

PROTOTIPO PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA BASADO EN UNA MÁQUINA  
DE INDUCCIÓN

HEINER DAVID QUIROGA TORRALBA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
BUCARAMANGA  
2021

PROTOTIPO PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA BASADO EN UNA MÁQUINA  
DE INDUCCIÓN

HEINER DAVID QUIROGA TORRALBA

Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Electrónico

Director

Ricardo Alzate Castaño

Doctorado en Ingeniería Informática y Automática

Co-Director

FABIÁN LEONARDO FORERO ORDÓÑEZ

Magíster en Ingeniería Eléctrica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
BUCARAMANGA

2021

## DEDICATORIA

*Dedico esta tesis a mi madre Gloria Elvia, pues sin ella no lo habría logrado, por eso te doy mi trabajo de grado en ofrenda por tu paciencia y amor madre mía, te amo con mi vida. A mi hermano Flavio porque sé que estarías muy orgulloso de la persona que forjo en mí este proceso universitario y sé que siempre cuidaste de mí, te extraño con el alma.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Quiero agradecer a cada una de las personas que estuvieron presentes en mi proceso universitario, principalmente a quienes me brindaron su amor, apoyo y colaboración los cuales nunca dejaron de creer en mí, mi madre Gloria Elvia, mi Padre Luis David y mi hermanita Karem Gineth, gracias a ustedes entendí que con esfuerzo, constancia y dedicación todos mis proyectos se harán realidad; en especial a mi madre por cada día hacerme ver la vida de una forma diferente y confiar en mis decisiones.*

## CONTENIDO

	pág.
<b>1. OBJETIVOS</b>	<b>17</b>
1.1. OBJETIVO GENERAL	17
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
<b>2. PROTOTIPO EXPERIMENTAL PARA GENERADOR AUTOEXCITADO</b>	<b>18</b>
2.1. EL GENERADOR DE INDUCCIÓN AUTOEXCITADO	18
2.2. SISTEMA EXPERIMENTAL PARA GIAE	21
2.2.1. Variador de frecuencia	23
2.2.2. Conjunto motor-generator	24
2.2.3. Banco de capacitores	25
2.2.4. Rectificador	26
2.2.5. Carga	27
2.2.6. Adquisición de datos	28
2.2.7. Sensor V/I	29
2.2.8. Interfaz de usuario	30
2.2.9. Sistema final implementado	34
2.3. OPERACIÓN AUTOMÁTICA DEL SISTEMA	34
<b>3. PRUEBAS EXPERIMENTALES DE GENERACIÓN</b>	<b>40</b>
3.1. OPERACIÓN EXPERIMENTAL DEL GIAE	40
3.2. EFECTOS DE VARIACIÓN EN POTENCIA MECÁNICA DE ENTRADA	41
3.2.1. Turbina eólica	45
3.2.2. Verificación experimental de turbina eólica acoplada al GIAE	48

<b>4. RECOMENDACIONES</b>	<b>54</b>
<b>5. TRABAJO FUTURO</b>	<b>55</b>
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>56</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>59</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Generador de inducción autoexcitado	14
Figura 2. Curva par-velocidad de una máquina de inducción	19
Figura 3. Relación para $X_c$ en curva de magnetización	22
Figura 4. Diagrama de bloques del sistema experimental para GIAE	22
Figura 5. Variador de frecuencia EURO THERM DRIVES 601	23
Figura 6. Ilustración para unidad de generación electromecánica	25
Figura 7. Curva de magnetización experimental para generador de inducción	26
Figura 8. Banco de capacitores constituido en laboratorio	27
Figura 9. Rectificador trifásico SEMIKRON SK95D12	27
Figura 10. Reóstato utilizado como carga resistiva	28
Figura 11. Sistema de adquisición de datos dSPACE DS1104	29
Figura 12. Sensor para magnitudes en corriente continua	31
Figura 13. Esquema de prototipado rápido en dSPACE ControlDesk	33
Figura 14. Interfaz de usuario desarrollada en ControlDesk	35
Figura 15. Prototipo experimental implementado en laboratorio	36
Figura 16. Diagrama de estados de operación para GIAE	38
Figura 17. Variables experimentales para operación bajo <i>perfil automático</i>	42
Figura 18. Variables experimentales para operación bajo <i>perfil manual</i>	43
Figura 19. Variables experimentales para operación bajo <i>control PI</i>	44
Figura 20. Ilustración para un parque eólico con aerogeneradores	45
Figura 21. Modelo en diagrama de bloques para una turbina eólica	48
Figura 22. Magnitudes eléctricas en corriente continua ante variaciones de $R$	52
Figura 23. Curvas de generación para el conjunto <i>turbina-GIAE</i>	53

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Convenciones máquina de estados de operación del sistema	37

## RESUMEN

**TÍTULO:** PROTOTIPO PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA BASADO EN UNA MÁQUINA DE INDUCCIÓN<sup>1</sup>

**AUTOR:** HEINER DAVID QUIROGA TORRALBA<sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVE:** CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL, ENERGÍAS RENOVABLES, GENERADOR DE INDUCCIÓN AUTOEXCITADO, PROTOTIPO DE LABORATORIO.

### **DESCRIPCIÓN:**

El presente trabajo de grado aborda el problema de generación eléctrica empleando máquinas de inducción del tipo jaula de ardilla a través del esquema autoexcitado. Inicialmente, se realizó el dimensionamiento para un banco de capacitores a partir de la curva de magnetización de una máquina de inducción trifásica de 2 HP actuando como generador autoexcitado. Posteriormente, se acopló el generador a un primotor con velocidad superior a su velocidad síncrona y a partir de su ejecución controlada mediante un variador de frecuencia, fue posible realizar la extracción de potencia en sus terminales. La salida trifásica fue rectificadora para atender la demanda de una carga resistiva. La interacción del usuario con el sistema fue posible a través de una interfaz desarrollada empleando prototipado rápido en MATLAB Simulink para el sistema de adquisición de datos dSPACE. A partir de ello fue posible realizar la generación controlada (en modos manual, automático y regulado ante perturbaciones de carga) a través de cambios de velocidad en el eje del primotor. Adicionalmente, fue posible analizar el efecto de variaciones en la potencia mecánica de entrada incorporando un modelo matemático para emular el efecto de una turbina eólica en la variación de los parámetros de entrada del sistema. Precisamente, esto último permitió constituir experimentalmente las curvas que caracterizan el comportamiento de generación del sistema manifestando una forma con punto de rodilla, que posibilita la exploración de técnicas de control para extraer el punto de máxima potencia, a manera de trabajo futuro.

---

<sup>1</sup> Trabajo de grado

<sup>2</sup> Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Ricardo Alzate Castaño, Doctorado en Ingeniería Informática y Automática.

## ABSTRACT

**TITLE:** ENERGY GENERATION PROTOTYPE BASED ON INDUCTION MACHINES<sup>3</sup>

**AUTHOR:** HEINER DAVID QUIROGA TORRALBA<sup>4</sup>

**KEYWORDS:** EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION, RENEWABLE ENERGY, SELF-EXCITED INDUCTION GENERATOR, TEST-BED.

**DESCRIPTION:**

In this work the electrical generation using self-excited induction machines is addressed. First of all, the reactive power required to accomplish the self-excitation phenomenon in an induction machine acting as generator was calculated experimentally for a three-phase squirrel cage 2 HP machine. By doing so, a Capacitor's bank was sized. Then, the generator was mechanically coupled to a prime mover rotating at speed values higher than those of its synchronous speed, allowing to achieve the self-excitation condition. The power generated was then rectified to feed a resistive load connected as the system output. In order to perform the operation of the generation unit, a user interface was developed employing the *Simulink Embedded Coder* tools available in MATLAB to perform rapid prototyping of algorithms interacting with the hardware platform provided by the *SPACE* data acquisition system. In accordance, it was possible to perform the controlled extraction of power from the generator in manual, automatic and regulated (under load disturbance) velocity pattern modes. Further analyses were performed by introducing variations in the mechanical input power provided by the mathematical model of a wind turbine. The latter allowed to perform the experimental characterization of generation curves depicting the knee waveform typical in applications involving the implementation of control techniques aimed at tracking the maximum power point. This constitutes the current ongoing work.

---

<sup>3</sup> Bachelor Thesis

<sup>4</sup> Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Ricardo Alzate Castaño, Doctorado en Ingeniería Informática y Automática.

## INTRODUCCIÓN

La dependencia de la sociedad en combustibles fósiles ha traído graves consecuencias ambientales y también económicas, sobre todo para países no productores, como sucedió durante la denominada “crisis de 1973” Jordi ROBERTS Paul y VIDAL. *El fin del petróleo*. Ediciones B, 2004.

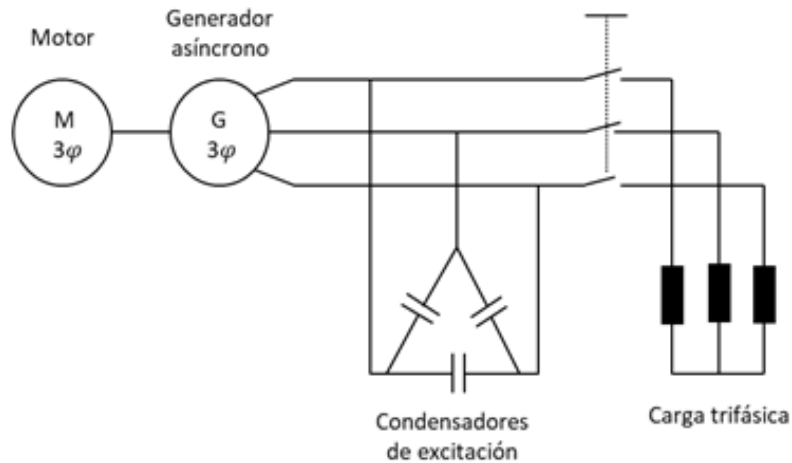
A partir de ello, el sector eléctrico como bastión de la economía moderna, ha sido llamado a renovar su matriz energética para trascender hacia un aprovechamiento masivo y sostenible de recursos naturales disponibles en cada región del planeta Jeremy RIFKIN. *La tercera revolución industrial: ¿Cómo el poder lateral está transformando la energía, la economía y el mundo?* Paidós Estado y Sociedad, 2011. Para cumplir con lo anterior, se han planteado diversas estrategias que incluyen formas alternativas de generación, algunas veces constituidas a partir de modificaciones y/o adaptaciones de tecnologías tradicionales.

Para el caso de generadores eléctricos rotativos, por ejemplo, la máquina síncrona ha sido utilizada de forma extensiva para generación a gran escala en plantas termoeléctricas o centrales hidroeléctricas et al KUNDUR Prabha. *Power system stability and control*. 7.<sup>a</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 1994. De otro lado, en aplicaciones de generación a baja escala (aprovechando recursos renovables como la biomasa, el viento, o la micro-hidrogenación) la máquina de inducción del tipo *jaula de ardilla* presenta ventajas representativas en términos de su reducido costo y el uso de un rotor sin escobillas con correspondiente ausencia de fuente de corriente continua para alimentarlo, lo cual redundo en tareas de mantenimiento relativamente sencillas, en una estructura de máquina eléctrica simple y robusta.

De manera más puntual, el principio de operación de la máquina de inducción como generador se fundamenta en la autoexcitación con condensadores, constituyendo una topología conocida como el “*generador de inducción autoexcitado*” (GIAE) que consiste en la conexión de condensadores en los bornes de generación para aportar la componente reactiva necesaria para conformar, a partir de la tensión remanente de la máquina, una señal trifásica de valor deseado Jose RODRIGO. *El generador de inducción autoexcitado*. Alfaomega, 2013 ver Fig.1. Adicionalmente, se pueden implementar estrategias de control con electrónica de potencia de manera relativamente simple et al. EL YAAKOUBI Ali. “A MPPT strategy based on fuzzy control for a wind energy conversion system”. En: *Procedia Technology* 22 (2016), págs. 697-704; Carlos Alejandro RAMÍREZ GÓMEZ. *Metodología para el diseño de un convertidor DC-DC aplicado a aerogeneradores de baja potencia*. Trabajo de Grado (Magister en Ingeniería - Automatización Industrial). Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 2013. Para aplicaciones de generación a mayor escala, es popular el uso de generadores de inducción del tipo rotor-devanado, en configuraciones doblemente alimentadas (DFIG) Juan Carlos ALVAREZ Juan Manuel y TARGARONA. “Generación eólica empleando distintos tipos de generadores considerando su impacto en el sistema de potencia”. En: *DYNA* 78.169 (2011), págs. 95-104; et al SHARMA Arvind Kumar. “Performance comparison of DFIG and SCIG based wind energy conversion systems”. En: *IEEE Innovative Applications of Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with their impact on Humanity (CIPECH)*. Ghaziabad, India, 2014.

