

VALIDACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE BANCO DE EMULACIÓN DE TURBINA EÓLICA DE BAJA POTENCIA

Ruben D. Bufanio¹, Cristian N. Zúñiga¹, Norberto C. Scarone¹, Nestor D. Marasco¹, Gustavo E. Monte¹, Daniel G. López¹, Solange Salazar¹, Ricardo F. Thomas¹

¹Grupo UTN GESE FRN – Departamento de Electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Neuquén (UTN FRN)

Pedro Rotter S/N, Plaza Huincul, Neuquén, Tel. 0299-4961162

e-mail: rbufanio@frn.utn.edu.ar

RESUMEN: Este Trabajo muestra los avances y mejoras obtenidos en el desarrollo de un emulador de turbina eólica de baja potencia de eje horizontal. Lo implementado permite emular las variables de desempeño principales de un rotor de palas, de manera que tanto el torque como velocidad de giro impuestos al generador eléctrico, en función del viento, se asemejen a los que un rotor real desarrolla. Reduciendo sensiblemente los tiempos de prueba de los sistemas eléctricos de conversión, al poder recrear diversos escenarios de campo, tanto para sistemas vinculados a la red eléctrica distribuida como aislados. Por lo tanto, se describe, el proceso de diseño e implementación de su control, las pruebas realizadas y los resultados obtenidos. Para ello, según las especificaciones impuestas, se comienza por los conceptos asociados al modelado computacional, luego los aspectos principales del hardware y software de control, la interfaz de usuario y sus características. Posteriormente, los detalles de la construcción del prototipo experimental, la obtención y análisis de resultados, y la comparación con los del modelado computacional. Se destacan los beneficios potenciales que puede aportar el sistema tanto en el ámbito académico como en la industria. Por último, como trabajo futuro, se plantean opciones de mejora.

Palabras clave: Emulador, Energía Eólica, Baja Potencia, Control.

INTRODUCCIÓN

Como se indica en (Zúñiga et al. 2023), dadas las especificaciones de un sistema de conversión de la energía eólica del viento, de sus siglas en inglés (WECS – del inglés, Sistema de Conversión de la Energía Eólica), el análisis de su desempeño suele ser muy costoso y llevar considerable tiempo. Las experiencias transitadas en los últimos años, (Bufanio et al., 2022; Bufanio et al., 2019), ratifican la necesidad del desarrollo de un banco de ensayos que permita emular las variables de desempeño principales de un rotor de palas, de manera que tanto el torque como velocidad de giro impuestos al generador eléctrico, para el rango de velocidades de viento especificadas, sean lo más acordes a aquellos obtenidos a través de pruebas en túnel de viento o de campo. Esta posibilidad brinda en principio la ventaja de poder probar el prototipo del sistema de conversión eléctrica sin la necesidad de tener que desarrollar o adquirir un sistema de palas, mecánica completa, torre, montajes, acondicionamientos del lugar, y esperar el tiempo necesario para que se cumplan las condiciones de viento para su ensayo, o tener que recurrir a un túnel de viento, lo cual en una primera etapa de validar especificaciones de desempeño de simulaciones computacionales puede incurrir en elevados costos de implementación y evaluaciones. Por lo tanto, este trabajo busca estandarizar un banco de ensayos del sistema de conversión de la energía eólica de baja potencia, que permita evaluar al sistema completo de conversión de la energía cinética del viento en eléctrica (WECS), conformado por el generador eléctrico, prototipos electrónicos o del tipo comerciales de electrónica de potencia y su control (Bufanio et al., 2022). Por otro lado, tratando que su funcionalidad brinde flexibilidad en el cambio de las variables de salida

aerodinámicas de un rotor de palas, y propicie la mejor adopción según desempeños obtenidos entre sistema aerodinámico/mecánico y el eléctrico.

La energía eólica, en especial la de baja potencia, interrelaciona a un gran número de disciplinas de la ingeniería, lo cual lleva al correspondiente estudio bibliográfico que va de lo general a lo particular de este trabajo. Por lo tanto, se comienza analizando las recomendaciones de seguridad y diseño que se determinan para aerogeneradores de baja potencia, y por otro lado los fundamentos tecnológicos que la rigen, aquí se utilizan dos referencias, la (Wood, 2011) que trata dichos fundamentos, y la (IEC-61400-2 Ed.3. 2013) como la normativa que regula las condiciones de diseño y seguridad. Luego, con el objetivo de comprender los conceptos que establecen las pautas para las especificaciones de evaluación y ensayo, la (Enevoldsen, 2015) que brinda detalles de documentación y certificación para con un generador eólico de baja potencia. Así mismo para poder incursionar en el control de potencia, la (Refan y Hangan 2012; Liu y Janajreh, 2012) brindan conceptos aerodinámicos, opciones de mejora y validación de la teoría de (BEM – Teoría del Elemento de Pala). En los tratados (Burton et al., 2011; Schaffarczyk, 2014; Hansen, 2015), se encuentran los conceptos fundamentales sobre las características y comportamientos estacionarios y dinámicos de los rotores de palas que permiten un mejor entendimiento de las condiciones a emular.

Para lograr establecer opciones de mejora, se estudian algunos métodos de ensayo de aerogeneradores de baja potencia que utilizan banco de emulación (WTE – del inglés Emulador de Turbina Eólica) destinados a la generación distribuida. Por ejemplo la (Jiawei, 2012), detalla un análisis, y demuestra experimentalmente la necesidad de aplicar un algoritmo al sistema de emulación que tenga en cuenta la dinámica de la turbina eólica en lugar de solo la estática, demostrando que con el tratamiento estacionario no se logra visualizar adecuadamente los transitorios reales debido principalmente a la diferencia en los momentos de inercia que se obtienen con un controlador de frecuencia/velocidad y máquina de inducción o sincrónica, mucho menores, respecto al de una turbina eólica real. En (Phlearn y Yuttana, 2013; Bufanio et al. 2019) se simulan a través de Simulink/Matlab el comportamiento estático y dinámico de un WECS, en la primera sin desarrollar la parte de conversión y control eléctrico y en la segunda con detalle de dicho esquema y su control inyectando energía a la red trifásica de baja tensión. En (Devbratta y Jiang, 2017) se ha diseñado, construido y evaluado un emulador físico de aerogenerador WTE en un entorno de microrred, con el objetivo principal de investigar la integración y control de coordinación de los sistemas de energía eólica en dicho esquema. Luego (Weijie et al., 2017) investiga y da solución a la problemática de que la inercia de los WTE sea mucho menor que la de los sistemas físicos reales, aportando un esquema de compensación de inercia que replica el comportamiento mecánico "lento" de las turbinas eólicas. Por otro lado, en (Ohyama y Nakashima, 2010) se presenta un emulador de aerogenerador utilizando un algoritmo basado en BEM, la propuesta se basa en un control sobre máquina de inducción, que permite emular un diseño de aerogenerador sin tener que fabricarlo, permitiendo ensayarla para condiciones arbitrarias de velocidad y perfil del viento. Por último, en (Tammaruckwattana y Ohyama, 2013), como aplicación del emulador, se propone y valida experimentalmente a través de un WTE, una solución a la problemática de sobretensión y velocidad de giro en que podría incurrir un aerogenerador (PMSG – del inglés Generador Síncrono a Imanes Permanentes) de baja potencia y velocidad variable, cuando es conectado a la red eléctrica. Para lo cual, se desarrolla, implementa y valida, con un emulador el sistema de conversión en tres modos de operación, según diferentes regiones de trabajo y en función de la velocidad del viento.

