

# Seminario Nacional CIGRE Colombia

Máquinas Eléctricas Rotativas 2022

## EL GENERADOR DE INDUCCIÓN AUTOEXCITADO Y AUTORREGULADO UNA OPCIÓN ALTERNATIVA PARA SER USADO CON ENERGÍAS RENOVABLES EN ZONAS NO INTERCONECTADAS

Roberto Rubén Ramirez Arcelles  
Universidad Nacional de Ingeniería  
Miembro del Comité Técnico del XIX ERIAC

Organizan:

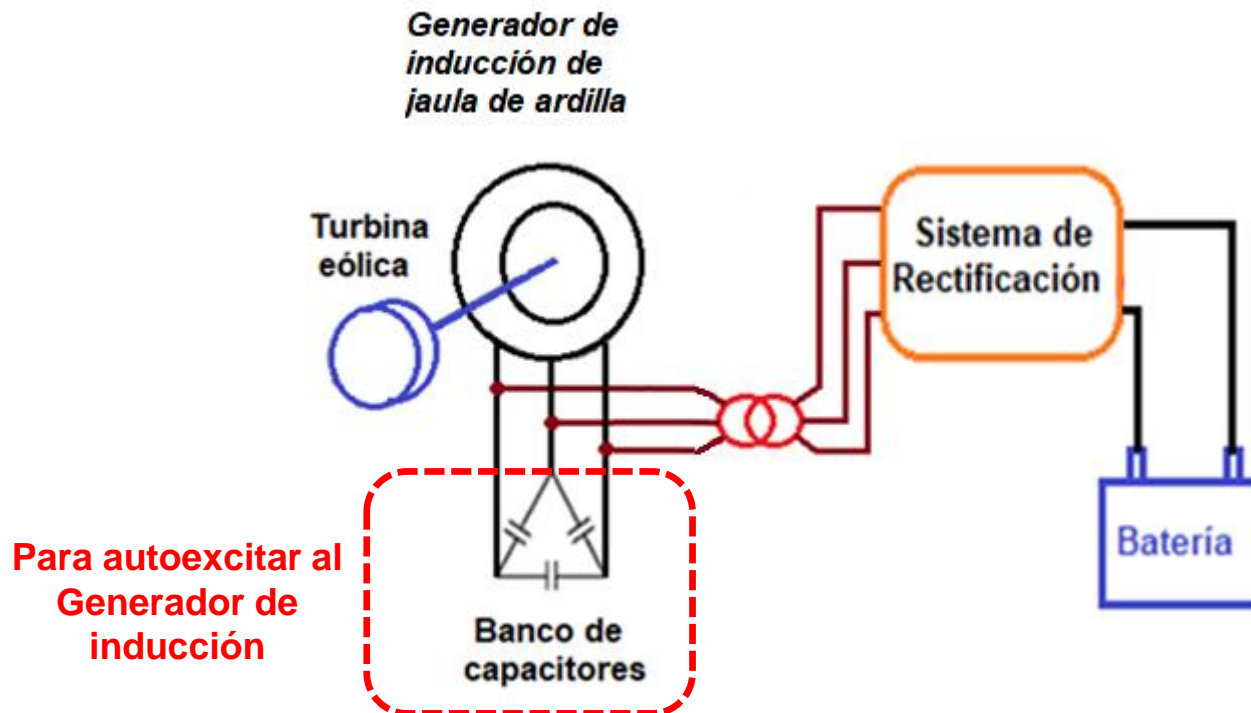


Apoya:

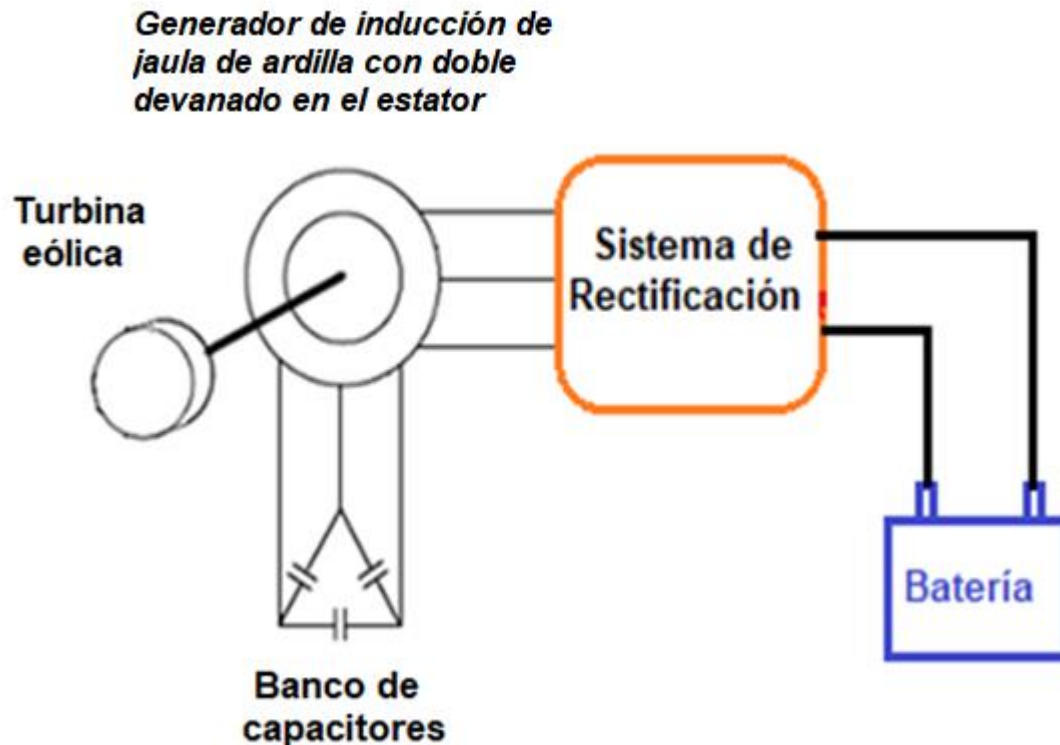


# 1. ANTECEDENTES

En [17] se desarrolló un Proyecto de Investigación Delcrosa-ITINTEC en el Perú, cuyo objetivo era diseñar una serie de generadores de inducción (GI) destinados a pequeñas plantas eólicas, que debían ser autoexcitados y deberían cargar baterías de 12 o 24 voltios.