Quispe en Enrique Ciro UISPE OQUEÑA. *Modelo matemático para el análisis y simulación transitoria del generador asíncrono autoexcitado en operación autónoma*. Trabajo de grado (Magister en Sistemas de Generación de Energía Eléctrica). San-

Figura 1. Generador de inducción autoexcitado



tiago de Cali, Colombia: Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Departamento de Electricidad, 1994 realiza un estudio muy completo acerca de la potencialidad del generador autoexcitado en aplicaciones de sistemas aislados en baja potencia. Asimismo Ortiz en Ramiro FLÓREZ. *Pequeñas centrales hidroeléctricas*. Ediciones de la U, 2011 justifica su uso en pequeñas centrales hidráulicas en Colombia.

Si se pretende realizar un estudio a nivel de laboratorio se considera pertinente crear una fuente que emule los perfiles de entrada al GIAE, lo cual se puede conseguir de forma práctica a través de un motor controlado mediante un variador de velocidad.

Alrededor de esta temática en la Universidad Industrial de Santander se han realizado diversos trabajos, entre los cuales se destacan: Sergio Nicolas MORENO SANCHEZ Sergio Andres y PINILLA CAÑÓN. *Adecuación y caracterización experimental para un prototipo de laboratorio que realiza control de velocidad de una máquina de inducción*. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela

de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2019 haciendo uso de un variador comercial en el cual se diseña e implementa un lazo de control PI para regular la velocidad de rotación del sistema y ESPARRAGOZA GOMEZ Cristhian Danilo y TORRES PRADA Andrés Felipe RINCON CONTRERAS Eduardo Andrés. *Banco de pruebas dinámico para arrancadores para un motor de inducción trifásico para prácticas de laboratorio mediante el software LabVIEW*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2016 en el que se diseñó y construyó un banco de pruebas que permitió configurar diferentes tipos de arranque para un motor de inducción trifásico. A nivel nacional: en Jorge Olmedo RINCÓN MORALES Diana Fernanda y SERNA VANEGAS. *Diseño de un controlador de velocidad para un motor de inducción utilizando control vectorial*. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). Cauca, Colombia: Universidad del Cauca, 2004 se diseña un control de velocidad para un motor de inducción utilizando control vectorial y en Rolando Alexis MORENO VACCA. *Regulación de velocidad de un motor trifásico a través de la variación de la relación voltaje/frecuencia de la línea de alimentación*. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). Colombia: Fundación Universitaria Los Libertadores, 2016 se establece un modelo para regulación de velocidad en una máquina eléctrica mediante la relación voltaje/frecuencia. En el ámbito internacional: en José TOAPANTA. *Diseño e implementación de una demostración práctica en el laboratorio de máquinas eléctricas utilizando el variador de frecuencia como fuente de ahorro de energía*. Trabajo de grado (Ingeniero Eléctrico-Mecánico). Ecuador: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2012 se analiza la reducción de consumos en máquinas eléctricas haciendo uso del TIA Portal; en José Manuel PIÑERO RUEDA. *Control de un motor de inducción usando un variador de frecuencia*. Trabajo de grado (Ingeniero de las Tecnologías de Telecomunicaciones). España: Universidad de Sevilla, 2015 se

hace uso de un PLC para controlar un variador de frecuencia y en Carlos. CAUDURO. *Control de velocidad sin sensor de motores de inducción sujetos a disturbio de torque*. Trabajo de grado (Maestro en Ingeniería Eléctrica). Brasil: Universidad Federal de Santa María, 2008 se presenta el estudio de un servomecanismo *sensorless* contra variaciones de par de carga.

El presente trabajo de grado abordará la implementación de la generación de energía haciendo uso del GIAE mediante la creación de un perfil de torque aplicado como entrada, que se definirá en un motor controlado mediante un variador de velocidad.

A partir de lo anterior se plantean las siguientes inquietudes: ¿Cómo configurar un sistema motor-generador para emular generación de energía a baja escala? ¿Cómo controlar el perfil de generación de un GIAE mediante un control de velocidad para un motor que actúa como primotor? ¿Cómo desarrollar una interfaz que permita la visualización de las variables del sistema motor-generador?

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

- Diseñar y construir un prototipo de sistema para la generación controlada de energía a partir de un generador de inducción autoexcitado.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Configurar un sistema motor-generador en laboratorio empleando máquinas de inducción;
- Instrumentar el prototipo para realizar la variación controlada de los perfiles de generación a partir de la velocidad del motor;
- Desarrollar una interfaz de usuario para manipular y visualizar electrónicamente las variables del sistema.

## **2. PROTOTIPO EXPERIMENTAL PARA GENERADOR AUTOEXCITADO**

El presente *Capítulo* aborda la concepción estructural y posterior diseño e implementación para un prototipo experimental de sistema de generación basado en una máquina de inducción bajo el esquema de autoexcitación.

Inicialmente se presentarán los fundamentos conceptuales de operación del sistema, para posteriormente configurar elementos en laboratorio que permitan obtener el comportamiento esperado a partir de dicha teoría de base.

La caracterización funcional del prototipo y las acciones básicas de control en lazo cerrado para el mismo, se considerarán en un *Capítulo* posterior del presente documento.

### **2.1. EL GENERADOR DE INDUCCIÓN AUTOEXCITADO**

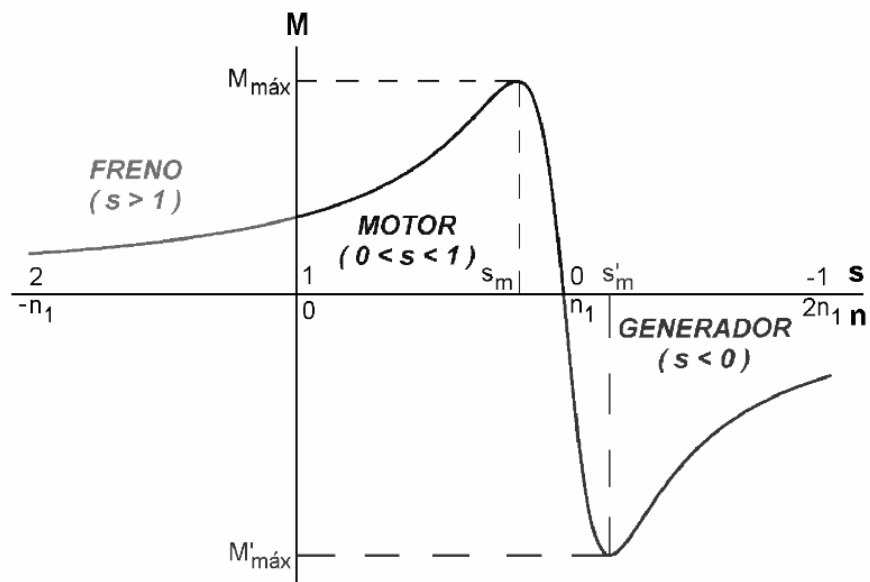
Retomando las ideas introducidas en el *Capítulo* y en la Fig. 1, el GIAE está constituido por un motor de inducción convencional cuyo rotor es impulsado por un primotor, a su vez complementado por un banco de capacitores conectado a su estator para proporcionar la componente de reactivos necesaria en el proceso de generación.

En particular, el modelo matemático equivalente para una máquina de inducción (sea esta motor o generador) corresponde con un arreglo circuital de resistencias e inductores Stephen CHAPMAN. *Máquinas Eléctricas*. Mc-Graw Hill, 1987, lo cual evidentemente justifica el carácter inductivo en el comportamiento eléctrico del sistema. Más aún, la máquina de inducción absorbe durante su operación una cantidad

importante de potencia reactiva que deberá ser provista por alguna fuente para magnetizar el rotor (cortocircuitado y sin posibilidad de acceso desde el exterior para el GIAE). De esta manera, para un régimen de operación aislado de la red principal de distribución un generador de inducción deberá recurrir al principio de autoexcitación para satisfacer dicho requerimiento.

Desde un punto de vista funcional, una máquina de inducción sigue la curva *par-velocidad* mostrada en la Fig. 2. Como se observa, la máquina puede operar como motor, generador o freno, dependiendo del valor de su velocidad de rotor (o equivalentemente del signo del par o torque aplicado en su eje CHAPMAN, *Máquinas Eléctricas*).

Figura 2. Curva par-velocidad de una máquina de inducción



A partir de ello se definen conceptos importantes como la velocidad síncrona de la máquina ( $n_1$ ) para la cual el torque  $M$  es nulo. Asimismo, se define una cantidad

relativa denominada deslizamiento  $s$  a partir de la expresión siguiente:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1},$$

siendo  $n$  la velocidad de la máquina en RPM. Así entonces, se observa que la máquina operará como generador para un deslizamiento negativo, o equivalentemente, para  $n > n_1$ . Otro parámetro importante es el deslizamiento máximo  $s_m$ , para el cual la máquina alcanza el máximo torque y que además define el rango límite para una operación estable, pues de la gráfica es claro que para deslizamientos fuera de este rango no existen incrementos de torque y por tanto no se incrementa la potencia mecánica (definida como el producto entre el torque y la velocidad) incorporando pérdidas CHAPMAN, *Máquinas Eléctricas*.

Por tanto, la operación de la máquina parte del reposo con una velocidad  $n = 0$  que posteriormente deberá incrementarse hasta alcanzar la velocidad síncrona  $n = n_1$ . En ese momento el torque será  $M = 0$  y la máquina estará lista para comportarse como generador ante incrementos adicionales de  $n$ . Para ello, deben garantizarse condiciones de magnetización incluyendo capacitores que satisfagan el principio de autoexcitación en el modo siguiente:

- i. En el transitorio inicial la máquina se opera en vacío (i.e. sin carga) puesto que aún no se genera potencia;
- ii. La tensión  $V_s$  (de fase) en los bornes del estator se intenta llevar y mantener en un valor nominal deseado a partir de la circulación de una corriente  $I_c$  a través del banco de capacitores (conectado en  $Y$ ), manteniendo la relación eléctrica dada por:

$$V_s = I_c \times X_c = \frac{I_c}{2\pi f C}, \quad (1)$$

significando una línea recta entre  $V_s$  e  $I_c$ , con pendiente constante ante valores

fijos para  $f$  y  $C$ ;

- iii. Incrementos posteriores en la velocidad del rotor tenderán a incrementar  $I_c$  y por ende a  $V_s$ ;
- iv. Al interior de la máquina circulará una corriente por el devanado de estator que polarizará eléctricamente la inductancia de magnetización. En la medida que la velocidad  $n$  del rotor se acerque a su valor síncrono  $n_1$ , el deslizamiento  $s$  se hará cero y la corriente medida en el estator corresponderá con la corriente de magnetización;
- v. La relación entre la corriente de magnetización y la tensión del estator se denomina la *curva de magnetización* de la máquina. Ante un escenario de operación en vacío, dicha corriente de magnetización corresponde con  $I_c$ ;
- vi. Así entonces, un valor de  $V_s$  generará un valor de  $I_c$ , que posteriormente generará un incremento en la magnetización del rotor y un correspondiente incremento adicional en  $V_s$ . Este procedimiento se repite hasta alcanzar la saturación magnética del rotor de la máquina;
- vii. Considerando la relación entre  $V_s$  e  $I_c$  dada por (1), el valor de  $C$  define el punto de corte entre las curvas de magnetización y la aproximación lineal, correspondiendo con el valor nominal deseado para  $V_s$  RODRIGO, *El generador de inducción autoexcitado*. La Fig. 3 ilustra gráficamente lo anterior;

## 2.2. SISTEMA EXPERIMENTAL PARA GIAE

La Fig. 4 muestra las principales etapas del sistema GIAE implementado en laboratorio. A continuación se realizará una descripción detallada para cada uno de los bloques individuales, indicando a su vez los elementos utilizados y su configuración funcional como parte del sistema.