Este trabajo, a diferencia de los planteados, intenta lograr una mejor prestación del WTE a través de un esquema "modular", con vista de su aplicación a entornos académicos y a la ampliación de sus capacidades. Se proponen mejoras en el sistema de control, hardware y software, con modificaciones en el manejo de los niveles de consigna, aplicación de los rangos del torque y velocidades reales, y con una interfaz de usuario mejorada. En función de lo cual se organiza de la siguiente manera, en la sección 2 se brinda un breve repaso de los conceptos principales del comportamiento estático y dinámico que deben emularse de una turbina eólica, luego en la sección 3 el modelado y simulación computacional del WTE. La sección 4, con sus subsecciones, trata los avances aplicados al desarrollo experimental del emulador de turbina eólica de baja potencia, luego en la sección 5 la verificación y evaluación de resultados. Por último, en la sección 6 las conclusiones.

COMPORTAMIENTO ESTÁTICO Y DINÁMICO DE LA TURBINA EÓLICA A EMULAR

Para poder garantizar el buen desempeño del emulador es esencial conocer el comportamiento estático y dinámico de la turbina eólica. El comportamiento estático o estacionario se refleja a través de las condiciones de equilibrio, definidas en las especificaciones de desempeño, entre las curvas de torque aerodinámico paramétricas según las velocidades de viento y la electromagnética, respecto ambas de la velocidad de giro de la máquina. En la Figura 1, se grafica una de ellas utilizadas durante el desarrollo de este trabajo.

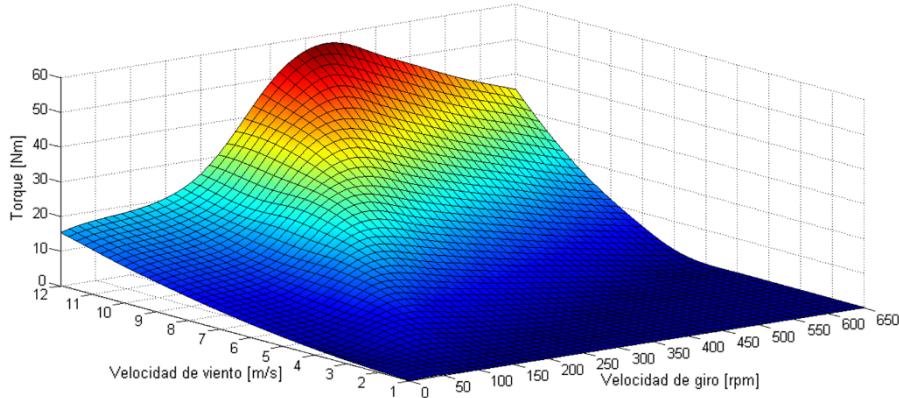


Figura 1: Características de torque para un rotor de perfil NACA 4412.

Las características aerodinámicas del rotor de una turbina pueden ser estudiadas empleando métodos físicos o numéricos, (Sirignano, 2013; Enevoldsen, 2015). Por otro lado, es posible conocer la geometría del o los perfiles alares a lo largo de la envergadura de la pala, aplicar la teoría de BEM, que se basa en una geometría 2D (dos dimensiones) de los diversos perfiles, (Burton et al., 2011). Este método, es el utilizado en este trabajo para obtener las características del rotor de la turbina eólica, dado que, en forma simplificada, pero eficaz, brinda las características aerodinámicas necesarias para un estudio de desempeño del rotor de palas sin la necesidad de poseerlas físicamente. Se observa además que es el ampliamente utilizado en aplicaciones industriales para predicción del comportamiento de un rotor, (Schaffarczyk, 2014). Por otro lado, si bien se trata de una aproximación al comportamiento de una turbina eólica real, se ha demostrado que los resultados de este método se encuentran dentro de un rango aceptable de exactitud, (Refan y Hangan, 2012).

Si bien la teoría de la variación de la cantidad de movimiento del elemento de pala permite establecer el comportamiento de una turbina en términos de torque y velocidad de giro, al implementar el banco de ensayo de emulación propuesto, Figura 2, es necesario considerar las diferencias entre el sistema mecánico de una turbina real y el sistema motor-generador implementado para su emulación, en especial por lo distinto de los momentos de inercia que se imponen entre ambos.

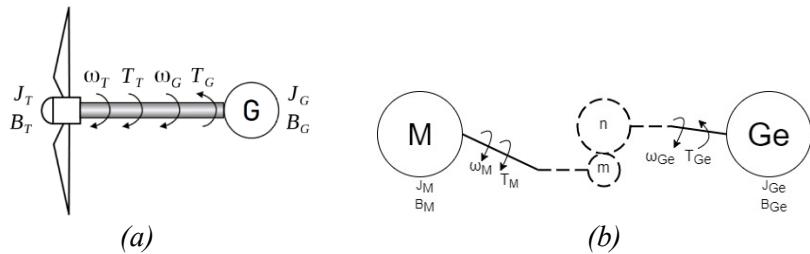


Figura 2: Modelo Mecánico, (a) Turbina Eólica Real, (b) Emulador de Turbina Eólica.

Suponiendo que el eje es infinitamente rígido, de la Figura 2a y a través de la Ec. (1), es posible obtener en forma simplificada la relación entre la diferencia entre el torque ejercido por la turbina y el aplicado al generador.

$$T_T - T_G = J_T \cdot \dot{\omega}_G \quad (1)$$

Donde:

T_T = Torque de la turbina

T_G = Torque del generador

J_T = Momento de inercia del rotor

ω_G = Aceleración angular

Con mismo criterio, aplicando la misma condición al sistema del emulador, Figura 2b, se obtiene la diferencia entre el torque ejercido por el motor, y el torque efectivamente aplicado al generador.

$$T_M - T_{Ge} \cdot a = J_M \cdot \omega_G \cdot a \quad (2)$$

Donde:

$a = m/n$, representa la relación de vueltas de polea utilizada.