Los análisis previos indicaban que en vez de un solo devanado de 220 V para conectar los capacitores de excitación (especificados para tensiones estándares de 220 V) y utilizar un transformador reductor para el cargador de baterías, resultaba adecuado que el GI tuviera otro devanado en el estator, de menor tensión para alimentar el cargador de la batería.

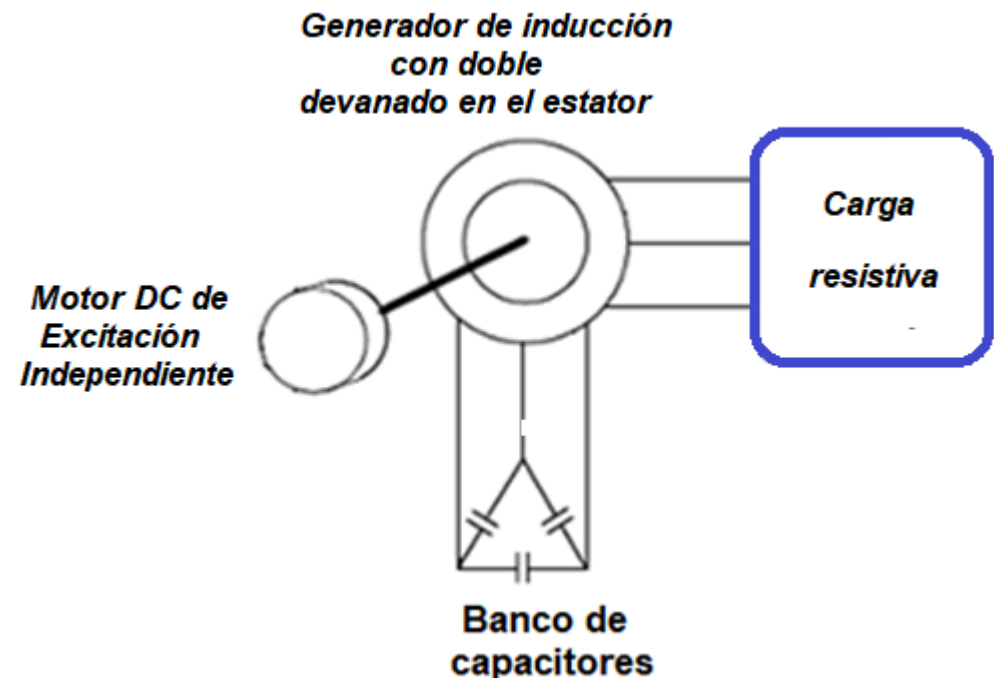


Se construyó y se realizaron pruebas de campo en un prototipo eólico de 120 W.

Se construyeron prototipos de 500 w, pero no se probaron en campo.

En [18], con el objetivo de desarrollar un modelo matemático de los generadores de inducción del proyecto de [17] y eventualmente aplicarlo a la verificación de sus diseños, en la **Máquina Generalizada el Laboratorio de Electricidad** de la Universidad Nacional de Ingeniería se implementó exitosamente un GI con dos bobinados independientes en el estator.

En el bobinado de mayor tensión, se conectó el banco de capacitores de excitación y en el otro bobinado se conectó una carga puramente resistiva.

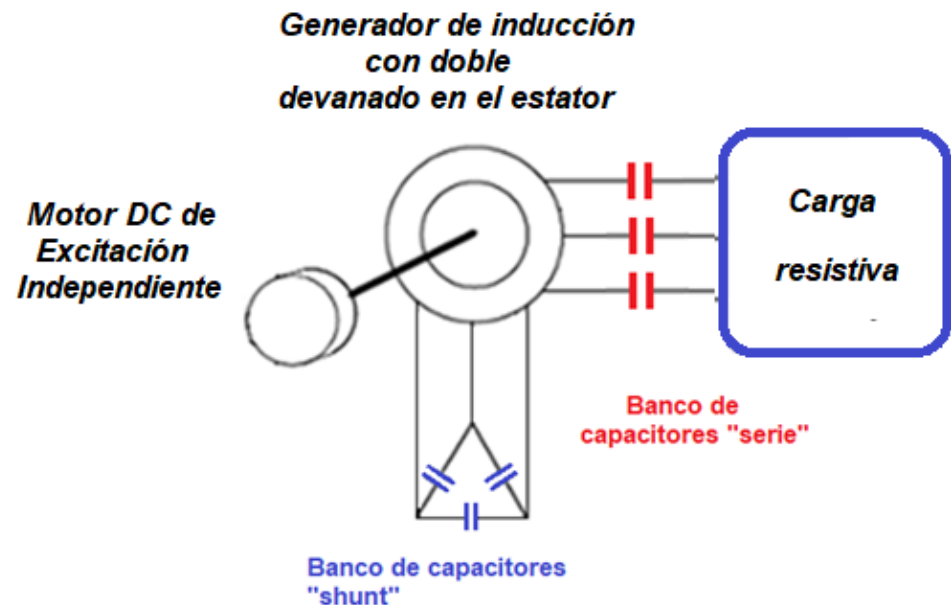


En [25], utilizando la **Máquina Generalizada del Laboratorio de Electricidad** de la UNI, se desarrolló un modelo para el análisis de estado estacionario y transitorio del Generador de Inducción Autoexcitado con Doble Bobinado en el estator.



Este generador, además de los capacitores “*shunt*” para la autoexcitación, poseía capacitores en serie con la carga.