Figura 3. Relación entre  $X_c$  y el punto de corte entre la curva de magnetización y la aproximación lineal

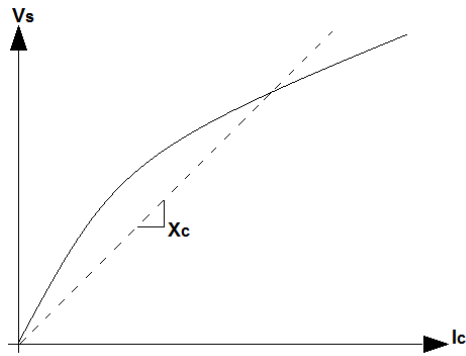
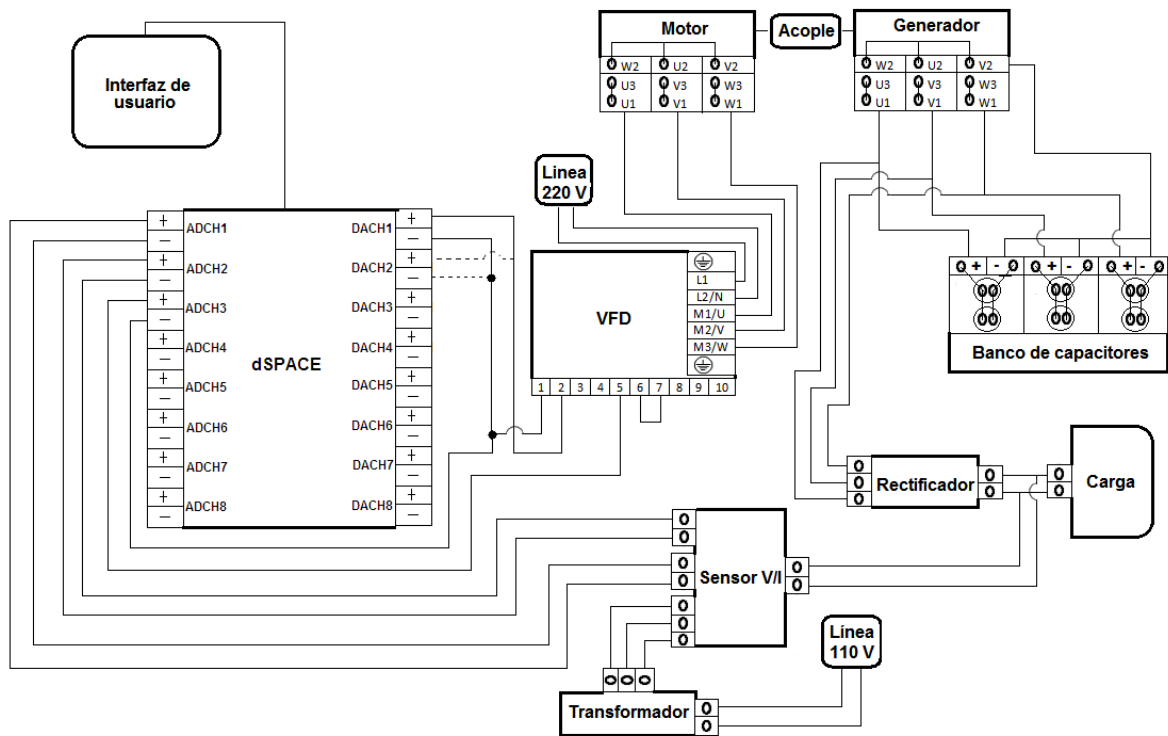


Figura 4. Diagrama de bloques del sistema experimental para GIAE



**2.2.1. Variador de frecuencia** Un VFD (*Variable Frequency Drive*) o variador de frecuencia, es un dispositivo que modifica la velocidad de una máquina de inducción a partir de manipulación de los valores de frecuencia del voltaje aplicado en sus terminales de alimentación.

El principio de operación del VFD aprovecha la versatilidad de los circuitos inversores de potencia basados en dispositivos electrónicos, para construir las formas de onda deseadas en la alimentación trifásica de la máquina. Adicionalmente, mantiene una relación constante entre la magnitud del voltaje de alimentación y la frecuencia de la señal, hasta alcanzar condiciones nominales. A lo anterior se le conoce como control escalar de velocidad o simplemente  $V/f$ . En el *Capítulo 6* de CHAPMAN, *Máquinas Eléctricas* se realiza una explicación detallada del método.

Figura 5. Variador de frecuencia EURO THERM DRIVES 601



Ahora bien, para objetivos del presente proyecto se empleó un VFD del tipo EURO THERM DRIVES 601 con apariencia física mostrada en la Fig. 5. La configuración del dispositivo se realiza siguiendo las indicaciones incluidas en el manual del fabricante

EUROTHERM DRIVES LIMITED. *Eurotherm Drives 601: Product manual*. England, 1999. Un resumen de las más importantes se presenta a continuación:

- El *modo de operación* se configura como remoto, para facilitar el mando del VFD a través de una interfaz de software;
- Los parámetros configurados en el variador fueron los siguientes: 1)  $P1 = 0$  Hz - Velocidad mínima o frecuencia de inicio del VFD; 2)  $P2 = 60$  Hz - Velocidad máxima o máxima frecuencia del VFD; 3)  $P13 = 0$  - Selección de método para punto de ajuste en voltios (0 - 10 V);
- Adicionalmente, se configuraron los siguientes parámetros de arranque como opciones de operación a través de la interfaz de usuario desarrollada: 1) modo automático / variación de frecuencia 0 – 36 Hz / variación de tensión 0 – 6 V / duración de rampa 75 s; 2) modo manual / variación de frecuencia 0 – 60 Hz / variación de tensión 0 – 10 V / duración de rampa personalizada.

Las conexiones del variador con los demás dispositivos del sistema, se indican a partir del nombre de sus terminales en el esquema general de la Fig. 4.

**2.2.2. Conjunto motor-generador** Para la etapa de generación, se empleó una máquina de inducción jaula de ardilla SIEMENS de referencia 11a7 080-4ya60, con los siguientes datos de placa: 2 HP; 1700 RPM; 220 YY / 440 Y VAC; 7 / 3.5 A; 60 Hz;  $\cos \phi = 0.8$ ; 12.1 kg. Una ilustración de la apariencia física del generador se presenta en la Fig. 7(a).

Asimismo, para impulsar el movimiento del rotor del generador se acondicionó (a manera de primotor) un motor de inducción jaula de ardilla WEG de referencia W22, con los siguientes datos de placa: 1 HP; 3410 RPM; 220 YY / 440 Y VAC; 3 / 1.5 A;

60 Hz;  $\cos \phi = 0.85$ . Una ilustración de la apariencia física del motor se presenta en la Fig. 7(b).

Figura 6. Ilustración para unidad de generación electromecánica

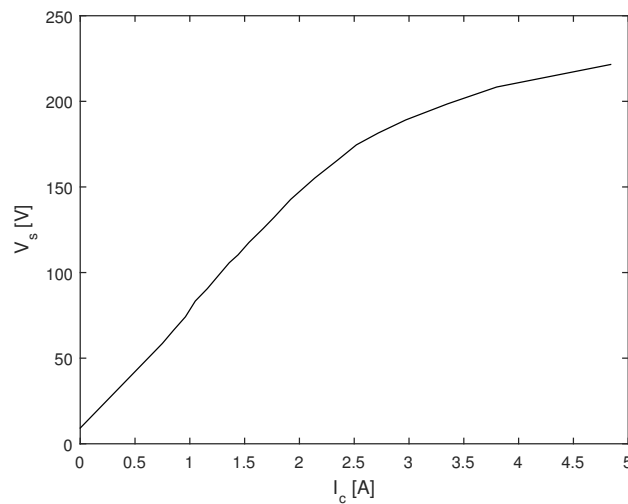


Por tanto, para la operación conjunta de ambos dispositivos fue necesario realizar una adecuación física correspondiente al acople mecánico entre sus ejes de rotor, lo cual implicó construir piezas en hierro para ajustar los terminales rotativos y adecuar bases sobre un riel común para garantizar una nivelación apropiada de las máquinas, para evitar vibraciones al rotar a máxima velocidad.

**2.2.3. Banco de capacitores** Tal y como fue explicado en la *Sección 2.1*, para poder realizar el proceso de autoexcitación la máquina necesita conectarse en paralelo con un banco de capacitores que suministre la potencia reactiva necesaria para la magnetización del devanado de rotor. De esta manera, atendiendo al estudio experimental desarrollado por Machuca en Jaime Andrés MACHUCA MAYORGA. *Control droop de un generador de inducción en una microrred simple*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléc-

trica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2020, la Fig. 7 incluye los resultados experimentales de la curva de magnetización de la máquina empleada como generador y por tanto, tomando en consideración su relación con la reactancia  $X_c$  a partir de la Fig. 3, es posible considerar un valor de capacitancia de magnetización  $C \approx 90 \mu F$ .

Figura 7. Curva de magnetización experimental para generador de inducción

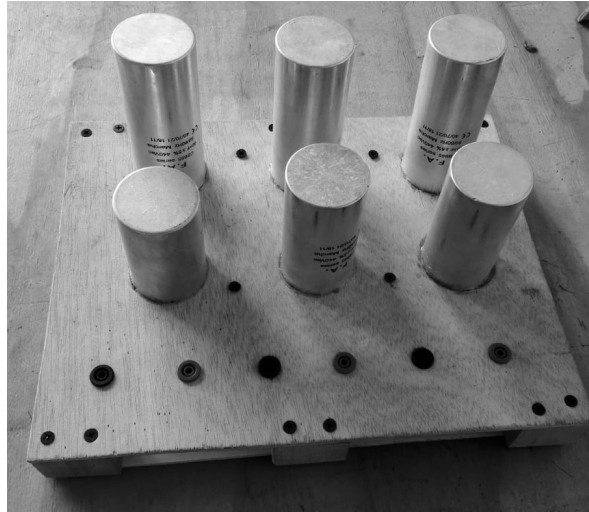


A partir de ello, se emplearon capacitores de marcha de  $30 \mu F$  y  $60 \mu F$  conectados en paralelo, para configurar cada rama del banco de capacitores conectado en Y. Los capacitores de marcha operan en modo permanente y por tanto mejoran el factor de potencia y reducen el consumo de corriente y la temperatura de operación. Una ilustración para la apariencia física del banco de capacitores constituido en laboratorio se presenta en la Fig. 8.

**2.2.4. Rectificador** En favor de cuantificar la energía generada por el GIAE, se realizó un tratamiento en corriente continua para las variables eléctricas del sistema.

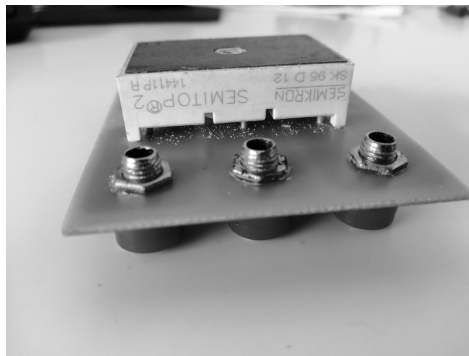
Para este propósito se empleó un puente rectificador trifásico de tipo estático y de

Figura 8. Banco de capacitores constituido en laboratorio



marca *SEMIKRON* modelo SK95D12. La apariencia física del dispositivo se muestra en la Fig. 9, presentando una capacidad de operación de hasta 400 W a 95 A.

Figura 9. Rectificador trifásico *SEMIKRON* SK95D12



**2.2.5. Carga** Como carga del sistema se empleó una combinación en serie de 4 reóstatos de marca CENCO con apariencia física mostrada en la Fig. 10 y las siguientes especificaciones eléctricas: 1)  $42.8 \Omega / 3.1 \text{ A}$ ; 2)  $41.7 \Omega / 3.1 \text{ A}$ ; 3)  $42.5 \Omega / 3.1 \text{ A}$  y 4)  $87.1 \Omega / 2.2 \text{ A}$ . La selección para una carga puramente resistiva se

justifica en la intención de analizar la generación de potencia activa por parte del GIAE. El análisis de generación de potencia reactiva se considerará en proyectos complementarios al presente trabajo de grado.

De esta manera, fue posible configurar una carga total de  $214.1 \Omega$  representando a su vez una potencia máxima de  $1036.2 \text{ W}$  (tras la limitación de  $2.2 \text{ A}$  máximos en uno de los reóstatos) y una máxima tensión rectificadora de  $471 \text{ V}$ .

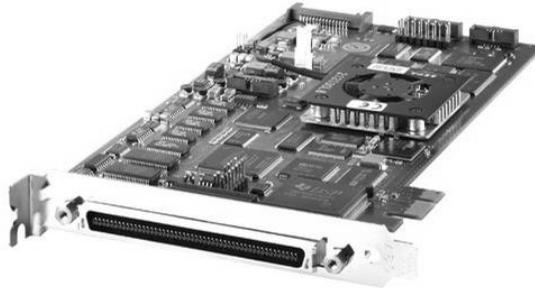
Figura 10. Reóstato utilizado como carga resistiva



**2.2.6. Adquisición de datos** Para la correcta interacción con el prototipo experimental se realizó la captura y envío de señales a través de la tarjeta  $\text{dSPACE}$  de referencia *DS1104*, especialmente concebida para prototipado rápido de algoritmos de control a través de *MATLAB Simulink*. La apariencia física de la tarjeta se muestra en la Fig. 11, y cuenta entre otras con las siguientes características técnicas: procesador de 64 bits con soporte para operaciones de punto flotante; SDRAM de 32 MB y 8 MB de memoria flash; 4 canales multiplexados equipados con un conversor A/D de 16 bits para muestreo y retención con entrada máxima de  $10 \text{ V}$ ; 4 canales paralelos con convertidores A/D independientes de 12 bits para muestreo y retención con entrada máxima de  $10 \text{ V}$ ; 8 canales de conversión D/A con salida máxima a  $\pm 10 \text{ V}$  y  $\pm 5 \text{ mA}$ , además de 20 pines de entrada/salida digital con niveles del tipo TTL y

corriente de hasta  $\pm 5$  mA.

