



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

“Sistema de emulación de modelos de velocidad de aspas en aerogenerador de baja potencia”

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de Maestría
en Ciencias Mecatrónica

PRESENTA

Ing. Uriel Hernández Osornio

DIRIGIDO POR:

Dr. Martín Valtierra Rodríguez

San Juan del Río, Querétaro, mayo de 2018



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Sistema de emulación de modelos de velocidad de aspas en aerogenerador de baja potencia.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de Maestría en Ciencias Mecatrónica

Presenta

Ing. Uriel Hernández Osornio

Dirigido por:

Dr. Martín Valtierra Rodríguez

Dr. Martín Valtierra Rodríguez
Presidente

Firma

Dr. Juan Pablo Amézquita Sánchez
Secretario

Firma

Dr. Luis Morales Velázquez
Vocal

Firma

Dr. Jesús Rooney Rivera Guillén
Suplente

Firma

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos
Suplente

Firma

Dr. Manuel Toledano Ayala
Director de la Facultad

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado

Querétaro, abril de 2018

I. RESUMEN

Hoy día, la energía eléctrica es utilizada en todo el mundo. Sus métodos de generación y su alta contaminación del medioambiente asociada a la manipulación del petróleo son temas de interés del sector científico. En este sentido se ha optado por nuevas fuentes de energía como la geotérmica, solar, eólica, entre otras. Sin embargo, para la producción eficiente de energía eléctrica en base a las energías antes mencionadas es necesario investigar su comportamiento y así obtener el máximo provecho de estas. Actualmente estas investigaciones en el área de energía eólica suelen ser bastante costosas, debido a que deben realizarse en campo; además, las condiciones ambientales no están controladas y los tiempos de traslado tanto de equipos de generación como de medición son elevados. De acuerdo a lo anterior, en este trabajo se propone un sistema de emulación de modelos de velocidad de aspas en un aerogenerador de baja potencia, con base en el desarrollo de un túnel de viento que permita generar perfiles de velocidad de viento muy similares al comportamiento del ambiente e incluso reproducir perfiles medidos del ambiente; para realizar las pruebas, al final del túnel, se coloca un aerogenerador de baja potencia del cual se medirá el comportamiento de las aspas ante los perfiles de viento en base al voltaje de salida del mismo. El sistema de emulación se compondrá de un motor de corriente directa acoplado a la flecha de un aerogenerador de baja potencia sin aspas en el que se incluirá un controlador para que el motor reproduzca el voltaje obtenido del aerogenerador con aspas. En general el proyecto consiste en tres etapas, en la primera: se obtendrán los perfiles de voltaje del aerogenerador con aspas en base a los perfiles de viento; en la segunda, se obtendrán nuevos perfiles de voltaje del sistema de emulación y, finalmente, estos últimos perfiles servirán para el modelado de las aspas utilizando técnicas estadísticas. Para obtener la emulación y modelado, se utilizaron siete perfiles de viento diferentes y la variante de modelado ARX, cuyos resultados fueron satisfactorios para emulación con un error menor a 1.17 % y buenos para modelado con 19.8% como máximo error; también, se correlacionó de buena forma el comportamiento con el número de aspas y perfil de velocidad de viento.

Palabras clave: Aerogenerador, modelado, perfil de viento, túnel de viento.

II. SUMMARY

Nowadays, the electric power is used around the world. Its generation methods and its high pollution of the environment related to the use of coal and oil are topics of interest for the scientific sector. In this regard, it has led to the investigation of new energy resources, such as geothermal, solar, wind, among others. However, for the efficient production of power energy based on the aforementioned energies, it is necessary to investigate their behavior. Currently, these investigations in the wind energy area are usually quite expensive because they must be carried out in field; besides that, the environmental conditions are not controlled and the transfer times of both generation and measurement equipment are very high. Therefore, in this work an emulator of blades for speed models in a low power wind turbine system is proposed. It is based on the development of a wind tunnel that allows generating wind speed profiles which are very similar to the ones generated under an environmental behavior. In order to perform the tests, at the end of the tunnel, a low power wind turbine is placed. From this turbine, the behavior of the blades under the wind profiles will be measured by considering the output voltage. The emulation system is based on a direct current motor coupled to the low power wind turbine shaft without blades in which a controller is included so that the motor reproduces the voltage obtained from the wind turbine with blades. In general the project consists of three parts, first: the voltage profiles is obtained from the wind turbine with blades according to the wind profiles; second, the new voltage profiles are generated from the emulation system and, finally, these new profiles will serve to obtain blades models according to each wind profile using statistical modeling techniques. To obtain the emulation and modeling, seven different wind profiles and the modeling variant ARX are used where the obtained results are very satisfactory since the error percentages do not exceed 1.2 % and 20%, respectively; also, the behavior associated to the number of blades and the wind speed profile are correctly correlated.

Keywords: modeling, wind profile, wind tunnel, wind turbine.

A mis padres y hermano, que siempre me apoyan.

III. AGRADECIMIENTOS

A mi familia que siempre me han apoyado a seguir adelante y vencer los obstáculos que se presentan, por su cariño, comprensión y por siempre creer en mí.

A mi asesor, el Dr. Martín Valtierra Rodríguez, por confiar en mí y darme la oportunidad de participar en este proyecto, por sus buenos consejos y comentarios que me ayudaron a terminar esta etapa de mi carrera.

A mis profesores el Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos, Dr. Luis Morales Velázquez, Dr. José Antonio Romero Navarrete y, en general, a todos por su apoyo y paciencia.

A mis amigos, Paco, Zaid, Gustavo, Amparo, Omar, Darién, y a los que faltan de mencionar por su apoyo, amistad y comprensión durante todo este tiempo y los buenos momentos que pasamos juntos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por haberme dado la oportunidad de desarrollar este proyecto de investigación apoyándome con el número de beca 595936, y a la Universidad Autónoma de Querétaro, siendo una de las instituciones con gran nivel educativo por su gran apoyo.

A todos, gracias.

IV. ÍNDICE

I.	RESUMEN.....	III
II.	SUMMARY.....	IV
III.	AGRADECIMIENTOS.....	VI
IV.	ÍNDICE.....	VII
V.	ÍNDICE DE FIGURAS	IX
VI.	ÍNDICE DE TABLAS	XI
1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Antecedentes	1
1.2.	Sistemas de Emulación.	2
1.3.	Emulación de Generadores Eólicos	4
1.4.	Descripción de Problema	7
1.5.	Justificación.....	8
1.6.	Hipótesis y Objetivos	10
1.6.1.	Hipótesis.....	10
1.6.2.	Objetivos	10
1.6.2.1.	Objetivo General.....	10
1.6.2.2.	Objetivos Particulares.	10
1.6.3.	Planteamiento General.	11
2.	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.	13
2.1	Partes del Aerogenerador.....	13
2.2	Modelos de Viento.	15
2.2.1	Modelo Velocidad Constante.....	16
2.2.2	Modelo Serie de Tiempo.....	17
2.2.3	Modelo Rampa.	18
2.2.4	Modelo Ráfaga.	19
2.2.5	Modelo Turbulencia.....	20
2.2.5.1	Intensidad de la Turbulencia.	20
2.2.5.2	Espectro de Turbulencia.	22
2.2.6	Modelo Estocástico de Viento.....	22
2.3	Sistema de Emulación Motor-Generador.....	23
2.4	Técnicas de Modelado.....	27
2.4.1	Modelo ARX.....	27

2.4.2	Modelo ARMAX.	28
2.5	Túnel de Viento.	29
2.5.1	Estructura.	29
2.5.2	Aplicación.	30
2.6	Variables de Medición.	31
2.6.1	Velocidad.	31
2.6.2	Voltaje.	32
2.6.2.1	NI USB 6211.	32
2.6.2.2	Tarjeta de Acondicionamiento.	32
2.7	Control.	33
2.8	LABVIEW.	35
2.9	Curve Fitting Toolbox.	36
3.	METODOLOGÍA.	38
3.1	Generación y validación de perfiles de viento en Túnel de Viento.	39
3.2	Obtención de perfiles de voltaje del aerogenerador.	42
3.3	Desarrollo de sistema de emulación.	44
3.4	Obtención de modelo general de perfiles de voltaje en aerogeneradores.	46
4.	EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS.	49
4.1	Sistema de Generación de Perfiles de Viento.	49
4.2	Obtención de perfiles de voltaje.	53
4.3	Sistema de emulación.	57
4.4	Modelado y obtención de ecuaciones generales.	62
5.	CONCLUSIONES	68
5.1	Prospectivas	69
6.	APÉNDICE.	70
7.	BIBLIOGRAFÍA.	77

V. ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1. Capacidad de energía eólica e incremento, top 10 de naciones cosechadoras de energía eólica, 2015, (Sawin et al. 2016).</i>	1
<i>Figura 1.2. Diagrama general de planteamiento general.</i>	11
<i>Figura 1.3. Diagrama a bloques del emulador Motor-Generador.</i>	12
<i>Figura 2.1. Partes básicas de un aerogenerador.</i>	14
<i>Figura 2.2. Diagrama a bloques del sistema Aerogenerador.</i>	14
<i>Figura 2.3. Modelo de velocidad de viento constante (Amaya et al. 2007).</i>	17
<i>Figura 2.4. Modelado de registro de velocidad de viento a), modelado con interpolación b), (Amaya et al. 2007).</i>	18
<i>Figura 2.5. Modelo Rampa, (Amaya et al. 2007).</i>	19
<i>Figura 2.6. Modelo Ráfaga, (Amaya et al. 2007).</i>	20
<i>Figura 2.7. Componentes del modelado por aproximación numérica.</i>	23
<i>Figura 2.8. Circuito equivalente de un motor de cd, a) completo, b) simplificado, (Chapman & Jaime 1998).</i>	25
<i>Figura 2.9. Circuito equivalente del generador cd, (Chapman & Jaime 1998).</i>	26
<i>Figura 2.10. Circuito equivalente simplificado de un generador cd, (Chapman & Jaime 1998).</i> ¡Error!	
Marcador no definido.	
<i>Figura 2.11. Diagrama a bloques del sistema de emulación.</i>	26
<i>Figura 2.12. Estructura general de túnel de viento.</i>	30
<i>Figura 2.13. Encoder rotatorio de 2 canales.</i>	31
<i>Figura 2. 14. Circuitos de acondicionamiento monofásico.</i>	33
<i>Figura 2.15. Panel frontal y diagrama de bloques de LABVIEW.</i>	37
<i>Figura 2.16. Herramienta Curve Fitting de MATLAB.</i>	37
<i>Figura 3.1. Diagrama general de Metodología.</i>	39
<i>Figura 3.2. Software de generación de perfiles de viento.</i>	40
<i>Figura 3.3. Túnel de viento.</i>	41
<i>Figura 3.4. Interfaz de adquisición y medición de datos.</i>	41
<i>Figura 3.5. Tarjeta de acondicionamiento.</i>	42
<i>Figura 3.6. a) Aerogenerador con tres aspas, b) aerogenerador con cinco aspas.</i>	43
<i>Figura 3.7. Sistema de adquisición de voltaje y velocidad.</i>	44

<i>Figura 3.8. Diagrama general del sistema de emulación.</i>	44
<i>Figura 3.9. Motor de DC, 12 voltios y 2 amperes.</i>	45
<i>Figura 3.10. Interfaz de control de velocidad.</i>	45
<i>Figura 3.11. Aerogenerador y motor acoplados.</i>	46
<i>Figura 3.12. Diagrama a bloques para obtención de modelo general.</i>	48
<i>Figura 4.1. Software de generación de perfiles.</i>	50
<i>Figura 4.2. Túnel de viento con puesta a experimento.</i>	50
<i>Figura 4.3. Anemómetro.</i>	51
<i>Figura 4.4. Resultado de las pruebas de flujo de aire.</i>	52
<i>Figura 4.5. Aerogenerador con cinco aspas.</i>	53
<i>Figura 4.6. Perfiles de voltaje adquirido del aerogenerador con cinco aspas.</i>	54
<i>Figura 4.7. Aerogenerador con tres aspas.</i>	55
<i>Figura 4.8. Perfiles de voltaje adquirido del aerogenerador con tres aspas.</i>	56
<i>Figura 4.9. Aerogenerador y motor acoplados.</i>	57
<i>Figura 4.10. Módulo VNH2SP30 (a), NI USB 6211 (b).</i>	58
<i>Figura 4.11. Interfaz de control de motor.</i>	58
<i>Figura 4.12. Respuesta del emulador para cinco aspas.</i>	59
<i>Figura 4.13. Respuesta del emulador para tres aspas.</i>	60
<i>Figura 4.14. Modelos generados para aerogenerador con cinco aspas.</i>	63
<i>Figura 4.15. Modelos generados para aerogenerador con tres aspas.</i>	64
<i>Figura 4.16. Polinomio de modelo constante 5 aspas.</i>	65

VI. ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Longitud de rugosidad, Z_0, para distintos ambientes.</i>	21
<i>Tabla 2. Especificaciones generales de la NI USB 6211.</i>	32
<i>Tabla 3. Coeficientes de los modelos polinomiales.</i>	66
<i>Tabla 4. Funciones generales para cada perfil.</i>	67

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La demanda de energía eléctrica en el mundo se ha incrementado en los últimos años, por lo que se están enfrentando problemas de calentamiento climático debido a las emisiones contaminantes en el afán de obtener dicha energía considerando fuentes de carbón y petróleo. Por otro lado, existe incertidumbre en la cantidad de reservas de fuentes energéticas fósiles como petróleo, gas o carbón y riesgo en el manejo de fuentes energéticas nucleares (Pecesila *et al.*, 2016). Por todo lo anterior, muchas organizaciones están tomando medidas necesarias e invirtiendo en energías renovables, ya que representan un impacto significativo en el desarrollo sustentable de las naciones; tanto así que, en los últimos años, alrededor del 22 % de la energía eléctrica generada alrededor del mundo proviene de fuentes renovables (Ursúa *et al.*, 2016; Kastner & Matthies, 2016). De entre las energías renovables, la solar y la eólica se han convertido en las más populares alrededor del planeta, con 12.27 % y 23.41 % respectivamente del total de producción mundial de energía renovable, siendo la energía eólica la apuesta en producción hacia el futuro del top diez mundial de cosechadores de energía como se puede observar en la Figura 1.1 (Sawin *et al.*, 2016).

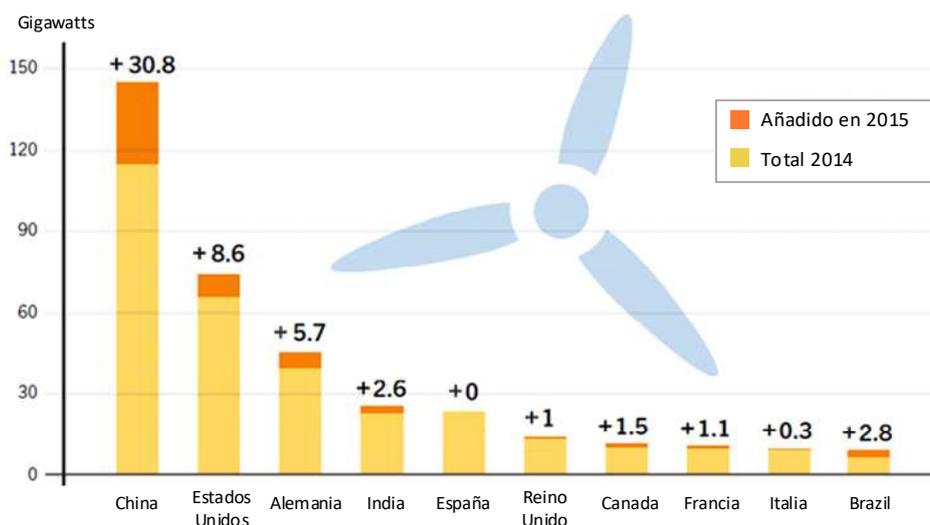


Figura 1.1. Capacidad de energía eólica e incremento, top 10 de naciones cosechadoras de energía eólica, 2015, (Sawin *et al.*, 2016).

En esta figura se observa que México no aparece dentro de las naciones con mayor producción de energía eólica; por lo tanto, es necesario el desarrollo de investigaciones en aerogeneradores. En este sentido se han realizado algunos trabajos enfocados al diseño mecánico, diseño de aspas, número de aspas, proposición de metodologías de modelado utilizando técnicas de emulación tanto en software como hardware. También se ha investigado la parte eléctrica como el propio generador y la etapa de potencia y algunas más en el desarrollo de controladores, de reguladores de carga, inversores, etc., donde la parte de pruebas en laboratorio en estas últimas es crucial para corroborar su correcto funcionamiento.

En este sentido, una gran parte de las tendencias actuales de investigación son enfocadas al desarrollo y estudio de pruebas en emuladores ya que presentan diversas ventajas; por ejemplo, los gastos de operación son más baratos, los gastos de consumibles se reducen y los ambientes de prueba son más controlados lo cual permite tener repetitividad en las pruebas además de realizarse con una mayor rapidez, entre otras. Dentro de las consideraciones a tomar en cuenta en la emulación, se deben considerar aspectos como modelado, control eléctrico de motores y electrónica de potencia. En lo siguiente, se describen algunos de los trabajos que se han enfocado a estas áreas, así como los que se han encaminado específicamente a aerogeneradores.

1.2. Sistemas de Emulación.

Actualmente se han desarrollado diversas investigaciones enfocadas a la validación mediante sistemas de emulación mediante algoritmos de control, involucrando sistemas mecánicos, eléctricos, y electrónicos, entre otros. Tal es el caso de Dai *et al.*, (2016) quienes diseñaron un emulador de un sistema de lazo de control básico para la supervisión del proceso de triturado de minerales mediante un actuador, un sistema de sensores y una planta virtual, dándole un enfoque hacia sistemas industriales, simulando además la dinámica del equipo y sus fallas. Saulnier *et al.*, (2014) desarrollaron un emulador de una pequeña nave espacial de

seis grados de libertad para realizar pruebas y validar nuevos algoritmos de control, orientación y navegación para el movimiento relativo de nano satélites, este sistema fue el primero en reproducir todos los grados de libertad mediante propulsores reales y no simulando la dinámica o usando servo actuadores. Tavoosi *et al.*, (2014) propusieron un algoritmo de control para mejorar la maniobrabilidad de vehículos presentando un subsistema de dirección por cable el cual fue simulado mediante el método HIL (*Hardware in the Loop* o Hardware en el lazo, HIL, por sus siglas en inglés) usando la herramienta Simulink de Matlab, algunas variables fueron extraídas del modelo simulado para introducirlas en el controlador y aplicar una corrección angular en la rueda de dirección. Por su parte Heidrich *et al.*, (2013) realizaron una simulación HIL para desarrollar y probar sistemas de control integrados a vehículos como sistemas de frenado, dirección y presión dinámica de las llantas. Wenbo & Qiang, (2012) desarrollaron un sistema de emulación HIL para probar las habilidades de controladores de navegación y guía de pequeños vehículos de lanzamiento mediante el análisis de las variables del sistema inercial de lanzamiento estableciendo los datos que se enviarán al controlador, después se realizó la simulación HIL para establecer el sistema de control y observar su comportamiento mediante la simulación de la desviación del casco después de la primera etapa de separación. Otro trabajo es el de Saleem *et al.*, (2010) quienes describieron una estrategia para la identificación y control de motores de inducción de jaula de ardilla trifásicos la cual consistió en la identificación en línea del sistema mediante una función de transferencia, se diseñó un controlador fuera de línea el cual fue simulado y validado mediante el método HIL usando la función de transferencia identificada y por último la aplicación del controlador diseñado al sistema real.

En todos los trabajos anteriores, durante su experimentación, se obtienen ventajas de reducción de costos y tiempos, además de, en muchos casos, minimizar los posibles riesgos físicos y humanos que podrían generarse.

1.3. Emulación de Generadores Eólicos

Así como se han realizado investigaciones sobre la emulación de sistemas en general y debido al creciente uso de las energías renovables como la energía eólica para la generación de energía eléctrica, también en los últimos años se han realizado investigaciones acerca del comportamiento de los Generadores Eólicos (GE). Esto debido a que es importante conocer el desempeño de estos equipos y su interacción con las condiciones naturales a las que están expuestos, en la gran mayoría de estas investigaciones se han desarrollado emuladores que puedan reproducir el comportamiento de los GE ante condiciones de viento controladas, lo cual puede ser de gran ayuda incluso para realizar otro tipo de estudios como pruebas eléctricas, pruebas de eficiencia o detección de fallas, entre otras. Sajadi *et al.*, (2016) propusieron, diseñaron e implementaron un nuevo emulador de GE usando una máquina de inducción de jaula de ardilla y un generador de inducción de imán permanente, usando un Transistor Bipolar de Puerta Aislada (*Insulated Gate Bipolar Transistor*, IGBT, por sus siglas en inglés) en Corriente Alterna (*Alternating Current*, AC, por sus siglas en inglés), a su vez un microprocesador fue usado para controlar el motor, además se usó la computadora para generar los perfiles de viento. Castelló *et al.*, (2016) describieron una plataforma experimental para emular el comportamiento estático y dinámico de sistemas reales de conversión de energía eólica, el emulador de GE consistió en dos máquinas de inducción de jaula de ardilla acopladas obteniendo las características del emulador en una Computadora Personal (*Personal Computer*, PC, por sus siglas en inglés) y un Procesador de Señales Digitales (*Digital Signal Processor*, DSP, por sus siglas en inglés), además el emulador implementado se usó para comparar diferentes algoritmos de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia, (*Maximum Power Point Traking*, MPPT, por sus siglas en inglés) y el comportamiento en baja tensión.

Giberti & Ferrari, (2015) desarrollaron un simulador usando el método HIL para probar modelos a escala de turbinas eólicas marinas flotantes mediante un túnel de viento y obteniendo la síntesis cinetostática mediante algoritmos genéticos. Simani *et al.*, (2015) describieron un esquema de diagnóstico de fallas en base a la

identificación de modelos difusos con el fin de detectar fallas y aislar estas fallas, además de mejorar los costos de energía, estos esquemas y modelos fueron validados en un simulador de GE.

Una de las etapas principales en el desarrollo de estos emuladores es el modelado del GE mediante técnicas de identificación, Castelló *et al.*, (2016) utilizaron una ecuación de modelado en base a las características del GE y del viento como la longitud de las aspas, la densidad y velocidad del viento, el ángulo de las aspas, entre otros, sin embargo, el modelo que ellos usaron fue tomado y adaptado de otros autores como Kim *et al.*, (2013) y Cirrincione *et al.*, (2013). También Monfared *et al.*, (2008) usaron una ecuación para modelar el GE tomando en cuenta las estructuras de control y el torque dinámico generado por las aspas, esta ecuación fue obtenida de Lopes *et al.*, (2005), es el mismo caso para Munteanu *et al.*, (2010) quienes usaron un modelo para describir matemáticamente la interacción entre los subsistemas de la turbina y las señales externas como la velocidad del viento y las fluctuaciones de la red, basándose en el trabajo de Burton *et al.*, (2001).

Por otro lado, el control del convertidor de energía es otra etapa bastante importante en la emulación de GE, Castelló *et al.*, (2016) propusieron tres métodos de control, relación de velocidad de la punta (*Tip Speed Ratio*, TSR, por sus siglas en inglés) el cual se basa en el conocimiento de las características de las aspas, retroalimentación de la señal de potencia (*Power Signal Feedback*, PSF, por sus siglas en inglés), este algoritmo se basa en la curva de máxima potencia obtenida experimentalmente, por último el de perturbación y observación (*Perturbation and Observation*, P&O, por sus siglas en inglés), el cual solo necesita la potencia de salida la cual depende de la velocidad de las aspas. Munteanu *et al.*, (2010) usaron un software de tres fases con bucle de fase cerrada basado en la transformada de Park para realizar el control del convertidor de potencia de DC a AC.

Además del control del convertidor de energía, también el control del motor que se usa en la emulación es importante, de esta manera, Monfared *et al.*, (2008) utilizaron un sistema de control Proporcional-Integral (PI) de una fase. Hardy & Jewell, (2011) utilizaron un sistema de control basado en un esquema Proporcional-

Integral-Derivativo (PID) implementado en el software LABVIEW cuyas ganancias se obtuvieron en base a prueba y error. Kim *et al.*, (2013) y Cirrincione *et al.*, (2013) utilizaron un sistema de control MPPT, que es un método común de control. Actualmente los aerogeneradores aún presentan algunas desventajas, ya que generan ruido, principalmente en las noches, otro inconveniente que manifiestan las comunidades es que representan un impacto visual negativo al medio ambiente, además de que causan daños a la vida salvaje, principalmente a las aves, las cuales pueden resultar dañadas e incluso morir al cruzar a través de los equipos, también se ha encontrado que los aerogeneradores pueden causar interferencia en la teletransmisión. Otro aspecto negativo, y quizás el más importante es el impacto sobre la salud de las personas, Bakker *et al.*, (2012) encontraron que las personas que viven en las proximidades pueden presentar alteraciones del sueño y angustia psicológica. Atendiendo lo anterior se han realizado y se continúan realizando diversas investigaciones para erradicar estas desventajas y que estos equipos sean totalmente amigables con el ambiente y las personas. Tal es el caso de Marques *et al.*, (2014) quienes realizaron un estudio sobre las colisiones de las aves en los parques eólicos y revisó las posibles estrategias de mitigación.