$T_G = T_{Ge} \cdot a$, y expresando ambas Ecs. (3,4), y luego restándolas, se obtiene por último la Ec. (5).

J_M = Momento de inercia de la máquina asincrónica

$$T_T = J_T \cdot \omega_G + T_G \quad (3)$$

$$T_M = J_M \cdot \omega_G \cdot a + T_{Ge} \cdot a \quad (4)$$

$$T_T - T_M = (J_T - J_M/a) \cdot \omega_G \quad (5)$$

El término de la derecha de la Ec. (5) constituye un “torque de compensación” que puede aplicarse para lograr que el comportamiento dinámico de ambos sistemas sea similar. No obstante, es importante destacar, que el método impone el uso de un derivador dentro del lazo de realimentación, (Weijie et al., 2017), que puede traer aparejado dificultades en la estabilidad del sistema debido al ruido presente en el valor de adquisición de la velocidad de giro. Por otra parte, también aumenta la complejidad de la implementación al tratarse de un cálculo que debe realizarse en tiempo real. En la Figura 3 se muestra un modelo simplificado de lo anteriormente expuesto.

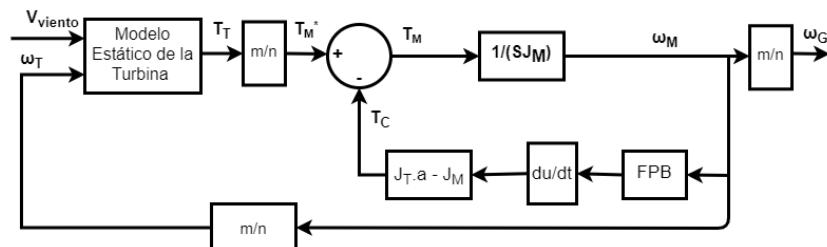


Figura 3: Diagrama de bloques simplificado de control del sistema de emulación de turbina eólica.

MODELADO Y SIMULACIÓN A TRAVÉS DE APLICATIVO INFORMÁTICO

Como se indicó en párrafos anteriores, se modela y simula la estrategia de control a llevar adelante por el prototipo experimental, de manera de tener una herramienta de prueba y comparación lo más cercana posible al banco de trabajo de emulación de turbina eólica. Para ello, se configura un diagrama de bloques de control teniendo en cuenta que se cuenta como dispositivos principales, y se informa más adelante detalle, de un Driver (controlador de torque-velocidad) de 5.5kW, máquina de inducción (asincrónica) de 4kW, y un generador PMSG, de 1kW. Además, con el fin de independizarse de la acción del motor eléctrico una relación de poleas 3:1, lo cual lo hace trabajar cercano a sus condiciones nominales con un bajo deslizamiento.

En la Figura 4, se muestra el esquema de control y potencia simplificado, donde se puede observar dos lazos de control uno interno de torque entre ambas máquinas, análogo al de torque a utilizar en el prototipo, y otro externo de velocidad de giro, a través del cual se implementa la estrategia de generación

PWM para el inversor trifásico, donde se emplea una consigna V/f cte. de manera de mantener flujo óptimo en la máquina de inducción. Por otro lado, se configura una tabla de la respuesta de un rotor de perfil “Clark Y”, utilizado como ejemplo en este trabajo y empleado en el aerogenerador comercial EOLOCAL modelo AG1000 (1kW de potencia nominal), a través de la cual, y con ayuda de los lazos de control y potencia, se intenta emular el rotor de dicha turbina.

La máquina de inducción seleccionada es una trifásica típica con rotor a jaula de ardilla, y un PMSG de polos no salientes, 6 pares de polos, con cte. de velocidad 299.28 V_{pico}_Línea / krpm, y cte. de torque 2.475 Nm/A_{pico}, fricción viscosa 0.06 Nm.S, de características similares al empleado en el prototipo experimental, que puede entregar hasta 1.5kW de potencia. Por otro lado, se coloca como carga a la salida del PMSG una del tipo resistiva, configurada en triángulo, de valor 20Ω, potencia nominal de 3kW, mismos valores a utilizar experimentalmente.

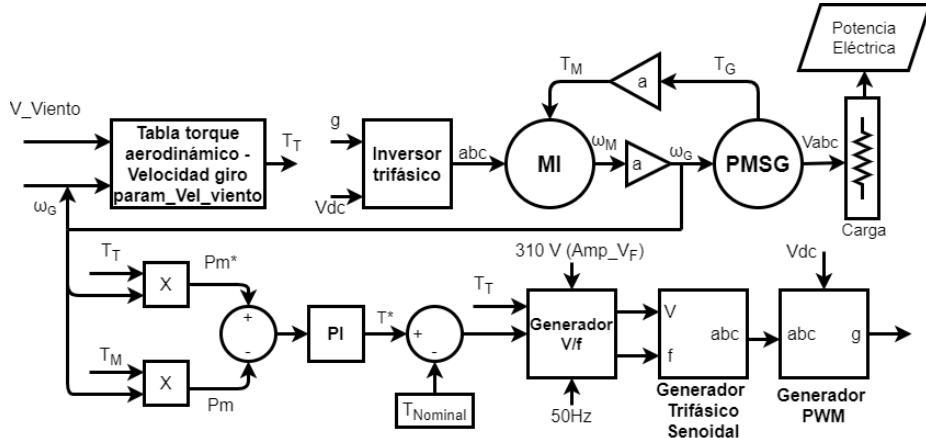


Figura 4: Diagrama de bloques de la implementación computacional del emulador de turbina eólica.

El diagrama de bloques de figura anterior es integrado a través de la herramienta Simulink®. En la Figura 5, se pueden observar sus bloques principales y lazos de control. Luego los resultados de simulación se utilizarán para comparar con los del prototipo propuesto y construido del banco de emulación, y teóricos del rotor de aerogenerador dado como ejemplo de estudio.

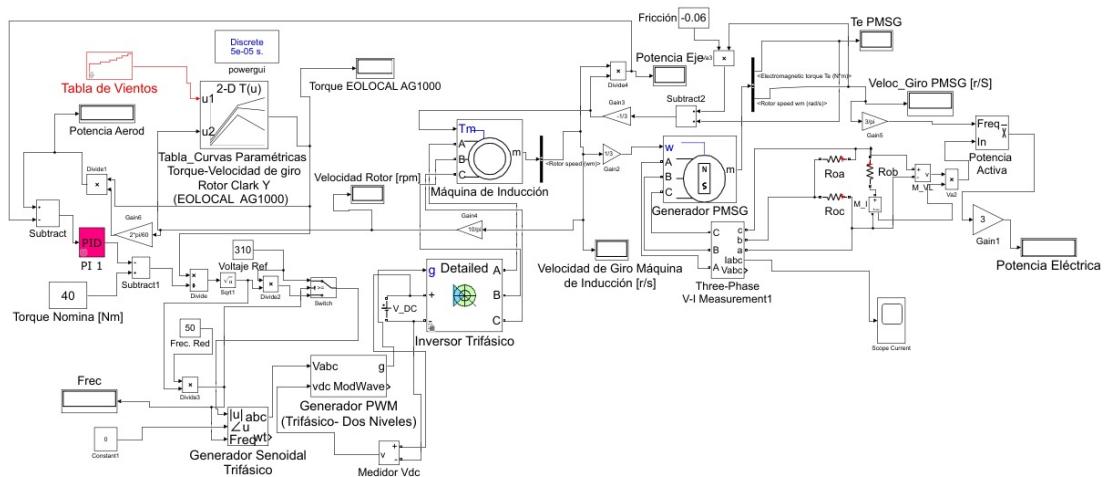


Figura 5: Modelado en herramienta informática de banco de emulación de turbina eólica.