Figura 11. Sistema de adquisición de datos dSPACE DS1104



A partir de ello, tal y como se visualiza en el detalle proporcionado por la Fig. 4, se emplearon los siguientes canales para efectos de sensado y actuación del GIAE: 1) *DACH1* - salida perfil de velocidad manual; 2) *DACH2* - salida perfil de velocidad automático; 3) *ADCH1* - entrada sensor de corriente; 4) *ADCH2* - entrada sensor de voltaje y 5) *ADCH3* - entrada para lectura de frecuencia desde VFD.

**2.2.7. Sensor V/I** El sensado de las magnitudes eléctricas a la salida del circuito rectificador (i.e. en corriente continua) se realizó utilizando sensores de efecto hall de marca LEM y referencias LV 25-P (para voltaje) / LA 25-NP (para corriente). La apariencia física de los dispositivos se aprecia en la Fig. 13(a), donde además se muestra una tarjeta de circuito impreso que complementa el montaje con elementos de amplificación y acople, que a su vez se configuran según el diagrama esquemático de la Fig. 13(b). Para detalles al respecto del diseño de la tarjeta de sensado se sugiere al lector interesado consultar Jaime Armando MENESES AGRESOTH

Victor Elias y ALMEYDA RUEDA. *Sistema de adquisición y adecuación de señales eléctricas para el control y monitorización del módulo SEMITEACH-IGBT de Semikron*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2014. De otro lado, sus especificaciones técnicas más relevantes pueden resumirse en lo siguiente: rangos de medida de 10-500 V (LV 25-P) y  $\pm 36$  A (LA 25-NP); corriente nominal de 10 mA; tensión de alimentación en corriente continua de  $\pm 15$  V y ancho de banda de 150 kHz.

A partir de lo anterior, se justifica la elección del dispositivo tomando en cuenta que los rangos de voltaje y corriente esperados en la práctica corresponden con 0-300 V y 0-1.6 A, respectivamente. Asimismo, el diagrama de conexiones del sensor al proceso (*rectificador*) y a la etapa de alimentación, se presenta en la Fig. 4 (donde el transformador corresponde con un reductor de 110 a 12 V / 60 W, con *tap* central).

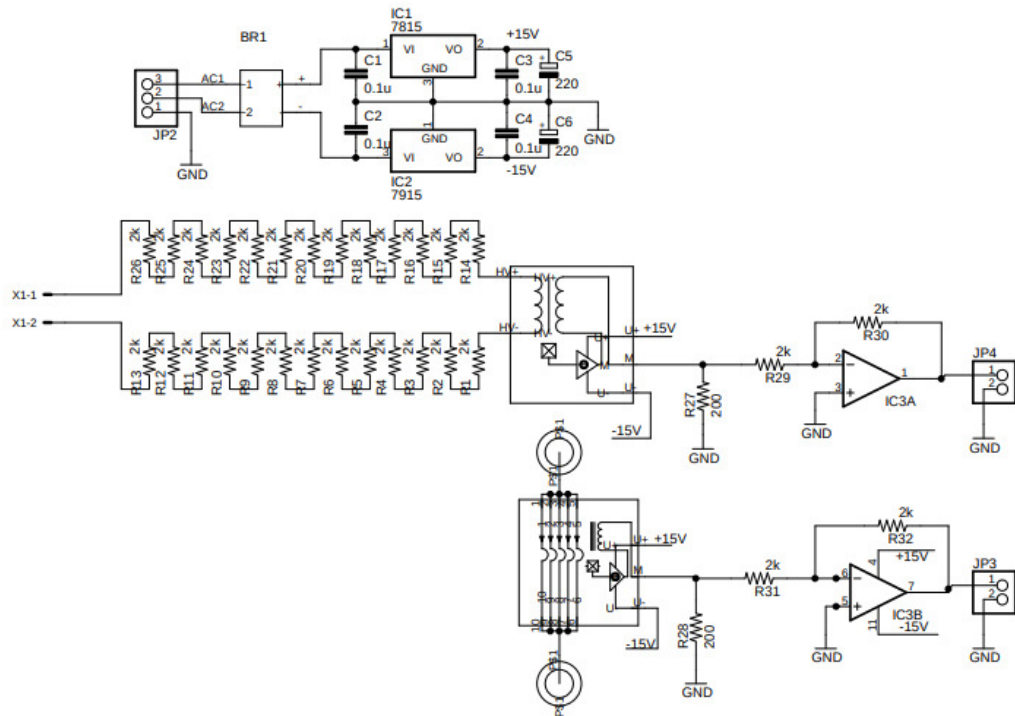
**2.2.8. Interfaz de usuario** Una característica importante del prototipo experimental a ser desarrollado está en la capacidad de manipulación que posea un *usuario* para interactuar con el sistema de generación, a partir de la asignación y ajuste de sus parámetros.

Para este propósito se hizo uso de las características de prototipado rápido que posee el sistema de adquisición dSPACE a través de un entorno de programación de alto nivel denominado ControlDesk, enteramente compatible con el entorno Simulink de MATLAB. Más específicamente, a través de la herramienta Simulink Embedded Coder, MATLAB convierte de manera automática y casi invisible las diferentes etapas de un diagrama de bloques en código C++ optimizado para su apropiada operación

Figura 12. Sensor utilizado para captura de magnitudes eléctricas en corriente continua



(a) Montaje en circuito impreso



(b) Diagrama esquemático

en el procesador de la tarjeta dSPACE 1104. De esta manera, el ControlDesk permite acceder a los datos adquiridos por los puertos de entrada del sistema de adquisición, visualizar la información generada en los puertos de salida y recibir parámetros ingresados de manera arbitraria por el usuario, atendiendo a la estructura ilustrada en la en la Fig.13.

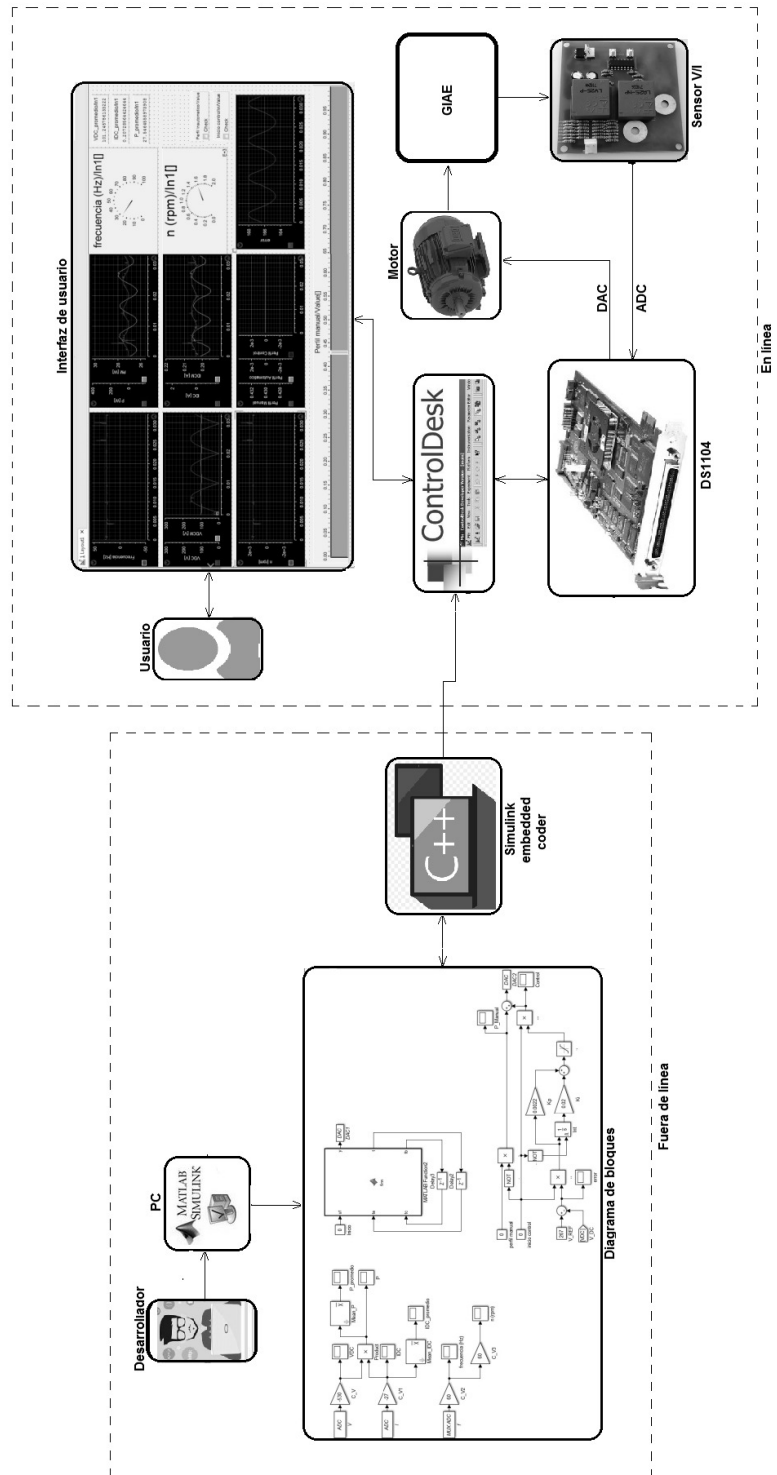
Tomando en cuenta lo anterior, se definen los siguientes parámetros de entrada para la interfaz de usuario desarrollada en ControlDesk:

- *selección de perfil automático*, para cargar valores de velocidad con variación previamente establecida;
- *activación de control (PI)*, para regular la tensión DC generada y por tanto deberá seleccionarse sólo cuando se cumplan las condiciones de autoexcitación;
- *selección de perfil manual*, para cargar valores de velocidad con variación seleccionada manualmente por el usuario.

Asimismo, se consideran los siguientes parámetros de salida:

- *frecuencia del motor*: valor de frecuencia en Hz entregado por el VFD;
- *velocidad del motor*: valor de velocidad en RPM entregado por el VFD;
- *VDC y VDC promedio*: valor de tensión en V a la salida del rectificador trifásico;
- *IDC e IDC promedio*: valor de corriente en A a la salida del rectificador trifásico;
- *potencia y potencia promedio*: valor de potencia en W a la salida del rectificador trifásico;
- *perfil seleccionado*: indicador para elección entre perfiles (manual, automático y de control);

Figura 13. Esquema de prototipado rápido en dSPACE ControlDesk



- *señal de error*: visualiza la diferencia entre el voltaje instantáneo medido y el valor de referencia.

A partir de ello, la Fig. 15(a) muestra la organización de dicha información en la pantalla de visualización, cuya presentación final para el usuario se muestra en la Fig. 15(b).

La operación del sistema se explicará con mayor detalle en la *Sección 2.3*. Adicionalmente, en la referencia Nicanor QUIJANO y Kevin PASSINO. *A Tutorial Introduction to Control Systems Development and Implementation with dSPACE*. The Ohio State University. Dept. of Electrical Engineering, 2002 se explica la configuración general para el ControlDesk y el desarrollo de programas simples para interactuar con el sistema de adquisición dSPACE desde Simulink.

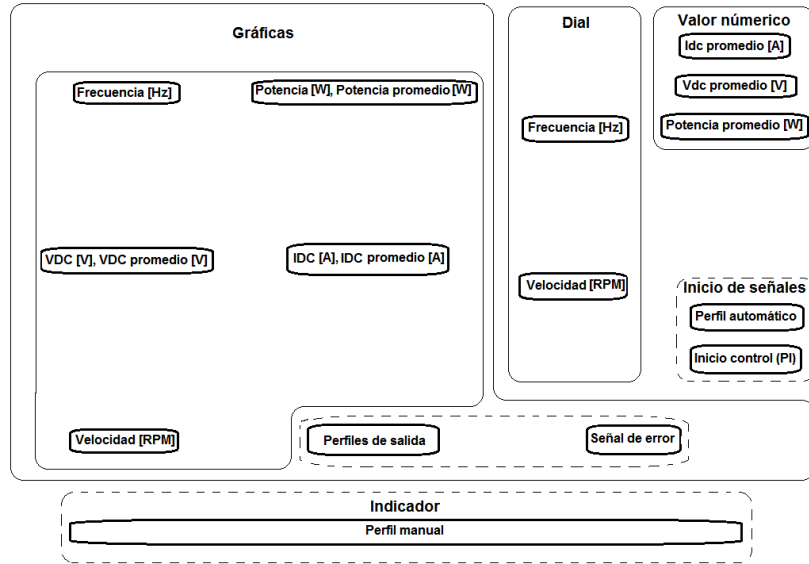
**2.2.9. Sistema final implementado** El prototipo final implementado en laboratorio para el sistema de generación basado en una máquina de inducción autoexcitada se presenta en la Fig. 15, en modo consistente con el diagrama de bloques definido al inicio del *Capítulo* en la Fig. 4.