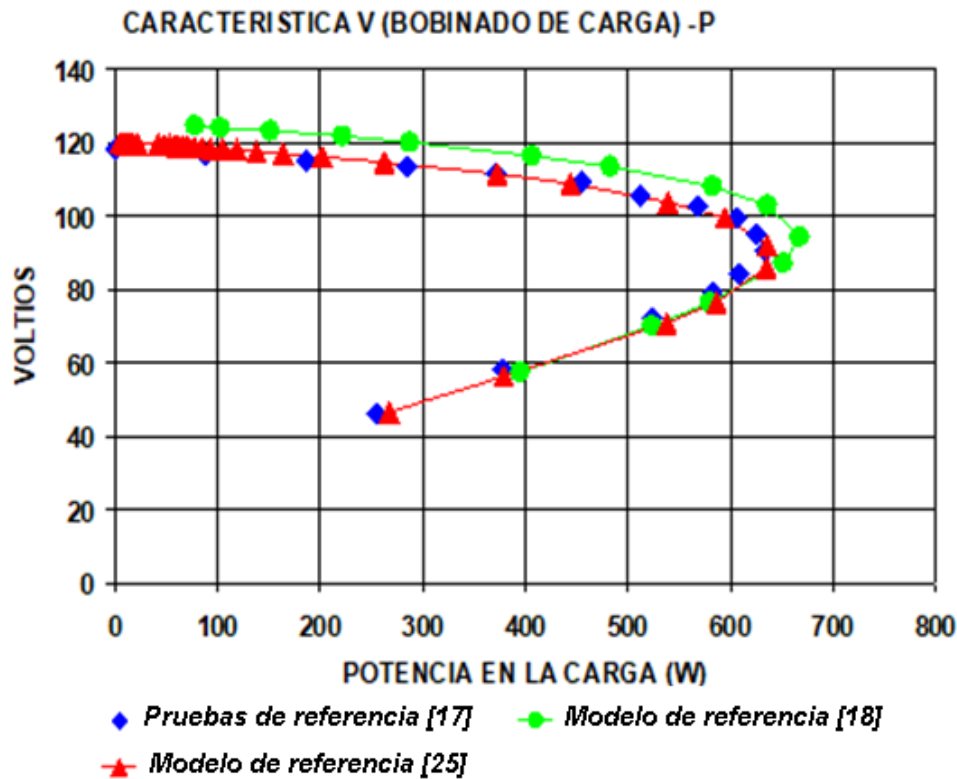
Los capacitores en serie se utilizaron para **mejorar la regulación de tensión e incrementar la capacidad de carga del GIA.**