Como se muestran los antecedentes anteriores, existen muchos trabajos acerca de la emulación de GE debido a que las experimentaciones en campo son costosas y que las condiciones de viento no son controladas por lo que es complicado obtener un resultado deseado durante la experimentación. También, los tiempos de traslado y el costo de tener un generador eólico real de gran escala en ambientes de laboratorio son muy altos. Además, algunos presentan problemas en el modelado analítico ya que utilizan o hacen uso de muchas consideraciones con el objetivo de reducir la complejidad del mismo, implicando errores o diferencias en la exactitud del mismo. Otros manejan velocidades de viento constantes lo que es poco probable que suceda en la vida real; en este sentido, los diferentes perfiles de viento existentes deben ser estudiados para poder, de mejor manera, estudiar y analizar el comportamiento de los aerogeneradores ante distintas condiciones de viento.

En esta investigación se propone el modelado de las señales de voltaje de una Turbina Eólica generadas por distintos perfiles de viento usando técnicas de modelado de Promedio Móvil Auto-Regresivo con entradas exógenas (*Auto-Regresive Moving Average with exogen inputs*, ARMAX, por sus siglas en inglés) para la implementación en un emulador a escala en tiempo real ante perfiles de viento con velocidad variable.

Finalmente, a pesar de que los GE presentan algunas desventajas como las que ya se han mencionado, estos dispositivos presentan un gran potencial en cuestión a la obtención de energías limpias, y un gran nicho de oportunidad a la investigación. Y, como se ha observado, aún faltan por explorar algunas otras áreas, como pruebas eléctricas y detección de fallas que podrían ser explotadas mediante el desarrollo modelos y emuladores que, debido a sus ventajas ya mencionadas, permitan el impulso de nuevos trabajos que involucren dichas áreas.

1.4. Descripción de Problema

Debido a los cambios climáticos que se están experimentando en el planeta, la mayoría de las naciones, y en mayor medida las desarrolladas, están optando por la obtención de energía eléctrica en base a fuentes renovables de energía como la hidroeléctrica, geotérmica, eólica, solar, entre otras. Como ya se ha mencionado, la apuesta hacia un futuro de los países desarrollados es la obtención de energía en base al viento, por lo que ya se han instalado grandes parques eólicos y su uso continúa en aumento. Esto conlleva un exhaustivo análisis tanto de la ubicación, de la cimentación para la instalación de los equipos y las condiciones de viento, como del diseño y selección de los GE que se adecuen a las características del ambiente. En este contexto, el diseño y selección de los GE implica un buen diseño de los elementos que conforman el GE, la cual requiere de sistemas de control y etapas de potencia que requieren ser validados, por consiguiente, todos estos aspectos y sistemas deben ser probados y validados en el laboratorio mediante la emulación de un GE en el cual se puedan realizar dichas tareas.

Por otro lado, para la realización de esta investigación y obtener los resultados deseados, se deben enfrentar los siguientes aspectos: en primera instancia, la medición de las variables de voltaje y velocidad lo cual implica la proposición de un encoder y diseño de un sistema de acondicionamiento. Estos dispositivos serán útiles para realizar las pruebas, por lo tanto, es necesario desarrollar un prototipo de un sistema de adquisición de datos al cual se conectarán los dispositivos anteriores para la medición de las variables en cuestión y obtener datos los necesarios para obtener el modelo. Otro problema que se presenta es que las condiciones de viento en la naturaleza son aleatorias y para este trabajo se necesitan condiciones controladas, de esta manera es necesario construir un túnel de viento que permita reproducir perfiles de viento adecuados para la experimentación y, que a su vez, ayuden a controlar la cantidad de viento que reciben las aspas, accediendo a la repetitividad en las pruebas. Esto no sería posible realizando las pruebas en campo. Además se podrían analizar las variantes en las aspas como su diámetro, material, ángulo de paso, dimensiones y en especial el número de aspas y el efecto en el desempeño eléctrico del aerogenerador. Una vez desarrollados los distintos modelos de las formas de onda de voltaje, estos deben ser probados para obtener el menor error de ajuste, es decir, encontrar el que mejor se ajuste a la realidad y represente el menor error posible. Otro aspecto importante a considerar es el controlador del motor, ya que en base a las mediciones y al lazo de control que se implemente, este debe comportarse tal cual lo hacen las aspas en el ámbito real ante ciertas condiciones de viento y por último la etapa de electrónica de potencia la cual debe encargarse de regular y suministrar la energía al sistema de emulación para que este funcione sin problema.

1.5. Justificación

Durante la revisión de la literatura, se ha observado que en muy pocas de las investigaciones se ha desarrollado modelos específicos, es decir, se han tomado modelos generales de otros sistemas y no modelos asociados a las formas de onda de voltaje bajo diferentes condiciones de viento, además, no se han utilizado técnicas estadísticas de modelado como la técnica ARMAX y sus variantes, esta técnica de modelado propuesta es muy importante ya que en la actualidad la

simulación de GE está siendo de gran utilidad tanto para validar los modelos como para probar diferentes metodologías de control, diseños de inversores de energía, detección de fallas en GE, pruebas eléctricas, pruebas de eficiencia, una infinidad de aplicaciones, las cuales resultan de calidad, rapidez y bajo costo.

Debido a los cambios climáticos que se están experimentando en el planeta, los países están buscando un desarrollo sustentable tomando como base las energías renovables como la energía eólica, representando ésta casi el 25% de las energías limpias producidas globalmente y sigue en incremento, ya que de los países desarrollados como China han incrementado su producción de energía eólica de 2014 a 2015 hasta en un 30%, (Sawin *et al.*, 2016). De esta manera, las investigaciones enfocadas a la emulación de GE están tomando un gran revuelo ya que presentan grandes ventajas debido a que las pruebas necesarias se pueden realizar en el laboratorio y no en campo, además si se quisieran hacer en campo los costos de traslado serían significativos, las condiciones de viento y del sistema no serían controladas, por otra parte, el costo de la obtención de un GE real de gran escala es bastante alto, el cual se incrementaría debido a los gastos de instalación, pues esta es especial porque requiere de una buena ubicación y preparación de la tierra para un buen funcionamiento.

En definitiva, el modelado y emulación de un GE es de gran utilidad, no solo porque con este dispositivo se pueden validar los mismos modelos del GE, sino que también porque las aplicaciones del emulador son bastantes, ya que se puede observar el comportamiento del dispositivo ante diferentes condiciones de viento. También se puede observar cómo influye en el aprovechamiento de la energía eólica la forma de las aspas, el material del que están hechas, el ángulo de paso, la longitud de las mismas, entre otras características que pueden ser variables. Otras aplicaciones posibles serían, el análisis de su eficiencia y su mejoramiento, la detección de fallas tanto en el GE como en las mismas aspas, incluso evitar que generen ruido, que es uno de los problemas que causan enfermedades en las personas relacionadas con el estrés.

El aporte principal de este trabajo es la proposición de una metodología para el modelado experimental que correlacionen el número de aspas con las

variables eléctricas y de velocidad en un aerogenerador de baja potencia, la cual será validada e implementada mediante el diseño y desarrollo de un emulador de GE a baja escala.

Finalmente, el prototipo de emulador desarrollado permitirá dar soporte de infraestructura a otras investigaciones enfocadas al desarrollo de inversores y controladores de seguimiento de máxima potencia.

1.6. Hipótesis y Objetivos

1.6.1. Hipótesis

La obtención de modelos experimentales en base a técnicas de modelado del tipo ARX y ARMAX, que correlacionen el número de aspas de aerogeneradores de baja potencia con las variables de voltaje y de velocidad del generador eólico en condiciones controladas de viento y el desarrollo de un emulador motor-generador para su implementación permitirán, además de su validación, el estudio de su desempeño eléctrico.

1.6.2. Objetivos

1.6.2.1. Objetivo General

Diseñar y desarrollar un emulador motor-generador para la implementación de al menos dos modelos obtenidos experimentalmente que correlacionen el número de aspas con las variables de voltaje y de velocidad en un aerogenerador de baja potencia.

1.6.2.2. Objetivos Particulares.

1. Desarrollar un software de control para la generación de perfiles de aire en un túnel de viento.
2. Instrumentar un aerogenerador de baja potencia para la medición de variables de velocidad y voltaje a través de un encoder para la aplicación en específico.
3. Obtener una matriz de pruebas de al menos dos composiciones diferentes de aspas en un aerogenerador

- usando al menos tres condiciones distintas de viento para el análisis de variables y referencias del modelo.
4. Obtener un modelo experimental que correlacione las variables medidas usando técnicas de modelado tipo ARMAX para su simulación.
 5. Construir un emulador mediante el acoplamiento de un motor y un generador con etapa de potencia para la validación del modelo obtenido.

1.6.3. Planteamiento General.

El desarrollo de este trabajo se hace de acuerdo a la Figura 1.2. Como primer paso, se hará la instrumentación de un aerogenerador de baja escala, desarrollando una etapa de acondicionamiento para las variables de voltaje y velocidad e integrando un encoder, el cual será instalado en la flecha del aerogenerador para realizar mediciones de la variable de velocidad y la obtención de una matriz de pruebas.

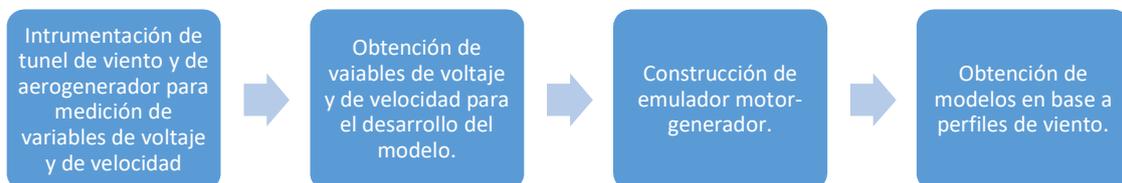


Figura 1.2. Diagrama general de planteamiento general.

Como segundo paso, se hará la adquisición de las variables eléctricas y de velocidad utilizando al menos dos disposiciones de aspas (cambiando el número de aspas) y tres diferentes perfiles de viento, usando una tarjeta NI USB 6211 de National Instruments, junto con un programa de Labview para obtener los datos, éstos se usarán para la constitución de las matrices de pruebas las cuales permitirán desarrollar el modelo de la formas de voltaje del aerogenerador. Como tercer paso

se construirá un sistema de emulación motor generador, cuyo diagrama se puede observar en la Figura 1.3, dicho sistema estará conformado por dos motores de dc acoplados, de los cuales se medirán las variables eléctricas y de velocidad mediante un sistema de adquisición de datos y enviarlos a la PC donde será implementado el modelo y la ley de control que se aplicará al motor primario.

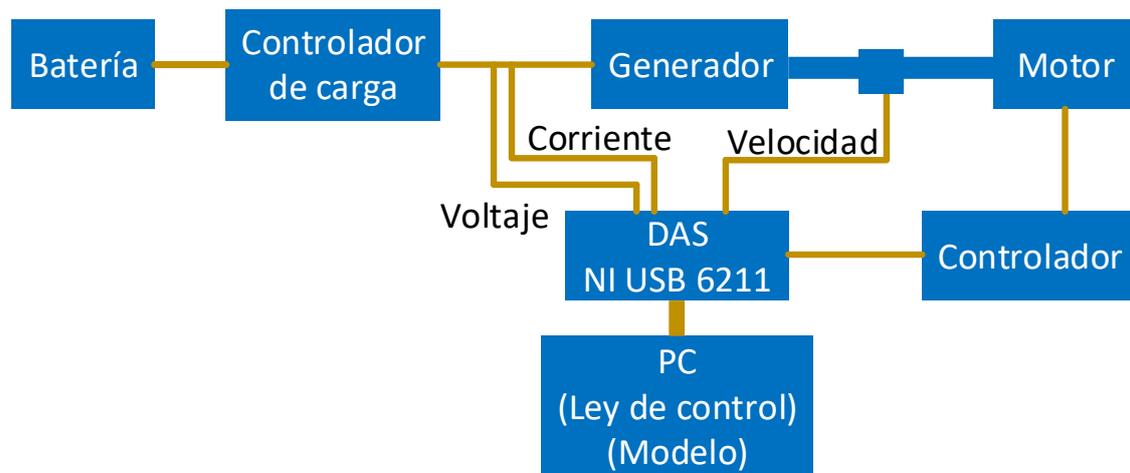


Figura 1.3. Diagrama a bloques del emulador Motor-Generador.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

Revisando el estado del arte, se encontraron algunos temas útiles para el desarrollo de este trabajo. Estos temas serán descritos a continuación y ayudarán a poner el contexto los aerogeneradores y sus partes, la forma en que se modelan los perfiles de viento y algunos de sus tipos, el funcionamiento de motores y generadores como los que se usarán en el sistema de emulación. También algunas de las técnicas estadísticas que serán útiles para la obtención de los modelos, la estructura y características de un túnel de viento, las variables de interés para su manipulación y su forma de medición, conceptos de control y su aplicación a este proyecto y, por último, los software como herramienta para el manejo y análisis de los datos obtenidos.

2.1 Partes del Aerogenerador.

Los generadores eólicos se pueden encontrar comercialmente con salida en dos rangos, por debajo de los 100 kW se consideran generadores pequeños, mientras que por encima se consideran grandes. Las turbinas pequeñas se usan para aplicaciones aisladas y para redes de generación pequeñas, mientras que las turbinas grandes son usadas para redes grandes y parque eólicos grandes. Usualmente las turbinas pequeñas no tienen un control de ángulo de paso, es decir, el ángulo de las aspas es fijo, además, en la mayoría de los casos se usan generadores de imán permanente y generadores de inducción de jaula de ardilla.

En general los generadores eólicos se componen de distintas partes: las aspas, el generador, cola, y torre (Figura 2.1), la etapa de potencia que comprende un inversor y una etapa de control de carga para el acoplamiento a la red o a un banco de baterías, se puede observar en la Figura 2.2.

Partes básicas de un aerogenerador

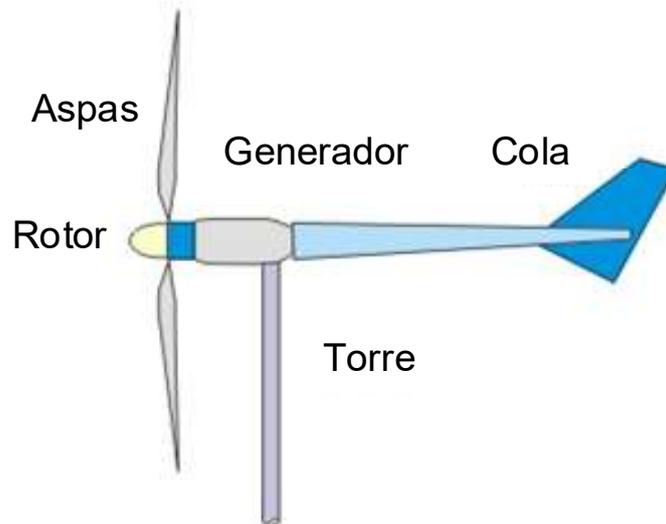


Figura 2.1. Partes básicas de un aerogenerador.

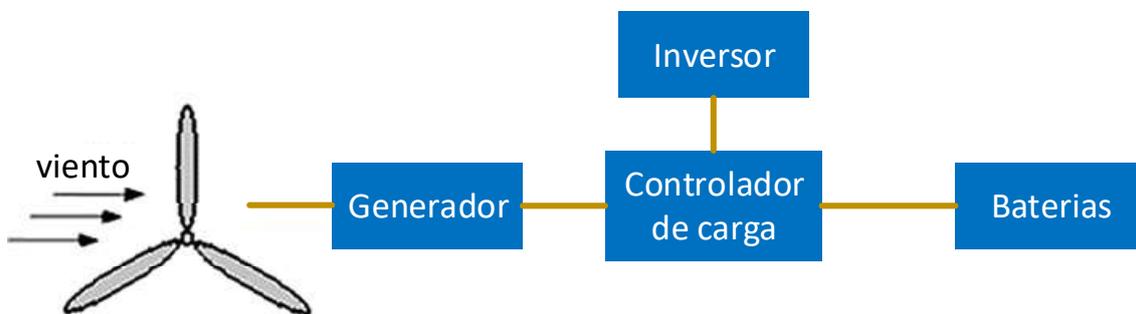


Figura 2.2. Diagrama a bloques del sistema Aerogenerador.

En particular las aspas son un elemento muy importante del equipo ya que sus características influyen bastante en el desempeño y la cantidad de energía que el generador puede aprovechar, por ejemplo, el ángulo de las aspas, la cantidad de aspas, el material del que se componen, la longitud, entre otras. Usualmente las turbinas comerciales tienen aspas cuyo ángulo de paso puede ser variado conforme cambian las condiciones del viento, de manera que se aproveche la mayor cantidad de energía y la turbina alcance su región óptima de operación. Para que la turbina

llegue a dicha región deberá pasar por algunos puntos críticos: velocidad de intercalación, por debajo de este punto la turbina no funciona en absoluto, por encima de este punto la turbina comienza a producir energía, el siguiente punto crítico es cuando se alcanza la velocidad de viento nominal. Es en este punto cuando la turbina genera la mayor cantidad de energía posible, si la velocidad del viento supera la nominal se comienza a dejar escapar energía eólica ajustando el ángulo de las aspas, si esta sigue incrementándose y se llega al siguiente punto crítico que es el desconexión, la turbina debe apagarse para evitar daños en sí misma y en el sistema (Hardy & Jewell, 2011).

En los generadores que se usan en las turbinas, se usan rotores de inducción arrollados o rotores de imán permanente. Para el caso de los rotores arrollados, debe usarse una caja de engranes para adaptar la velocidad de la flecha de las aspas y el generador, mientras que, en el caso de rotor de imán permanente, las aspas se conectan directamente a la flecha del generador (Martinez *et al.*, 2014).

El convertidor o inversor eléctrico, usualmente se coloca entre el generador y la carga, para las turbinas de imán permanente se usa un convertidor, diodos rectificadores, mientras que para los generadores de inducción de jaula de ardilla se usa un convertidor back to back entre el estator y la carga (Martinez *et al.*, 2014).

2.2 Modelos de Viento.

Para fines de investigación, es difícil controlar las condiciones de viento en campo abierto para la realización de pruebas que permitan la obtención de un modelo del sistema eólico, por lo que es necesario el desarrollo de un modelo de viento que permita obtener un modelo del sistema eólico y observar el desempeño de dicho sistema.

Amaya *et al.*, (2007) desarrollaron los siguientes modelos de viento:

- Modelo Velocidad constante.
- Modelo Serie de tiempo.
- Modelo Rampa.
- Modelo Ráfaga.
- Modelo Turbulencia.
- Modelo Estocástico.

2.2.1 Modelo Velocidad Constante.

Para la realización de pruebas y observar el comportamiento de un aerogenerador típicamente se genera un perfil o modelo de viento a velocidad constante, las pruebas ante este tipo de modelo suelen no durar mucho tiempo, este tiempo puede oscilar entre los 10 minutos y 5 horas, en muchas de las ocasiones el modelo se basa en mediciones reales y el valor constante del modelo es el valor promedio de las mediciones. De acuerdo con lo anterior, los n puntos discretizados t_i del intervalo de tiempo $t \in [t_0, t_n]$ en consideración, se describen como sigue:

$$t_i = t_0 + i\Delta t \quad \text{para } i = 0,1,2, \dots, n \quad (1)$$

Donde Δt está definido como el intervalo de tiempo de discretización y está dado por:

$$\Delta t = \frac{t_n - t_0}{n} \quad (2)$$

Siendo n el número de sub-intervalos considerados para la discretización.

La velocidad del viento se mantiene constante durante el lapso de tiempo considerando, siendo esta igual al promedio y descrita como sigue:

$$v_w(t) = \{V_w(t_i) = \{V_{prom}\}_{i=1}^n \quad \text{para } t = \{t_i\}_{i=1}^n \quad (3)$$

En la Figura 2.3 se puede observar de forma gráfica el modelo de velocidad de viento constante.

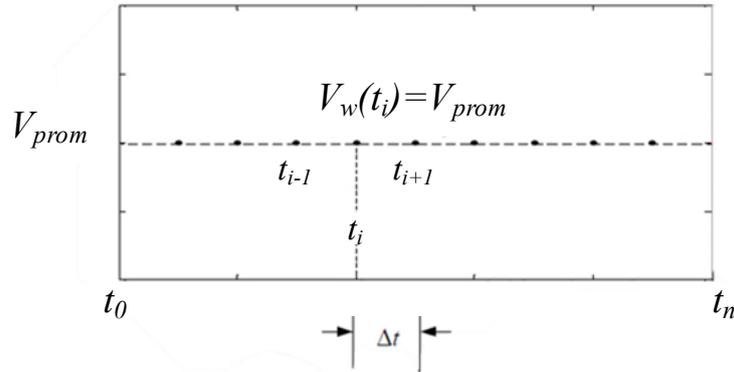


Figura 2.3. Modelo de velocidad de viento constante (Amaya et al. 2007).

2.2.2 Modelo Serie de Tiempo.

Para el desarrollo de este tipo de modelos, se proporciona un registro secuencial de velocidades de viento el cual contiene una sucesión de puntos en forma de pares ordenados y que se muestra en la ecuación 4:

$$v_w = \{V_{w1}, V_{w2}, V_{w3}, \dots, V_{wn}\} \quad (4)$$

$$t = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$$

En dicho registro, el valor instantáneo de la velocidad $V_w(t)$ se especifica en cada uno de los valores de tiempo (t_i), de esta manera, la velocidad del viento se representa con un par ordenado $(V_w(t_i), t_i)$. Sin embargo, en ocasiones se requiere conocer el valor instantáneo de la velocidad en un punto entre el intervalo de tiempo t_i y t_{i+1} por lo que es necesario realizar una aproximación mediante una interpolación donde el paso está dado por la ecuación (2). En la Figura 2.4 se muestra en la parte a) el registro de velocidades de viento en un intervalo de tiempo, mientras que en la parte b) los valores instantáneos de la velocidad del viento que se pueden obtener mediante una interpolación.

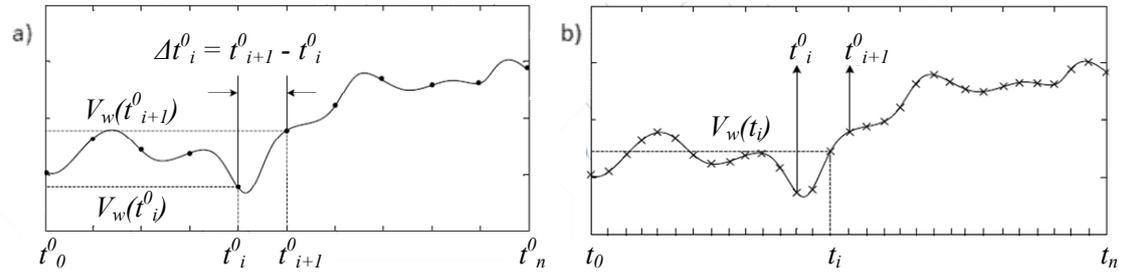


Figura 2.4. Modelado de registro de velocidad de viento a), modelado con interpolación b), (Amaya et al. 2007).

2.2.3 Modelo Rampa.

Para la simulación de cambios en la velocidad del viento más o menos lineales se puede utilizar un modelo de rampa, ya sea ascendente o descendente, este modelo cuenta con tres parámetros principales, la amplitud representada como A_r (m/s), el tiempo de inicio de aumento o disminución de velocidad T_{sr} (s) y el tiempo final de la rampa T_{er} (s), la velocidad de viento del modelo rampa queda descrita como sigue:

$$\begin{aligned}
 t < T_{sr} & \quad \text{para} \quad v_{wr} = 0 \\
 T_{sr} \leq t \leq T_{er} & \quad \text{para} \quad v_{wr} = \widehat{A}_r \frac{(t - T_{sr})}{(T_{er} - T_{sr})} \\
 T_{er} < t & \quad \text{para} \quad v_{wr} = \widehat{A}_r
 \end{aligned} \tag{5}$$

En la Figura 2.5 se muestra un modelo genérico de una rampa, en la cual se pueden observar los valores característicos de este modelo, el cual se puede obtener en base a la formulación matemática número (5).

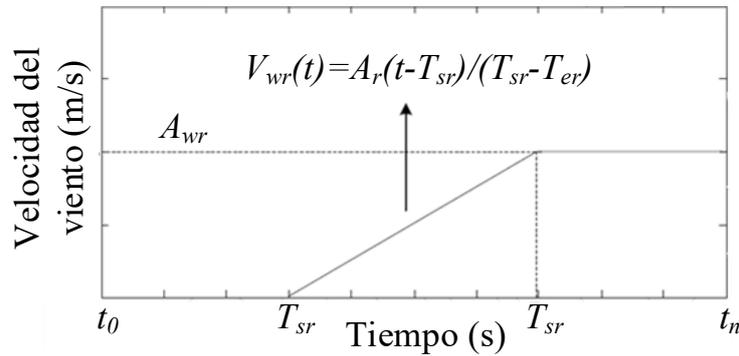


Figura 2.5. Modelo Rampa, (Amaya et al. 2007).