DISEÑO DEL BANCO EMULADOR DE TURBINA EÓLICA DE BAJA POTENCIA

En la Figura 6 se representa el sistema implementado para esta propuesta, se utiliza un sensor del tipo incremental para detectar la velocidad de giro del motor, cuyas señales de salida son procesadas a través de un controlador de velocidad de máquina de inducción, o variador de velocidad. El uso de dicho sensor

(encoder) responde a la búsqueda de un control preciso del comportamiento del motor y por ende del generador. El variador, por su parte, tiene la posibilidad de intercambiar consignas con el circuito de control de manera que este último las interprete fácilmente. Además, provee la información de torque, lo cual permite minimizar las desviaciones que podrían ocurrir.

En tanto, el lazo de realimentación se cierra mediante la consigna de torque que el circuito de control aplica al variador. Dentro del circuito de control, también se incluye un conjunto de datos que permiten ejecutar distintos tipos de procesos de simulación con mayor independencia del (PC - computadora personal). Esta a su vez recibe toda la información necesaria mediante un bus USB y ejecuta una interfaz gráfica de usuario creada para seleccionar y ajustar el proceso de simulación, así como para asistir al usuario durante la ejecución.

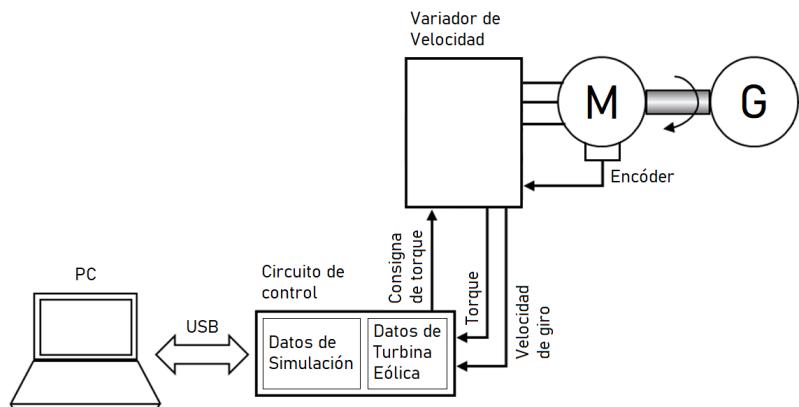


Figura 6: Sistema simplificado implementado para el emulador de turbina eólica.

Para cumplir con el objetivo de modularidad, y que el sistema tenga la suficiente flexibilidad a los cambios, se buscó dar una estructura genérica al protocolo de comunicación entre la PC y el circuito de control, así como al manejo de los niveles de consigna, torque y velocidades de giro reales.

Componentes de hardware principales utilizados

Generador síncrono de imanes permanentes (PMSG) de 1 kW, 450 rpm y 6 pares de polos. Esto depende directamente de las características del sistema de conversión de energía eólica que se desee emular, dado el desarrollo actual del mercado en baja potencia, se optó por un PMSG, (Bufanio et al. 2022). Además, el generador utilizado definirá en qué rango de potencias y velocidades de giro se va a trabajar.

La máquina de inducción trifásica cumple la función de aplicar el torque y la velocidad de giro apropiadas al generador. Se utilizó una de 4kW, potencia bastante mayor al del generador, para que sea capaz de producir el torque necesario, y no condicionar el desempeño de la emulación.

En cuanto al variador de velocidad encargado de aplicar la regulación de torque, y dada las prestaciones requeridas, se recurrió a la familia Sinamics, del fabricante Siemens, con un módulo de potencia PM240-2 y unidad de control CU250S-2 PN, con panel de operador IOP-2. La versatilidad del sistema para definir el rango de voltajes para la entrada de consigna permite minimizar el requerimiento de hardware intermedio. Por otro lado, se utilizó la funcionalidad del cálculo interno del torque aplicado, este parámetro y la velocidad de giro se disponen en las salidas analógicas de voltaje del controlador de frecuencia. Se seleccionó el control vectorial por torque, ya que posee características dinámicas superadoras, frente a cambios bruscos en la consigna de torque debidos a las variaciones “rápidas” de la velocidad del viento. Por último, como principal, se encuentra un sensor utilizado para detectar la velocidad de giro, modelo 1XP8001-1 del fabricante Siemens, del tipo HTL bipolar de 1024 PPR.

Interfaz de usuario

La interfaz de usuario permite seleccionar y configurar los datos de la turbina y del proceso de simulación, así como iniciar y finalizar las mismas. El objetivo del desarrollo es que la interfaz gráfica permita la configuración de los procesos de simulación de forma ágil y sencilla.

La implementación de la interfaz se desarrolló mediante el lenguaje de programación Python, y a modo de comparación también en C++. En ambos casos, dicho software consta internamente de módulos que agrupan las funciones correspondientes a segmentos del proceso, con la finalidad de agilizar su desarrollo, así como facilitar futuras modificaciones de este.

Los datos del rotor de la turbina a emular se obtuvieron mediante el software libre Q-Blade y luego se exportaron como archivos del tipo csv, siendo a posteriores procesados mediante el código desarrollado y ejecutado en el ordenador. La implementación actual del software automatiza la lectura y procesamiento del archivo csv que contiene los datos del rotor de la turbina a emular. Este procesamiento es el que permite disponer de la característica de la turbina en formato de una matriz de muestras, posibilitando, en los casos que sea necesario, realizar interpolaciones entre estas. En la interfaz de usuario se incluye la configuración de los siguientes parámetros.