En particular, la Fig. 16(a) ilustra el detalle de los elementos en el área de generación mientras la Fig. 16(b) realiza una vista panorámica para las etapas del sistema experimental.

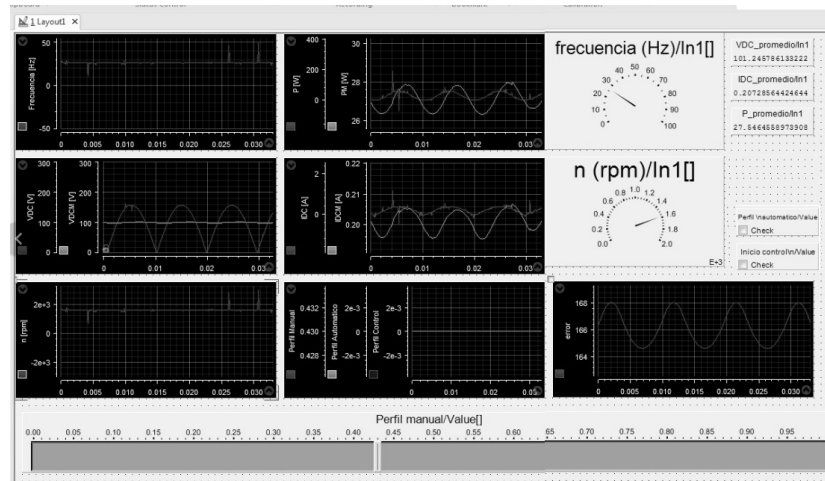
## **2.3. OPERACIÓN AUTOMÁTICA DEL SISTEMA**

La operación del sistema experimental, se resume a través del diagrama de estados mostrado en la Fig. 16. Por tanto, en favor de dar una interpretación para dicho diagrama conviene definir las variables binarias presentadas en la Tabla 1.

Figura 14. Interfaz de usuario desarrollada en ControlDesk

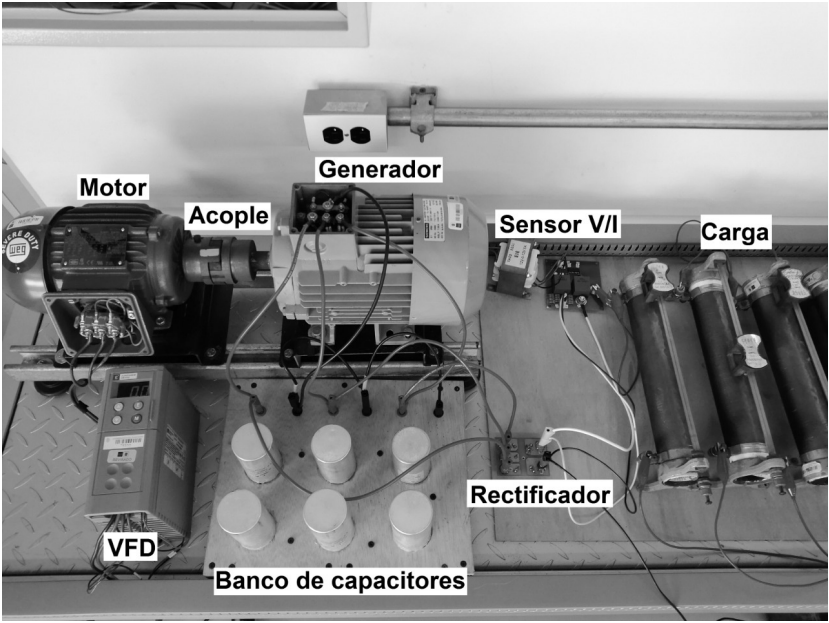


(a) Distribución de elementos de entrada/salida

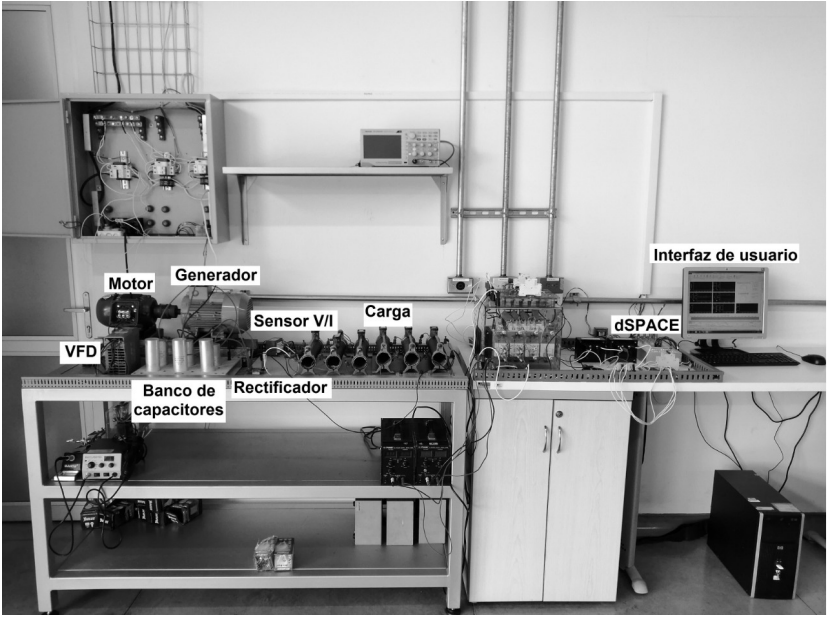


(b) Apariencia de interfaz

Figura 15. Prototipo experimental para generador de inducción autoexcitado implementado en laboratorio



(a) Detalle para elementos de generación



(b) Vista panorámica para etapas del sistema

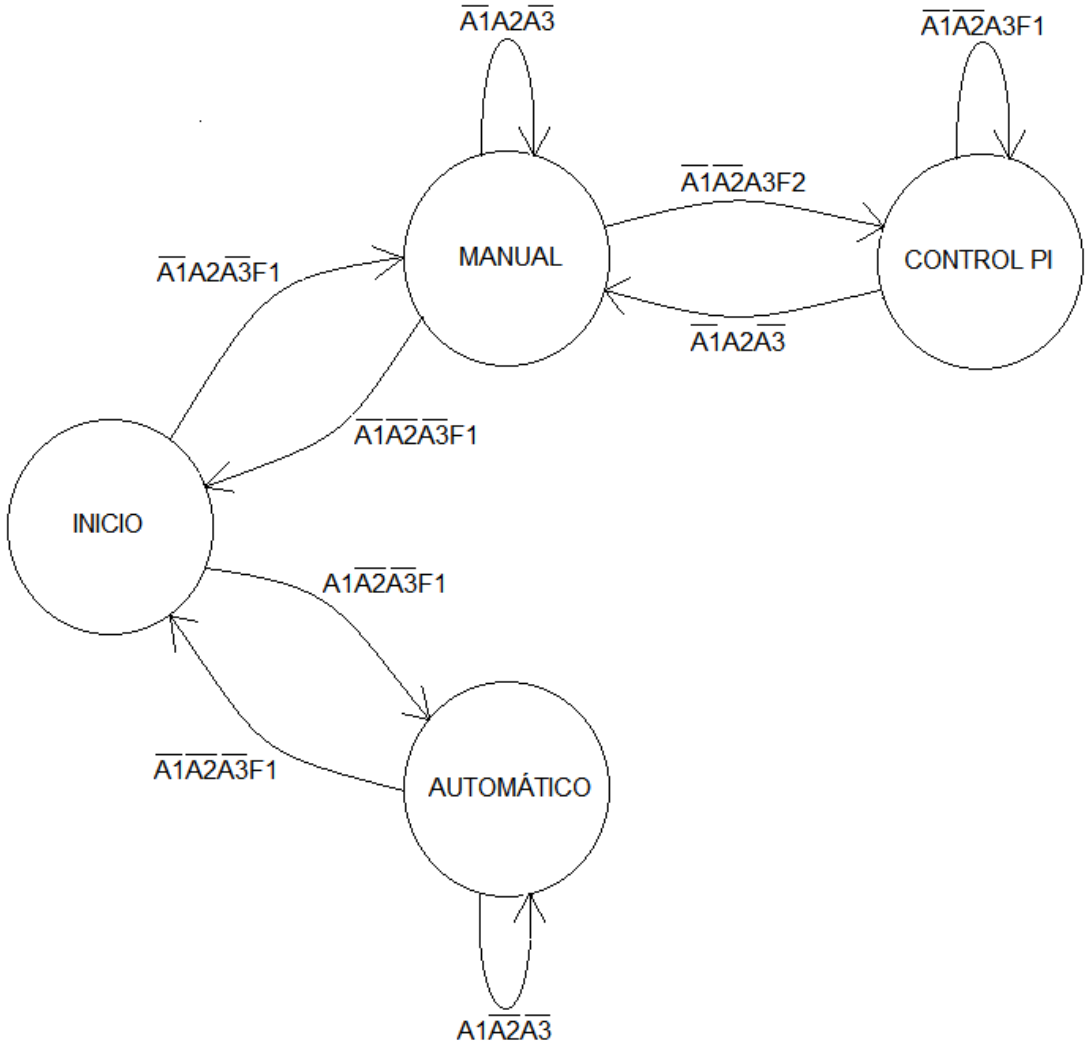
Tabla 1. Convenciones máquina de estados de operación del sistema

Convención	Descripción
$A_1$	selección de perfil automático
$A_2$	selección de perfil manual
$A_3$	selección de control PI
$F_1$	bandera 1: $n = 0$
$F_2$	bandera 2: $n > n_1$

A partir de ello, es claro que el sistema se concibe para operar en uno de tres estados: 1) operación bajo *perfil manual*; 2) operación bajo *perfil automático* y 3) operación bajo *control PI*. También es evidente de dicho diagrama de operación, que existe un estado de *inicio* que permite agregar una condición segura (condición de no-opere o NOP) a la cual se referencian los demás estados operativos. De esta manera, partiendo del INICIO se realizará una ejecución de *perfil automático* siempre que se seleccione dicho perfil ( $A_1 = 1$ ), no esté seleccionado el modo de *perfil manual* ( $A_2 = 0$ ) ni tampoco el de *control PI* ( $A_3 = 0$ ) y el sistema parta del reposo ( $F_1 = 1$ ). Bajo este estado AUTOMÁTICO el sistema experimentará una rampa de velocidad con pendiente de 122.22 RPM/s (tanto se subida como de bajada) y valor máximo de 2200 RPM, en un comportamiento cíclico que se repetirá indefinidamente a lo largo del tiempo hasta que se deshabilite la selección del perfil automático ( $A_1 = 0$ ), para regresar al estado de INICIO cuando la condición de velocidad cero se cumpla ( $F_1 = 1$ ).

Otra posibilidad de operación es que partiendo del estado de INICIO se seleccione el modo de *perfil manual* ( $A_2 = 1$ ), estando deshabilitados los modos de *perfil automático* ( $A_1 = 0$ ) y de *control PI* ( $A_3 = 0$ ), además de comprobarse una velocidad cero ( $F_1 = 1$ ). De este modo, el autómata se posicionará en el estado de operación MANUAL en el cual un usuario ingresará de manera voluntaria a través de la interfaz, el valor de velocidad del generador en un rango posible de valores de entre 0

Figura 16. Diagrama de estados de operación para GIAE



y 3100 RPM. A partir de allí, el autómata podrá regresar a la posición de INICIO si se deshabilita el modo de *perfil manual* ( $A_2 = 0$ ) y se comprueba una velocidad cero en el generador ( $F_1 = 1$ ). Adicionalmente, desde el estado MANUAL también será posible posicionarse en el estado CONTROL PI si se selecciona el modo de *control PI* ( $A_3 = 1$ ), no se tienen habilitados los modos de *perfil automático* ( $A_1 = 0$ ) ni *manual* ( $A_2 = 0$ ) y adicionalmente la velocidad del generador se encuentra por encima de la velocidad de sincronismo ( $F_2 = 1$ ). Bajo este estado de operación se realizará la regulación del voltaje en corriente continua medido a la salida del rectificador, para mantener un voltaje de 267 V. Este valor de voltaje se selecciona debido a que corresponde con el rango medio de valores posibles de salida obtenido a partir de una caracterización experimental. Adicionalmente, los parámetros del controlador PI se seleccionaron como  $k_p = 0.0022$  y  $k_i = 0.02$  mediante técnicas empíricas de ensayo y error. Posteriormente, al deshabilitar la elección del modo de control PI el autómata pasará al estado de operación MANUAL ante un valor de velocidad arbitrario, que puede ser superior o no a la velocidad de sincronismo del generador.

### 3. PRUEBAS EXPERIMENTALES DE GENERACIÓN

Posterior a la concepción del prototipo experimental para un generador de inducción autoexcitado (GIAE), se presenta en este *Capítulo* la verificación del comportamiento del sistema a partir pruebas de laboratorio, buscando identificar las curvas que definen la caracterización de sus variables operativas.