## 2. HALLAZGOS EN REFERENCIAS [17, 18 Y 25]



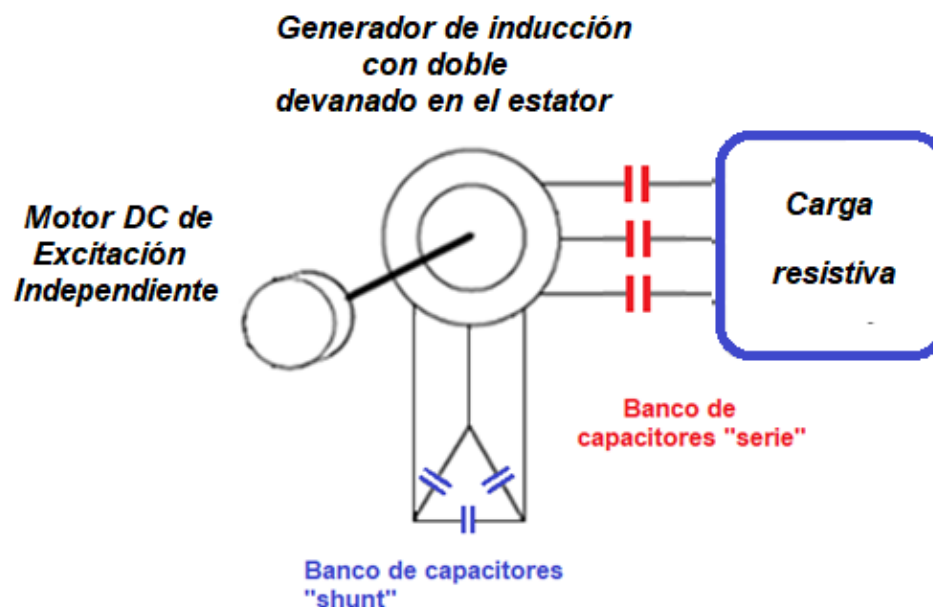
### CARACTERÍSTICA TÍPICA P – V DEL GIA

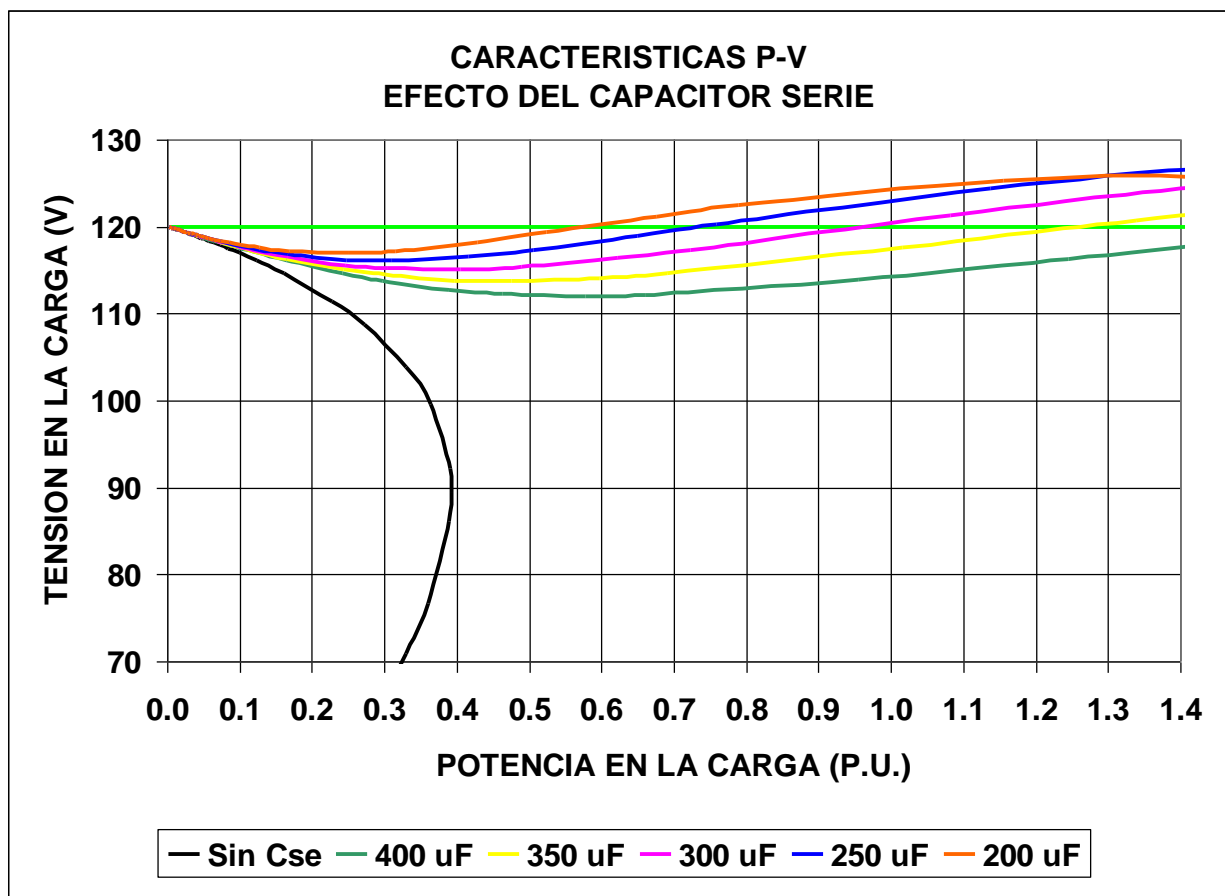


Las simulaciones de la operación en estado estacionario y los resultados de las pruebas experimentales muestran que el GIA presenta una pobre regulación de tensión y que existe una carga máxima crítica que provoca la desexcitación del GIA.

Esta inflexibilidad impide que el GIA aproveche a plenitud la estructura magnética de la máquina y la capacidad de corriente de sus bobinados.

En la referencia [25], mediante simulaciones se obtuvo las características de operación de un GIAA implementado en la **Máquina Generalizada del Laboratorio de Electricidad** de la UNI, excitado con un banco de capacitores de 30  $\mu\text{F}$ /fase en paralelo, impulsado a una velocidad constante de 2700 rpm y autorregulado mediante un capacitor serie cuyos valores estuvieron en el rango 200  $\mu\text{F}$ /fase a 400  $\mu\text{F}$ /fase.





**CARACTERÍSTICA P – V, EFECTO DEL CAPACITOR SERIE [25]**

Los resultados de las simulaciones permitieron demostrar de manera cualitativa la autorregulación de la tensión en la carga al utilizar un banco de capacitores en serie.

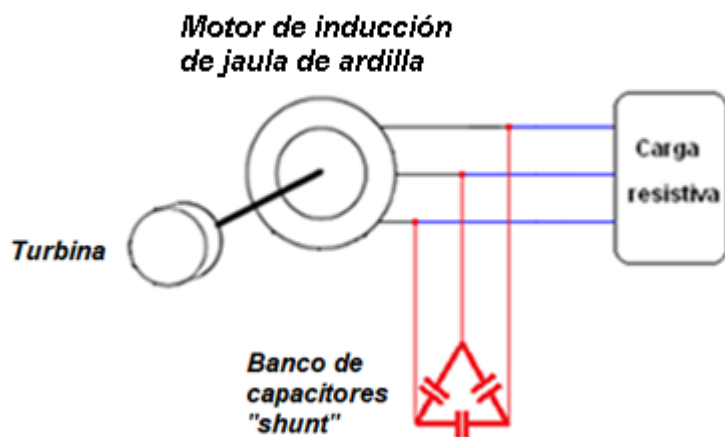


### 3. PLANTEAMIENTO

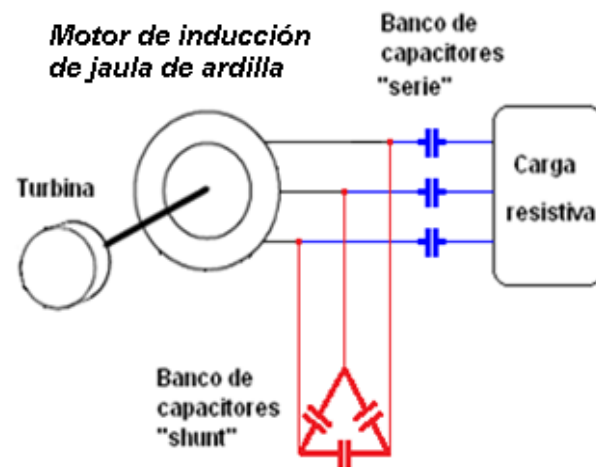


Implementar la **autoexcitación y autorregulación**, en un **motor de inducción de jaula de ardilla de uso comercial**,

tal que, **impulsado por una microturbina hidráulica, una turbina biogás o una turbina eólica (en un determinado rango de velocidades)**, se conforme **una microcentral de generación autónoma para alimentar cargas rurales en zonas remotas**.



Generador de Inducción Autoexcitado (GIA)



Generador de Inducción Autoexcitado y Autorregulado (GIA)