2.2.4 Modelo Ráfaga.

Una ráfaga de viento se caracteriza por que la velocidad de este presenta una fluctuación rápida, en otras palabras, es un cambio temporal en la velocidad del viento, de manera similar que el modelo rampa, el modelo ráfaga posee tres puntos importantes, la amplitud de la ráfaga de viento $\hat{A}_g(m/s)$, el tiempo de inicio de la fluctuación de velocidad $T_{sg}(s)$ y el tiempo final de la ráfaga $T_{eg}(s)$, la velocidad de viento del modelo ráfaga queda descrita con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 t < T_{gr} & \quad \text{para } v_{wg} = 0 \\
 T_{gr} \leq t \leq T_{gr} & \quad \text{para } v_{wg} = \hat{A}_g \left\{ 1 - \cos \left[2\pi \left(\frac{(t - T_{sg})}{(T_{eg} - T_{sg})} \right) \right] \right\} \\
 T_{gr} < t & \quad \text{para } v_{wg} = 0
 \end{aligned} \tag{6}$$

En la Figura 2.6 se ilustra de manera gráfica la ráfaga de viento genérica, la cual puede ser obtenida en base a las ecuaciones (6), además como se puede observar este cambio súbito de velocidad, se asemeja a un semiciclo positivo de una señal coseno, también se pueden observar los parámetros propios.

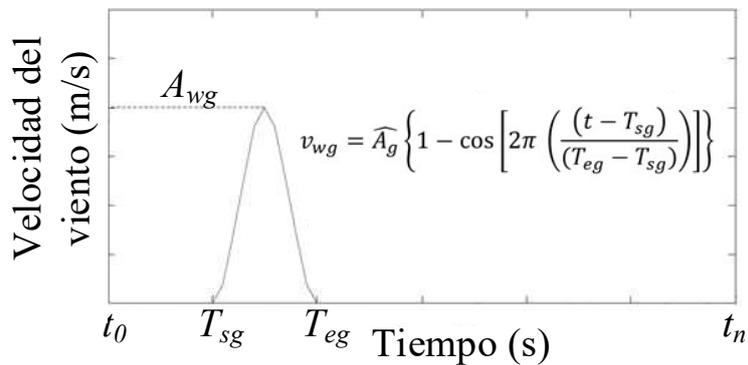


Figura 2.6. Modelo Ráfaga, (Amaya et al. 2007).

2.2.5 Modelo Turbulencia.

Es bastante complicado desarrollar un modelo matemático para este comportamiento del viento, ya este puede tomar valores totalmente aleatorios y erráticos, el comportamiento de este depende básicamente de tres aspectos: el origen de la turbulencia, su intensidad y su espectro.

Se analizará de manera individual el origen, la intensidad y el espectro de la turbulencia para lograr una correcta comprensión.

2.2.5.1 Intensidad de la Turbulencia.

Para poder calcular la componente longitudinal, la desviación estándar se establece como σ_u , y debido a que la intensidad de la turbulencia disminuye con la altura, la desviación permanece casi constante con la altura por lo que se puede usar $\sigma_u = 2.5u^*$ para calcular la desviación estándar, en base a la velocidad de fricción.

Debido a que se pueden realizar los cálculos de diferentes formas obteniendo resultados distintos, algunas instituciones han homologado los criterios del cálculo de la intensidad de la turbulencia para el diseño, desarrollo y desempeño de turbinas de viento.

La Asociación de Ingenieros y la Federación de Ingenieros de Dinamarca (The Danish Society of Engineers and the Federation of Engineers) en 1992 estableció un código para la práctica de las cargas y seguridad en la construcción de las turbinas de viento (DS 472, 1992). En este código se especifica la intensidad de la turbulencia del viento en todas direcciones:

$$\begin{aligned}
 I_u &= \frac{1}{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)} \text{ Intensidad de la Turbulencia Longitudinal} \\
 I_v &= 0.8 I_u \text{ Intensidad de Turbulencia Lateral} \\
 I_w &= 0.5 I_u \text{ Intensidad de Turbulencia Vertical}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Por otra parte, La Comisión Electrotécnica Internacional (International Electrotechnical Commission, IEC), estableció un 1999 el estándar 61400-1 (I. E. C., 1999), para la estandarización para los requerimientos de seguridad de los sistemas de generadores con turbinas de viento.

En la Tabla 1 se muestran los valores de Z_0 para distintos ambientes que rodean la turbina de viento.

Tabla 1. Longitud de rugosidad, Z_0 , para distintos ambientes.

Tipo de Ambiente	Rango de Z_0 (m)
Mar abierto o arena	0.0001-0.001
Nieve	0.001-0.005
Césped bajo o estepas	0.001-0.01
Césped largo o tierra rocosa	0.04-0.1
Bosques o ciudades	1-5

$$I_u = I_{15} \left(\frac{a + \frac{15}{u}}{a + 1} \right) \text{ Intensidad de la Turbulencia Longitudinal.}
 \tag{8}$$

Donde:

$I_{15} = 0.18, a = 2$ Para lugares de alta turbulencia.

$I_{15} = 0.16, a = 3$ Para lugares de baja turbulencia.

$I_v = 0.8 I_u$ Intensidad de Turbulencia Lateral

$I_w = 0.5 I_u$ Intensidad de Turbulencia Vertical

Por último, Lloyd (1993) especifica simplemente el 20 por ciento de la intensidad de turbulencia.

2.2.5.2 Espectro de Turbulencia.

Este parámetro describe el contenido de las variaciones de la frecuencia de la velocidad del viento, este debe aproximarse al límite asintótico proporcional $n^{-5/3}$ en alta frecuencia (donde n denota la frecuencia, en Hz). Frecuentemente se utilizan dos expresiones para el espectro de la componente longitudinal de velocidad de viento, ambas con tendencia al límite asintótico:

$$\frac{nS_u(n)}{\sigma_u^2} = \frac{4nL_{1u}/\bar{U}}{(1+6nL_{1u}/\bar{U})^{5/3}} \quad \text{Espectro Kaimal} \quad (9)$$

$$\frac{nS_u(n)}{\sigma_u^2} = \frac{4nL_{2u}/\bar{U}}{\left(1+70.8\left(\frac{nL_{2u}}{\bar{U}}\right)^2\right)^{5/6}} \quad \text{Espectro Von Karman} \quad (10)$$

Donde $S_u(n)$ es la función de la densidad auto espectral para la componente longitudinal, L_{1u} y L_{2u} son escalas de longitud las cuales guardan la siguiente relación $L_{1u} = 2.329 L_{2u}$.

De acuerdo con Petersen (1998), el espectro Von Karman da una buena descripción de la turbulencia en túneles de viento y es usado a menudo por las consistencias con las expresiones analíticas, donde L_{2u} es la integral de la longitud de la escala de la componente longitudinal en la dirección longitudinal y se denota por L_{xu} .

2.2.6 Modelo Estocástico de Viento.

Este tipo de modelo está diseñado para tiempos cortos de simulación los cuales están comprendidos en el rango de los segundos, tiene como ventaja que se representa mediante una velocidad real y sirve para medir el desempeño de la turbina, es frecuente asumir que el modelo de velocidad de viento está compuesto de las siguientes componentes:

v_{wa} : Valor promedio.

$v_{wr}(t)$: Una componente de rampa, incremento constante en la velocidad.

$v_{wg}(t)$: Una componente de ráfaga, fluctuación repentina en la velocidad.

$v_{wt}(t)$: Una componente representada por una turbulencia.

De esta manera, la velocidad del viento del modelo estocástico se describe de la siguiente manera, cuyas componentes ya han sido descritas con anterioridad y pueden observarse gráficamente en la Figura 2.7, en donde el modelo por aproximación numérica resulta de la suma del promedio, rampa, ráfaga y turbulencia:

$$v_w(t) = v_{wa} + v_{wr}(t) + v_{wg}(t) + v_{wt}(t) \quad (11)$$

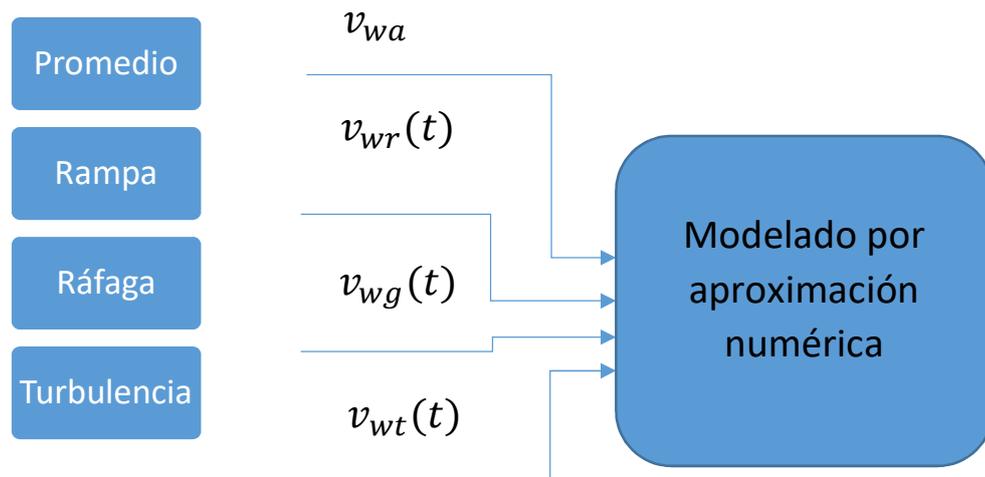


Figura 2.7. Componentes del modelado por aproximación numérica.

2.3 Sistema de Emulación Motor-Generador.

Chapman & Jaime, (1998) mencionan que los motores de corriente directa (cd), fueron ampliamente utilizados hasta el año de 1960, a partir del cual comenzó

un declive en la utilización de éstos; sin embargo, existen muchas aplicaciones que requieren el uso de estos equipos como en los coches, camiones o aviones, en los que se requiere su uso, debido a la gran facilidad con la que se puede controlar su velocidad.

Existen cinco diferentes tipos de motores de corriente directa de uso general:

- Motor de cd de excitación separada.
- Motor de cd en derivación.
- Motor de cd de imán permanente.
- Motor de cd en serie.
- Motor de cd compuesto.

En la Figura 2.8, parte a), se muestra el circuito equivalente de un motor de cd, en donde el circuito del inducido se representa por una fuente voltaje ideal y un resistor, este incluye las bobinas, interpolos y devanados de compensación. La caída de voltaje en las escobillas se representa por medio de una batería en sentido opuesto a la dirección del flujo de corriente en la máquina. Las bobinas de campo que producen el campo magnético en el generador esta simbolizadas por un inductor y un resistor, el resistor independiente representa un resistor exterior que regula la cantidad de corriente que en el circuito de campo.

Con frecuencia la caída de voltaje en las escobillas es incluida con una aproximación en el valor de la resistencia, además, la resistencia interna de las bobinas de campo se agrupa con el resistor variable como se muestra en la Figura 2.8 parte b).

El voltaje interno que genera esta máquina está dado por la ecuación 12:

$$E_A = K\Phi\omega_m \quad (12)$$

El par inducido por la máquina está dado por la ecuación 13:

$$E_A = K\Phi\omega_m \quad (13)$$

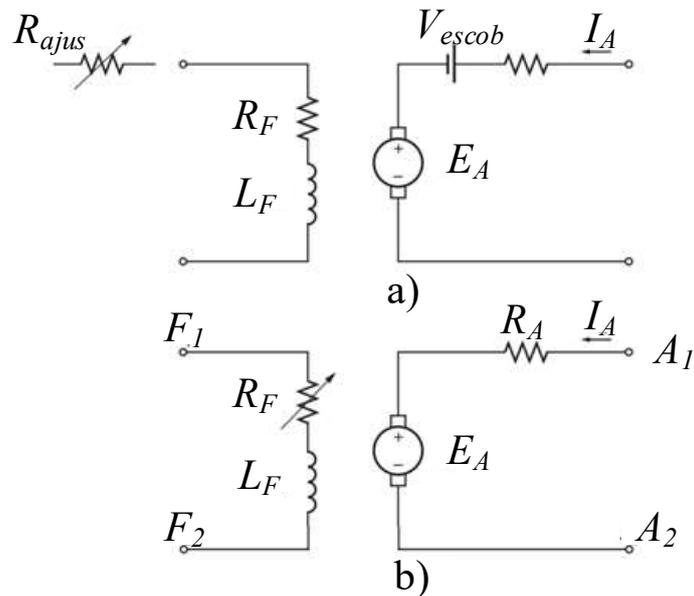


Figura 2.8. Circuito equivalente de un motor de cd, a) completo, b) simplificado, (Chapman & Jaime 1998).

Chapman & Jaime, (1998) también menciona que no existe una diferencia real entre un generador y un motor excepto en la dirección del flujo de potencia. Hay cinco tipos principales de generadores de cd que se clasifican de acuerdo con la forma en la que se produce el flujo del campo magnético:

Generador de excitación separada. El flujo de campo se deriva de una fuente separada independiente del generador en sí mismo.

Generador en derivación. El flujo del campo se deriva de la conexión del circuito del campo directamente a través de las terminales del generador.

Generador en serie. El flujo del campo se produce por la conexión de circuito de campo en serie con el inducido del generador.

Generador compuesto acumulativo. En él están presentes tanto el campo de derivación como el campo en serie y sus efectos son aditivos.

Generador compuesto diferencial. En él se encuentra tanto el campo de derivación como el campo en serie, pero sus efectos se restan.

Aunque los generadores de cd son bastante raros en sistemas de potencia modernos, han mostrado un resiente renacimiento como fuentes de potencia en las torres independientes para teléfonos celulares.

En la Figura 2.9 se observa en circuito equivalente de un generador de cd y en la Figura 2.10 se muestra la versión simplificada del circuito equivalente, estos son parecidos a los del motor de cd excepto que la dirección del flujo de la corriente y las pérdidas en las escobillas son de sentido contrario.

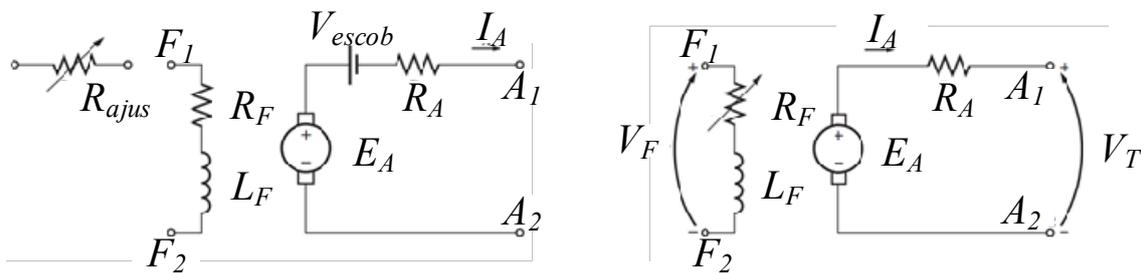


Figura 2.9. Circuito equivalente del generador cd, (Chapman & Jaime 1998).

Los sistemas de emulación están constituidos generalmente por un motor conectado a un generador, un controlador para el motor, un controlador de carga para el generador y la carga, en este caso, un banco de baterías. Este sistema se puede observar en la Figura 2.11.

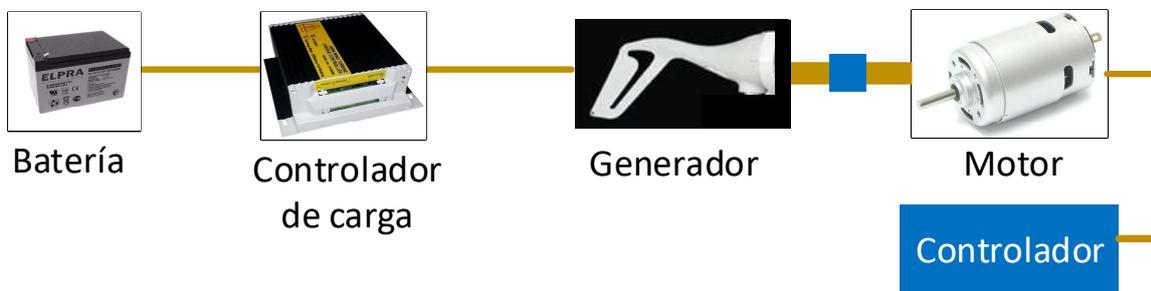


Figura 2.10. Diagrama a bloques del sistema de emulación.

2.4 Técnicas de Modelado.

En la literatura existen distintas metodologías para el modelado de los sistemas de generación eólica, sin embargo, este trabajo estará basado en técnicas experimentales de tipo ARMAX y/o sus variantes (MathWorks, 2005), las cuales, principalmente serán:

- ARX (Auto-Regressive with exogenous input).
- ARMAX (Auto-Regressive Moving Average with exogenous input)

2.4.1 Modelo ARX.

Muchas series de tiempo observadas presentan una correlación lineal, es decir, existe una asociación lineal entre los retardos observados, esto sugiere que las observaciones pasadas pueden usarse para predecir observaciones actuales. El proceso auto regresivo modela la media condicional de y_t como una función de observaciones pasadas, $y_{t-1}, y_{t-2}, \dots, y_{t-p}$. Un proceso ARX que depende de p observaciones pasadas y una entrada externa, es denominada modelo ARX de grado p , y se denota por ARX(p), (MathWorks, 2005).

La forma del modelo ARX(p) en Econometrics Toolbox™ está descrita en la ecuación 14:

$$y(t) + a_1y(t-1) + \dots + a_{n_a}y(t-n_a) = b_1u(t-n_k) + \dots + b_{n_b}u(t-n_b-n_k+1) + e(t) \quad (14)$$

Los parámetros n_a y n_b son los órdenes de modelo ARX, y n_k es el retardo.

- $y(t)$ Salida en el tiempo t
- n_a Número de polos.
- n_b Número de ceros más 1.
- n_k Número de muestras de entrada que transcurren antes que la entrada afecte la salida, también llamado tiempo muerto del sistema.
- $y(t-1) \dots y(t-n_a)$ Salidas anteriores de las que depende la salida actual.

- $u(t - n_k) \dots u(t - n_k - n_b + 1)$ Entradas anteriores y con retraso de las que depende la salida actual.
- $e(t)$ Valor de disturbio de ruido blanco.

Una forma más compacta de escribir la ecuación en diferencias es la siguiente:

$$A(q)y(t) = B(q)u(t - n_k) + e(t) \quad (15)$$

Para series de datos en el tiempo que no contiene entradas, una salida y de orden $= n_a$, el modelo tiene estructura AR de orden n_a . La estructura del modelo AR es la siguiente:

$$A(q)y(t) = e(t) \quad (16)$$

2.4.2 Modelo ARMAX.

Para algunas series de tiempo observadas, es necesario un modelo ARX o MA de muy alto orden para modelar de una buena manera el proceso en cuestión, en este caso, un modelo combinado promedio móvil auto-regresivo (ARMAX) puede ser una opción más sencilla.

Un modelo ARMAX expresa la media condicional de y_t como una función tanto de observaciones pasadas, $y_{t-1}, y_{t-2}, \dots, y_{t-p}$ como de innovaciones pasadas $\mathcal{E}_{t-1}, \mathcal{E}_{t-2}, \dots, \mathcal{E}_{t-q}$. El número de observaciones pasadas del que depende y_t , p , es el grado del modelo ARX, el número de innovaciones de las que depende y_t , q , es el grado del modelo MA. En general este modelo esta denotado por ARMAX(p,q), (MathWorks, 2005).

La forma del modelo ARMAX(p,q) en Econometrics Toolbox™ es:

$$\begin{aligned} y(t) + a_1y(t - 1) + \dots + a_{n_a}y(t - n_a) & \quad (17) \\ & = b_1u(t - n_k) + \dots + b_{n_b}u(t - n_k - n_b + 1) \\ & + c_1e(t - 1) + \dots + c_{n_c}e(t - n_c) + e(t) \end{aligned}$$

Una forma más compacta de escribir la ecuación en diferencias es la siguiente:

$$A(q)y(t) = B(q)u(t - n_k) + C(q)e(t) \quad (18)$$

Donde:

- $y(t)$ Salida en el tiempo t
- n_a Número de polos.
- n_b Número de ceros más 1.
- n_c Número de coeficientes.
- n_k Número de muestras de entrada que transcurren antes que la entrada afecte la salida, también llamado tiempo muerto del sistema.
- $y(t - 1) \dots y(t - n_a)$ Salidas anteriores de las que depende la salida actual.
- $u(t - n_k) \dots u(t - n_k - n_b + 1)$ Entradas anteriores y con retraso de las que depende la salida actual.
- $e(t - 1) \dots e(t - n_c)$ Valor de disturbio de ruido blanco.

Los parámetros n_a , n_b y n_c son los órdenes de modelo ARMAX, y n_k es el retardo. q Es el operador de retardo.

Si la serie de datos en el tiempo que no tiene canal de entrada y un canal de salida, entonces, el modelo ARMAX calcula un modelo ARMA para la serie de tiempo. La estructura del modelo ARMA es la siguiente:

$$A(q)y(t) = C(q)e(t) \quad (19)$$

2.5 Túnel de Viento.

2.5.1 Estructura.

Un túnel de viento es una herramienta experimental usada para estudiar los efectos del viento sobre diferentes objetos. Su estructura se compone principalmente de tres secciones: sección de inyección de flujo de aire, sección de

manipulación del flujo de aire y la sección de salida de flujo de aire. El principio de operación de esta herramienta se basa en la inyección de aire a través de un ducto en el cual se colocan los objetos sujetos a observación (Boyle & Knaub, 1988), un ejemplo general de este se puede observar en la Figura 2.12.

2.5.2 Aplicación.

Existen diferentes tipos de variables que pueden ser medidas en el túnel de viento, estas pueden ser la velocidad del flujo, la presión, la fuerza de arrastre entre otras, la selección del tipo de variable depende de la aplicación del túnel de viento. Entre las áreas de aplicación de esta herramienta se encuentra la aeronáutica, mecánica de fluidos, aerodinámica, energías alternativas, ciencias ambientales, etc. (Tolentino *et al.*, 2004).

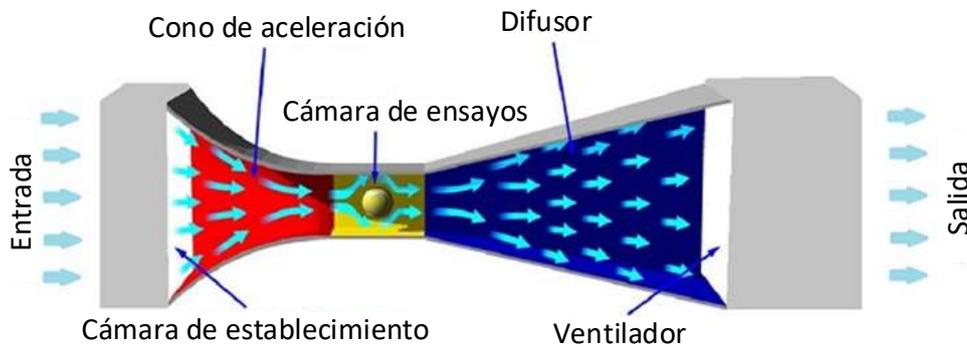


Figura 2.11. Estructura general de túnel de viento.

2.6 Variables de Medición.

2.6.1 Velocidad.

El sensor de sensado de posición en controladores modernos de movimiento son usualmente encoders incrementales, un encoder senoidal o un resolutor con un convertidor digital. En cualquier caso, el servo controlador conoce la posición solo dentro de una resolución específica. Para encoders incrementales de dos canales usados en la mayoría de las servo aplicaciones, la resolución es cuatro veces la cuenta de las líneas, la interface del circuito del encoder usa una técnica llamada decodificación en cuadratura para generar cuatro pulsos para cada línea del encoder, esta técnica se basa en tener dos señales del encoder, canal A y canal B, separadas por 90°.

Debido a la cuadratura, hay cuatro aristas para cada línea del encoder, una positiva y una negativa para cada canal. Por lo tanto un encoder de 1000 líneas generará 4000 cuentas para cada revolución del encoder, los encoders de un canal son raramente usados en las servo aplicaciones debido a que los encoders de dos canales también proporcionan información de dirección de giro (Ellis, 2012). En la Figura 2.13 se muestra una imagen de un encoder de dos canales.



Figura 2.12. Encoder rotatorio de 2 canales.

2.6.2 Voltaje.

2.6.2.1 NI USB 6211.

El dispositivo USB-6211 es un dispositivo DAQ (Data acquisition) multifunción que ofrece entradas y salidas analógicas, entradas y salidas digitales y dos controladores de 32 bits. Este dispositivo posee un amplificador integrado diseñado para configuraciones rápidas a altas velocidades de escaneo. También cuenta con la tecnología NI Signal Streaming que permite la transferencia de datos bidireccionalmente a alta velocidad a través del bus USB. Este dispositivo puede ser utilizado para aplicaciones de prueba, control diseño, registro de datos portátil y monitoreo de campo entre otras (<http://www.ni.com/es-mx/support/model.usb-6211.html>). En la Tabla 2 se muestran las especificaciones generales de la NI USB 6211.

Tabla 2. Especificaciones generales de la NI USB 6211.

Entradas Analógicas	16
Resolución (Bits)	16
Máxima Frecuencia (kS/s)	250
Rangos de entradas analógicas.	-10 V to 10 V
	-5 V to 5 V
	-1 V to 1 V
	-200 mV to 200 mV

2.6.2.2 Tarjeta de Acondicionamiento.

Existen diferentes tipos de sensores de voltaje, los cuales dependen de la aplicación para los que sean usados, además, en muchas de estas aplicaciones es necesario contar con una etapa de acondicionamiento que adecue dicha señal de voltaje a los rangos aceptados por los sistemas de adquisición de datos, dicha etapa de acondicionamiento, en muchos de los casos, suelen ser circuitos compuestos de elementos electrónicos, monofásicos o trifásicos, que permitan modificar la amplitud de la señal (Granados, 2013).