Más precisamente, se realizará un análisis de operación simple a través de valores de velocidad aplicados como entrada en el primotor y a partir de ello mediciones sobre sus parámetros eléctricos. Adicionalmente, se verificará la influencia de la variación en la potencia mecánica de entrada a través de un bloque que emula la acción de una turbina eólica, actuando como fuente primaria de energía.

#### 3.1. OPERACIÓN EXPERIMENTAL DEL GIAE

Tomando como base los contenidos presentados en la *Sección 2.3* y, más precisamente el esquema de operación ilustrado en la Fig. 16 para el prototipo experimental del sistema, se desarrollaron pruebas en laboratorio para verificar la funcionalidad del GIAE.

A partir de ello, la Fig. 17 presenta los resultados para datos experimentales capturados operando el sistema bajo el modo de *perfil automático*. Como se observa en la Fig. 18(a), la curva de frecuencia posee el perfil esperado de rampas de subida y bajada, pero que también se mantiene constante en alrededor de 38 Hz (equivalentes a 2200 RPM según se muestra en la Fig. 18(b)). Por tanto, es evidente la manera en la cual se obtienen valores de corriente (Fig. 18(c)) y voltaje (Fig. 18(d)) en corriente continua a la salida del circuito rectificador, de manera instantánea a

partir del instante (aproximadamente en  $t = 15$  [s]) en que la velocidad  $n$  del rotor del generador supera la velocidad de sincronismo de la máquina  $n_1 = 1700$  RPM; es decir, a partir del instante en el cual se genera el fenómeno de autoexcitación. Así entonces, se alcanza una potencia efectiva de 400 W en la carga (Fig. 18(e)), constituidos a su vez por 275 V y 1.5 A.

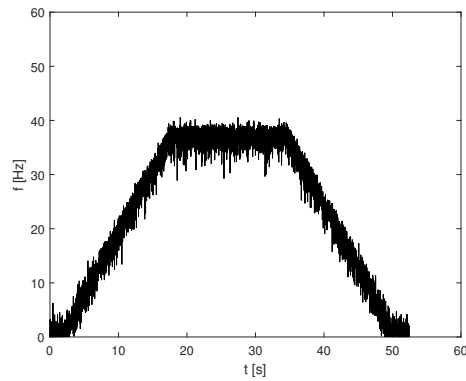
Asimismo, la Fig. 18 presenta los resultados experimentales para la operación del sistema bajo el modo de *perfil manual*, de los cuales se observa el patrón arbitrario de velocidad aplicado al sistema por parte del usuario a través de la interfaz HMI desarrollada. De manera más puntual, se corrobora que existe potencia eléctrica aplicada a la resistencia de carga en la salida (Figs. 19(c), 19(d) y 19(e)), cuando el valor de frecuencia ingresado (Figs. 19(a) y 19(b)) supera el valor correspondiente a la velocidad síncrona del generador.

Por último, se realizaron experimentos para operación bajo el modo de *control PI* con resultados mostrados en la Fig. 19. A partir de ellos, se observa que a pesar de presentarse variaciones en los valores de frecuencia aplicados como entrada (y correspondiente variación en la velocidad del rotor), las variaciones en la corriente eléctrica a la salida del circuito rectificador (y la correspondiente potencia en corriente continua), contrastan con el comportamiento de una tensión que tiende a mantenerse constante en un valor cercano al deseado de referencia en 267 V.

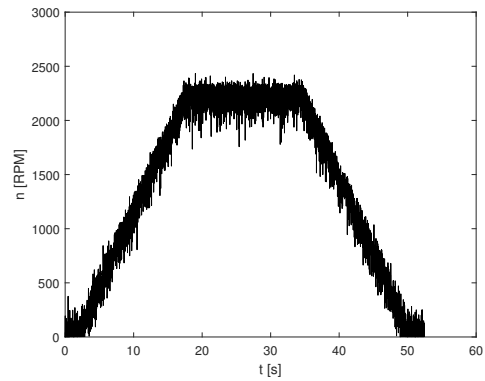
### **3.2. EFECTOS DE VARIACIÓN EN POTENCIA MECÁNICA DE ENTRADA**

Una *turbina* es un dispositivo que transforma la energía cinética de un fluido, en potencia mecánica para un eje de rotación en su salida. De esta manera, el torque aplicado por el primotor como entrada al GIAE corresponde en la práctica con la transformación que realiza una *turbina* sobre una fuente de energía primaria.

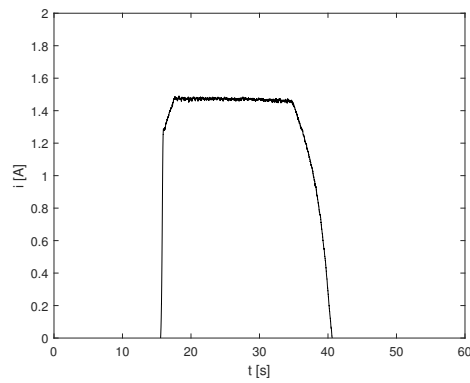
Figura 17. Variables medidas experimentalmente para operación bajo *perfil automático*



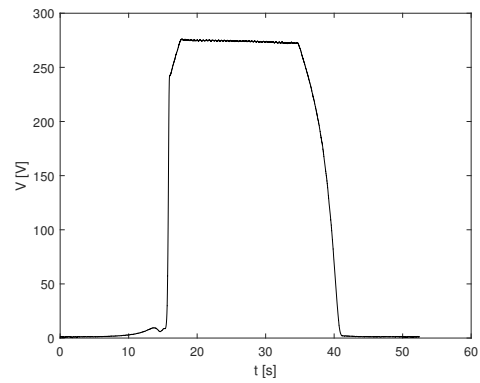
(a) frecuencia



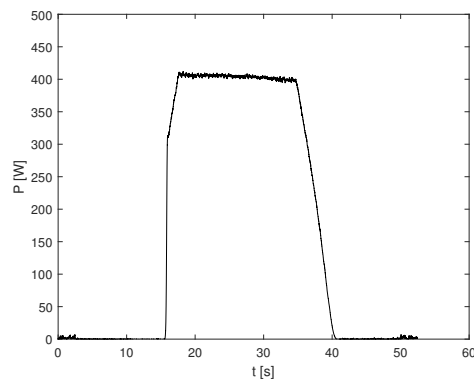
(b) velocidad



(c) corriente DC

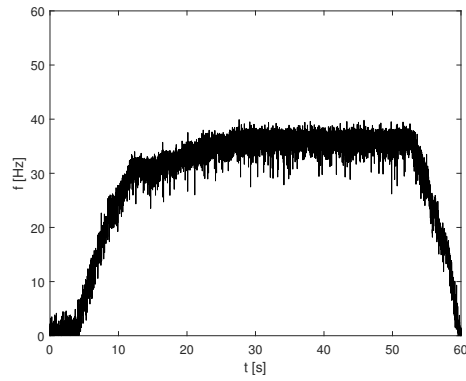


(d) voltaje DC

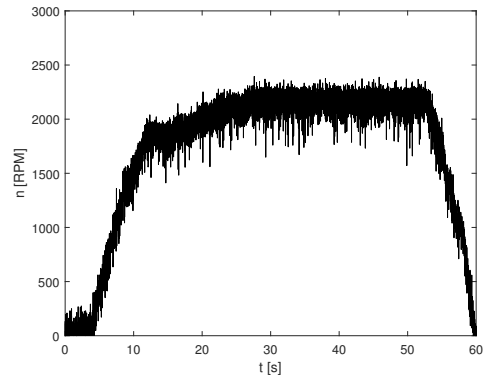


(e) potencia DC

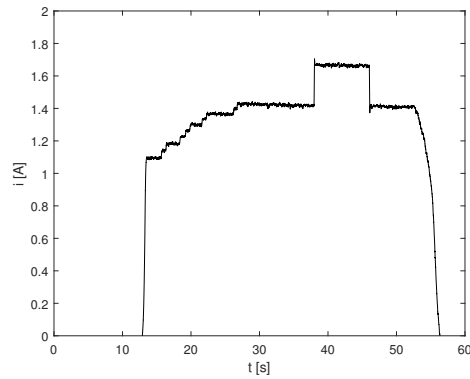
Figura 18. Variables medidas experimentalmente para operación bajo *perfil manual*



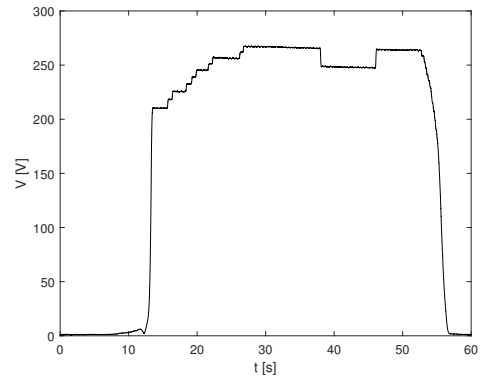
(a) frecuencia



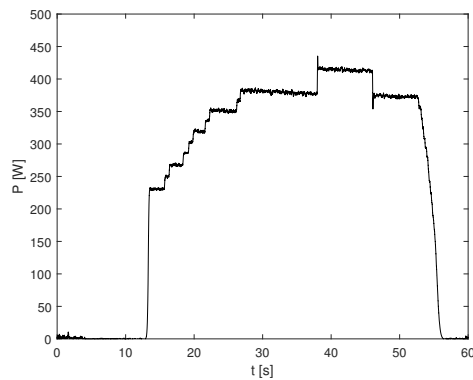
(b) velocidad



(c) corriente DC

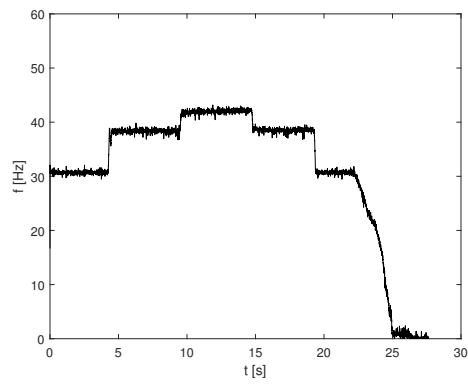


(d) voltaje DC

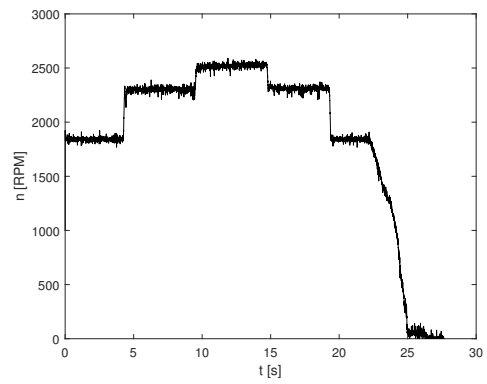


(e) potencia DC

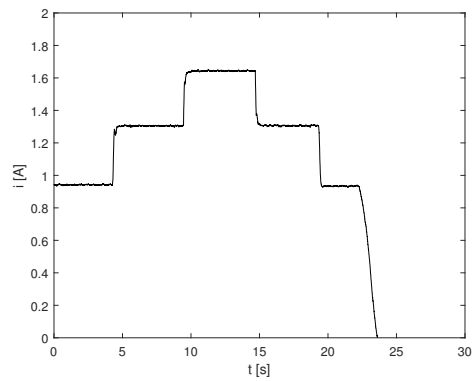
Figura 19. Variables medidas experimentalmente para operación bajo *control PI*



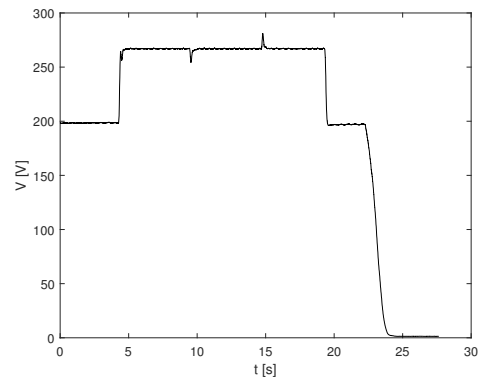
(a) frecuencia



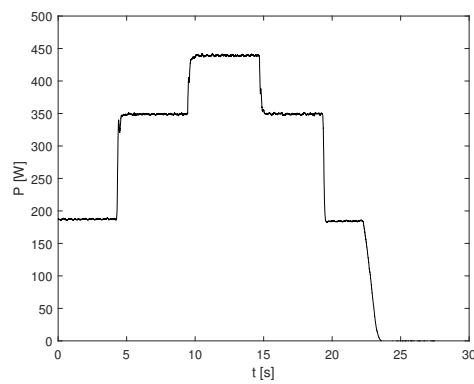
(b) velocidad



(c) corriente DC



(d) voltaje DC

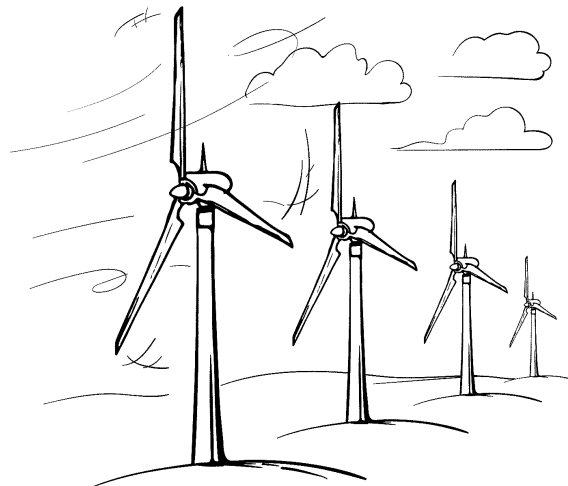


(e) potencia DC

En esta *Sección* se asumirá que dicha fuente corresponde con la potencia mecánica provista por una fuente eólica (i.e. energía de las corrientes de viento).