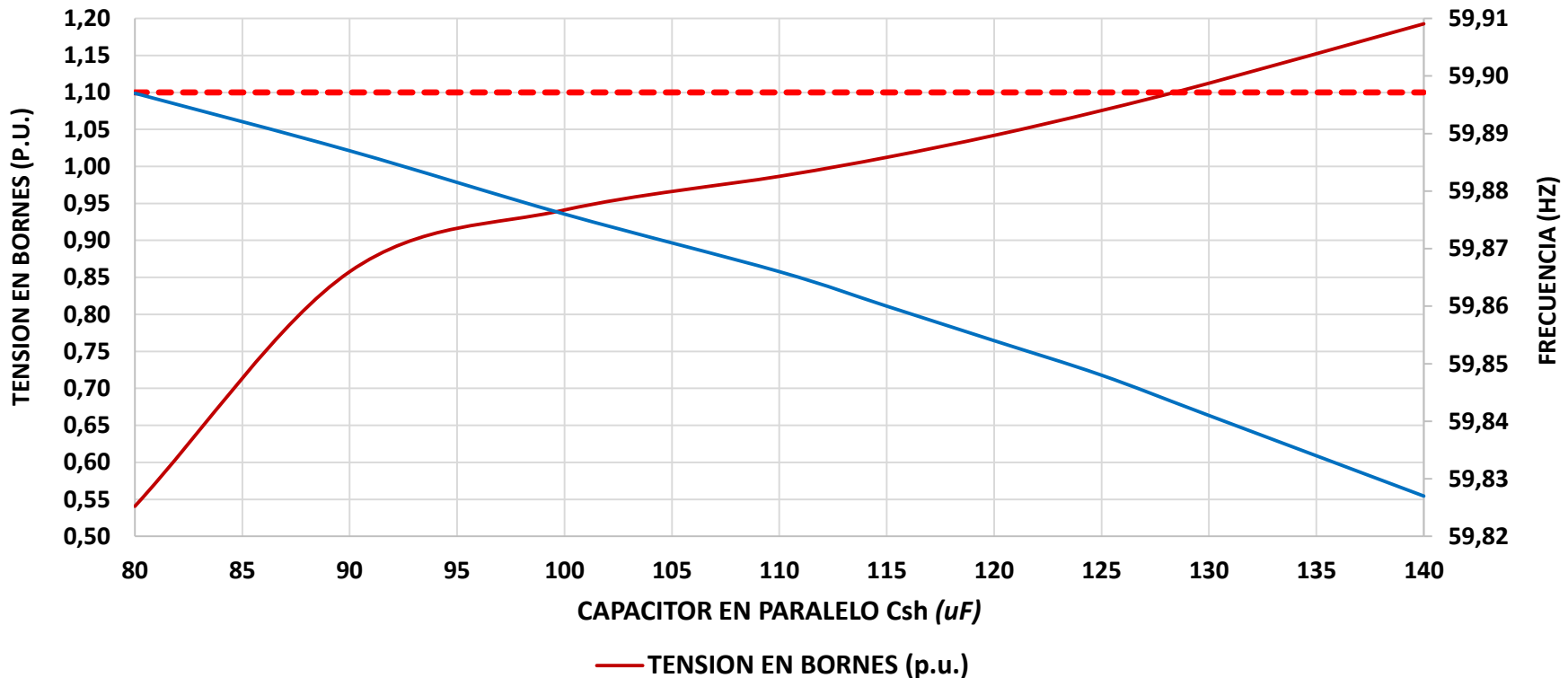
## 4. RESULTADOS DE SIMULACIONES

El cálculo de la operación en estado estacionario de un generador de inducción autoexcitado en base a un motor de inducción de jaula de ardilla tipo IE1 de 3 HP, 230 V, 9 A, 60 Hz, 1745 rpm, Conexión Estrella.



### 4.1 GIA OPERANDO EN VACIO

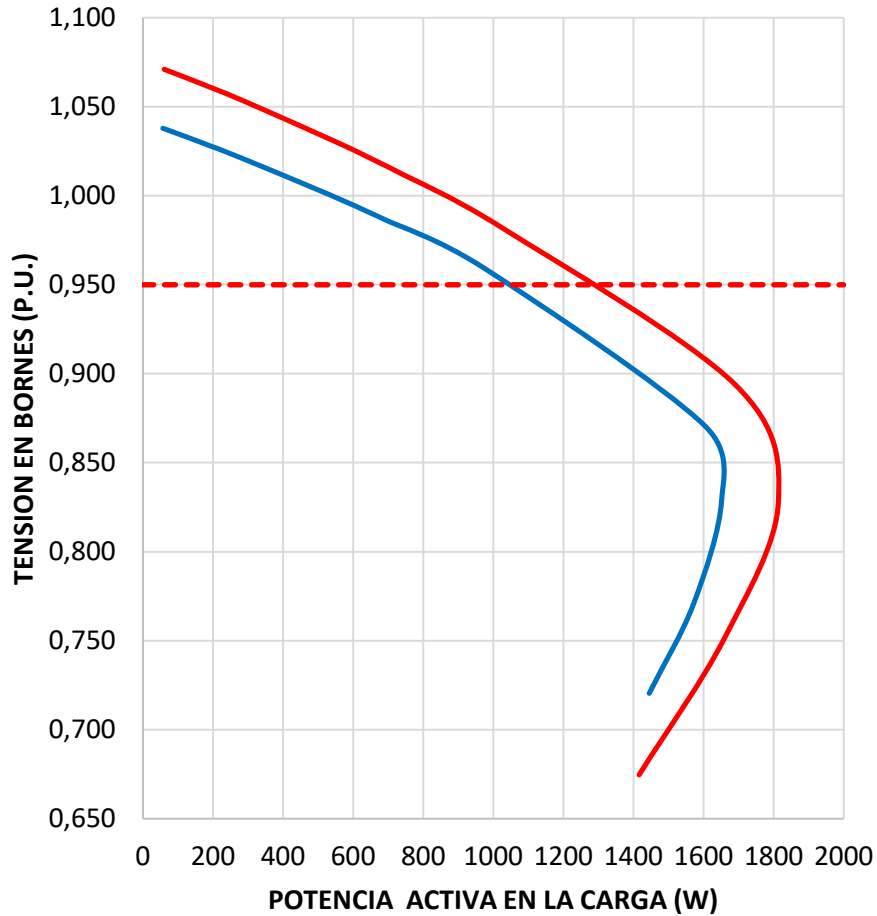
GIA EN VACIO IMPULSADO A 1800 RPM  
CON Csh : 80 uF - 140 uF