En la Figura 2.14 se muestra los circuitos de acondicionamiento monofásico que permiten modificar la amplitud de las señales monitoreadas a dos rangos, uno de +/- 10v y otro de 0 a 3.3v (Granados, 2013).

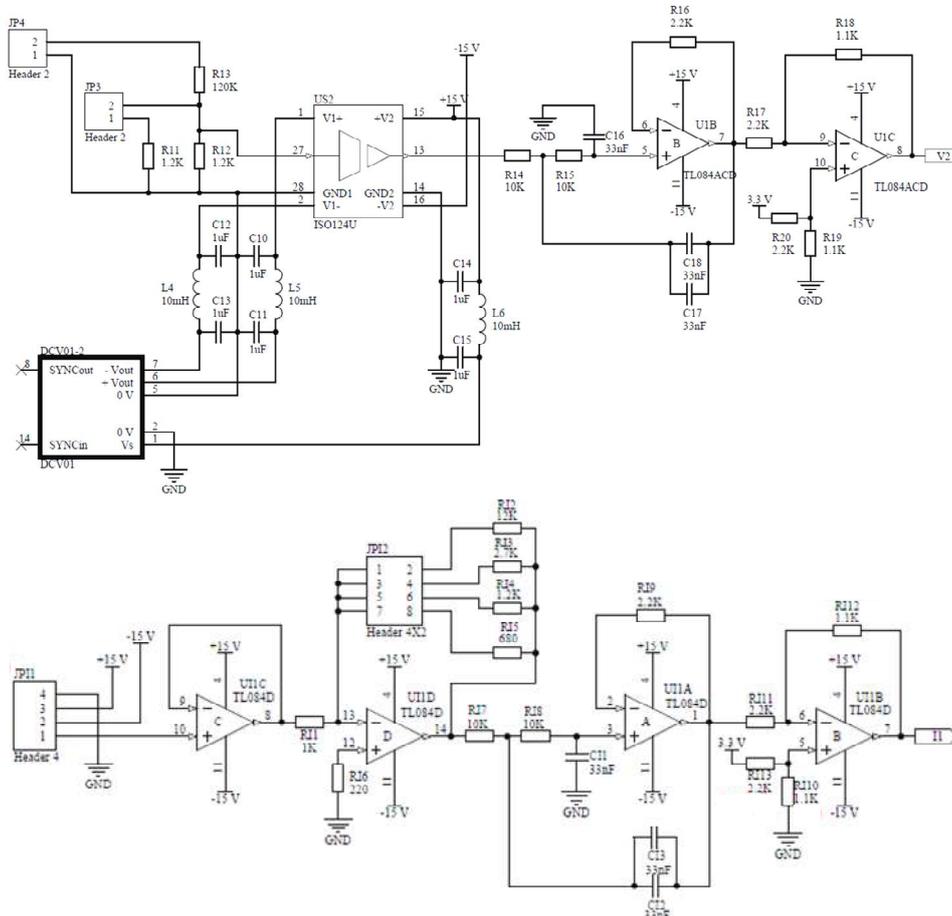


Figura 2. 134. Circuito de acondicionamiento monofásico (Voltaje arriba y corriente abajo).

2.7 Control.

Dependiendo de la aplicación que se requiera, para realizar el control de un sistema se pueden diseñar diferentes algoritmos para los controladores. Los sistemas físicos pueden describirse como un algoritmo o expresión matemática, estos algoritmos deben ser diseñados para que describan de la mejor manera el comportamiento de un proceso en base a su análisis. El objetivo de los controladores o algoritmos de control, es modificar el comportamiento del proceso

haciéndolo más eficiente y corregir anomalías o perturbaciones que lo afecten (Jaen, 2011).

En general existen 5 tipos de controladores, como se muestra a continuación:

- Proporcional.
- Integral.
- Proporcional-Integral.
- Proporcional-Derivativo.
- Proporcional-Integral-Derivativo

Acción de control Proporcional: La relación entre la salida del controlador $u(t)$ y la señal de error $e(t)$ es:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (20)$$

En donde K_p se considera la ganancia proporcional.

Para cualquier sistema real y forma de operación, el controlador proporcional es, en esencia, un amplificador con una ganancia ajustable.

Acción de control Integral: para este controlador, el valor de la salida $u(t)$ cambia proporcionalmente a la señal de error $e(t)$. Es decir,

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \quad \text{o} \quad u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (21)$$

En donde K_i es una constante ajustable.

La acción de control integral, en ocasiones, es denominada control de reajuste.

Acción de control Proporcional-Integral (PI): esta acción de control está definida mediante la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (22)$$

En donde K_p es la ganancia proporcional y T_i se denomina tiempo integral y ambas son ajustables. El tiempo integral afecta la acción integral del control mientras que K_p afecta tanto la acción integral como a la proporcional, además, el inverso de T_i es denominada velocidad de reajuste, la cual representa la cantidad de veces por minuto que se duplica la acción proporcional del control.

Acción de control Proporcional – Derivativa (PD): Este controlador está definido por:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (23)$$

En donde K_p es la ganancia proporcional y T_d es una constante denominada tiempo derivativo, ambas son ajustables. La acción de control derivativo en ocasiones es denominada control de velocidad, la magnitud de la salida del controlador es proporcional a la velocidad de cambio de la señal de error.

Acción de control Proporcional – Integral – Derivativo (PID): La acción de control de la combinación de estos tres controladores se obtiene mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (24)$$

En donde K_p es la ganancia proporcional, T_i es el tiempo integral y T_d es el tiempo derivativo. Este controlador posee las ventajas de cada acción individual (Ogata, 2003).

2.8 LABVIEW.

LABVIEW es el acrónimo de Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench. Este es un lenguaje y a la vez un entorno de programación gráfica en el que se pueden crear aplicaciones de forma rápida y sencilla. Originalmente estaba orientado a aplicaciones de control de instrumentos electrónicos usadas en el desarrollo de sistemas de instrumentación, lo que se conoció como instrumentación virtual, por lo que los ficheros fueron llamados instrumentos virtuales (VI, Virtual Instruments), en general, posee dos ventanas principales, panel

frontal y diagrama de bloques, en el primero se despliegan los resultados, y en el segundo, se realiza la programación.

Algunas de las aplicaciones para las que puede ser usado LABVIEW son la adquisición de datos de instrumentos, procesamiento de datos, como la aplicación de filtros o transformadas, otro uso puede ser el análisis de datos y el control de instrumentos y equipos. En la Figura 2.15, se observa como ejemplo el panel frontal y el diagrama de bloques de cierta aplicación de análisis de señales.

2.9 Curve Fitting Toolbox.

Esta caja de herramientas provee una aplicación y funciones para el ajuste de datos a curvas, esta herramienta permite analizar datos exploratoriamente, pre procesarlos y pos procesarlos, comparar modelos y remover datos atípicos. Permite elaborar análisis regresivos usando la librería de modelos lineales y no lineales especificando la ecuación personalizada. Esta librería proporciona parámetros de solución optimizados y condiciones iniciales para mejorar la calidad de los ajustes. Esta herramienta, además, acepta técnicas de modelado no paramétrico como splines, exploración y suavizado.

Una vez que se ha creado el ajuste, se pueden aplicar una serie de métodos de pos procesamiento para trazado, interpolación y extrapolación; estimar intervalos de confianza; calcular integrales y derivadas (MathWorks, 2005). Con el fin de ilustrar esta herramienta, en la Figura 2.16 su interface con un ejemplo de ajuste aleatorio.

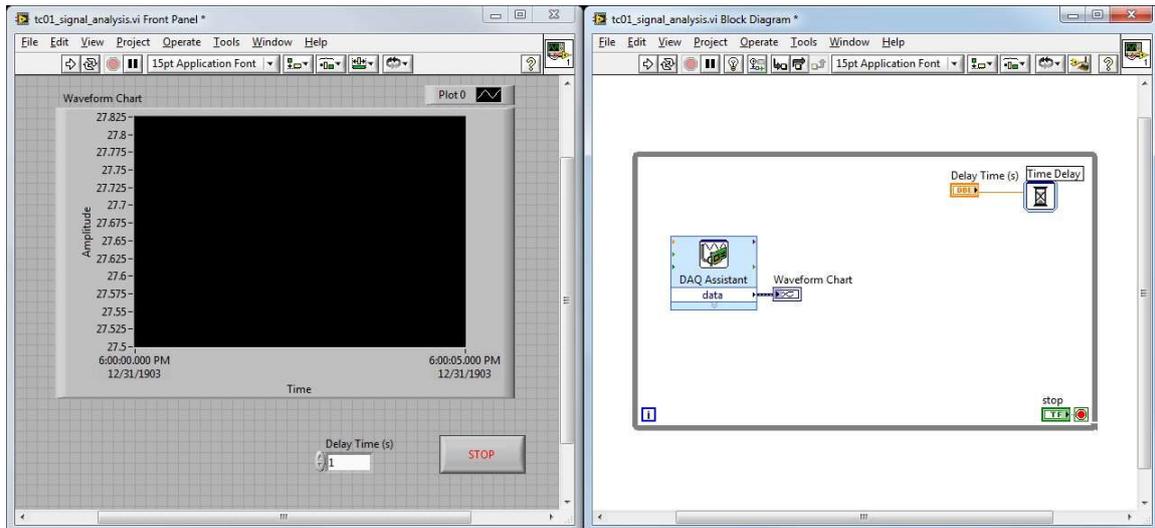


Figura 2.14. Panel frontal y diagrama de bloques de LABVIEW.

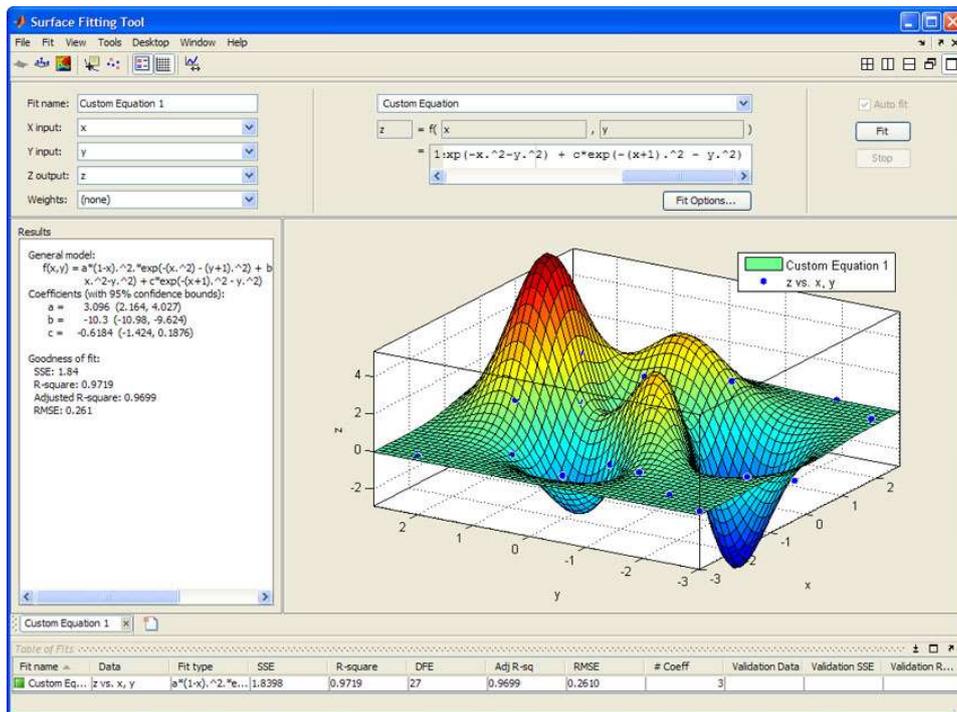


Figura 2.15. Herramienta Curve Fitting de MATLAB.

3. METODOLOGÍA.

La metodología a seguir para el desarrollo de este trabajo se observa en la Figura 3.1. Como primer paso, Generación y validación de perfiles de viento, se desarrollará el software que permita generar los perfiles de viento, también se integrará todo el sistema de túnel de viento que será en donde se reproduzcan dichos perfiles de viento. En este sistema se hará la validación de los mismos mediante su medición con ayuda del desarrollo de una interfaz de adquisición de datos y usando un anemómetro como sensor de velocidad de viento. En la segunda parte, Perfiles de voltaje y Túnel de viento, se hará la instrumentación de un aerogenerador de baja escala, en este se realizarán mediciones de variables de voltaje y de velocidad utilizando al menos dos composiciones diferentes de aspas y tres diferentes perfiles de viento, obteniendo así una matriz de pruebas con nuevos perfiles, pero ahora de voltaje. Como tercer paso, Emulador, se integrará el sistema de emulación mediante el acople de un aerogenerador sin aspas y un motor de corriente directa, en el cual se implementará un controlador y, usando una tarjeta NI USB 6211, se obtendrán nuevos perfiles de voltaje que representan el comportamiento de las aspas. Los datos obtenidos permitirán desarrollar los modelos en base a las técnicas estadísticas mencionadas en el capítulo 2. Finalmente, en la cuarta etapa, Modelado ARMAX, se obtendrá un modelo general de perfiles de voltaje en aerogeneradores en base a cada uno de los modelos obtenidos para cada perfil de viento y cada cantidad de aspas, 3 o 5. Estos modelos permitirán reconstruir las formas de onda de voltaje que genera un aerogenerador; a su vez, estos perfiles de voltaje podrán ser reproducidos por el emulador (motor-generador) para su validación y posterior uso en otras investigaciones, ejemplo: desarrollo de inversores o estudios de eficiencia. En las siguientes secciones se describe a mayor detalle cada una de las etapas mencionadas.



Figura 3.1. Diagrama general de Metodología.

3.1 Generación y validación de perfiles de viento en Túnel de Viento.

Como parte del desarrollo de la primera etapa, se construye un túnel de viento para la generación de los perfiles de viento necesarios, el cual está controlado mediante un software de generación de perfiles de viento y un inversor de frecuencia. El software desarrollado puede observarse en la Figura 3.2, en este se pueden generar 5 tipos diferentes de perfiles, un perfil de velocidad constante, un perfil de rampa de velocidad, un perfil de ráfaga de viento, un perfil de velocidad aleatoria y un perfil personalizado, cabe mencionar que también se pueden importar archivos de texto con datos de mediciones reales de velocidad de viento. La duración de dichos perfiles de viento puede ser ajustada, además, también se puede ajustar su magnitud y mezclarlos entre sí, una vez generado el perfil deseado, este puede ser guardado en un archivo con extensión .mat. En Figura 3.3 se puede observar el desarrollo del túnel de viento así como la pc y el inversor de frecuencia que controlan el flujo de viento. Debido a que el inversor de frecuencia utiliza un voltaje de referencia analógico, es necesaria una etapa de acondicionamiento que permita transformar los datos digitales de los perfiles de viento en un voltaje analógico de 0 a 10 volts.



Figura 3.2. Software de generación de perfiles de viento.

En la Figura 3.4 se observa la interfaz de adquisición de datos, esta fue desarrollada en Matlab y cuenta con una gráfica para las señales obtenidas de velocidad. También se puede especificar el tiempo de duración de la prueba y guardar el perfil de velocidad medido en un archivo de datos en cualquier ruta que se especifique.

Estos tres elementos, interfaz de generación de perfiles de viento, túnel de viento e interfaz de adquisición de datos, conforman la primera etapa del proyecto en la que se generan los perfiles de viento deseados y se reproducen en el túnel de viento. Con el fin de tener la certeza de que estos perfiles de viento son reproducidos de forma muy similar a las condiciones ambientales, al final del túnel se coloca un anemómetro para realizar mediciones de velocidad de viento y validar el funcionamiento del sistema.

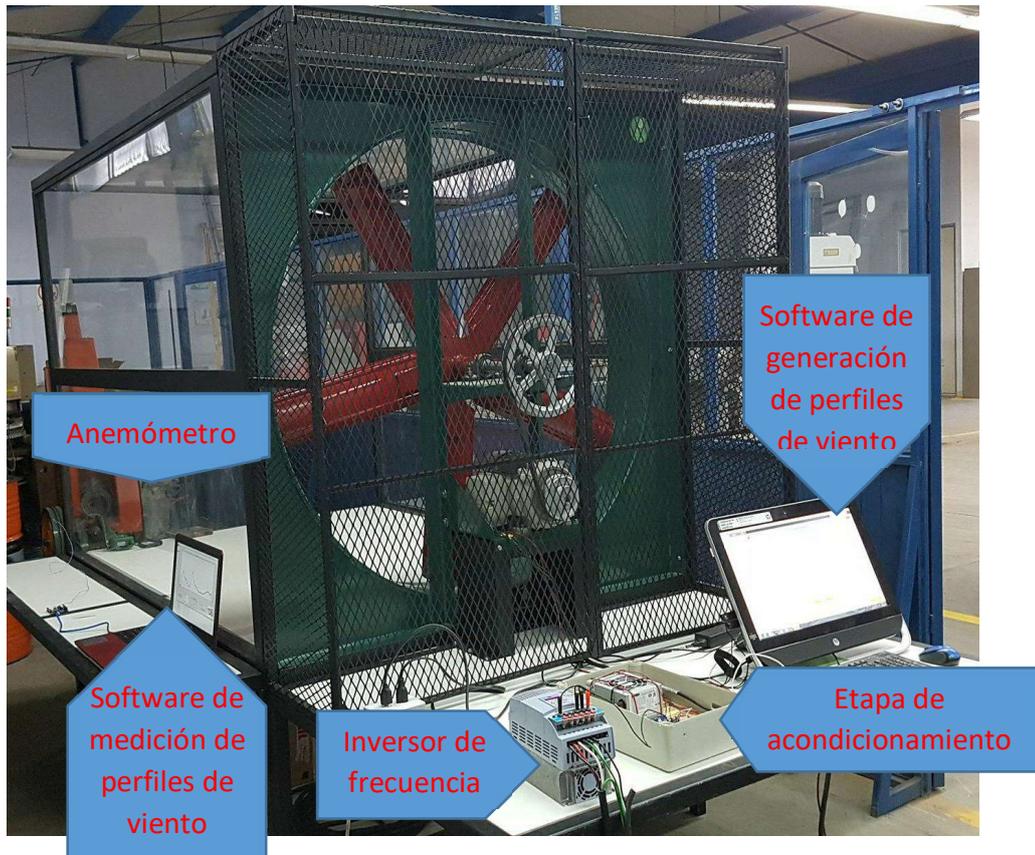


Figura 3.3. Túnel de viento.

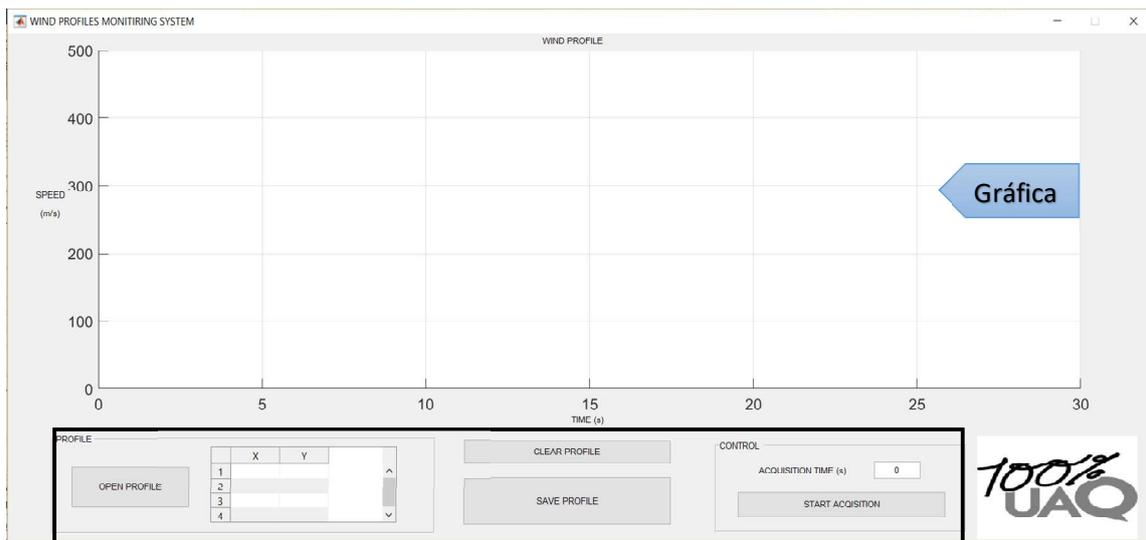


Figura 3.4. Interfaz de adquisición y medición de datos.

3.2 Obtención de perfiles de voltaje del aerogenerador.

Para la adquisición de las variables de voltaje y velocidad, el aerogenerador es equipado con un inversor de corriente y un encoder, de los cuales serán obtenidos los datos de dichas variables, en el caso de la variable de voltaje, es desarrollada una tarjeta de acondicionamiento conteniendo el circuito de la Figura 2.13 para acondicionar los rangos de voltaje y además poder medir la corriente que genera el aerogenerador, esta tarjeta de acondicionamiento puede observarse en la Figura 3.5.

Una vez que se tiene desarrollado el software de generación de la Figura 3.2 y la instrumentación del aerogenerador, se procederá con la reproducción de siete perfiles de viento a través del túnel de viento, los siete perfiles de viento serán los siguientes: velocidad constante, rampa de velocidad, ráfaga de viento, perfil de viento personalizado, medición de velocidad real de viento, combinación de velocidad constante y ráfaga de viento, y combinación de rampa de velocidad, ráfaga de viento y turbulencia.



Figura 3.5. Tarjeta de acondicionamiento.

Estos perfiles serán reproducidos en el túnel de viento para ser captados por el aerogenerador y medir las variables antes mencionadas, los perfiles de viento se convertirán ahora en perfiles de voltaje a través del aerogenerador que serán los

que se introduzcan en el emulador. En el desarrollo de este trabajo existirán dos casos de estudio, en uno se usará un aerogenerador con tres aspas y en el otro se usará uno con cinco aspas, esto con el propósito de observar su comportamiento, la forma en que afecta el número de aspas al voltaje y así poder correlacionarlos. En la Figura 3.6 a), se observa el aerogenerador con tres aspas y en la Figura 3.6 b) se observa el aerogenerador con cinco aspas.

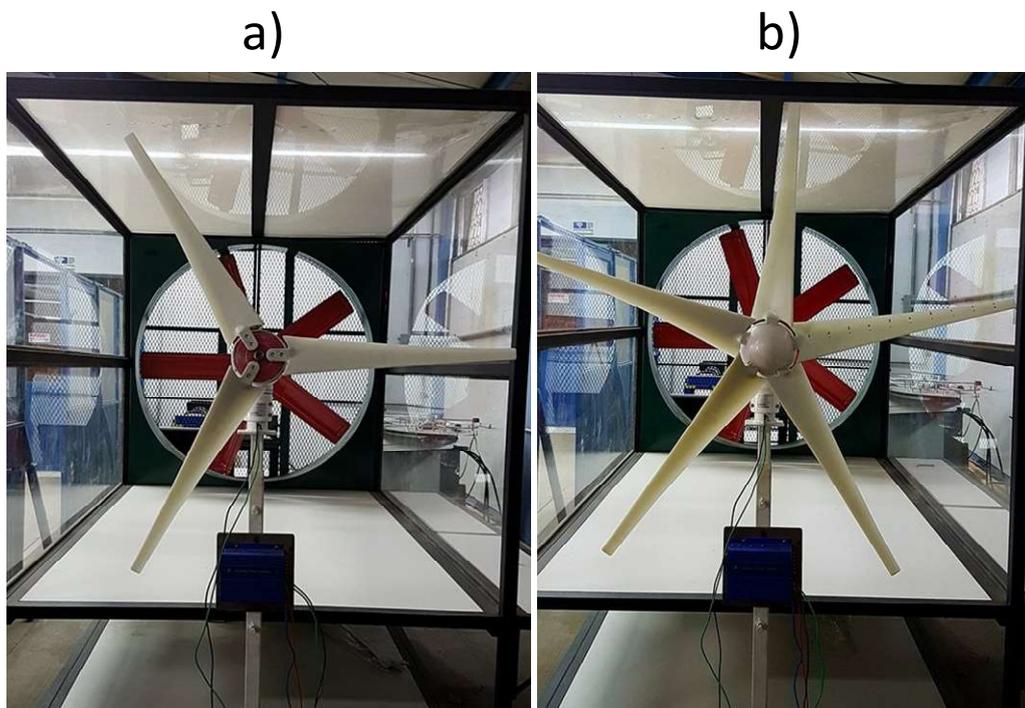


Figura 3.6. a) Aerogenerador con tres aspas, b) aerogenerador con cinco aspas.

La interfaz de adquisición que se muestra en la Figura 3.7 es con la cual se medirán las variables de interés antes mencionadas, esta interfaz cuenta con dos gráficas, una para las señales de voltaje y otra para la de velocidad. Además, en ésta se puede especificar la frecuencia de muestreo, la duración de la prueba y el número de datos o muestras que se desean almacenar en el archivo de texto que permite guardar. Dicha interfaz será conectada al aerogenerador mediante una tarjeta DAQ NI USB 6211 y el módulo de acondicionamiento de la Figura 3.5.