**3.2.1. Turbina eólica** La Fig. 20 ilustra un parque eólico, compuesto por varios aerogeneradores. A su vez, cada aerogenerador contiene en su parte superior la palas o aspas que constituyen una *turbina eólica*.

Figura 20. Ilustración para un parque eólico con aerogeneradores



El objetivo para esta clase de sistema es extraer la energía proveniente de una ráfaga de viento. Para ello será importante que exista un contacto entre las partículas de aire circulante y la superficie de las aspas de la turbina, aunque evitando una de las siguientes dos situaciones extremas: 1) que la velocidad de rotación de la turbina sea tan baja que no exista un contacto efectivo, o 2) que la velocidad de rotación sea tan alta que el flujo de aire encuentre un obstáculo que le impida fluir a través de las aspas. Lo anterior, muestra que el desempeño del sistema (turbina) depende

ampliamente de criterios ligados al diseño aerodinámico de la misma y a las características mecánicas del viento.

En particular, la física fundamental nos propone que la energía cinética  $E$  de un fluido en movimiento corresponde con:

$$E = \frac{1}{2}mv^2,$$

siendo  $m$  la masa de la partícula y  $v$  su velocidad traslacional de desplazamiento. Asimismo, para el caso del aire esta energía cinética puede escribirse alternativamente como:

$$e = \frac{1}{2}\rho v^2,$$

con  $\rho$  representando la densidad específica del aire. Por tanto, empleando esta última expresión es posible definir la densidad de potencia  $P_a$  del aire en movimiento a través de la expresión siguiente:

$$P_a = \frac{1}{2}\rho v^3.$$

A su vez, esta densidad de potencia se combina en el área de contacto  $A$  (correspondiente con la sección de área transversal que dibujan las aspas de la turbina al girar) y con un coeficiente de potencia  $c_p$  (valor entre 0 y 1 relacionado con la eficiencia de la turbina) para calcular la potencia mecánica  $P_m$  efectiva a la salida de la turbina:

$$P_m = A \times P_a \times c_p.$$

De manera más específica, el coeficiente  $c_p$  es una función del coeficiente de velo-

idades (en inglés: *TSP* - tip speed ratio):

$$\lambda = \frac{n}{v},$$

siendo  $n$  la velocidad tangencial de la turbina eólica (i.e. velocidad del rotor del generador). Este resultado coincide precisamente con la discusión inicial propuesta al respecto de la relación entre la velocidad de rotación de la turbina y el aprovechamiento eficiente de la energía en el flujo de aire del viento, permitiendo demostrar que dependiendo de las características constructivas de una turbina esta puede considerarse eficiente a velocidades de rotación bajas con un tamaño de aspas promedio.

A partir de ello:

$$\begin{aligned} P_m &= A \times P_a(v) \times c_p(\lambda) \\ &= f(v, \lambda). \end{aligned}$$

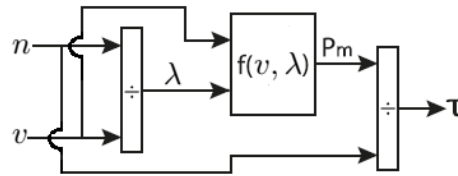
Adicionalmente, es claro que el valor de  $\lambda$  no es constante puesto que tanto  $n$  como  $v$  pueden variar en aplicaciones reales. En este sentido, cobra importancia el control de la velocidad  $n$  del generador en esquemas de generación asíncrona (como la referida con el GIAE) para garantizar que  $\lambda$  se mantenga en un valor óptimo, a pesar de las variaciones presentadas en el flujo de viento incidente.

A partir de lo anterior, es fácil comprender que la turbina eólica vista como sistema (ver Fig. 21) posee como entradas a la velocidad  $n$  del generador y a la velocidad  $v$  del viento, para proceder a calcular el correspondiente valor de  $\lambda$  y con ello la potencia eficaz  $P_m$  entregada al rotor del GIAE, cantidad que a su vez puede ser

fácilmente convertida a par motor o torque  $\tau$  como variable de salida, a partir de la relación:

$$P_m = n \times \tau \quad \Rightarrow \quad \tau = \frac{P_m}{n}.$$

Figura 21. Modelo en diagrama de bloques para una turbina eólica



Detalles adicionales al respecto de las expresiones matemáticas que describen la operación de una turbina eólica, pueden encontrarse en la información provista por *The Mathworks Inc.* como soporte a la librería *SimScape* en el entorno *Simulink* de *MATLAB MATHWORKS. SimPowerSystems for use with Simulink: User's guide. V3.* Hydro-Québec TransÉnergie Technologies. pp 5.225-228. 2003. Estos a su vez, refieren la obra de S. Heier en Siegfried HEIER. *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems.* John Wiley & Sons, 1998.

**3.2.2. Verificación experimental de turbina eólica acoplada al GIAE** A partir de las bases conceptuales presentadas para indicar los principios de operación de una turbina eólica, se analizará a continuación la influencia de la variación de velocidades en el desempeño del conjunto *turbina-GIAE* como parte de un sistema de generación de energía.

Hasta el momento, se han presentado resultados experimentales para el GIAE aplicando perfiles variables (*manuales, automáticos* y controlados mediante *control PI*) para la velocidad de rotación del generador. Sin embargo, no se ha relacionado dicha variación de velocidad con alguna aplicación práctica. Por tanto, motivados en

la idea de un sistema de *generación eólica*, conviene caracterizar la operación del GIAE ante diferentes condiciones de velocidad, para la situación hipotética de un flujo de aire constante como fuente primaria de energía.

Para dicho propósito, se realizó la incorporación del bloque *Wind Turbine* (disponible como parte de la librería *SimScape* en el entorno *Simulink* de MATLAB MATHWORKS, *SimPowerSystems for use with Simulink: User's guide. V3.*), al esquema que permite constituir al algoritmo en el *ControlDesk* para el gobierno del GIAE. La configuración del dicho bloque se realizó empleando los siguientes parámetros:

- *Nominal output power*: potencia nominal de salida de 1500 W, tomando en cuenta la potencia nominal del generador de inducción;
- *Base power of electrical generator*: potencia nominal del generador de 1000 W, tomando en cuenta la potencia máxima asumida por la carga del sistema;
- *Base wind speed*: velocidad de base para el viento de 12 m/s, valor típico en zonas con alta densidad de viento para aplicaciones eólicas;
- *Maximum power at base wind speed*: valor máximo de potencia normalizada de 1 p.u., valor por defecto;
- *Base rotational speed*: velocidad de base para el rotor de 1.2 p.u., valor por defecto;
- *Pitch angle  $\beta$* : ángulo de inclinación de las aspas de 0°, por ser una variable no considerada en el estudio;
- *Otros valores*: parámetros adicionales para el modelo de la turbina como  $A$  y  $c_p$  se atribuyeron a valores por defecto, según contemplado en la documentación del bloque MATHWORKS, *SimPowerSystems for use with Simulink: User's gui-*

de. V3.

De esta manera, un valor de  $v$  constante (e igual a 12 m/s según indicado) permitirá calcular el valor de  $\tau$  a ser aplicado al GIAE según el diagrama equivalente para la turbina eólica mostrado en la Fig. 21.

Adicionalmente, diferentes valores de  $n$  (con su respectiva conversión a rad/s) ante  $v$  constante, permitieron determinar para el bloque `Wind Turbine` la relación experimental siguiente:

$$n(\tau) = (111.05 \times \tau) + 3325. \quad (2)$$

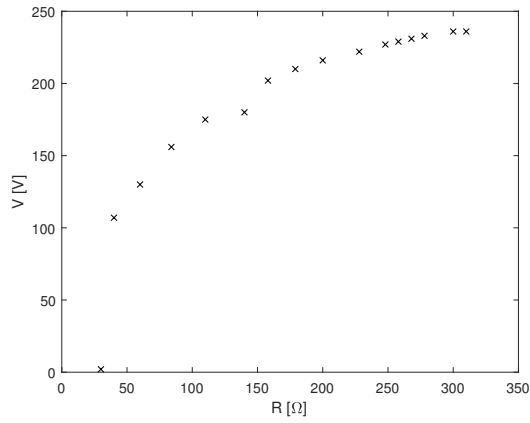
Por tanto, se realizó la operación manual del GIAE desde condiciones iniciales cero hasta alcanzar la velocidad de sincronismo (i.e. la autoexcitación). Posteriormente, se utilizó el bloque `Wind Turbine` para calcular el valor de torque  $\tau$  y a su vez la expresión (2) para determinar la velocidad  $n$  a ser aplicada al VFD. Tomando en cuenta que la entrada del VFD se realiza en voltaje, fue necesario realizar el escalamiento necesario para convertir el valor de velocidad calculado en RPM a V. Asimismo, el valor de frecuencia medido en el VFD (velocidad del motor) fue convertido de Hz a RPM y posteriormente a rad/s, antes de ser ingresado al bloque que modela la turbina.

Todo lo anterior fue repetido para diferentes valores de la resistencia de carga, permitiendo obtener los resultados presentados en la Fig. 22, a partir de los cuales se verifica un incremento de tensión (ver Fig. 23(a)) y una caída de corriente (ver Fig. 23(b)) ante la reducción de la demanda (i.e. aumento de resistencia) ilustrada mediante los valores de potencia de la Fig. 23(c).

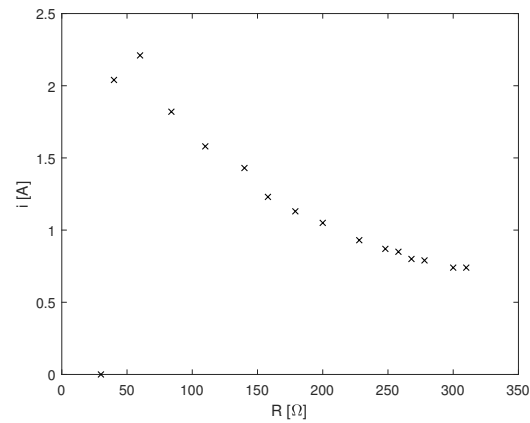
En este punto es importante mencionar que los cambios de resistencia aplicados representan modificación en los valores de velocidad de rotación de la máquina, debido a los cambios ocasionados en el correspondiente par resistivo (torque de oposición). Por tanto, analizar cambios de carga es equivalente (para todos los propósitos) a analizar cambios de velocidad.

Adicionalmente para el mismo experimento, un análisis de la relación entre la potencia eléctrica  $P$  y el voltaje  $V$  a la salida del generador permite obtener en la Fig. 24(a) la forma típica de *punto de rodilla* en el perfil de generación del conjunto *turbina-GIAE*, lo cual posibilita la utilización de estrategias de control de generación para extracción del punto de máxima potencia (MPPT - *maximum power point tracking*), muy populares en aplicaciones de energía fotovoltaica pero también aplicables a máquinas rotativas como se demuestra a partir de este resultado Ali ELTAMALY y Almoataz ABDELAZIZ. *Modern maximum power point tracking techniques for photovoltaic energy systems*. Springer, 2020. De hecho, es posible evidenciar en la Fig. 24(b) que dicho fenómeno (de *punto de rodilla* o valor de máxima potencia) se verifica también para la relación entre la corriente  $I$  y el voltaje  $V$  a la salida del generador, como curva típica para definir sus características operativas (en modo similar a como se hace con los paneles fotovoltaicos).