# 4.2 GIA OPERANDO CON UNA CARGA RESISTIVA

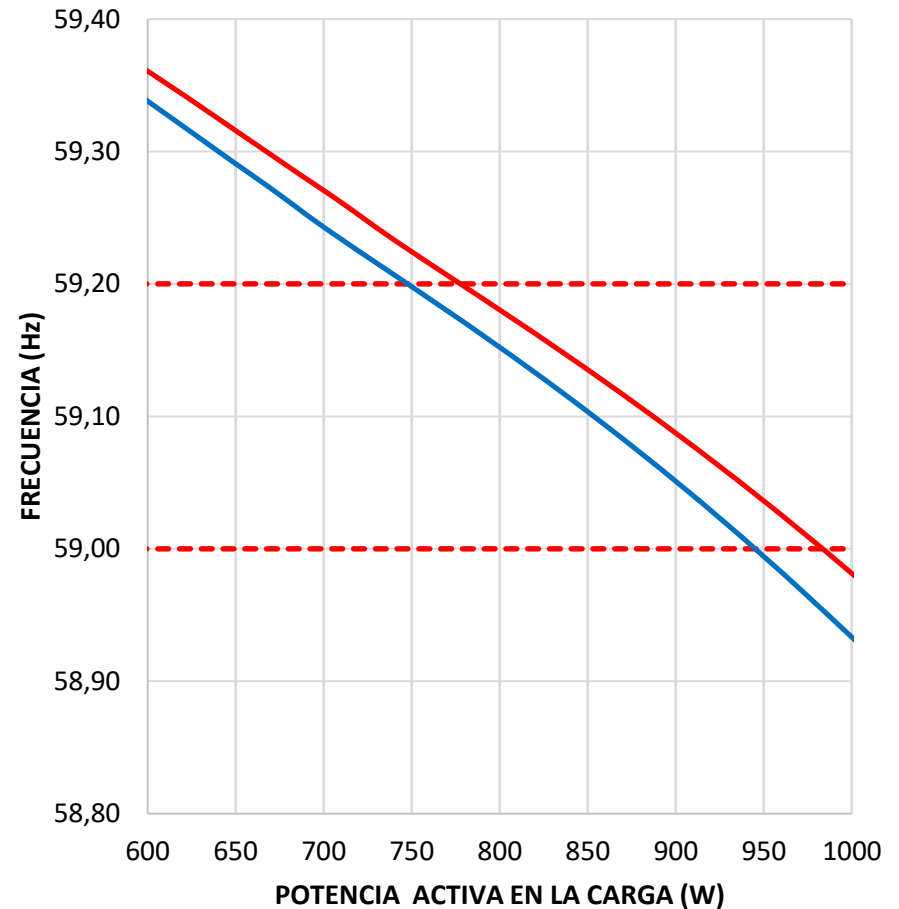


### CARACTERISTICA EXTERNA DEL GIA - IE1 RPM=1800



— Csh = 120 uF    — Csh = 125 uF

### FRECUENCIA DEL GIA - IE1 RPM=1800

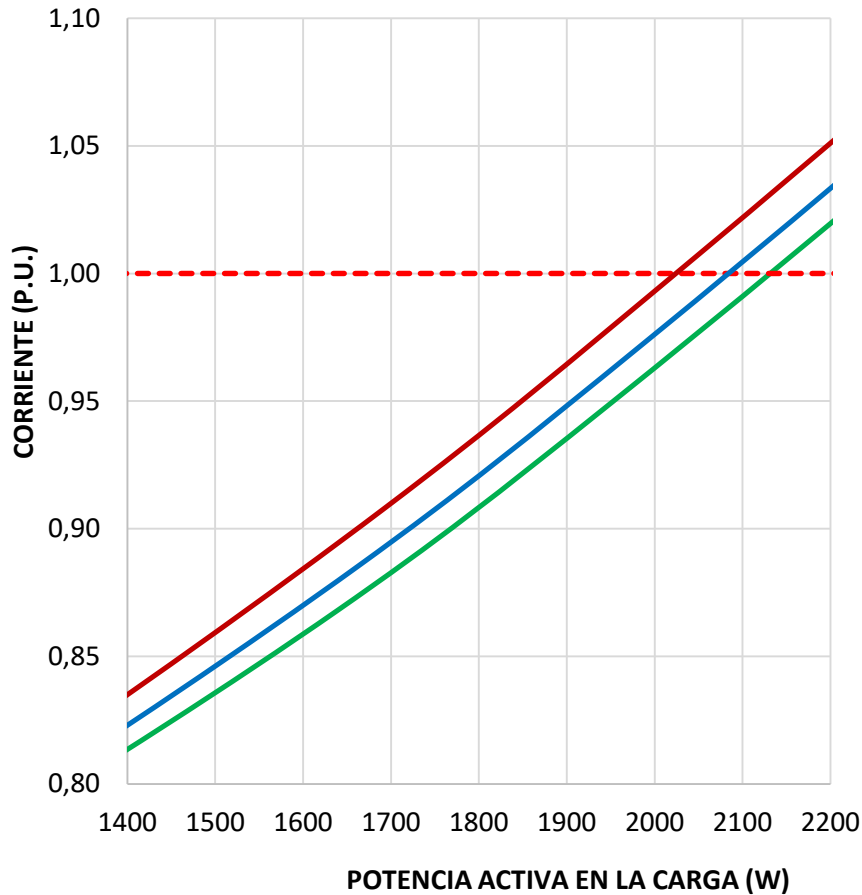


— Csh = 120 uF    — Csh = 125 uF

# 4.3 GIAA OPERANDO CON UNA CARGA RESISTIVA

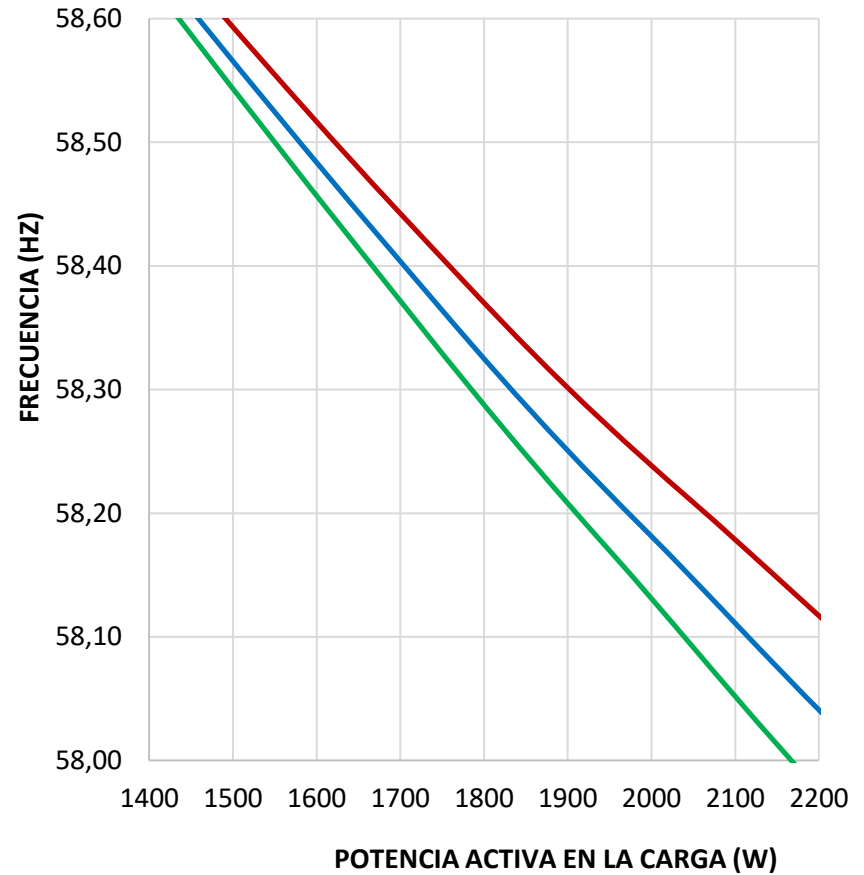


**CORRIENTE DEL GIAA - IE1**  
RPM=1800; Csh= 120 uF



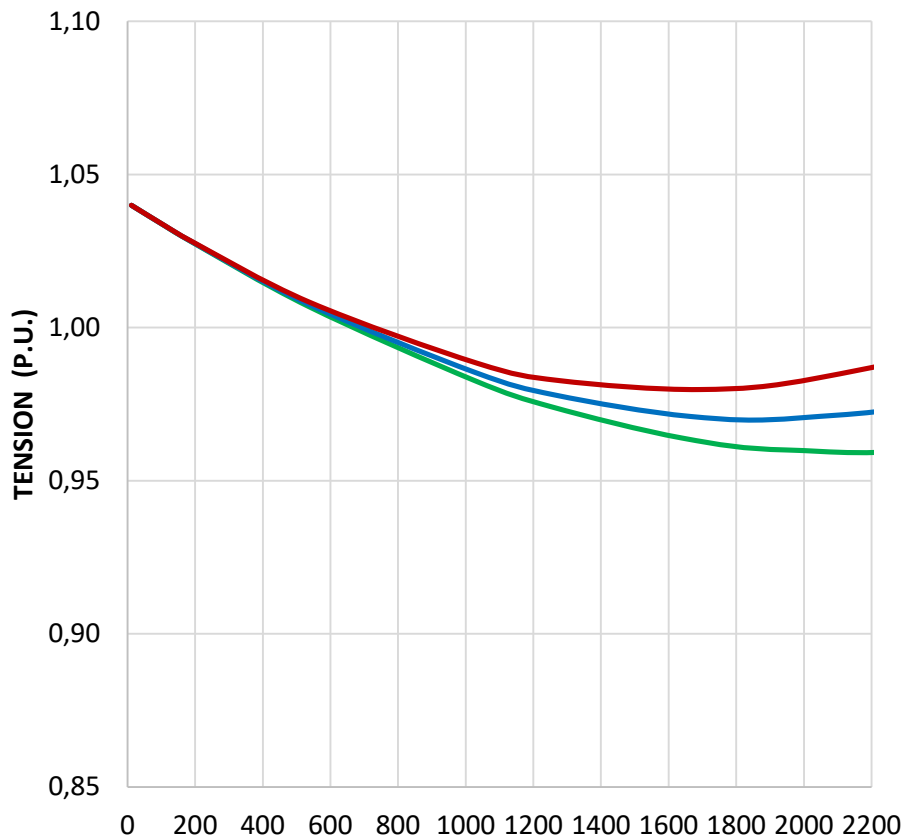
— Cse = 450 uF — Cse = 400 uF — Cse = 350 uF

**FRECUENCIA DEL GIAA - IE1**  
RPM=1800; Csh= 120 uF

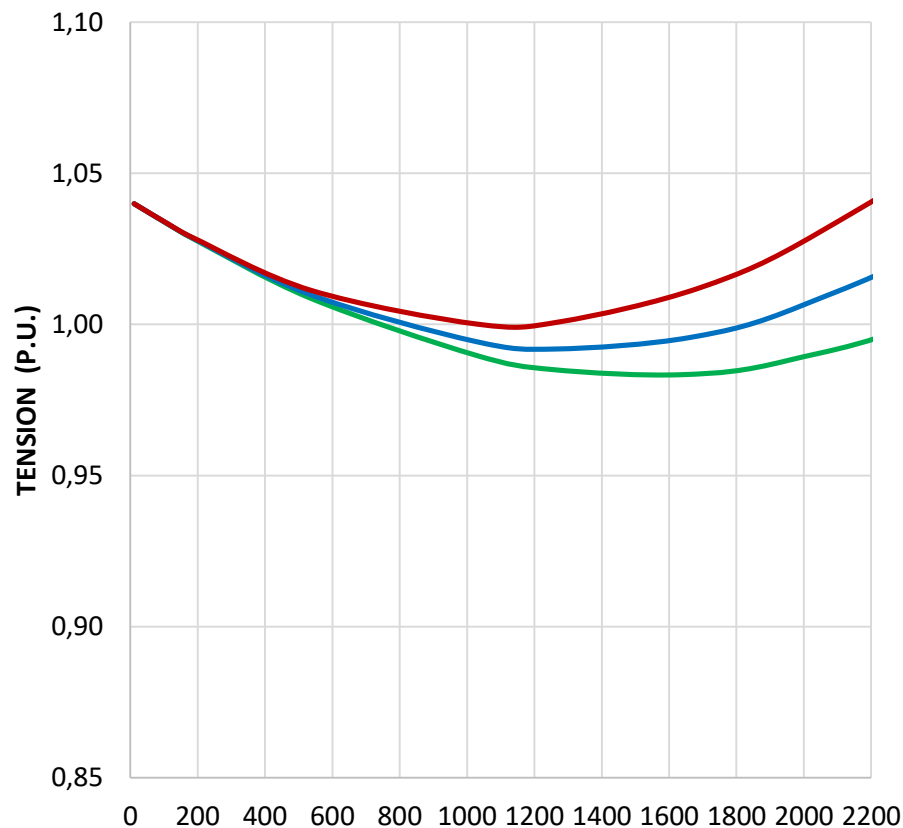


— Cse = 450 uF — Cse = 400 uF — Cse = 350 uF

**TENSION EN LA CARGA DEL GIAA - IE1**  
RPM=1800; Csh= 120 uF



**TENSION EN BORNES DEL GIAA - IE1**  
RPM=1800; Csh= 120 uF



POTENCIA ACTIVA EN LA CARGA (P.U.)

— Cse = 450 uF    — Cse = 400 uF    — Cse = 350 uF

POTENCIA ACTIVA EN LA CARGA (P.U.)

— Cse = 450 uF    — Cse = 400 uF    — Cse = 350 uF

## 5. RESUMEN DE IDEAS



Existen zonas rurales y remotas que no cuentan con energía eléctrica, pero que, en la mayoría de los casos disponen de recursos como el viento, la biomasa y/o recursos micro-hidráulicos, para implementar microcentrales de 0.5 a 100 kW.