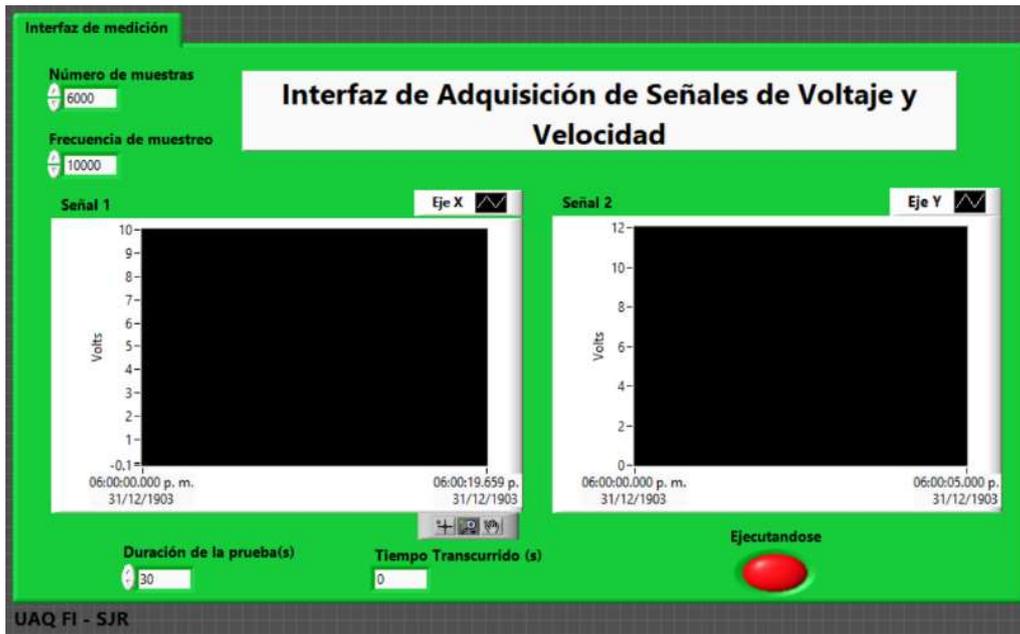


Figura 3.7. Sistema de adquisición de voltaje y velocidad.

3.3 Desarrollo de sistema de emulación.

El diagrama general del sistema de emulación se muestra en la Figura 3.8. Al aerogenerador se le sustituirán las aspas por un motor de corriente continua de 12 volts y 2 amperes como el que se muestra en la Figura 3.9.

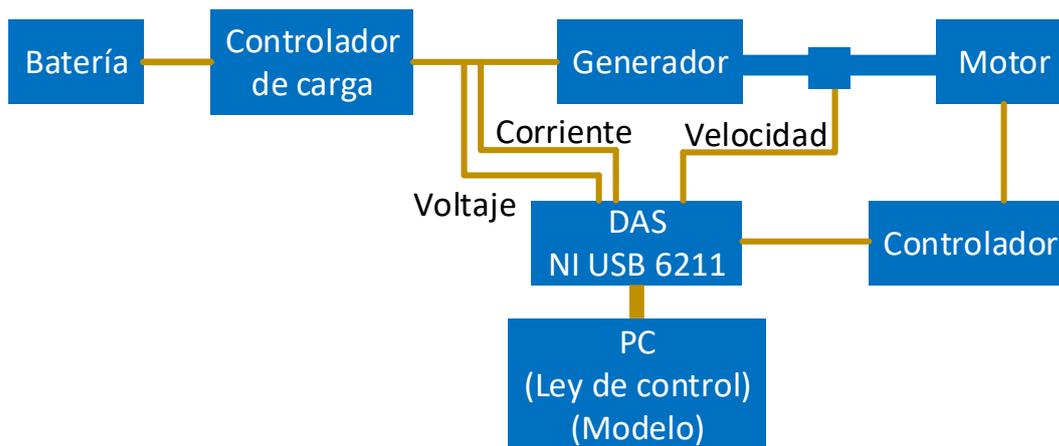


Figura 3.8. Diagrama general del sistema de emulación.



Figura 3.9. Motor de DC, 12 voltios y 2 amperes.

Este motor de DC, será dirigido por un puente H VNH2SP30. Con este dispositivo se controlará el sentido de giro del motor, así como su velocidad por medio de una señal de PWM que será enviada al mismo desde una tarjeta NIUSB6211. El dispositivo VNH2SP30 se alimenta con 12 voltios por lo que se hará uso de una fuente de voltaje para proporcionarlos, una vez que se haya integrado todo el sistema de emulación, se implementará una ley de control PID (Proporcional, Integral, Derivativo) en una interfaz de control diseñada en la plataforma de Labview. En esta interfaz se pueden introducir o modificar las ganancias del controlador, además, en esta misma, se hará el procesamiento de los perfiles de voltaje de referencia para enviar la señal adecuada al motor y el emulador funcione correctamente al seguir los perfiles de voltaje. En la Figura 3.10 se puede observar la interfaz de control desarrollada en la plataforma de Labview.

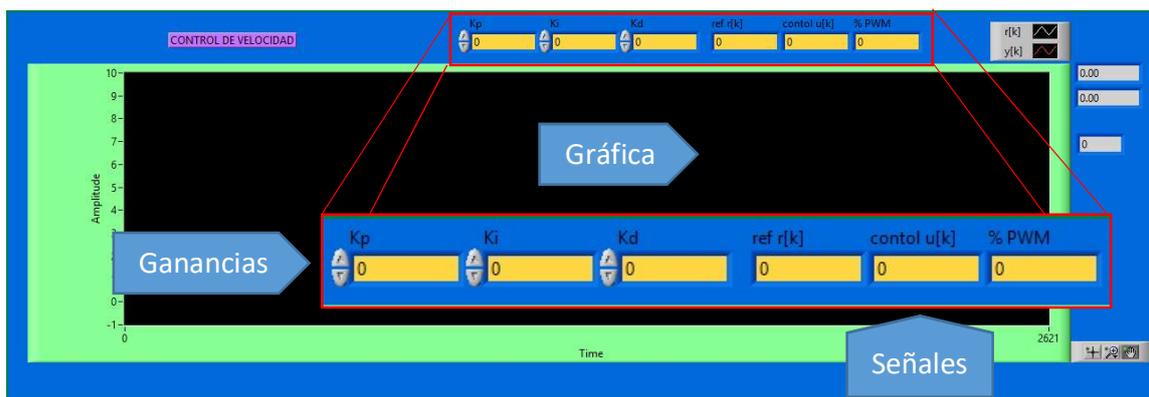


Figura 3.10. Interfaz de control de velocidad.

Los perfiles de voltaje de referencia, como ya se mencionó con anterioridad, serán los perfiles de voltaje que sean obtenidos en las mediciones del aerogenerador con tres y cinco aspas al final del túnel, y de acuerdo con los casos de estudio, en este sistema también se hará la emulación de los perfiles tanto para tres aspas como para cinco, obteniendo así, nuevos perfiles de voltaje medidos correspondientes a tres y cinco aspas. El acoplamiento entre el aerogenerador sin aspas y el motor de corriente continua se puede ver en la Figura 3.11. El motor sustituye el efecto mecánico de las aspas en movimiento asociadas al perfil de viento.



Figura 3.11. Aerogenerador y motor acoplados.

3.4 Obtención de modelo general de perfiles de voltaje en aerogeneradores.

Una vez que se han emulado todos los perfiles tanto para el caso del aerogenerador con tres aspas como para el caso con cinco, se obtendrá un modelo que represente la forma de onda de voltaje para cada uno de estos nuevos perfiles de voltaje emulados con ayuda de una herramienta de Matlab llamada System Identification (Identificación de Sistemas). Además, se hará una comparación entre

la respuesta del aerogenerador con tres aspas y con cinco, de manera que se pueda encontrar una relación entre los modelos correspondientes a cada perfil. Ya que se ha encontrado esta relación se puede establecer una ecuación en función de los coeficientes de los modelos y en función del número de aspas para estimar los mismos modelos ya obtenidos para así poder validarla y dimensionar a otras configuraciones.

Esta ecuación general para la reproducción de estas formas de onda de voltaje se obtendrá con ayuda de una herramienta de Matlab llamada Curve Fitting (Ajuste de curvas), esta ecuación será validada obteniendo los coeficientes de un perfil real, si estos coinciden o son parecidos a los que ya se tienen, será posible entonces encontrar un modelo que corresponda al comportamiento del aerogenerador con n número de aspas. El diagrama a bloques de la Figura 3.12 representa todo el procedimiento arriba descrito.

Es importante mencionar que las formas de onda de voltaje obtenidas con el modelo general podrán ser introducidas al emulador para que este reproduzca el comportamiento de un aerogenerador real (pero de forma emulada) para realizar investigaciones relacionadas al aerogenerador como lo es el desarrollo de inversores y controladores para el desempeño eléctrico sin la necesidad de contar con un túnel de viento o, en otros casos, sin tener que tener el aerogenerador en condiciones reales de operación (en ciertos ambientes geográficos). Aunque este trabajo se enfocó a las señales de voltaje y su relación con el número de aspas, la misma metodología o concepto metodológico puede aplicarse al impacto de la forma de aspas en su desempeño eléctrico, a la detección y estudio de fallas, etc.

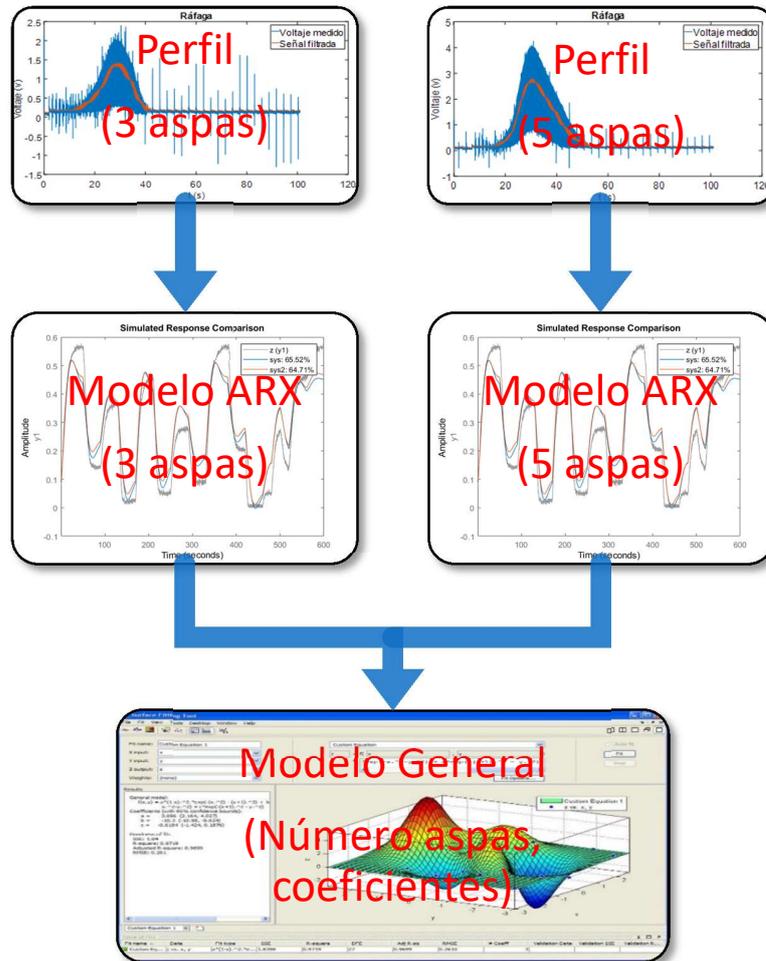


Figura 3.12. Diagrama a bloques para obtención de modelo general.

4. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS.

A continuación se describen los resultados obtenidos de la experimentación en cada una de las etapas planteadas en la metodología, se presentarán cada uno de los softwares desarrollados tanto para la generación de perfiles de viento como para la adquisición de señales en el aerogenerador y en el emulador. El túnel construido que ayudó a la generación de los perfiles de viento, el sistema de emulación integrado junto con su controlador y los modelos estadísticos obtenidos para cada par de perfiles de voltaje tanto de tres como de cinco aspas.

4.1 Sistema de Generación de Perfiles de Viento.

Como ya se mencionó con anterioridad, el sistema de generación de perfiles de viento consta de un software para generar dichos perfiles y un túnel de viento que es la herramienta en la que se reproducen, el software de generación de perfiles se puede observar en la Figura 4.1, en esta imagen se puede observar que dicha herramienta ya se encuentra funcionando con uno de los siete perfiles que se reprodujeron en el túnel. El túnel de viento fue construido con perfil cuadrado de acero de una pulgada y un cuarto, melamina y acrílico; este ya desarrollado, se puede ver en la Figura 4.2, en donde también se observan los sistemas auxiliares para su funcionamiento como el inversor de frecuencia, la etapa de acondicionamiento y una computadora de escritorio en donde se ejecuta el software de generación de perfiles de viento.

En la puesta a experimento que se puede observar en la Figura 4.2, el inversor de frecuencia se configuró para que se pudiera controlar el motor trifásico que haría girar las aspas del ventilador generador del flujo de aire, a dicho inversor de frecuencia se le especificó que el motor se alimenta con 220 voltios, además de que su corriente nominal es de 5,8 amperes, sus revoluciones nominales son 1740 y que es de 2 hp.

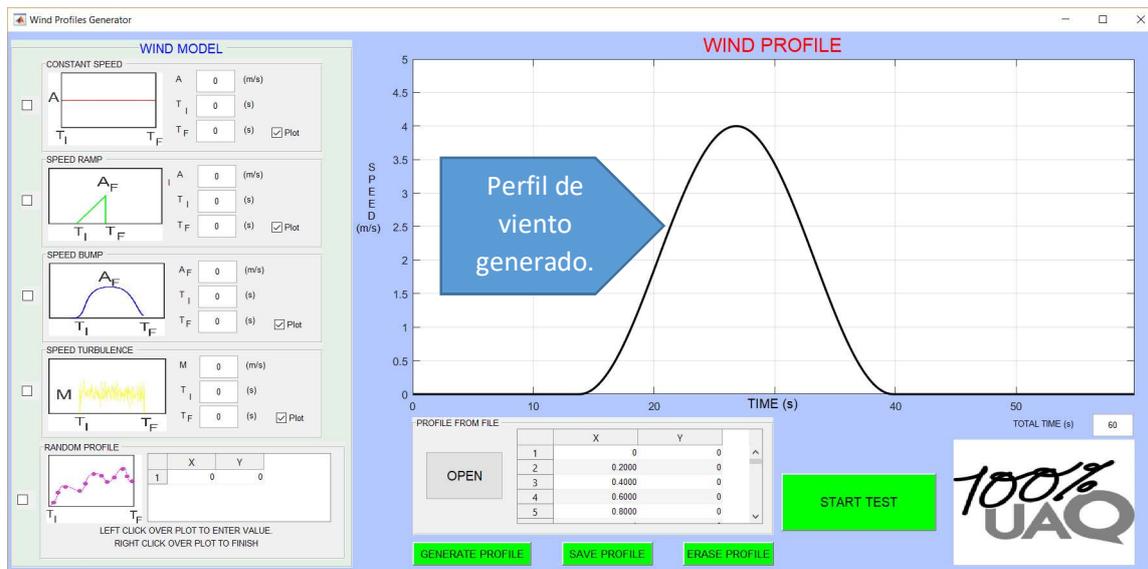


Figura 4.1. Software de generación de perfiles.

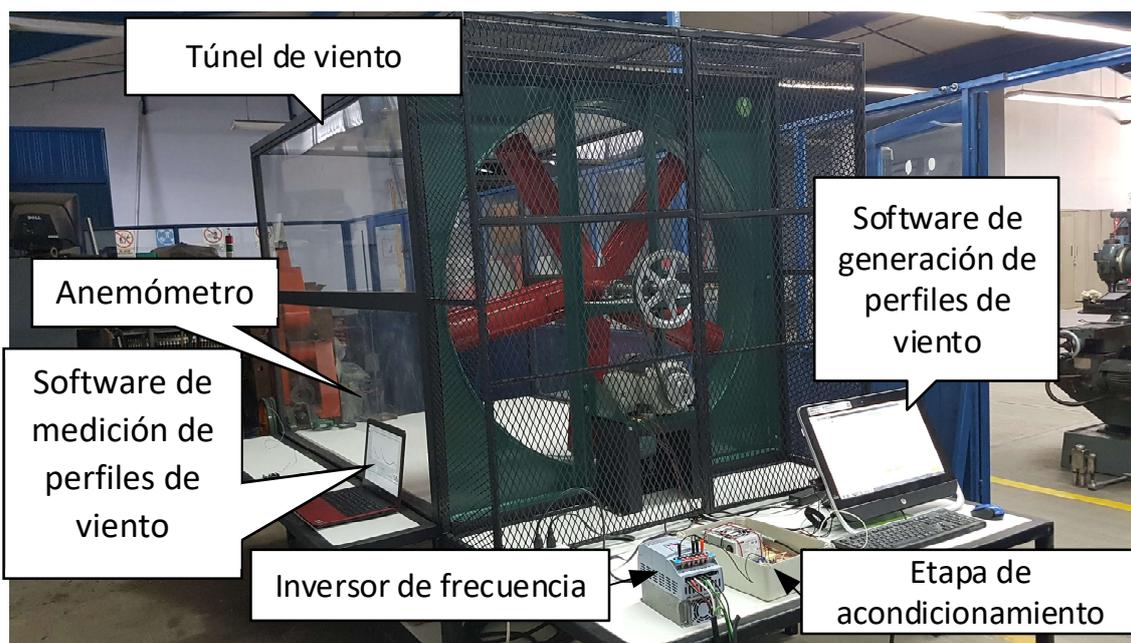


Figura 4.2. Túnel de viento con puesta a experimento.

Una vez que se realizó la configuración del inversor de frecuencia, se procedió a realizar algunas pruebas en las que se verificó que a la salida del túnel de viento, el flujo de aire correspondiera al perfil de viento diseñado, por lo que se reprodujeron siete perfiles de viento distintos y se realizó la medición del flujo de

aire a la salida del túnel con un anemómetro como el que se muestra en la Figura 4.3.



Figura 4.3. Anemómetro.

De los resultados que se obtuvieron de las pruebas que se mencionaron anteriormente se obtuvo la Figura que se muestra a continuación (Figura 4.4), en donde se puede observar en la columna de la izquierda, los perfiles que se generaron en el software de generación en base a las ecuaciones de la parte teórica. También como se mencionó en el apartado 3.2 de la metodología, se reprodujeron 7 perfiles distintos, estos incluyen los siguientes: velocidad constante, rampa de velocidad, ráfaga de viento, perfil de viento personalizado, medición de campo de velocidad real de viento, combinación de velocidad constante y ráfaga de viento, y combinación de rampa de velocidad, ráfaga de viento y turbulencia. En la columna del centro, el voltaje de referencia fue generado por la etapa de acondicionamiento y enviado al inversor de frecuencia para ser reproducido por el motor, y por último en la columna de la derecha se observa la medición del flujo de aire que fue medido a la salida del túnel de viento con la interfaz de medición presentada en la Figura 3.4 del capítulo anterior y el sensor de velocidad de viento de la figura 4.3.

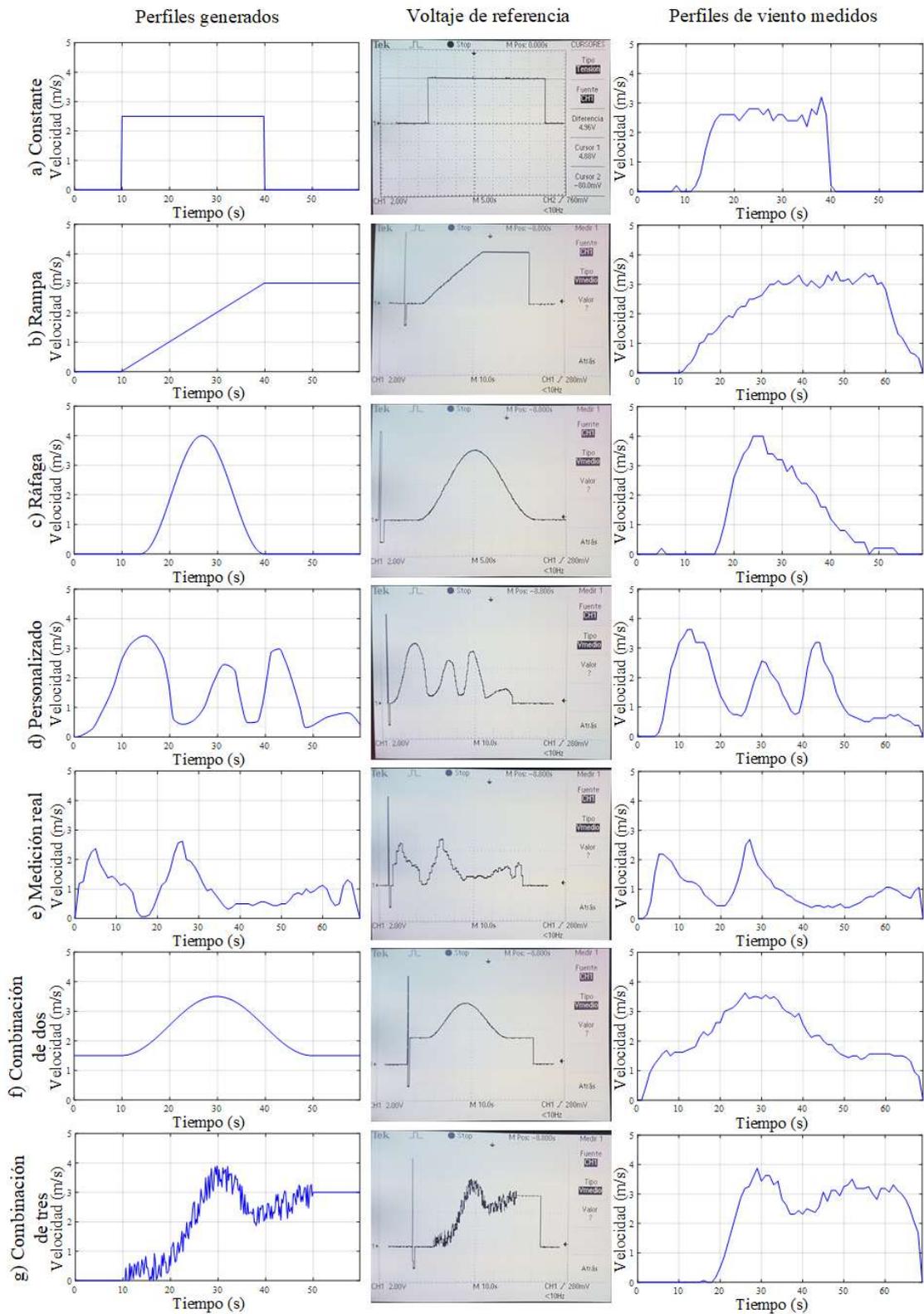


Figura 4.4. Resultado de las pruebas de flujo de aire.

4.2 Obtención de perfiles de voltaje.

De acuerdo con la Figura anterior, ya se ha comprobado el correcto funcionamiento del túnel de viento, por lo que se procedió con la instrumentación y colocación del aerogenerador al final del túnel para comenzar con las pruebas sobre el mismo y comenzar con la adquisición de las variables eléctricas, el aerogenerador cuenta con cinco aspas, su voltaje nominal es de 12 voltios y su potencia nominal es de 400 watts, este aerogenerador se sujetó al suelo por medio de una base metálica por seguridad como se muestra en Figura 4.5.

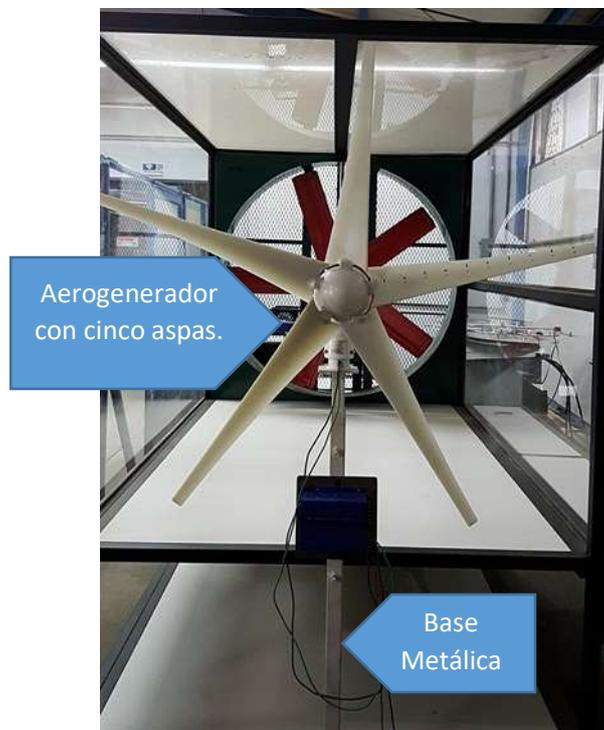


Figura 4.5. Aerogenerador con cinco aspas.

Una vez que se fijó el aerogenerador, se procedió a la reproducción de los diferentes perfiles de viento para obtener así una matriz de pruebas con los perfiles de voltaje medidos del dispositivo mediante el software de adquisición de señales de voltaje y velocidad usando la interfaz mostrada en la Figura 3.7 del capítulo anterior. En la Figura 4.6 se pueden ver los perfiles de voltaje adquirido, de color azul se puede ver el voltaje medido en cada uno de los perfiles y, como se puede apreciar, la señal contiene mucho oscilación debido a las condiciones inherentes de

operación, por lo que se optó por aplicar un filtro promediador. La señal que se obtiene del filtro se puede observar de color rojo.