- Torque máximo: el máximo valor de torque que debería permitir el sistema de control
- Velocidad máxima: la máxima velocidad angular que debería permitir el sistema de control
- Torque de referencia: valor de torque de referencia para la consigna aplicada
- Velocidad de referencia: valor de velocidad angular de referencia para la realimentación
- Relación de poleas: relación de velocidades entre el motor y el generador
- Momento de inercia: momento de inercia de la turbina que se desea emular

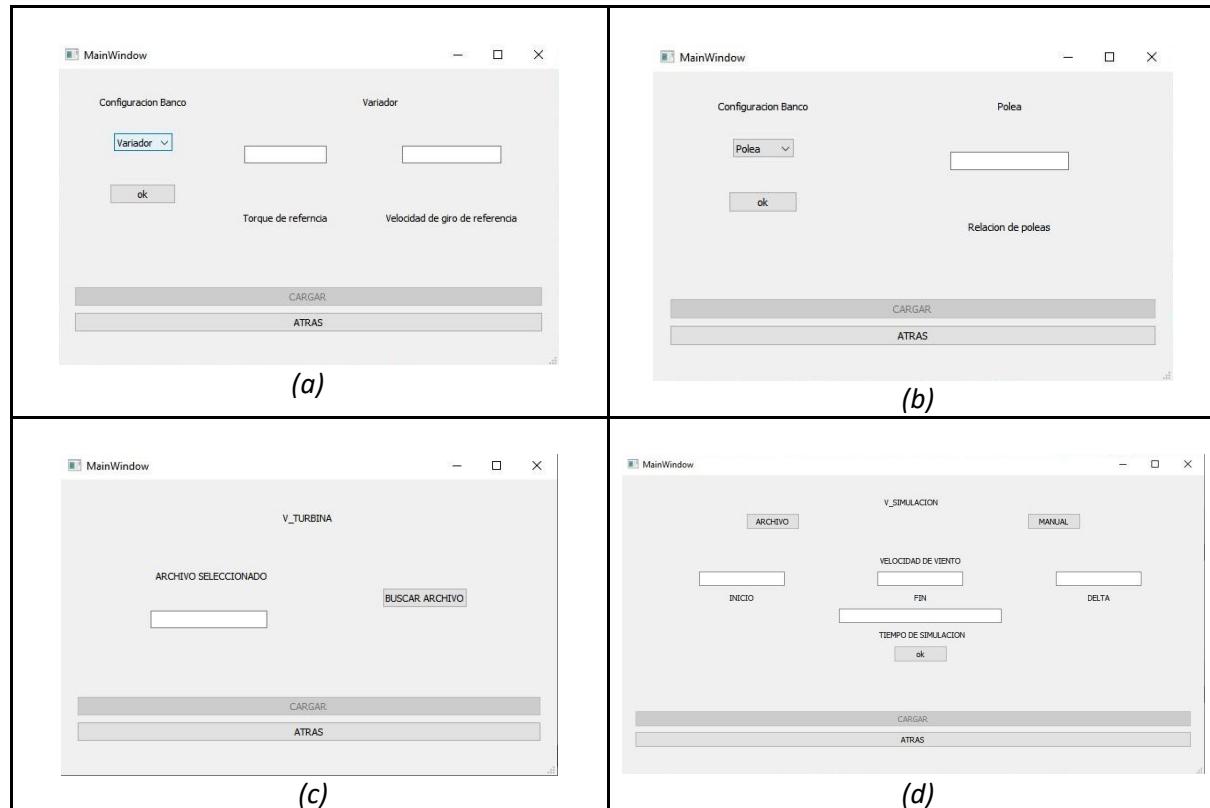


Figura 7: Esquema de interfaces de usuario del desarrollo electrónico propuesto para controlar al emulador, (a) configuración de velocidad y torque, (b) relación de poleas, (c) Carga de datos de turbina eólica, (d) carga de datos de velocidad del viento.

Mientras que los parámetros de referencia son necesarios para la correcta comunicación de las variables, los máximos definen las condiciones límites de operación. En tanto, el momento de inercia se utilizaría en caso de emular las características dinámicas de la turbina. Todos estos parámetros son utilizados para que el circuito de control pueda ejecutar el lazo de control de forma apropiada. En la Figura 7a y 7b, se

muestran algunas de las pantallas correspondientes al ajuste de los parámetros arriba mencionados. En tanto, en la Figura 7c, se observa la pantalla correspondiente a la carga de los datos de la turbina eólica que se desea emular, que se envían por medio de un bus USB al circuito de control, previo escalamiento acorde a los parámetros ingresados en las anteriores pantallas. Por otro lado, lo propio para los datos de viento que se ingresan de forma similar o manualmente, mediante la pantalla mostrada en la Figura 7d.

Esquema de control y desarrollo electrónico

Las funcionalidades básicas del circuito de control son controlar los procesos de carga de datos, permitir e implementar el algoritmo de trabajo, configurar la simulación y ejecutarla. De forma complementaria, también debe detectar las señales analógicas que indican los valores de torque y velocidad, generar el voltaje analógico de consigna, y comunicarse con el ordenador o PC.

Como elemento central del hardware de control, se utiliza dada su potencial, un microcontrolador del tipo ARM. Sus capacidades analógicas permiten procesar las señales que indican los valores de velocidad de giro y torque, y generar la señal utilizada como consigna.

En la Figura 8 se muestran las distintas partes del hardware de la placa de control que acompañan al microcontrolador. En la parte 8a se puede observar la circuitería de la interfaz entre el microcontrolador y el variador de velocidad, donde los circuitos correspondientes a las entradas y salidas analógicas implementan una adaptación de voltajes, y un filtrado de las señales para minimizar los efectos del ruido y las interferencias. Para el caso de las entradas y salidas digitales, se utiliza un acoplamiento óptico, que facilita adaptar los diferentes voltajes de operación de cada elemento y elimina el riesgo de que un fallo o error de conexión dañe el resto del hardware. Adicionalmente, cuenta con una serie de entradas/salidas digitales bidireccionales con el fin de facilitar futuras implementaciones que las requieran. En tanto, en la Figura 8b se representa el adaptador UART-USB basado en circuito integrado, el cual se incorporó en la misma placa que el microcontrolador. Este circuito permite la comunicación con la PC, el resto de los circuitos corresponden a la alimentación y los voltajes de referencia del microcontrolador.

