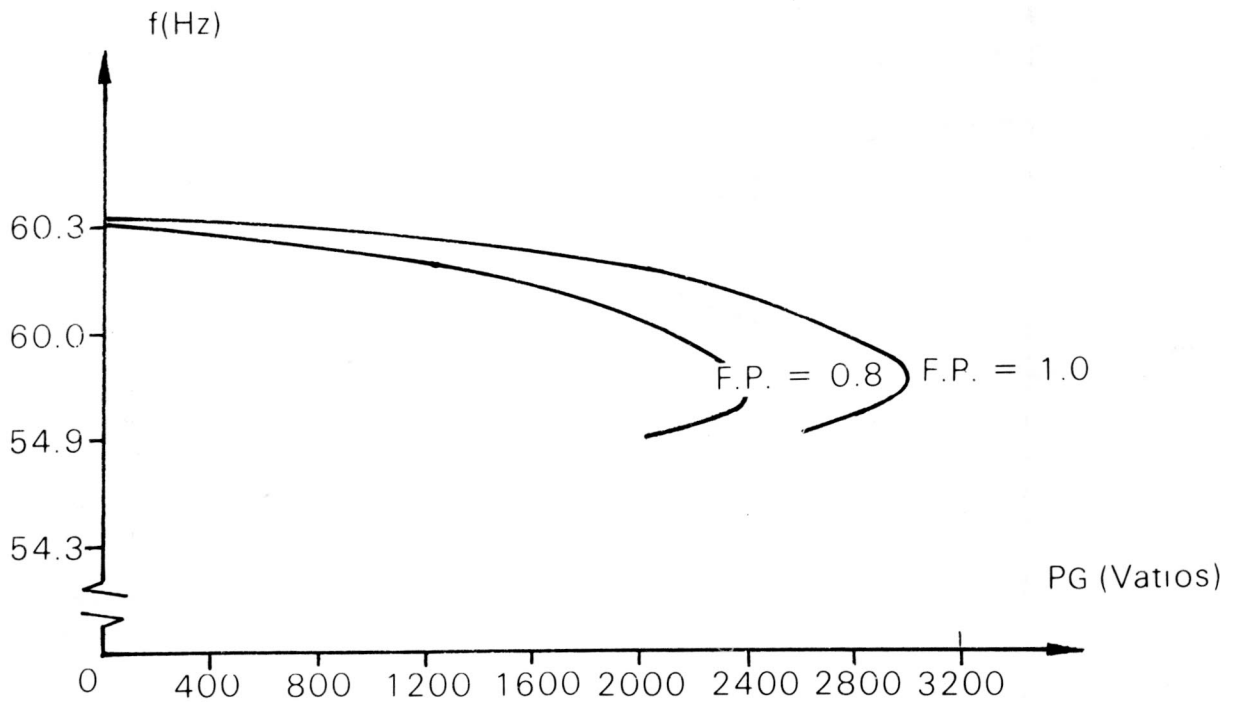


FIGURA 7. Variación de la frecuencia en función de la potencia activa ofrecida a la carga a velocidad constante $n = 1.220 \text{ rpm}$.

5 Maudanz, Horts. "Curso de diseño de máquinas eléctricas", Departamento de Ingeniería Eléctrica, U.N., Bogotá.
 6 Pinto Caldas, Fernando. "Un estudio do gerador do indução autoexcitado e aplicacoes", Tese de Mestrado, Coppelu-Froj, Rio de Janeiro, agosto, 1980.
 7 H. Torres, A. Alarcón. "Generador de inducción", Revista Ingeniería e Investigación, Vol. 2, Nº 6, 1983, Bogotá.
 8 Braganca Filho, A. Ferreira. "Gerador asincrono", Directoria de

coordenacão do Electrobras, Rio de Janeiro, 1978.
 9 N. Mohan, M. Díaz. "Wind-driven, capacitor excited induction generator for residential electric". Heating, paper A780050-7, IEEE Winter Meeting, New York, Jan, 1978.
 10 Carlson, Renato; Schneider, Marcio. "Aproveitamento do mini quedas d'agua utilizando geradores do inducao autoexcitados" Departamento do Engenharia Eléctrica UFSC. Balneario Cambariú —SC— Brasil, 1981.