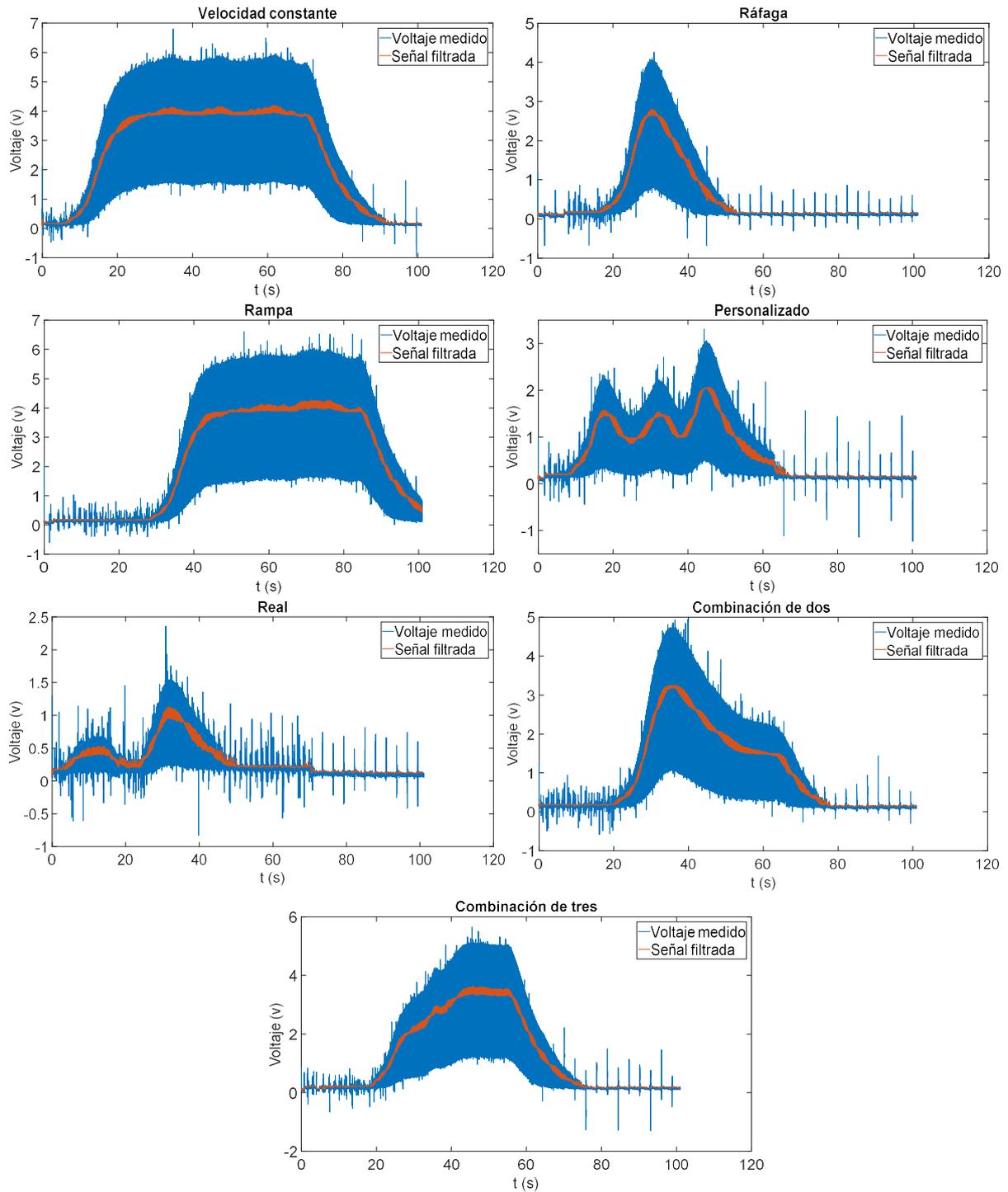


Figura 4.6. Perfiles de voltaje adquirido del aerogenerador con cinco aspas.

Ahora que ya se tienen los perfiles de voltaje medidos para el aerogenerador de cinco aspas, se continuó a hacer la adaptación de una nariz con tres aspas para el mismo aerogenerador y a tal adaptación aplicar los mismos perfiles de viento que al aerogenerador de cinco aspas. El aerogenerador con tres aspas se puede observar en la Figura 4.7. Los perfiles de voltaje medidos del este último dispositivo se pueden observar en la Figura 4.8, en donde nuevamente se aplicó el filtro promediador de orden alto y el voltaje medido se ve en color azul, mientras que en color rojo se puede ver la señal de voltaje filtrada.

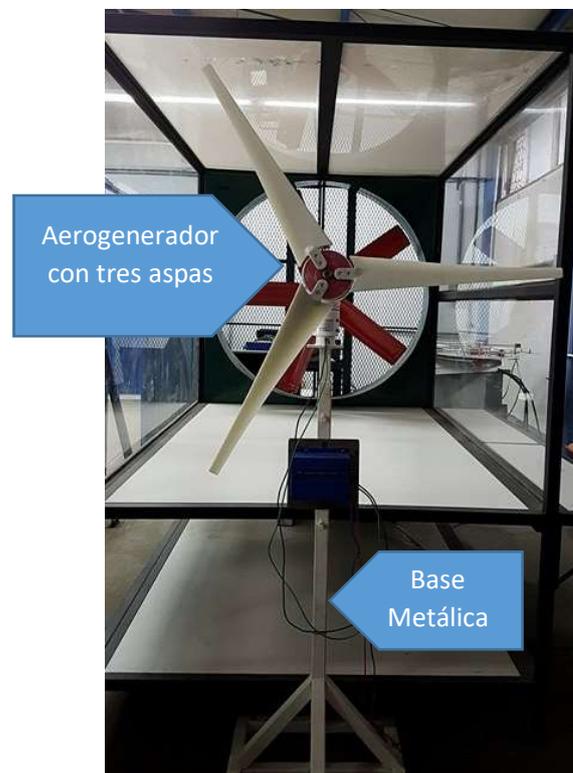


Figura 4.7. Aerogenerador con tres aspas

Los resultados que se obtuvieron del aerogenerador con tres aspas ante los mismos siete perfiles de viento, como ya se mencionó, se muestran en la Figura 4.8, en donde se puede observar en comparación con la Figura 4.6, que el aerogenerador con tres aspas pierde torque, ya que se puede ver que los perfiles que se monitorearon del mismo disminuyen en amplitud e incluso se pierden algunos eventos. Por ejemplo en los perfiles reale y personalizado, algunos picos

de velocidad no se perciben; es decir, en la gráfica del perfil personalizado y real de la Figura 4.6, se observan 3 y 2 picos de voltaje, respectivamente, mientras que en la gráfica de la Figura 4.8 solo se observa un pico de voltaje en ambas.

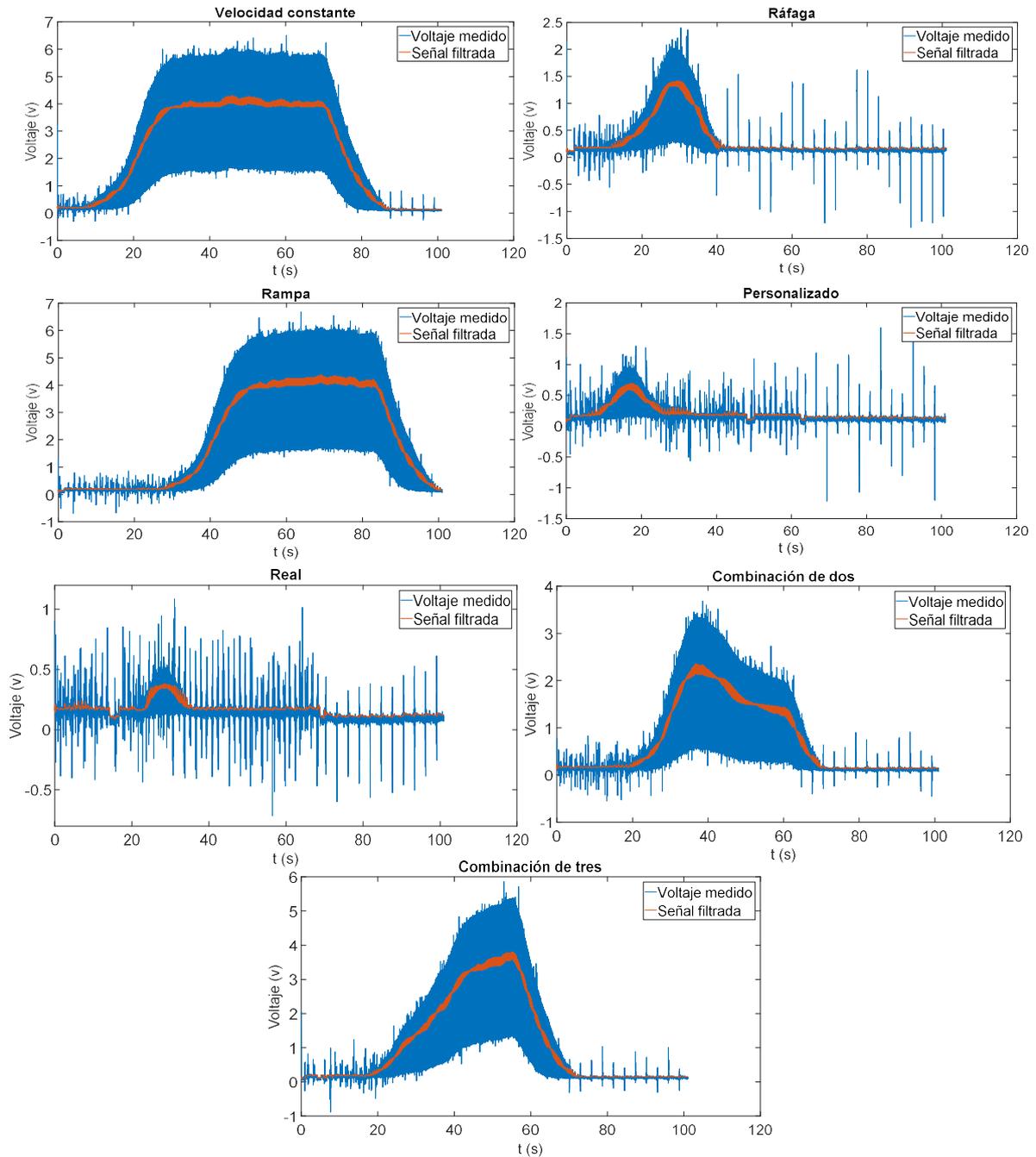


Figura 4.8. Perfiles de voltaje adquirido del aerogenerador con tres aspas.

4.3 Sistema de emulación.

Como ya se mencionó con anterioridad, los voltajes medidos del aerogenerador con tres y cinco aspas se filtraron. Procediendo con el desarrollo del trabajo, estas señales filtradas se usaron ahora como velocidad de referencia en el emulador que se desarrolló, este emulador se construyó con un aerogenerador sin aspas acoplado a un motor de corriente directa de 12 volts y 2 amperes, estas dos máquinas eléctricas acopladas se pueden observar en la Figura 4.9.

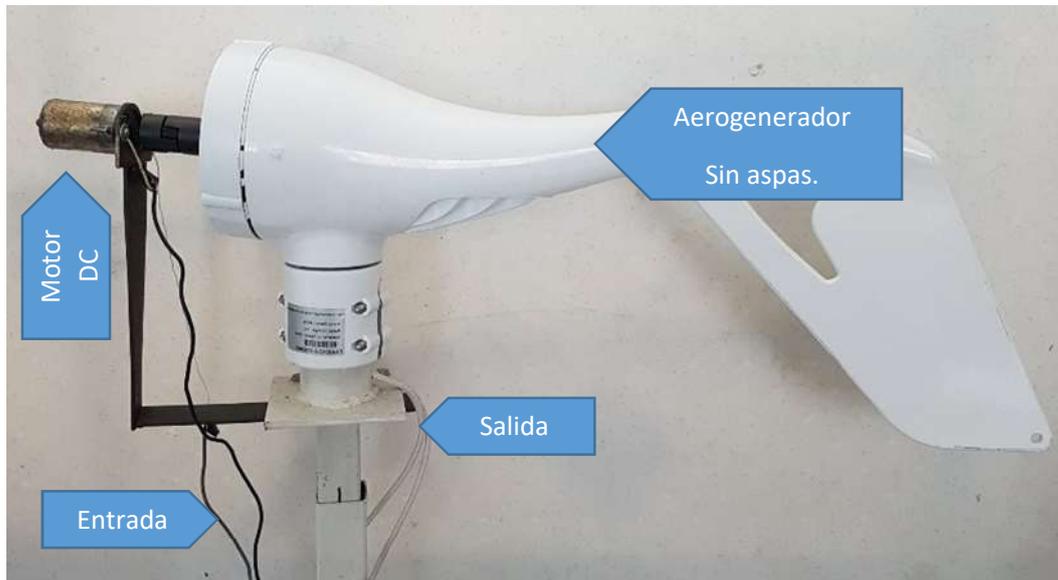


Figura 4.9. Aerogenerador y motor acoplados.

Para realizar el control de velocidad del motor, se empleó el módulo de puente H VNH2SP30 como el que se muestra en la Figura 4.10 a), en general este driver necesita 4 señales, una de habilitación del dispositivo, dos para el sentido de giro y una más para el porcentaje de ancho de pulso, además, este también necesita dos voltajes de alimentación uno de 5 voltios y otro de 5 a 20 voltios y obviamente su respectiva conexión a tierra. Este módulo fue dirigido por medio de una tarjeta NI USB 6211 (Figura 4.10 b)) y una fuente de alimentación externa y para enviar las señales a dicha tarjeta se desarrolló una interfaz de control en la plataforma Labview en la que se implementó una ley de control PID, la interfaz que se desarrolló se puede ver en la Figura 4.11.



Figura 4.10. Módulo VNH2SP30 (a), NI USB 6211 (b).

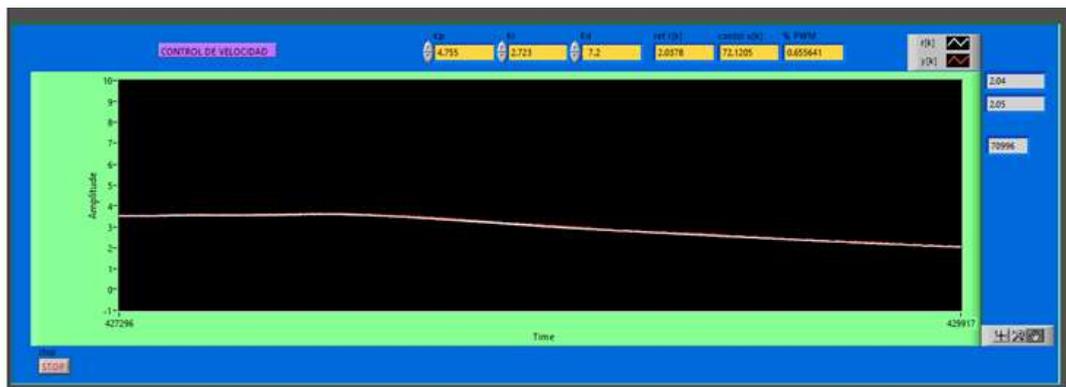


Figura 4.11. Interfaz de control de motor.

Para realizar la medición de los perfiles de voltaje emulados por el sistema, se utilizó la tarjeta de acondicionamiento antes desarrollada, ya que como se mencionó con anterioridad el voltaje que entrega el aerogenerador es mayor al que puede monitorear la tarjeta NI USB 6211. Una vez que se tiene el sistema de emulación (Figura 4.9), se procedió con la sintonización de la ley de control en la interfaz gráfica de la Figura 4.11, mediante el método de Ziegler-Nichols obteniendo las siguientes ganancias: $K_p = 4.3887$, $K_i = 3.113$, $K_d = 7.4185$. Con las ganancias anteriores, la respuesta del motor fue buena por lo que el siguiente paso fue reproducir los perfiles de voltaje de color rojo de las Figuras 4.8 para tres aspas y 4.6 para cinco aspas en el emulador obteniendo los resultados mostrados en la

Figura 4.12 para cinco aspas y 4.13 para tres aspas. En estas Figuras se puede observar que el seguimiento de la velocidad del motor es mejor para amplitudes mayores a 2 volts y por consecuencia los perfiles con amplitud menor a la dicha, poseen mayor contenido de ruido.

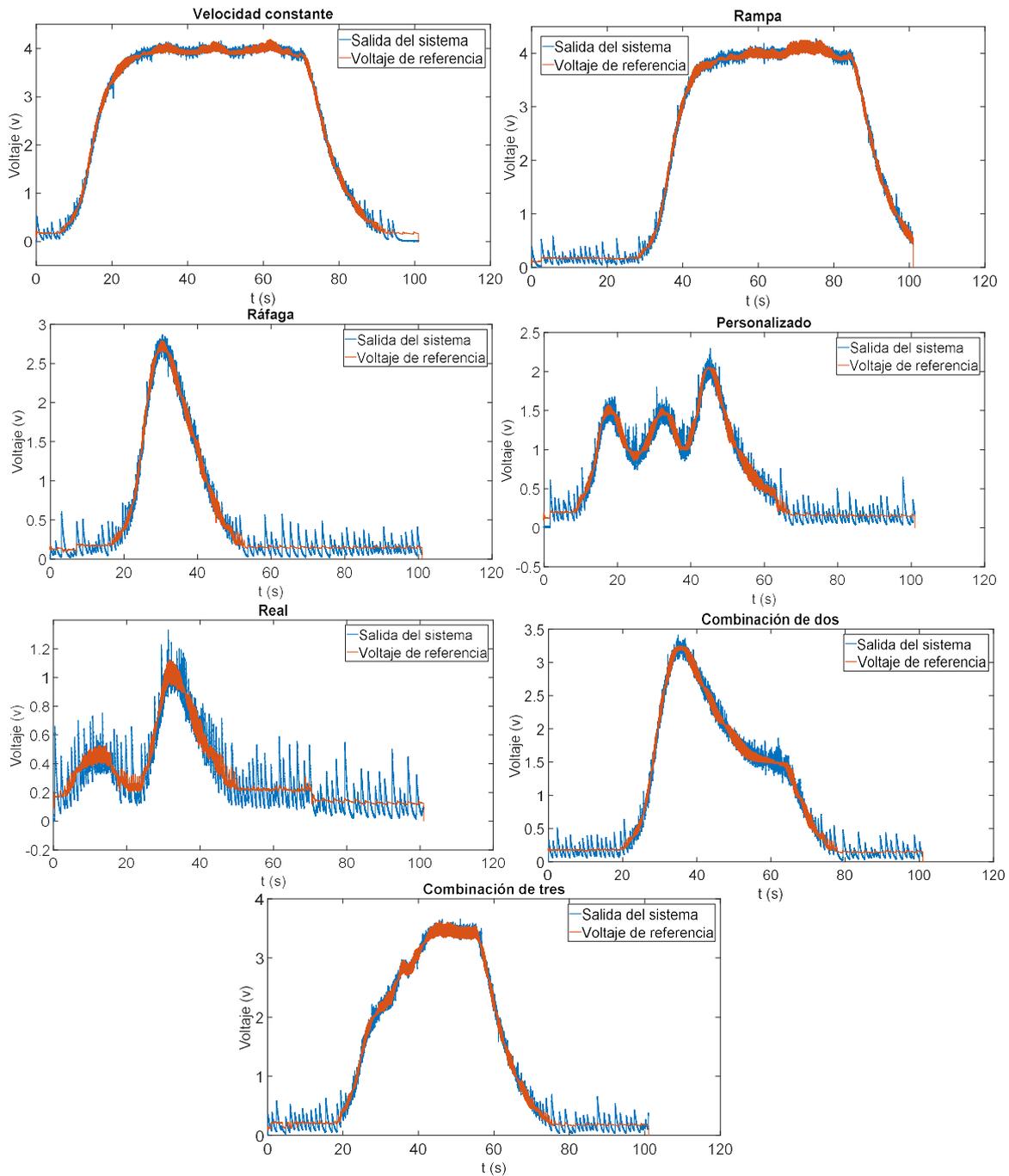


Figura 4.12. Respuesta del emulador para cinco aspas.

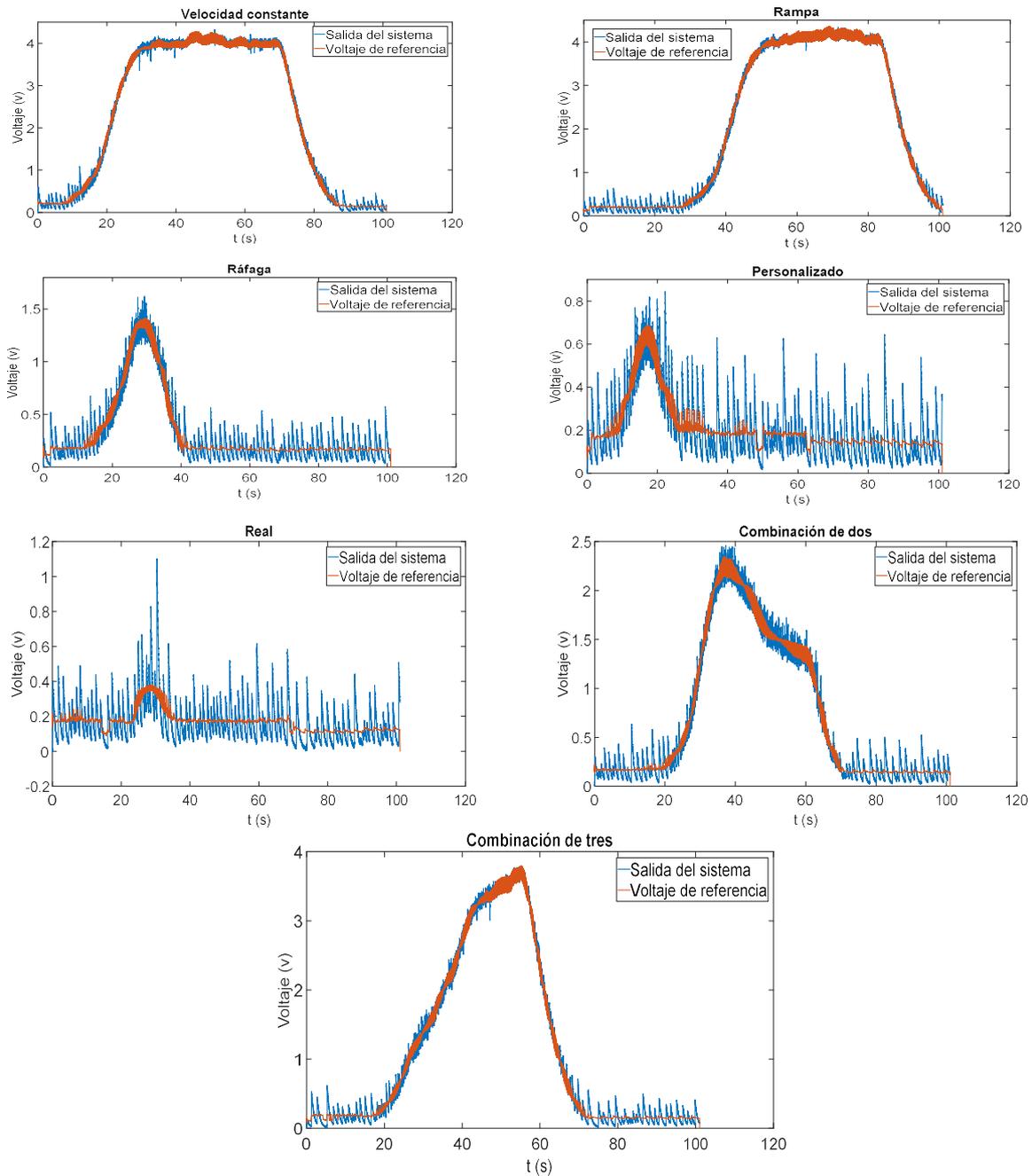


Figura 4.13. Respuesta del emulador para tres aspas.

Sin embargo, en la Tabla 2 se muestra una relación entre los perfiles de voltaje originales y los perfiles emulados. Uno de los índices de relación es el error cuadrático medio que es bastante bajo, observando que el perfil emulado con mayor error es el real con 1.10 % y con el menor error es el perfil constante con 0.97 % para los perfiles de 3 aspas. Para los perfiles con 5 aspas, se puede ver en la Tabla

que el perfil real y el de la combinación de tres tienen el mayor error, ambos con 1.17 %, mientras que, por el contrario, el que tiene menor error es el perfil rampa con 0.8 % de error. Otro índice es el coeficiente de correlación de Pearson que indica cual parecidas son un par de señales, en donde 0 es el caso en el que las señales comparadas no son parecidas en lo absoluto y donde 1 es el caso en el que las señales comparadas son idénticas en forma. En lo que respecta a este índice, las que más se parecen son las del perfil constante con 0.9983 y perfil rampa con 0.9986 para 3 y 5 aspas respectivamente, mientras que las que menos se parecen son el perfil real en ambos casos con 0.5191 y 0.9086.

En los algunos perfiles emulados se ha detectado mayor error como en el real, en este caso esto se debe a que estos perfiles son de bajas amplitudes, menores a un volt y el sistema de emulación no tiene una buena respuesta para estas magnitudes, sin embargo conforme esta magnitudes aumentan, el comportamiento del emulador mejora reduciendo este error.