En base a su menor costo inicial y al menor costo de mantenimiento, se puede utilizar un generador de inducción del tipo jaula de ardilla, autoexcitado y autorregulado (GIAA), en vez de un generador síncrono.

Este GIAA será seleccionado para operar aislado con un determinado rango de carga (potencia), impulsado por una microcentral hidroeléctrica, biogás o una planta eólica en un cierto rango de velocidades, garantizando una adecuada regulación de tensión y una frecuencia para el rango de carga rural especificado.

# 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. C. Bansal, "Three-Phase Self-Excited Induction Generators: An Overview", IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 20, No. 2, JUNE 2005.
- [2] R. C. Bansal, D. P. Kothari, and T. S. Bhatti, "Induction generator for isolated hybrid power system applications: A review," in Proc. 24th Nat. Renewable Energy Conversion, Bombay, India, Nov.30 /Dec. 2, 2000, pp. 462–467.
- [3] P. K. S. Khan and J. K. Chatterjee, "Three-phase induction generators: A discussion on performance," Elect. Mach. Power Syst., vol. 27, pp. 813-832, 1998.
- [4] C. Grantham, F. Rahman, and D. Seyoum, "A regulated self-excited induction generator for use in a remote area power supply," Int. J. Renewable Energy Eng., vol. 2, no. 1, Apr. 2000.
- [5] R. C. Bansal, T. S. Bhatti, and D. P. Kothari, "Induction generator for isolated hybrid power system applications: A review," J. Inst. Eng., vol. 83, pp. 262–269, Mar. 2003.
- [6] A. Nejmi, Y. Zidani, and M. Naciri, "Investigation on the self excited induction generator provided with a hydraulic regulator," in FIER, 2002, pp. 494–499.
- [7] A.V. Braga A, A.J.J. Rezek A, V.F. Silva A, A.N.C. Viana A, E.C. Bortoni A, W.D.C. Sánchez B, P.F. Ribeiro, "Isolated Induction Generator in a Rural Brazilian Area: Field Performance Tests, ELSEVIER, 2015.
- [8] R. Ramírez, J. Guerra, "Operación de una Central Eólica con Generador Asíncrono de 600 kW en la localidad de Malabrigo, Trujillo", Ministerio de Energía y Minas, 1994.
- [9] H. Meza D, "Método de evaluación de la infraestructura de un Centro de Control y Comunicaciones en la generación de energía eléctrica, Caso: EGASA, Tesis de Doctor en Ciencias de Ingeniería de la Producción, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 2017.
- [10] Bassett, E. y Potter, F., "Capacitive Excitation for Induction Generators", AIEE Trans-PAS Vol. 54, pp 540-545, 1935.
- [11] Doxey, B., "Theory and application of the capacitor-excited induction generator", The Engineer, Vol. 216, pp 893-897, 1963.
- [12] Malik, N., "Capacitance Requirements for Isolated Self Excited Induction Generators", IEEE Transactions on Energy conversion, Vol. EC-2, No 1, March 1987.
- [13] Murthy, S.S., Singh, B.P., Nagamani, C. and Satyanarayama, K.V.V., "Studies on the use of conventional induction motor as self-excited induction generator", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol 3, No 4, pp 842-848, Dec. 1988.
- [14] Novotny, D.W., Gritter D.J. and Studtmann, G.H., "Self excitation in inverter driven induction machine", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-96, No 4, pp 1117-1125, July-August, 1977.

- [15] Breenen, M.B. and Abbondati, A., "Static exciter for induction generators", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol IA-13, No 5, pp 133-139, September, 1977.
- [16] Brown, J.E., Kovacs, K.P. and Vas, P., "A method of including the effects of main flux saturation in the generalized equations of a.c. machines", IEEE Trans. on PAS, 1983, 102, pp. 96-103.
- [17] Ramírez R. y Guerra J., Proyecto de Investigación, "Desarrollo de Generadores Asíncronos para Plantas de Generación Eólica", Delcrosa S.A.- ITINTEC, 1981.
- [18] Ramírez, R., "Modelo matemático de un generador asíncrono autoexcitado con doble bobinado en el estator", Tesis de Ingeniero Electricista, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 1982.
- [19] Vas, P., Hallenius, P., and Grown, J.E., "Cross-saturation in smooth air gap electrical machines", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 6, No 2, pp 336-345, June, 1991.
- [20] Quispe, E. C. "Modelo matemático para el análisis y simulación transitoria del generador asíncrono autoexcitado en operación autónoma". Tesis de Maestría, Universidad del Valle, Colombia, 1994.
- [21] Quispe, E. C., Arias, R.D. y Quintero, J. E., "A New Voltage Regulator for Self-Excited Induction Generator Design, Simulation, and Experimental Results", Proceedings of IEEE International Electric Machines and Drives Conference IEMDC 1997, May, Milwaukee 1997.
- [22] Dawit Seyoum, The Dynamic Analysis and Control of a Self-excited Induction Generator driven by a wind turbine, Doctor of Philosophy, School of Electrical Engineering and Telecommunications, University of New South Wales for the Degree, March, 2003.
- [23] BASHIR AHMAD ZAHIR, "A variable-speed constant-frequency self-excited induction generator, Doctoral Thesis, June, 2005, Loughborough University, June, 2005".
- [24] Dandan Ma, "Self-excited Induction Generator – A Study Based on Nonlinear Dynamic Methods", Doctor of Philosophy, May, 2012, School of Electrical and Electronic Engineering, Newcastle University, United Kingdom.
- [25] Ramírez, R., "Generador de inducción con doble bobinado en el estator autoexcitado con capacitores shunt y autorregulado con capacitores serie", Tesis de Maestría en Ciencias de Ingeniería Eléctrica con Mención en Sistemas de Potencia, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 2013.
- [26] Jyotirmayee Dalei, Development of Voltage Controller and Fault Analysis of Self Excited Induction Generator System, Doctor of Philosophy in Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology Rourkela, INDIA, July 2016.
- [27] Kailash Rana; Duli Chand Meena; "Self Excited Induction Generator for Isolated Pico Hydro Station in Remote Areas", 2nd IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy systems, 2018.



## ROBERTO RUBÉN RAMÍREZ ARCELLES

- rramirez@uni.edu.pe
- rramirez.arcelles@pss-sac.com
- 51 1 989163812
- Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.
- Power System Solutions SAC

Organizan:



Apoya:



**FIN**