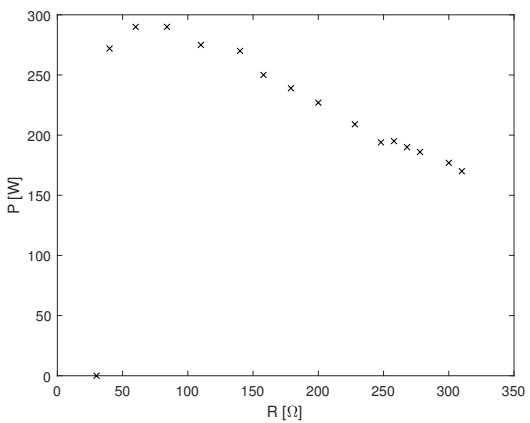
Figura 22. Magnitudes eléctricas en corriente continua ante variaciones de  $R$



(a) voltaje DC

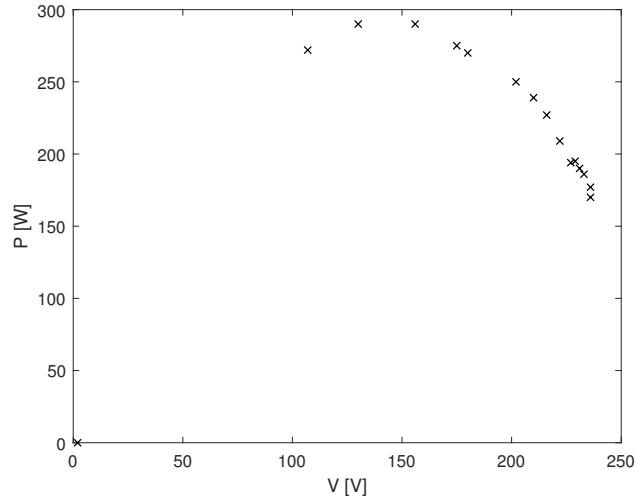


(b) corriente DC

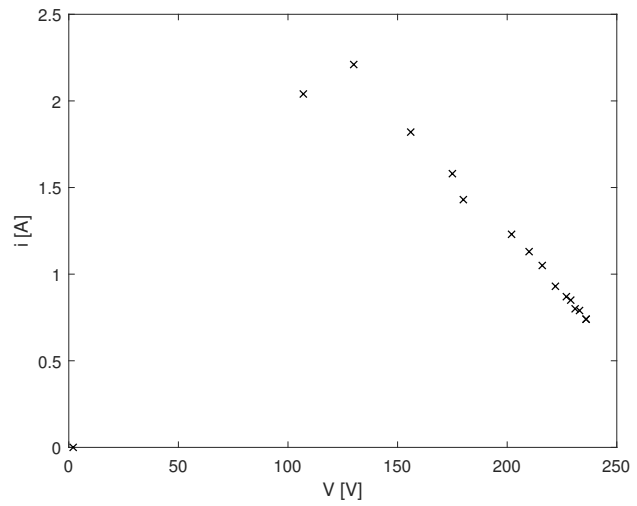


(c) potencia DC

Figura 23. Curvas de generación para el conjunto *turbina-GIAE*



(a)  $P$  vs.  $V$



(b)  $I$  vs.  $V$

#### **4. RECOMENDACIONES**

La apropiada operación del prototipo experimental desarrollado requiere alcanzar velocidades de rotación superiores al valor síncrono del generador, para evidenciar el fenómeno de autoexcitación. Por tanto, se recomienda realizar transiciones suaves de velocidad (principalmente bajo el perfil de operación *manual*) para evitar reducir la vida útil de los elementos empleados en el montaje.

## **5. TRABAJO FUTURO**

El presente trabajo de grado permitió evidenciar en laboratorio el fenómeno de auto-excitación para una máquina de inducción actuando como generador. La operación del sistema experimental evidenció la generación controlada de potencia a través de cambios en la velocidad de rotación del primotor. Posteriormente, se relacionaron estos cambios con incidencias físicas del entorno mediante la incorporación de un modelo de turbina eólica. Por tanto, la evolución natural de los resultados presentados sugieren la implementación de estrategias de control para mantener el sistema en el punto de máxima potencia (o equivalentemente en el punto de potencia demandada por una carga variable en un sistema de generación aislado).

## 6. CONCLUSIONES

El presente trabajo de grado, fue desarrollado en el marco del proyecto de investigación denominado: “*Control centralizado para un sistema de generación de energía con potencial aplicación en zonas rurales del departamento de Santander*”, financiado por la Universidad Industrial de Santander a través del código VIE-UIS 2479.

A partir de los desarrollos presentados y los resultados obtenidos, es posible enunciar la siguiente conclusión general:

- Se diseñó y construyó un prototipo de sistema para la generación controlada de energía a partir de un generador de inducción autoexcitado. En particular, se realizó la configuración en laboratorio para un motor de inducción gobernado a través de un variador de frecuencia, actuando como primotor para un generador de inducción trifásico (tipo jaula de ardilla) acoplado mecánicamente a su eje de rotación. El movimiento de rotación controlado permitió llevar el generador de inducción a velocidades superiores a su velocidad síncrona, posibilitando el fenómeno de autoexcitación (empleando un banco de capacitores de respaldo para generación de reactivos) y a partir de ello la correspondiente generación de potencia eléctrica. Al conjunto *motor-generador* se le acopló posteriormente un circuito rectificador para aplicar potencia eléctrica en corriente continua a una carga resistiva conectada en su salida. La operación del sistema de generación fue realizada a través de una interfaz de usuario constituida mediante la herramienta `ControlDesk` de `dSPACE` a través de `MATLAB`. Adicional a la operación de generación (manual, automática y regulada ante perturbaciones) fue posible analizar el comportamiento del sistema de genera-

ción ante variaciones en la potencia mecánica de entrada simulando el efecto de una turbina eólica.

De manera más puntual:

- Se configuró un sistema motor-generador en laboratorio empleando máquinas de inducción. Atendiendo a los principios físicos de operación de un generador de inducción autoexcitado enunciados en la *Sección 2.1*, se realizó la configuración para un conjunto *motor-generador* entre dos máquinas de inducción trifásicas, de manera tal que el motor tuviese mayor velocidad de rotación que la velocidad síncrona del generador para facilitar el fenómeno de autoexcitación. Adicionalmente, el gobierno del motor fue realizado empleando un variador de frecuencia (VFD) y se incorporó un banco de capacitores dimensionado a partir de pruebas experimentales realizadas sobre la curva de magnetización del generador. Todo lo anterior se encuentra descrito en la *Sección 2.2*.
- Se instrumentó el prototipo para realizar la variación controlada de los perfiles de generación a partir de la velocidad del motor. Tal y como fue descrito en la *Sección 2.2*, además del VFD fue necesario agregar dispositivos de sensado para determinar los niveles de tensión y corriente a la salida del circuito rectificador. Adicionalmente, se incorporaron señales provenientes del VFD para medición de frecuencia y se hizo uso de una interfaz dSPACE (tarjeta de hardware + aplicación interactiva de usuario) para la adquisición y escritura de datos del sistema. A partir de ello, fue posible constituir la operación controlada del generador autoexcitado según el diagrama ilustrado en la Fig. 16.
- Se desarrolló una interfaz de usuario para manipular y visualizar electrónicamente las variables del sistema. Específicamente, se hizo uso de las herra-

mientas de programación del `ControlDesk` para interactuar con el sistema de adquisición `dSPACE`, posibilitando el prototipado rápido de algoritmos a través de la herramienta `Simulink Embedded Coder` de `MATLAB`. El esquema general de programación utilizado se muestra en la Fig. 13. Asimismo, la interfaz desarrollada se ilustra en las Figs. 15(a) y 15(b). A partir de ello, fue posible realizar todo el análisis experimental presentado en el *Capítulo 3* para la operación del sistema bajo el esquema de generación convencional (i.e. a través de la variación directa del perfil de velocidad de rotación) y mediante la inclusión del modelo equivalente para una turbina eólica emulando la variación de potencia mecánica en la entrada.

## BIBLIOGRAFÍA

- ALVAREZ Juan Manuel y TARGARONA, Juan Carlos. “Generación eólica empleando distintos tipos de generadores considerando su impacto en el sistema de potencia”. En: *DYNA* 78.169 (2011), págs. 95-104 (vid. pág. 13).
- CAUDURO, Carlos. *Control de velocidad sin sensor de motores de inducción sujetos a disturbio de torque*. Trabajo de grado (Maestro en Ingeniería Eléctrica). Brasil: Universidad Federal de Santa María, 2008 (vid. pág. 16).
- CHAPMAN, Stephen. *Máquinas Eléctricas*. Mc-Graw Hill, 1987 (vid. págs. 18-20, 23).
- EL YAAKOUBI Ali, et al. “A MPPT strategy based on fuzzy control for a wind energy conversion system”. En: *Procedia Technology* 22 (2016), págs. 697-704 (vid. pág. 13).
- ELTAMALY, Ali y Almoataz ABDELAZIZ. *Modern maximum power point tracking techniques for photovoltaic energy systems*. Springer, 2020 (vid. pág. 51).
- FLÓREZ, Ramiro. *Pequeñas centrales hidroeléctricas*. Ediciones de la U, 2011 (vid. pág. 14).
- HEIER, Siegfried. *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*. John Wiley & Sons, 1998 (vid. pág. 48).
- KUNDUR Prabha, et al. *Power system stability and control*. 7.<sup>a</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 1994 (vid. pág. 12).

LIMITED, EUROTHERM DRIVES. *Eurotherm Drives 601: Product manual*. England, 1999 (vid. pág. 24).

MACHUCA MAYORGA, Jaime Andrés. *Control droop de un generador de inducción en una microrred simple*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2020 (vid. pág. 25).

MATHWORKS. *SimPowerSystems for use with Simulink: User's guide. V3*. Hydro-Québec TransÉnergie Technologies. pp 5.225-228. 2003 (vid. págs. 48, 49).

MENESES AGRESOTH Victor Elias y ALMEYDA RUEDA, Jaime Armando. *Sistema de adquisición y adecuación de señales eléctricas para el control y monitorización del módulo SEMITEACH-IGBT de Semikron*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2014 (vid. pág. 29).

MORENO SANCHEZ Sergio Andres y PINILLA CAÑON, Sergio Nicolas. *Adecuación y caracterización experimental para un prototipo de laboratorio que realiza control de velocidad de una máquina de inducción*. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2019 (vid. pág. 14).

MORENO VACCA, Rolando Alexis. *Regulación de velocidad de un motor trifásico a través de la variación de la relación voltaje/frecuencia de la línea de alimentación*.

Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). Colombia: Fundación Universitaria Los Libertadores, 2016 (vid. pág. 15).

PIÑERO RUEDA, José Manuel. *Control de un motor de inducción usando un variador de frecuencia*. Trabajo de grado (Ingeniero de las Tecnologías de Telecomunicaciones). España: Universidad de Sevilla, 2015 (vid. pág. 15).

QUIJANO, Nicanor y Kevin PASSINO. *A Tutorial Introduction to Control Systems Development and Implementation with dSPACE*. The Ohio State University. Dept. of Electrical Engineering, 2002 (vid. pág. 34).

RAMÍREZ GÓMEZ, Carlos Alejandro. *Metodología para el diseño de un convertidor DC-DC aplicado a aerogeneradores de baja potencia*. Trabajo de Grado (Magister en Ingeniería - Automatización Industrial). Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 2013 (vid. pág. 13).

RIFKIN, Jeremy. *La tercera revolución industrial: ¿Cómo el poder lateral está transformando la energía, la economía y el mundo?* Paidós Estado y Sociedad, 2011 (vid. pág. 12).

RINCÓN MORALES Diana Fernanda y SERNA VANEGAS, Jorge Olmedo. *Diseño de un controlador de velocidad para un motor de inducción utilizando control vectorial*. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). Cauca, Colombia: Universidad del Cauca, 2004 (vid. pág. 15).

RINCON CONTRERAS Eduardo Andrés, ESPARRAGOZA GOMEZ Cristhian Danilo y TORRES PRADA Andrés Felipe. *Banco de pruebas dinámico para arrancadores para un motor de inducción trifásico para prácticas de laboratorio mediante*

*el software LabVIEW*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2016 (vid. pág. 15).

ROBERTS Paul y VIDAL, Jordi. *El fin del petróleo*. Ediciones B, 2004 (vid. pág. 12).

RODRIGO, Jose. *El generador de inducción autoexcitado*. Alfaomega, 2013 (vid. págs. 13, 21).

SHARMA Arvind Kumar, et al. "Performance comparison of DFIG and SCIG based wind energy conversion systems". En: *IEEE Innovative Applications of Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with their impact on Humanity (CIPECH)*. Ghaziabad, India, 2014 (vid. pág. 13).

TOAPANTA, José. *Diseño e implementación de una demostración práctica en el laboratorio de máquinas eléctricas utilizando el variador de frecuencia como fuente de ahorro de energía*. Trabajo de grado (Ingeniero Eléctrico-Mecánico). Ecuador: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2012 (vid. pág. 15).

UISPE OQUEÑA, Enrique Ciro. *Modelo matemático para el análisis y simulación transitoria del generador asíncrono autoexcitado en operación autónoma*. Trabajo de grado (Magister en Sistemas de Generación de Energía Eléctrica). Santiago de Cali, Colombia: Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Departamento de Electricidad, 1994 (vid. pág. 13).