Perfil	Error cuadrático medio 3 aspas/5 aspas (%)	Coefficiente de correlación de Pearson 3 aspas/5 aspas
Constante	0.97/0.81	0.9983/0.9985
Rampa	1.06/0.8	0.9982/0.9986
Ráfaga	1.06/1.02	0.9548/0.9908
Personalizado	1.07/1.13	0.7536/0.9829
Real	1.10/1.17	0.5191/0.9086
Combinación de dos	1.02/0.99	0.9905/0.9950
Combinación de tres	1.03/1.17	0.9967/0.9965

4.4 Modelado y obtención de ecuaciones generales.

Una vez que se tienen los nuevos perfiles de voltaje emulados, se procede a modelar dichos perfiles con ayuda de la herramienta System Identification de Matlab, se utilizó la técnica estadística ARX para realizar el modelado de los siete perfiles de voltaje. Estos modelos que se han generado son funciones polinomiales de cuarto orden, para los siete modelos del aerogenerador con cinco aspas, en la mayoría de estos el ajuste se ubica por encima del 80.2 %, a excepción del perfil real, el cual ronda el 50 % de ajuste, para los modelos del aerogenerador con tres aspas, el ajuste disminuye considerablemente debido a que disminuye la magnitud de los perfiles como ya se ha mencionado.

Para todos los modelos generados para los perfiles de ambas configuraciones, se intentó aumentar el orden de las funciones polinomiales para incrementar el ajuste de los modelos, sin embargo, no se obtuvo un incremento que mejorara el resultado ya que dicho ajuste no incrementó, por lo que opto por mantener el orden de los modelos. Las aproximaciones de las formas de voltaje generadas con los modelos se muestran en las Figuras 4.14 y 4.15 en donde en color gris se pueden observar los perfiles emulados y en color rojo las aproximaciones generadas para cada respectivo perfil. A pesar de que el nivel de ajuste para algunos es un tanto bajo, de hasta un 50%, para otros es bastante mayor superando el 94 %. Debido a lo anterior, se puede decir que los modelos son buenos ya que sus aproximaciones se sobreponen de buena forma a los perfiles.

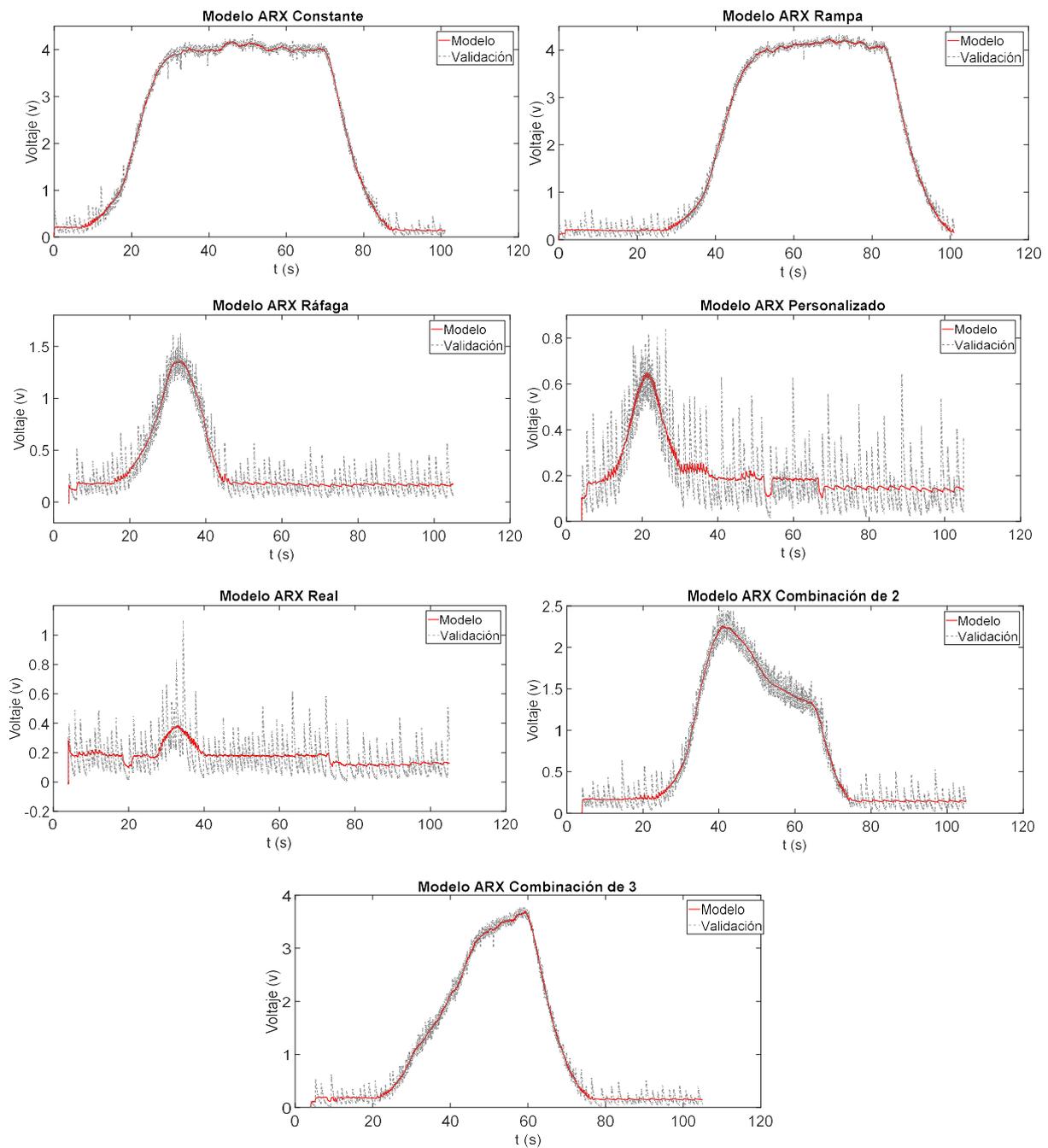


Figura 4.14. Modelos generados para aerogenerador con cinco aspas.

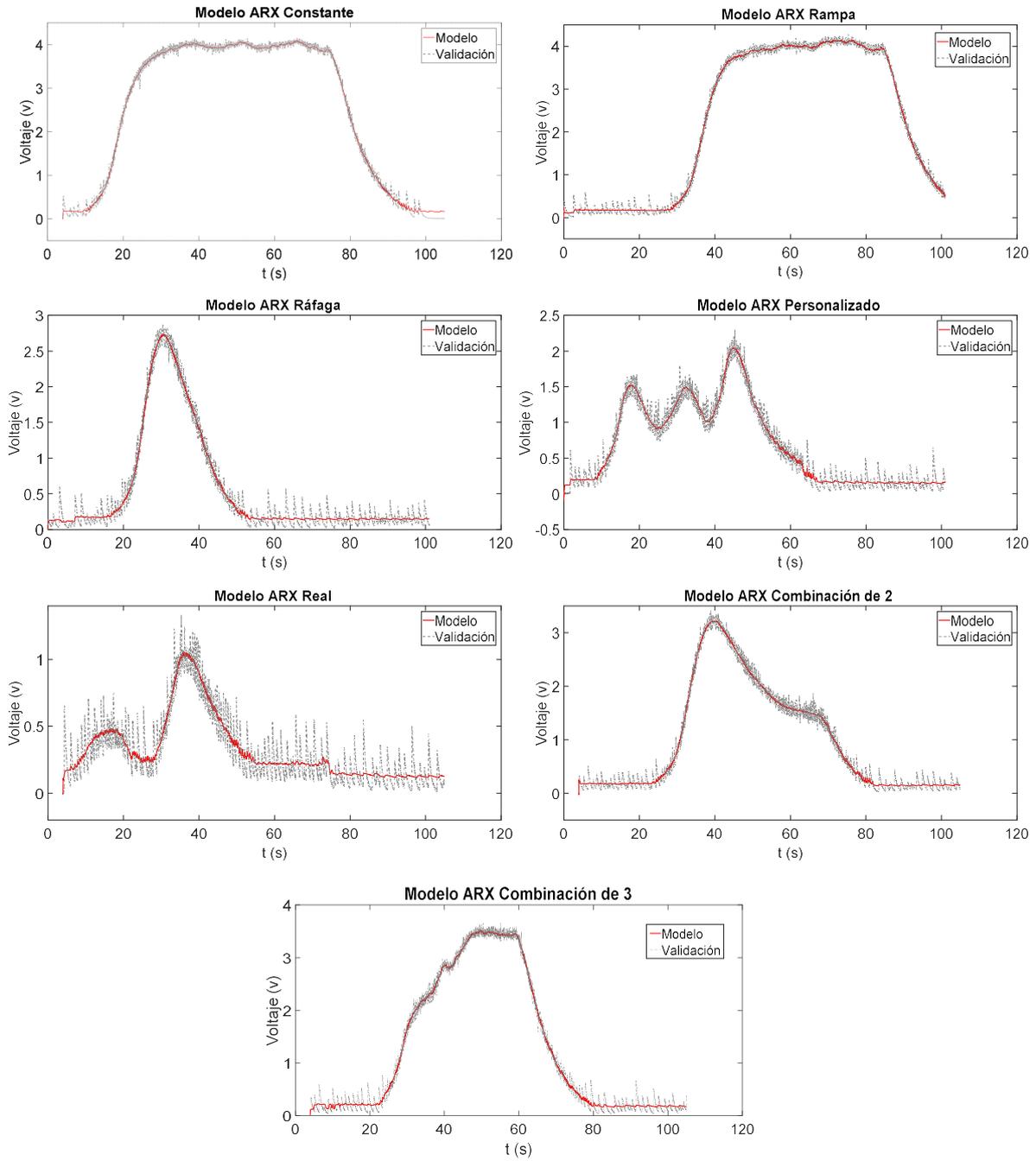


Figura 4.15. Modelos generados para aerogenerador con tres aspas.

Ya que se tienen los modelos como funciones polinomiales, como el de la Figura 4.16, en donde se observan los coeficientes de modelo en tiempo discreto. Cabe mencionar que los coeficientes de la parte inferior del polinomio, es decir los B, son muy similares en todos los modelos por lo que los que se estimaron fueron los de la parte superior, es decir los A; así entonces, se continuó a obtener una función que relacione el modelo individual de 3 y 5 aspas como función polinomial del aerogenerador para cada uno de los siete perfiles, con ayuda de la herramienta de Matlab llamada Curve Fitting. Como resultado de este paso, se obtendrá una ecuación general que permita generar los polinomios que generan las distintas formas de onda de voltaje en función del número de aspas.

```

Modelo ARX tiempo-discreto, constante 5 aspas: A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t)
A(z) = 1 - 1.013 z^-1 + 0.05722 z^-2 - 0.01124 z^-3 + 0.01469 z^-4
B(z) = 0.002594 z^-1 + 0.008171 z^-2 + 0.01721 z^-3 + 0.01969 z^-4

```

Figura 4.16. Polinomio de modelo constante 5 aspas.

En base a la información presentada en la Tabla 3 y con el objetivo de tener una ecuación general que permita generar los coeficientes de los modelos de las formas de voltaje para 3 y 5 aspas, o incluso para interpolar y extrapolar a otro número de aspas, se obtiene un modelo general usando el ajuste de curvas, comentado anteriormente. Es decir, una ecuación que relacione el comportamiento de los coeficientes b1, b2, b3, b4, y b5; por ejemplo, la ecuación debe proporcionar cuanto b para determinada condición de número de aspas

La función obtenida, se encuentra dependiente de dos variables, “x” y “y”, siendo x el número de coeficiente que se busca del polinomio que rige la forma de onda de voltaje y y la cantidad de aspas del aerogenerador al que pertenece dicho polinomio. Por lo tanto, ahora se tiene una función general para los distintos perfiles, de la cual se pueden obtener los modelos de los mismos perfiles pero para diferente cantidad de aspas en el aerogenerador; es decir, se pueden obtener modelos ya

calculados para los aerogeneradores con tres y cinco aspas y además obtener modelos para aerogeneradores con 4, 6 o n número de aspas.

Tabla 3. Coeficientes de los modelos polinomiales.

Coeficientes: $B(z) = b_1 + b_2 z^{-1} + b_3 z^{-2} + b_4 z^{-3} + b_5 z^{-4}$						
Perfil	No. Aspas	b1	b2	b3	b4	b5
Constante	3	0	0.01546	-0.004452	0.01459	0.0209
	5	0	0.002594	0.008171	0.01721	0.01969
Rampa	3	0	0.0344	-0.04815	0.06135	-0.005206
	5	0	0.0167	-0.01353	0.0269	0.02427
Ráfaga	3	0	0.0105	0.1516	-0.3135	0.1712
	5	0	-0.03565	0.08308	0.01578	-0.04041
Personalizado	3	0	0.011	-0.05907	-0.09407	0.1571
	5	0	0.0783	-0.0589	-0.08683	0.09912
Real	3	0	0.1447	-0.3355	-0.0511	0.2546
	5	0	0.09168	-0.1578	-0.07023	0.155
Combinación de 2	3	0	0.0404	-0.007751	-0.05047	0.05056
	5	0	0.02379	-0.0366	0.06567	-0.01118
Combinación de 3	3	0	-0.00439	-0.002287	0.05512	-0.01452
	5	0	0.006604	-0.003911	0.0637	-0.03154

En la Tabla 4 se muestran las funciones generales para cada perfil distinto. En estos polinomios, por ejemplo, si se toma la función general del perfil constante y se sustituyen las “x” por el número de coeficiente, es decir 1, 2, 3, 4, ya que son cuatro coeficientes B, y las “y” por el número de aspas, es decir 3 o 5, si fuera el caso para el aerogenerador con tres o cinco aspas, se obtiene un estimado de los cuatro coeficientes B de la Tabla 3. Con estos coeficientes (polinomio) se puede generar la forma de voltaje que un aerogenerador de 3 o 5 aspas generaría bajo una velocidad de viento constante. La forma de voltaje obtenida puede ser colocada en el emulador (motor-generator) para que sea reproducida y así realizar investigaciones de desempeño eléctrico, diseño de inversores y controladores, etc., sin la necesidad de tener un túnel de viento o tener el aerogenerador bajo condiciones de viento reales en localizaciones geográficas específicas; además, de poder interpolar o extrapolar el comportamiento eléctrico a aerogeneradores con distinto número de aspas.

Tabla 4. Funciones generales para cada perfil.

Perfil	Polinomio: x= número de coeficiente, y= número de aspas.
Constante	$f(x,y) = 0.001859 + 0.004308*x + 0.001435*y + 0.02989*x^2 + 0.008195*x*y + 0.001809*x^3 - 0.001457*x^2*y - 0.01405*x^4 - 0.004684*x^3*y;$
Rampa	$f(x,y) = - 0.03084 + 0.01727*x - 0.001891*y + 0.188*x^2 - 0.0107*x*y - 0.007623*x^3 + 0.003501*x^2*y - 0.09346*x^4 + 0.009163*x^3*y;$
Ráfaga	$f(x,y) = 0.1173 - 0.1436*x + 0.04319*y - 0.5712*x^2 + 0.2105*x*y + 0.09331*x^3 - 0.04763*x^2*y + 0.2912*x^4 - 0.14*x^3*y;$
Personalizado	$f(x,y) = - 0.05898 - 0.1502*x + 0.01613*y + 0.08413*x^2 - 0.02766*x*y + 0.11*x^3 - 0.01596*x^2*y - 0.008767*x^4 + 0.009042*x^3*y;$
Real	$f(x,y) = - 0.2467 - 0.2032*x + 0.03696*y + 0.7514*x^2 + 0.02428*x*y + 0.1553*x^3 - 0.04036*x^2*y - 0.3097*x^4 - 0.02436*x^3*y;$
Combinación de 2	$f(x,y) = - 0.02217 - 0.02679*x + 0.01339*y + 0.1186*x^2 + 0.07357*x*y + 0.01896*x^3 - 0.01383*x^2*y - 0.05599*x^4 - 0.04761*x^3*y;$
Combinación de 3	$f(x,y) = - 0.003099 + 0.06081*x + 0.003891*y + 0.1004*x^2 - 0.00015*x*y - 0.03855*x^3 - 0.004215*x^2*y - 0.05838*x^4 - 0.001775*x^3*y;$

5. CONCLUSIONES

Se desarrolló una metodología para la integración de un túnel de viento y la generación de perfiles de viento tanto ideales como reales mediante un software de desarrollo propio. Este software permitió, además de generar los perfiles, realizar mediciones en campo para reproducir estas condiciones ambientales en el laboratorio.

De acuerdo con esta metodología, se desarrolló una plataforma de mediación que ayudó en gran medida a la verificación y validación del correcto funcionamiento del túnel de viento, gracias a esta plataforma se pudo obtener una matriz de pruebas, en la cual se observó que los perfiles captados al final del túnel de viento son muy similares a los reproducidos por el software.

Se llevó a cabo la instrumentación de un aerogenerador para la medición de sus variables eléctricas y de velocidad, esto ayudo a observar y monitorear el comportamiento del mismo ante condiciones de viento distintas y ante diferente número de aspas.

Por otra parte, se desarrolló un emulador y control del mismo acoplado un motor de dc y un aerogenerador sin aspas, que permitió emular los perfiles de voltaje medido en el aerogenerador con un bajo porcentaje de error (1.2%), para obtener otra matriz de pruebas, y en base a esta, obtener los modelos de cada perfil de viento aplicando las técnicas estadísticas.

Por último, se obtuvo de manera satisfactoria un conjunto de funciones que permiten correlacionar el comportamiento de un aerogenerador con distinto número de aspas ante cierto perfil de viento, correspondiendo cada función a un perfil de viento diferente. La ventaja de este conjunto de funciones es que se puede llegar a conocer el comportamiento de un aerogenerador con n número de aspas ante un perfil de viento específico.

5.1 Prospectivas

Este proyecto puede servir estructuralmente para el desarrollo de otros trabajos relacionados al estudio de aerogeneradores de baja potencia, incluso relacionado a otras áreas de investigación con el desarrollo del túnel. Por otro lado, teniendo el emulador se pueden generar perfiles de voltaje en un aerogenerador para estudios de desempeño eléctrico, diseño de controladores e inversores sin la necesidad de contar con un túnel de viento o sin contar con las aspas. Por último, obteniendo el modelado del comportamiento de las aspas midiendo sus perfiles de voltaje y obteniendo una ecuación general que rijan la relación entre el número de aspas y el polinomio del modelo, es posible interpolar o extrapolar a otro polinomio de un modelo que corresponda al comportamiento de un aerogenerador con distinto número de aspas.

6. APÉNDICE

Software-hardware to control of a wind tunnel and wind profiles.

Uriel Hernandez-Osornio¹, Salvador Zaid Hernandez-Michel², Martin Valtierra-Rodriguez³
Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro
San Juan del Río, Querétaro, México
uriel.hernandez@enap-rg.org¹, zaid.hernandez@enap-rg.org², martin.valtierra@enap-rg.org³

David Granados-Lieberman
Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro
San Juan del Río, Querétaro, México
martin.valtierra@enap-rg.org

Abstract— A wind tunnel is an experimental tool mainly compound of injection, manipulation and exit flow sections. This is used in many research areas to study the wind effects over certain objects or structures. Depending on the application, the variable to be measured of the wind flow could be speed, pressure, drag force, Etc. In most experiments the wind applied have a constant speed and in few of these only take the Reynolds number as a real wind characteristic. But it would be desirable that the air flow could be reproduced in accordance with real characteristics. That's way, a wind tunnel structure, a generation wind profile generation software and a real wind profile acquisition software based on Matlab platform are proposed. The generation software is capable to reproduce real wind profiles and generate personalized wind profiles. The acquisition software is able to measure the wind speed and save the data as wind profiles. The results show that is possible reproduce reliably the actual measured wind profiles as well as the personalized and virtual generated profiles. Which demonstrates that the wind tunnel is a useful tool for the study of wind behavior and its effects on objects of interest.

Keywords—wind tunnel; wind profile; actual measurement; air flow; wind speed.

I. INTRODUCTION

A wind tunnel is an experimental tool used to study the wind effects over objects, solid bodies or buildings, its structure is mainly compound by three sections: flow injection section, flow manipulation section and flow exit [1]. On the other hand, the operation principle of this tool is based on air injection through a duct in which the bodies under observation are placed [1]. The variable to be measured of the air flow can be the speed, pressure, drag force, Etc., and they depend on the application of the wind tunnel. Among the applications areas of this tool figure aeronautics, fluid mechanics, aerodynamics, alternative energies, turbomachinery, environmental sciences, metrology, civil and automotive engineering [2].

In accordance with the above mentioned, the wind tunnel as an experimental tool has a lot of applications; for example, in [3] the wind behavior along different topography and the wind

effect over very-tall buildings against major meteorological phenomena is analyzed. The effect produced by wind orientation over pollutant dispersion is analyzed in [4] using a wind tunnel, where the effects of different types of natural ventilation on the risk of infection with respiratory diseases is also observed. Different models of blades are proposed for a low-scale wind turbine, which are probed in wind tunnel where the torque developed at different speeds is analyzed, these proposed models are compared against Darrieus model, with some advantages resulting from these proposals [5], in [6] the wind effect over moving vehicles is studied, especially on bridges, also a mechanism manipulated by a servo motor is proposed, which takes advantage of the wind to provide stability and aerodynamics to the vehicle. A wind tunnel is used to observe the performance of a low-scale wind turbine by changing the blade number from two to five [7]; also, the estimation of torque by measuring torque and pressure is performed. Regarding wind turbine farms, a study is carry out in base of arrays and configurations of the distribution of wind turbines to determine in which the performance is better, also the distance between each is determined to the maximum energy extraction because it depends on the wind direction [8].

The behavior of pollutant dispersion in elongated rectangular buildings areas is studied in [9] using a wind tunnel, with the purpose of obtain a new model of pollutant dispersion including the angle effect of the buildings position respect the flow source. In [10] is proposed a new wind turbine umbrella type model, in this model the blades can be retracted to regulate the output power, this model also is probed in a wind tunnel getting good results in the output power regulation. A wind tunnel to study the aerodynamic and aeroacoustics performance of aircraft components or scaled models is built in [11]; this tunnel have two sections, one closed for developing aerodynamic experiments and the other one open for developing aeroacoustics experiments, in this experiments low levels of turbulence are determined takin on account the Reynolds number. According to the aforementioned works, there are many applications for a wind tunnel as an experimental tool, however, in most of these, only the Reynolds number is

taken on account as a real characteristic of the wind, namely, if the air flow is turbulent or laminar, so that in many would be desirable that the air flow could be reproduced in accordance with real characteristics, such as wind profiles consisting of a constant speed, a ramp, a gust and a turbulence, which are part of a generic wind model, [13,14,7,11,12].

This work consists in two parts: in the first one the design and development of an interface that allows the generation of generic wind models (consisting of a constant speed, a ramp, a gust and a turbulence) using a Matlab platform is proposed, in addition to a structure for a wind tunnel in which the models can be reproduced with the aid of a wind injector coupled to a three-phased induction motor, which will be directed by a frequency inverter, that receives the models data through an Arduino card, this models can include personalized data or even real wind data acquisitions, in the second part, a measurement software on the Matlab platform to acquire the actual speed of the wind model using an anemometer is proposed.

II. THEORETICAL BACKGROUND

This section is divided in three parts, in the first one the hardware and software for air flow injection are described, in the second one the structure for the wind tunnel is defined, and in the last one the sensor and the software to acquire the wind speed are presented. This parts can be observed in Fig. 1.

A. Air flow injection system.

The wind profile generation software is based on the Matlab GUI (Graphic User Interface), this software can generate five different types of wind profiles, a constant speed profile, a speed ramp profile, a speed gust profile, a turbulence speed profile and a personalized speed profile.

As reported in [12] a constant speed profile can be described as the average value or math mean of the wind speed measured during a certain time lapse; a speed ramp profile has three parameters, the ramp amplitude A_r (m/s), the start time T_s (in seconds) and the finish time T_f (in seconds), having this parameters, this wind profile can be represented as follow [12]:

$$\begin{aligned} v_r &= 0 \quad \text{to } t < T_s \\ v_r &= A_r \left(\frac{t - T_s}{T_f - T_s} \right) \quad \text{to } T_s \leq t \leq T_f \\ v_r &= A_r \quad \text{to } t > T_f \end{aligned} \quad (1)$$

The gust speed profile as a fluctuation or a temporal change of the wind speed has three parameters, the gust amplitude A (m/s), the start time T_s (in seconds) and the finish time T_f (in seconds), this three parameters are included in the math equations of this profile [12]:

$$\begin{aligned} v_g &= 0 \quad \text{to } t < T_s \\ v_g &= A_g \left\{ 1 - \cos \left[2\pi \left(\frac{t - T_s}{T_f - T_s} \right) \right] \right\} \quad \text{to } T_s \leq t \leq T_f \end{aligned} \quad (2)$$

$$v_g = 0 \quad \text{to } t > T_f$$

In the turbulence case, it can be represented as a random variable, namely, as Gaussian noise with zero-mean and variance σ^2 [15],

Once the wind profile is generated, the data of this profile is sent to an Arduino Due board, which together with an array of operational amplifiers conditions and provides the reference voltage needed by a frequency inverter, this frequency inverter is connected to a three-phase induction motor, this last one is coupled to an axial fan to generate the air flow inside the wind tunnel.

B. Wind tunnel structure.

In general, there are different types of wind tunnel structures, these depends on the application, the open circuit wind tunnel is a structure in which the air is recirculated through the ambient, on the other hand, the closed circuit wind tunnel is a structure in which the air flow is recirculated through a designed path, these two types of wind tunnel are the most frequently used [1].