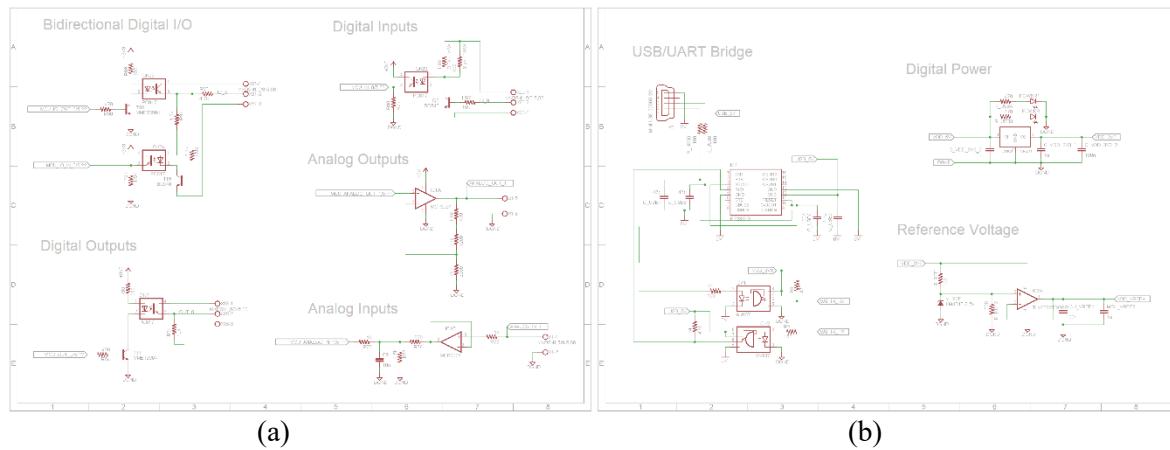


Figura 8: Esquema electrónico desarrollado de placa de control del emulador, (a) Interfaz entre microcontrolador y variador de velocidad, (b) adaptador UART-USB basado en circuito integrado.

Características del software desarrollado, comunicación, y algoritmo de control

En base a la estructura de software previamente utilizada y a las características modulares buscadas, se desarrolló una versión adaptada a un microcontrolador de mayor desempeño. Para ello el software contempla una consulta periódica a la PC para verificar la conectividad con la misma, que fue evaluada satisfactoriamente como medida de seguridad para evitar que el operador pierda el control sobre el circuito de control y con ello sobre todo el sistema. Un aspecto importante de este software es que recibe al comienzo del proceso toda la información necesaria para ejecutar la simulación. Por ello, luego de esta comunicación inicial, el control ejecuta la simulación de forma totalmente autónoma, sin requerir ningún tipo de intervención por parte del usuario.

La comunicación entre la PC y el circuito de control tiene dos funcionalidades básicas, llevar a cabo un intercambio confiable de datos, y permitir al ordenador accionar sobre el circuito de control durante el proceso de simulación. Considerando lo anterior, se establecieron tres objetivos principales en su diseño:

1. Resolver la comunicación de los datos en una forma suficientemente genérica, que permita reemplazar el circuito de control, el ordenador o PC, o el software que esta ejecuta.
2. Incluir en el proceso de comunicación, una redundancia suficiente para garantizar la integridad de los datos que se envían desde la PC.
3. Garantizar que la PC mantenga siempre el control sobre el funcionamiento del circuito de control.

Como primera medida, para lograr el principio de modularidad, se utiliza un bus USB para la comunicación. Complementariamente a esto, se estableció un conjunto de comandos y tramas de datos, que define exactamente como enviar y recibir información. En segunda instancia, dentro de las tramas de datos mencionadas, Figura 9, se incorporó el uso de Comprobación de Redundancia Cíclica (CRC), permitiendo evaluar la fidelidad de los datos recibidos y reenviarlos en caso de ser erróneos, evitando por lo tanto un potencial comportamiento errático del emulador durante la simulación. Por último, se implementa la respuesta a la consulta de conectividad que envía el circuito de control, la misma se realiza durante todo el proceso de simulación y solo ocurre mientras el software de la PC se encuentre funcionando correctamente.

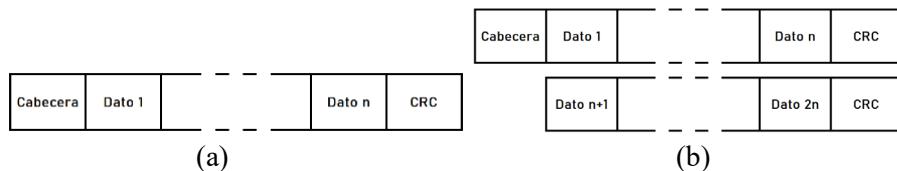


Figura 9: Trama de datos enviados desde la PC al Circuito de Control, (a) modelo de trama de datos, (b) Trama alternativa.

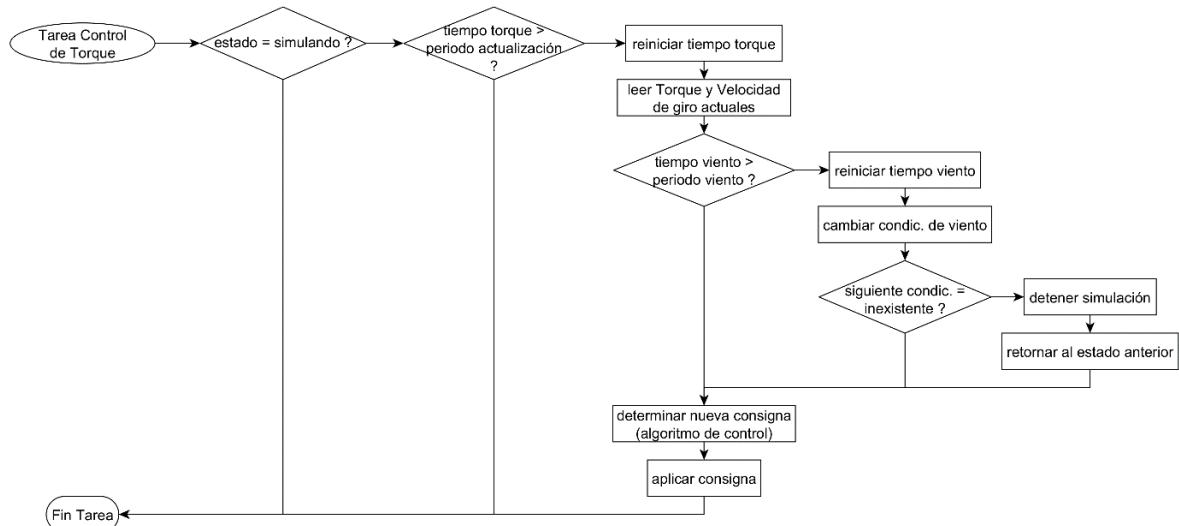


Figura 10: Diagrama de flujo de la tarea de Control por Torque implementado en el software.

El algoritmo de control se ejecuta como una de las tareas del software multitarea, de manera que sea fácilmente modificable. En este caso, se lo implementa para una aproximación gradual al punto de funcionamiento buscado (Torque-Velocidad de giro) de la característica de la turbina a emular, esto a fin de reducir estrés mecánico y acercarse al comportamiento dinámico real. En la Figura 10, se muestra el diagrama de flujo de la tarea de control de torque, encargada de ejecutar el algoritmo de control. En dicho diagrama, tiempo torque y tiempo viento son registros de tiempo que se activan al poner en marcha la simulación. Una importante ventaja de esta implementación es la posibilidad de modificar el método para determinar el nuevo valor de consigna según el algoritmo de control que se desee ejecutar.

DESARROLLO EXPERIMENTAL, ANÁLISIS DE PRIMEROS RESULTADOS Y VALIDACIÓN

Las pruebas realizadas en el laboratorio de electrónica de la UTN FRN tuvieron como objetivo validar y optimizar el emulador de turbina eólica, para ello se compararon resultados de pruebas experimentales, respecto a simulación computacional y condiciones ideales de equilibrio. Como objetivo anexo, dado los cambios realizados respecto a etapas anteriores, se repitió la evaluación de la confiabilidad del equipo y la funcionalidad de la interfaz de usuario. Durante las pruebas, se utilizó una carga de tipo resistiva trifásica, de unos 20 ohm, conectada en triángulo a la salida del PMSG. Para el análisis del desempeño se midió potencia, voltaje y corriente, y se visualizaron los valores de torque y velocidad de giro mediante un osciloscopio conectado a las salidas analógicas del variador de velocidad, ver figura 11. La medición de los parámetros eléctricos se realizó mediante un hardware dedicado adicional, que se conecta a la salida del generador y entrega la información de potencia por medio de un bus serie.

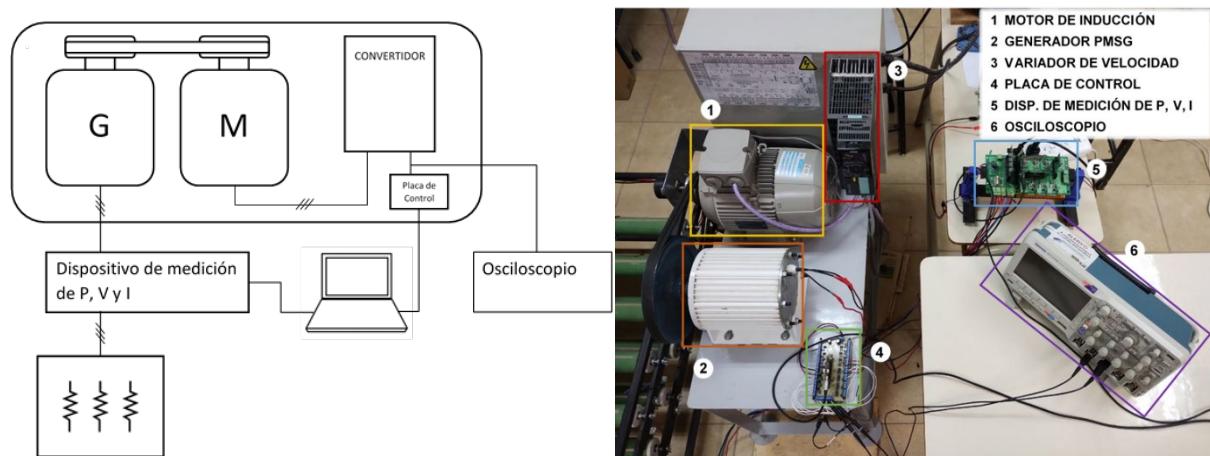


Figura 11: Prototipo experimental del emulador de turbina eólica de baja potencia con la disposición de los elementos utilizados durante las pruebas de laboratorio.

Tabla 1: Resultados estacionarios, simulación computacional, experimental, y referencia de rotor.

Viento [m/s]	Pot. Salida PMSG Simul. Comp. [W]	Pot. Salida PMSG WTE [W]	Curva Aerod (Tm*ω) Simul. Comp. [W]	Curva Aerod (Tm*ω) Tabla Rotor [W]	V. Rotor Tabla [rpm]	V. Rotor PMSG Simul. Comp. [rpm]	V. Rotor PMSG WTE [rpm]	Torque tabla Rotor [Nm]	Torque Simul. Rotor Comp. [Nm]	Torq. WTE [Nm]
10	1000	1017	1252	1284	430	434	451	27.3	27.53	28.51
9	706	716	884	908	360	364	379	23.3	23.17	24.29
8	466	452	584	597	300	296	298	18.8	18.84	20.33
7	255	207	319	321	220	218	203	14.1	13.94	13.9

Las pruebas consistieron en seleccionar, mediante la GUI, distintos valores de velocidad de viento a emular, manteniendo las condiciones de carga. El modelo de aerogenerador utilizado es el del fabricante EOLOCAL, modelo AG1000, de 1 kW. Como ejemplo se recorrieron velocidades de viento entre 7m/s a 10m/s, los resultados se muestran a través de figura 12, a y b, y tabla 1, donde se representaron las curvas características y puntos de equilibrio alcanzados para cada una de las condiciones de viento. Una primera comparación permite ver la correlación esperada entre los valores de torque, potencia y velocidad de giro de cada punto de equilibrio con lo establecido por las características de la turbina. Se pone de manifiesto, que salvo para la velocidad de 7m/s donde debido a que la carga proporciona un equilibrio inestable de referencia, las diferencias entre simulación, prototipo experimental y curvas de referencia son menores al 10%, lo cual valida en principio la propuesta desarrollada. Cabe aclarar que las diferencias entre las potencias de equilibrio de curvas aerodinámicas del rotor a emular respecto a las del prototipo experimental y simulación computacional, obedecen a las pérdidas mecánicas (fricción en

transmisión) y eléctricas en PMSG, que va en línea con las que se observa de un aerogenerador de este tipo probado en campo.

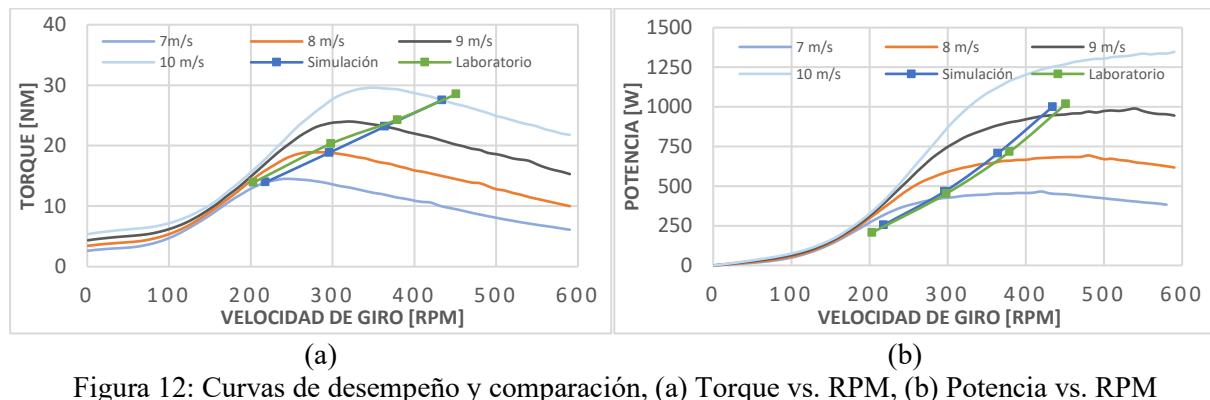


Figura 12: Curvas de desempeño y comparación, (a) Torque vs. RPM, (b) Potencia vs. RPM

CONCLUSIONES

Mediante la configuración desarrollada, se logró en laboratorio condiciones de emulación aceptables del comportamiento aerodinámico del rotor de una turbina eólica de baja potencia de eje horizontal, donde las interfaces entre el variador y el circuito de control sean lo suficientemente genéricas y confiables para alcanzar los objetivos de modularidad y fidelidad.