C. Real wind profile measurement system.

In this work is proposed an anemometer as sensor to measure the wind profile speed, this sensor has an encoder that provide pulses that are sent to an Arduino One board in which this data is processed to determine the real wind profile speed and sent again to the acquisition software also based on the Matlab GUI, in this software, the wind profile can be plotted with the real speed values measured.

III. EXPERIMENTAL SET-UP

In this section the development of this work is described and the experimental setup can be observed in Fig. 2. The Profile Generation Software can be observed in Fig. 4a, this software is developed in Matlab platform, where the equations



Fig. 1. General diagram for the wind tunnel control.

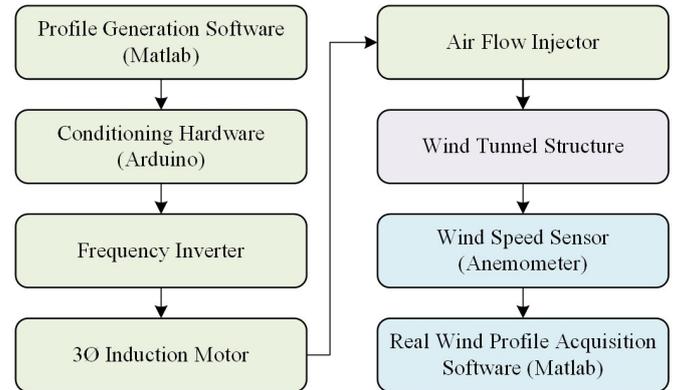


Fig. 2. Methodology general scheme.

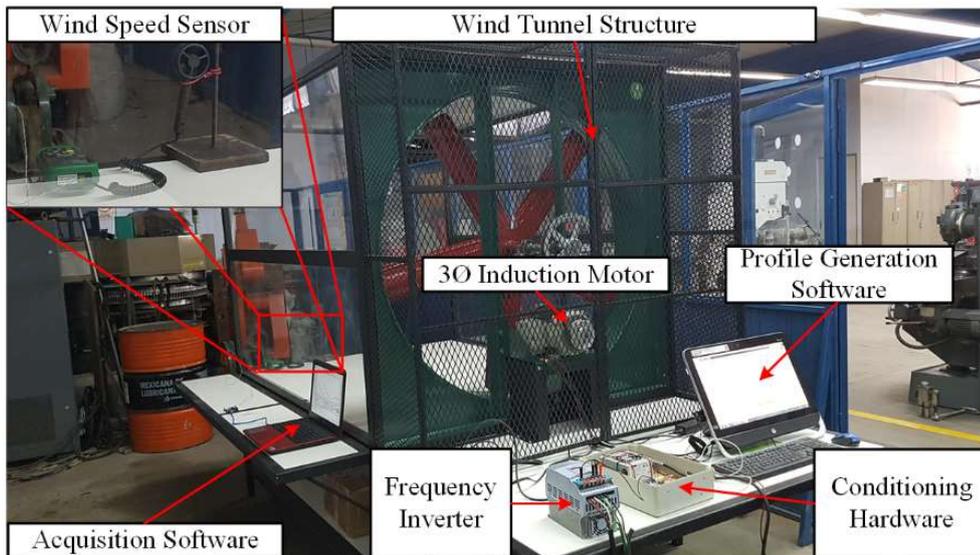
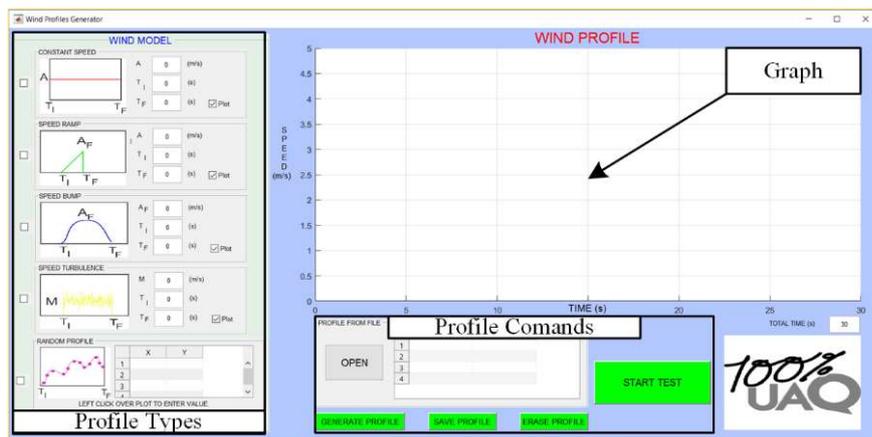
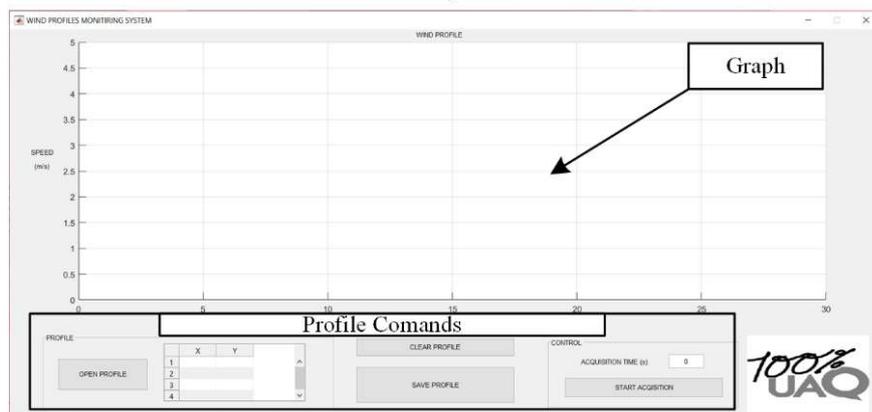


Fig. 3. Experiment modules and wind tunnel structure



a)



b)

Fig. 4. a) Generation profile software. b) Measuring profile software.

of the theoretical background are applied and can be generated five different types of wind profiles (constant, ramp, gust, turbulence and personalized, also can be reproduced real wind measurements). After the desired profile has been generated, the data is sent to the conditioning hardware, this last one consist of convert the profile data into a reference voltage signal with a range from 0 to 10 volts through an Arduino DUE board and an amplifiers array.

The frequency inverter and the conditioning hardware module can be observed in Fig. 3. The frequency inverter used to drive the three-phase motor is a WEG model CFW-08. This, in order to be able to drive the motor and to receive the reference voltage, must be programed according to its specifications. When the frequency inverter has been programed and received the reference voltage signal, convert this signal into a frequency range from 0 to 60 Hertz which varies the motor speed from 0 to 1740 rpm (revolutions per minute). The frequency inverter also must be fed with a three phase voltage.

The three phase induction motor can be seen in Fig. 3, this 2 horse power induction motor of 1740 rpm is coupled to the axial fan and driven by the frequency inverter. The axial fan of 1.219 meters consist of five blades and is used as the air flow injector. The tunnel structure is made of metal profiles and melamine, its length is 2 meters and its height and width is 1.4 meters. The structures also has in the back a security guard to avoid risks for the people making experiments.

The wind speed sensor is an anemometer Twilight CM-DT618 and can be observed in Fig. 3, this one has an encoder that allows it measure the wind speed, and the signal can be captured by a computer through an Arduino DUE board.

Finally, the software that captures the data coming from the sensor can be seen in Fig. 3b. This software is developed in Matlab platform, once it receives the data from the Arduino DUE board connected to the software, the data is processed and plotted and after the acquisition is complete, the measured profile can be saved.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

Once a series of experiments has been finished with different wind speeds in the open loop wind tunnel, the results are shown in this section, the left column of Fig. 5 show seven different types of generated profiles, this profiles are generated with the software of Fig. 4a. In a) can be seen a constant profile of 2.5 m/s, b) shows a ramp of 3 m/s and c) shows a gust of 4 m/s.

In d) can be observed a personalized profile with a maximum magnitude of 3.5 m/s and in e) a real measurement of wind speed which maximum magnitude is almost 3 m/s. The personalized and the real profiles are an advantage in this work since in other works these kind of profiles are not taken on account, as already mentioned above, the personalized profile can be designed by the author accordingly with the experimental needs and the real profile is an actual measurement of the wind speed in some area of convenience. If the actual measurement is taken in said zone, the experiments can be carry out in the laboratory instead of in the field.

The letter f) is a combination of two profiles, a constant of 1.5 m/s and a gust of 2 m/s. The letter g) is a combination of three profiles, a ramp of 3 m/s, a gust of 2 m/s and a turbulence of 1 m/s. This combinations can be approached to a real wind profile but is better use the personalized profile.

When the desired profiles has been designed, these can be observed as a reference voltage signal very similar to the original profiles in the middle column of Fig. 5, this signals are proportionated to the frequency inverter.

In the right column of Fig. 5 can be observed the real wind profile measurements, these profiles are measured with the anemometer and plotted with the help of the acquisition software, the most important aspect is that the magnitude of the profiles are almost maintained, their shape are nearly the same, due to the turbulence generated, the presence of noise in the profiles is unavoidable.

The results of the experiments are satisfactory, as can be observed in Fig 5, the measured profiles are very similar to the designed profiles. Against very low wind speed, for example, below 0.5 m/s the anemometer does no record a specific measurement, so there is a time-out in the profiles although it cannot be perceived clearly in the Fig 5. If is pay attention to the magnitude of the measured profiles, can be observed that the it is almost the same, but there are clear variations due to the turbulence generated inside the wind tunnel.

During the experiments it was possible to determine that the maximum speed of the wind is in the circumference of the blades bay placing in different positions the sensor, detecting the minimum speed in the center of the blades circumference. The above is due to the fact that the experiments were carried out in an open loop wind tunnel.

V. CONCLUSIONS AND PROSPECTIVES

The purpose of this work is to illustrate the software-hardware control of a wind tunnel and wind profiles, an open loop wind tunnel with a square transversal area of 1.4 meters of side was designed and built. A generation software in base on the theoretical background and an acquisition software to monitor the wind speed were developed. After a series of experiments, the measured profiles were compared with those ideally generated and based on the experiment results, the measured profiles are discussed.

It is obvious that the measured profiles cannot be perfectly equal to the ideals, nevertheless these are very similar only having some noise in the signal due to the turbulence generated, also the measured signal have a time-out due to the sensor characteristics and the length of the wind tunnel, although it is almost imperceptible. It is important to mention that the real wind measured and the personalized profiles were reproduced satisfactorily as well as their results with little noticeable noise, this is an advantage for this work in reference to others.

However, the results could be better, so as a prospective, it will be implemented control techniques to improve the magnitudes of the measured profiles and to decrease the noise in the measured signals.

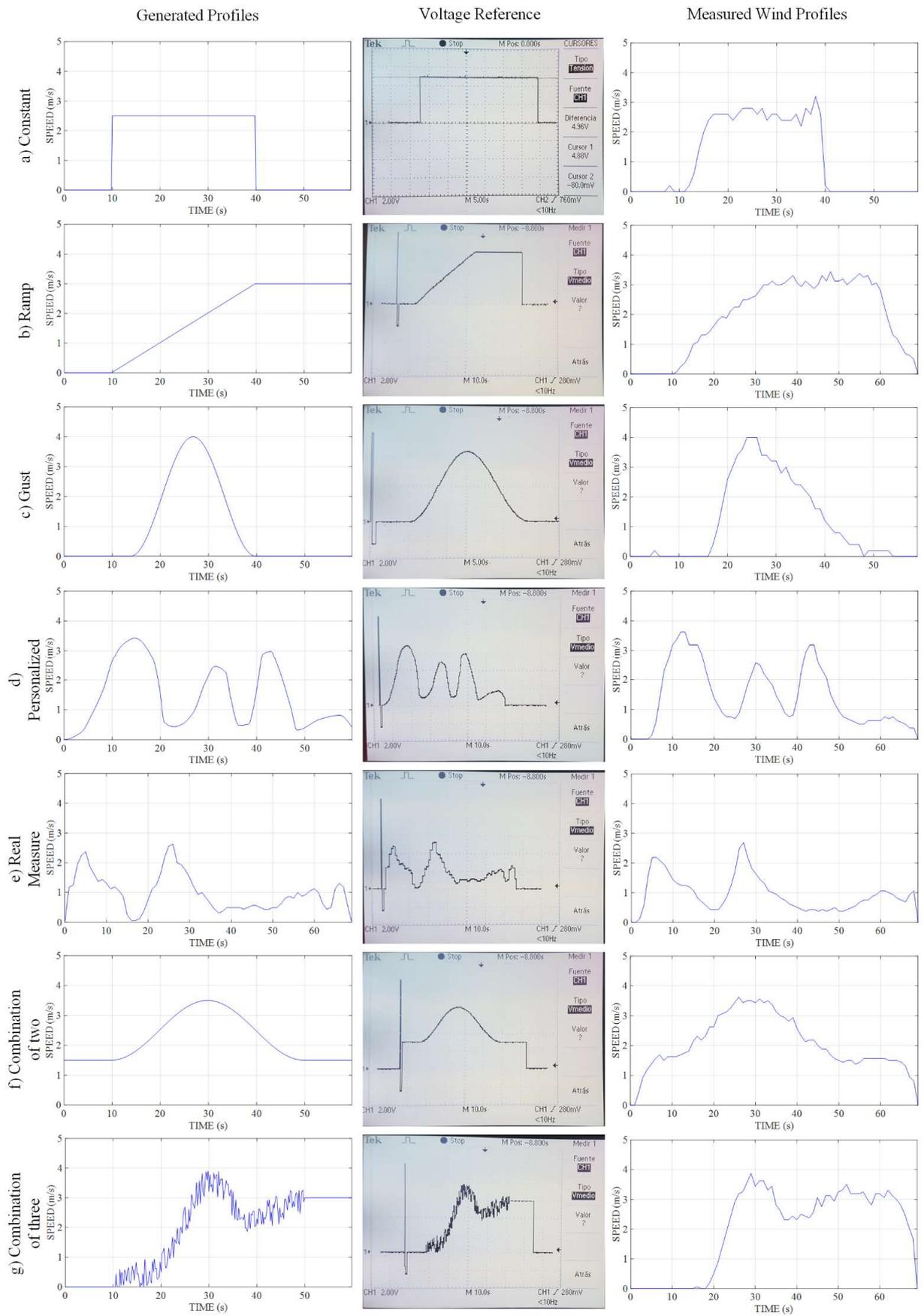


Fig. 5. Generated profiles, voltage reference measures and wind profile measures.

VI. ACKNOWLEDGMENT

The first author was supported by CONACYT scholarship 743468.

VII. REFERENCES

- M. T. Boyle and C. Knaub, Low speed wind tunnel testing, IEEE In *Semiconductor Thermal and Temperature Measurement Symposium, 1988. SEMI-THERM IV., Fourth Annual IEEE* (pp. 31-39).
- R. Tolentino, M. Toledo, G. Tolentino & F. Sánchez, Modificaciones al Túnel de Viento del LABINTHAP para Mediciones de Velocidad de Aire desde 5 m/s hasta 30 m/s. In *Simposio de metrología, 2004*, (pp. 25-27).
- Q.S. Li, X. Li, Y. He, & J. Yi, Observation of wind fields over different terrains and wind effects on a super-tall building during a severe typhoon and verification of wind tunnel predictions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 162*, 73-84.
- Du. Mu, N. Gao, & T. Zhu, Wind tunnel tests of inter-flat pollutant transmission characteristics in a rectangular multi-storey residential building, part A: Effect of wind direction. *Building and Environment, 2016, 108*, 159-170.
- M. Scungio, F. Arpino, V. Focanti, M. Profili, & M. Rotondi, Wind tunnel testing of scaled models of a newly developed Darrieus-style vertical axis wind turbine with auxiliary straight blades. *Energy Conversion and Management, 2016 130*, 60-70.
- H. Xiang, Y. Li, S. Chen, & C. Li, A wind tunnel test method on aerodynamic characteristics of moving vehicles under crosswinds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 163*, 15-23.
- Q. A. Li et al., Effect of solidity on aerodynamic forces around straight-bladed vertical axis wind turbine by wind tunnel experiments (depending on number of blades). *Renewable Energy, 2016, 96*, 928-939.
- M. Ahmadi-Baloutaki, R. Carriveau, & D. S. Ting, A wind tunnel study on the aerodynamic interaction of vertical axis wind turbines in array configurations. *Renewable Energy, 2016, 96*, 904-913.
- S. G. Perry, D. K. Heist, L. H. Brouwer, E. M. Monbureau, & L. A. Brixey, Characterization of pollutant dispersion near elongated buildings based on wind tunnel simulations. *Atmospheric Environment, 2016, 142*, 286-295.
- W. Xie, P. Zeng, & L. Lei, Wind tunnel testing and improved blade element momentum method for umbrella-type rotor of horizontal axis wind turbine. *Energy, 2017, 119*, 334-350.
- P. Liu, Y. Xing, H. Guo, & L. Li, Design and performance of a small-scale aeroacoustic wind tunnel. *Applied Acoustics, 2017, 116*, 65-69.
- O. Amaya, M. Cooz, & F. Gonzalez-Longatt, Modelado del Viento para Simulaciones Computarizadas de Sistemas de Potencia. *Reporte de Investigación, 2007, 12*.
- J. G. Sloomweg, S. W. H. De Haan, H. Polinder, & W. L. Kling, Modeling wind turbines in power system dynamics simulations. *IEEE In Power Engineering Society Summer Meeting, 2001, July*, (Vol. 1, pp. 22-26).
- J. E. Cermak, Wind-tunnel development and trends in applications to civil engineering. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2003, 91(3)*, 355-370.
- F. Luisier, T. Blu, & M. Unser, Image denoising in mixed Poisson-Gaussian noise. *IEEE Transactions on Image Processing, 2011 20(3)*, 696-708.

UNIVERSIDAD DE
GUANAJUATO



El Departamento de Estudios Multidisciplinarios
otorga la presente

CONSTANCIA

A

URIEL HERNANDEZ OSORNIO

Por su destacada participación en

2017 International Conference on Applied Electronic

Con la sesión oral titulada

Software-Hardware System to Generate Wind Profiles in a Wind Tunnel

Yuriria, Gto. 27 de octubre de 2017

Dr. Eduardo Cabal Yépez
Director del Departamento de Estudios
Multidisciplinarios

Dr. Igor V. Guryev
Presidente del comité organizador



7. BIBLIOGRAFÍA.

- Amaya G. Omar R., Cooz U. Marco A., Duran M. Luís R. (2007). *Modelado del viento para simulaciones computariadas de sistemas de potencia*.
- Bakker, R. H., Petersen, E., van den Berg, G. P., Stewart, R. E., Lok, W., & Bouma, J. (2012). Impact of wind turbine sound on annoyance, self-reported sleep disturbance and psychological distress. *Science of the Total Environment*, 425, 42-51.
- Boyle, M. T. and Knaub, C. (1988). Low speed wind tunnel testing, IEEE In Semiconductor Thermal and Temperature Measurement Symposium. SEMI-THERM IV., Fourth Annual IEEE (pp. 31-39).
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2001). *Wind energy handbook*. West Sussex, England.: John Wiley & Sons.
- Castelló, J., Espí, J. M., & García-Gil, R. (2016). Development details and performance assessment of a Wind Turbine Emulator. *Renewable Energy*, 86, 848-857.
- Chapman, S. J., & Jaime, P. M. (1988). *Máquinas eléctricas*. Mexico: McGraw-Hill Interamericana.
- Cirrincione, M., Pucci, M., & Vitale, G. . (2013). Neural MPPT of variable-pitch wind generators with induction machines in a wide wind speed range. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(2), 942-953.
- Commission., I. E. (1999). *IEC 61400-1: Wind turbine generator systems–Part 1: Safety Requirements*.
- Dai, W., Zhou, P., Zhao, D., Lu, S., & Chai, T. (2016). Hardware-in-the-loop simulation platform for supervisory control of mineral grinding process. *Powder Technology*, 288, 422-434.
- DS 472, T. D. (1992). *Code of practice for loads and safety of wind turbine constructions*.
- Ellis, G. (2012). Encoders and Resolvers, Control System Design Guide (Fourth Edition). Chapter 14, Pages 285-311.
- Giberti, H., & Ferrari, D. (2015). A novel hardware-in-the-loop device for floating offshore wind turbines and sailing boats. *Mechanism and Machine Theory*, 85, 82-105.
- Granados, D. (2013). Análisis en maquinaria CNC ante variaciones de bajo voltaje y sus efectos en la calidad de la energía.

- Hardy, T., & Jewell, W. . (2011). Emulation of a 1.5MW Wind Turbine with a DC Motor. *In 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting (pp. 1-8). IEEE.*
- Heidrich, L., Shyrokau, B., Savitski, D., Ivanov, V., Augsburg, K., & Wang, D. . (2013). Hardware-in-the-loop test ring for integrated vehicle control systems. *IFAC Proceedings Volumes.*
- Jaen, A. (2011). Desarrollo de perfiles polinomiales 3D basado en FPGA para control de posición en una maquina fresadora CNC.
- Kastner, I., & Matthies, E. . (2016). Investments in renewable energies by German households: A matter of economics, social influences and ecological concern. *Energy Research & Social Science, 17, 1-9.*
- Kim, K. H., Van, T. L., Lee, D. C., Song, S. H., & Kim, E. H. (2013). Maximum Output Power Tracking Control in Variable-Speed Wind Turbine Systems Considering Rotor Inertial Power. *IEEE transactions on industrial electronics, 60(8), 3207-3217.*
- Lloyd, G. (1993). *Rules and Regulations, IV Non Marine Technology. Part I: Wind Energy.* Hamburg, Germany.
- Lopes, L. A. C., Lhuillier, J., Khokar, M. F., & Mukherjee, A. (2005). A wind turbine emulator that represents the dynamics of the wind turbine rotor and drive train. *In 2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference (pp. 2092-2097). IEEE.*
- Marques, A. T., Batalha, H., Rodrigues, S., Costa, H., Pereira, M. J. R., Fonseca, C., ... & Bernardino, J. (2014). Understanding bird collisions at wind farms: An updated review on the causes and possible mitigation strategies. *Biological Conservation, 179, 40-52.*
- Martinez, F., Herrero, L. C., & de Pablo, S. (2014). Open loop wind turbine emulator. *Renewable Energy, 63, 212-221.*
- MathWorks, I. (2005). *MATLAB: the language of technical computing. Desktop tools and development environment, version 7 (Vol. 9).* Obtenido de <https://www.mathworks.com/help/econ/conditional-mean-models.html>
- Monfared, M., Kojabadi, H. M., & Rastegar, H. (2008). Static and dynamic wind turbine simulator using a converter controlled dc motor. *Renewable Energy, 33(5), 906-913.*
- Munteanu, I., Bratcu, A. I., Bacha, S., Roye, D., & Guiraud, J. (2010). Hardware-in-the-loop-based simulator for a class of variable-speed wind energy conversion systems: Design and performance assessment. *IEEE Transactions on Energy Conversion, 25(2), 564-576.*

- Ogata, K. (2003). *Ingeniería de Control Moderna*.
- Pacesila, M., Burcea, S. G., & Colesca, S. E. (2016). Analysis of renewable energies in European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 156-170.
- Petersen, E. L. (1998). *Wind power meteorology*. Roskilde, Denmark.
- Premalatha, M., Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2014). Wind energy: Increasing deployment, rising environmental concerns. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 270-288.
- Tolentino, R., Toledo, M., Tolentino, G. & Sánchez, F. (2004). Modificaciones al Túnel de Viento del LABINTHAP para Mediciones de Velocidad de Aire desde 5 m/s hasta 30 m/s. In Simposio de metrología, (pp. 25-27).
- Sajadi, A., Rosłaniec, Ł., Kłós, M., Biczal, P., & Loparo, K. A. (2016). An emulator for fixed pitch wind turbine studies. *Renewable Energy*, 87, 391-402.
- Saleem, A., Issa, R., & Tutunji, T. (2010). Hardware-in-the-loop for on-line identification and control of three-phase squirrel cage induction motors. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 18(3), 277-290.
- Saulnier, K., Pérez, D., Huang, R. C., Gallardo, D., Tilton, G., & Bevilacqua, R. . (2014). A six-degree-of-freedom hardware-in-the-loop simulator for small spacecraft. *Acta Astronautica*, 105(2), 444-462.
- Sawin, J. L., Sverrisson, F., Rickerson, W., Lins, C., Williamson, L. E., Adib, R., ... & Valero, A. (11 de Julio de 2016). *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*. Obtenido de Ren21: <http://www.ren21.net>
- Simani, S., Farsoni, S., & Castaldi, P. (2015). Wind turbine simulator fault diagnosis via fuzzy modelling and identification techniques. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 1, 45-52.
- Tavoosi, V., Kazemi, R., & Hosseini, S. M. (2014). Vehicle Handling Improvement with Steer-by-Wire System Using Hardware in the Loop Method. *Journal of applied research and technology*, 12(4), 769-781.
- Ursúa, A., Barrios, E. L., Pascual, J., San Martín, I., & Sanchis, P. (2016). Integration of commercial alkaline water electrolyzers with renewable energies: Limitations and improvements. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(30), 12852-12861.
- Wenbo, H., & Qiang, Z. (2012). The hardware-in-the-loop simulation on the control system of a small launch vehicle. *Procedia Engineering*, 29, 1867-1871.

Wold, H. (1939). *A study in the analysis of stationary time series*. Uppsala, Sweden:
Almqvist & Wiksell.