Se ha garantizado a través de los primeros resultados, y en línea con las referencias citadas, que el emulador posea un margen de exactitud considerado aceptable. Por otro lado, en las pruebas con un perfil de viento real, se demostró la viabilidad de la simulación en dichas condiciones, con la necesaria inserción para ello del cálculo de la compensación dinámica del sistema. Se comprobó que el funcionamiento del equipo y la interfaz de usuario fueron aceptables y la comunicación entre las unidades suficientemente confiables.

En cuanto a trabajos futuros, dado el alcance de los objetivos de modularidad, resulta viable la integración del equipo en un sistema orientado a la evaluación de estrategias de control de velocidad de giro de la turbina, como el utilizado en (Weijsie et al., 2017), mismo a ensayos y evaluaciones con sistemas WECS más complejos y reales que los ofrecidos para este alcance con una carga resistiva, tanto en prototipos experimentales como los ya realizados en la UTN FRN para inyectar energía a la red, o comerciales. Esta ampliación en las capacidades del banco de ensayo permitiría, por ejemplo, emular una estrategia de control que implique cambios en el ángulo del paso de pala, que requeriría del desarrollo de un hardware adicional y una nueva interfaz de usuario. Por último, y con más desarrollo, resultaría posible y muy enriquecedor integrar el sistema en una microrred experimental, donde analizar la interacción de esta con una fuente distribuida de generación como la eólica de baja potencia, y estimar por ejemplo los efectos ocasionados por el comportamiento particular (turbulento) del recurso eólico a baja altura y en entornos complejos, como los urbanos, y su capacidad de complementariedad con otras fuentes de origen renovable como la solar fotovoltaica.

REFERENCIAS

- Zuñiga C., Bufanio R., Marasco D., Monte G., Scarone N., Agnello A. (2023). Estudio y desarrollo de banco de emulación de turbina eólica de baja potencia. IV Congreso de Energías Sustentables en Bahía Blanca.
- Bufanio R., Arribas L., de la Cruz J., Karlsson T., Amadío M., Zappa A., Marasco D. (2022). An update on the electronic connection issues of low power SWTs in AC-coupled systems: a review and case study. *Energies* - MDPI.
- Bufanio R., Marasco D., Monte G., Scarone N. (2019). Control de energía eólica PMSG, on-grid, para baja potencia. Programa CYTED – REGEDIS. Jornadas Científico-Técnicas, Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín Colombia, 2019. <https://cyted.org/REGEDIS>.

- Wood, D. (2011). *Small Wind Turbines: Analysis, Design and Application*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany.
- IEC 61400-2 Ed.3. (2013). *Wind Turbines–Part 2: Small Wind Turbines*. International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland.
- Sven W. Enevoldsen. (2015). *Small Wind Turbines Engineering*. Randers Denmark.
- Refan M. and Hangan H. (2012). Aerodynamic Performance of a Small horizontal axis wind turbine. *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 134.
- Liu Su and Janajreh Isam. (2012). Development and application of an improved blade element momentum method model on horizontal axis wind turbines, *Springer Open Journal*.
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. & Bossanyi, E. (2011). *Wind Energy Handbook*, John Wiley and Sons, Ltd.
- Schaffarczyk A. (2014). *Introduction to Wind Turbine Aerodynamics*. 1st Ed, Springer Science & Business Media, pp. 85 – 91.
- Hansen Martin. (2015). *Aerodynamics of Wind Turbines*. 3rd Ed, Earthscan, pp. 38 – 53.
- Jiawei Chen, Jie Chen, Chunying Gong and Huizhen Wang. (2012). Design and Analysis of Dynamic Wind Turbine Simulator for Wind Energy Conversion System. *Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, pp. 971 – 977.
- Phlearn Jansuya and Yuttana Kumsuwan. (2013). Design of MATLAB/Simulink Modeling of Fixed-Pitch Angle WT Simulator. *Energy Procedia* 34, pp. 362 – 370.
- Bufanio R., Marasco D., Monte G., De Villaflor A., González J., Scarone N., and Bracco R. (2019). Low Power Wind Energy Control “WECS PMSG” On-Grid. *Modern Environmental Science and Engineering*, Volume 5, Number 6, June 2019.
- Devbratta Thakur and Jin Jiang. (2017). Simulator for Integration to a Microgrid with Renewable Energy Source. *Electric Power Components and Systems*, 45(9):949–963.
- Weijie Li, Minghui Yin, Zaiyu Chen and Yun Zou. (2017). “Inertia Compensation Scheme for Wind Turbine Simulator Based on Deviation Mitigation. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, Vol. 5(2), pp. 228 – 238.
- Ohyama K. and Nakashima T. (2010). Wind Turbine Emulator Using Wind Turbine Model Based on Blade Element Momentum Theory. *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, pp. 762 – 765.
- Tammaruckwattana S. and Ohyama K. (2013). Modeling and Simulation of Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Power Generation System Using Boost Converter Circuit. *Fukuoka Institute of Technology*.

VALIDATION AND OPTIMIZATION OF SMALL WIND TURBINE EMULATOR

ABSTRACT: This Work shows the advances and improvements obtained in the development of a small wind horizontal axis wind turbine emulator. The implementation allows us to emulate the main performance variables of a bladed rotor, so that both the torque and rotation speed imposed on the electric generator, depending on the wind, are similar to those that a real rotor develops. Sensibly reducing test times for electrical conversion systems, by being able to recreate various field scenarios, both for systems coupled to the distributed electrical grid and isolated ones. Therefore, the design and implementation process of its control, the tests carried out and the results obtained are described. To do this, according to the imposed specifications, we begin with the concepts associated with computational modeling, then the main aspects of the control hardware and software, the user interface and its characteristics. Subsequently, the details of the construction of the experimental prototype, the obtaining and analysis of results, and the comparison with those of computational modeling. The potential benefits that the system can bring both in academia and in industry are highlighted. Finally, as future work, improvement options are proposed.

Keywords: Emulator, Wind Energy, Small Wind, Control