

**EMULADOR DE PERFIL DE VIENTO CON MOTOR DC MEDIANTE DSP**

**Presentado Por:  
HAROLD NARANJO BORRERO  
ADRIANA ROMERO JIMENEZ**

**Asesores:  
RAFAEL CASTILLO SIERRA  
LUIS LOPEZ DIAZ  
LORAIN NAVARRO ESTRADA  
INGRID OLIVEROS PANTOJA  
DIONISIO RAMIREZ PRIETO**



**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA PROYECTO FINAL  
BARRANQUILLA MAYO DE 2019**

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero que todo, a Dios por darnos la vida, salud y la sabiduría para realizar este proyecto.

A nuestros asesores, el Ing. Dionisio Ramírez y el Ing. Rafael Castillo, por permitirnos trabajar con ellos y aceptarnos como su grupo de trabajo. Por creer en nosotros, por su dedicación y ayuda

A nuestras familias, padres y hermanos, por su apoyo incondicional y por ofrecer su ayuda ante cualquier situación. Y a todas las personas que contribuyeron a la realización de este proyecto mil gracias.

## Tabla de Contenido

AGRADECIMIENTOS	2
1. INTRODUCCIÓN	6
2. OBJETIVOS	7
2.1. OBJETIVO GENERAL	7
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
3. DELIMITACIONES	7
3.1. ALCANCES	7
3.2. LIMITACIONES	7
3.3. ENTREGABLES	8
4. ESTADO DEL ARTE	9
5. DESCRIPCIÓN DETALLADA	11
5.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MÁQUINA DC	11
5.1.1. Determinación de los parámetros del circuito de armadura	11
5.1.2. Determinación de los parámetros del circuito de campo	12
5.1.3. Determinación del momento de inercia y coeficiente de fricción	12
5.1.4. Determinación de las constantes K y Kf	13
5.2. IMPLEMENTACIÓN CIRCUITO DE POTENCIA	16
5.2.1. Calibración de los sensores de corriente y tensión a las condiciones actuales	16
5.2.2. Conexión entre los circuitos de potencia, sensores y DSP	16
5.3. DESARROLLO DE CÓDIGO EN DSP	17
5.3.1. Configuración de los pines digitales y analógicos de la DSP	18
5.3.2. Desarrollo de código para máquina de baja potencia	18
5.3.3. Desarrollo de código para máquina de alta potencia	19
5.4. SIMULACIÓN Y CONTROL DEL MOTOR DC	19
5.5. DESARROLLO DE INTERFAZ DE USUARIO EN MATLAB	22
5.5.1. Elementos de la interfaz y diseño gráfico	22
5.5.2. Codificación de la interfaz	23
6. PRUEBAS, RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	24
6.1. VERIFICACIÓN DE CONEXIÓN INTERFAZ Y DSP	24
6.2. VERIFICACIÓN DE LA SEÑAL PWM	24
6.3. CARACTERIZACIÓN DE VELOCIDADES	26
6.4. PRUEBAS DE CARGA	27
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	27
8. BIBLIOGRAFÍA	30
9. ANEXOS	31

## Tablas

Tabla 1. Parámetros del Circuito de Armadura .....	11
Tabla 2. Parámetros del Circuito de Campo Paralelo .....	12
Tabla 3. Momento de Inercia .....	12
Tabla 4. Par Viscoso .....	13
Tabla 5. Momento de Inercia .....	13
Tabla 6. Análisis de Varianza o ANOVA .....	15
Tabla 7. Prueba T Student .....	15
Tabla 8. Parámetros del Motor de Baja Potencia.....	18
Tabla 9. Contantes utilizadas en la Simulación .....	19
Tabla 10. Valores para transformación de la Velocidad del Viento .....	23
Tabla 11. Verificación de Varianza .....	25

## Ilustraciones

Ilustración 1. Relación $K^*K_f$ .....	14
Ilustración 2. Valores de $K_f$ vs $I_f$ .....	14
Ilustración 3. Residuos .....	15
Ilustración 4. Curvas de Relación Sensores .....	16
Ilustración 5. Ecuaciones de Ajuste .....	16
Ilustración 6. Esquema de Conexiones .....	17
Ilustración 7. Pines para Señal PWM .....	18
Ilustración 8. Pines para Sensores .....	18
Ilustración 9. Modelado del Motor DC.....	20
Ilustración 10. Código FIT 3 .....	21
Ilustración 11. Sistema de Control.....	22
Ilustración 12. Interfaz Gráfica de Usuario.....	22
Ilustración 13. Conexión entre interfaz de usuario y DSP .....	24
Ilustración 14. Comparación del Ciclo Útil en Máquina de Baja Potencia .....	25
Ilustración 15. Comparación del Ciclo Útil en Máquina de Alta Potencia .....	25
Ilustración 16. Comparación entre Velocidades.....	26
Ilustración 17. Velocidad del Viento y Velocidad de la Máquina .....	27
Ilustración 18. Velocidad del Viento y Potencia .....	27
Ilustración 19. Velocidad de la Máquina y Par Desarrollado .....	28

## Ecuaciones

Ecuación 1 .....	12
Ecuación 2 .....	13
Ecuación 3 .....	13
Ecuación 4 .....	18
Ecuación 5 .....	20
Ecuación 6 .....	20
Ecuación 7 .....	20
Ecuación 8 .....	20
Ecuación 9 .....	20
Ecuación 10 .....	20
Ecuación 11 .....	20
Ecuación 12 .....	21
Ecuación 13 .....	21
Ecuación 14 .....	21
Ecuación 15 .....	21
Ecuación 16 .....	21
Ecuación 17 .....	21
Ecuación 18 .....	21
Ecuación 19 .....	23

## 1. INTRODUCCIÓN

Energía segura, económicamente competitiva (en muchas aplicaciones) y respetuosa con el clima son adjetivos que se aplican a las energías renovables (ER), de las cuales la energía eólica es la más antigua. El uso de la potencia del viento se remonta desde hace más de 5000 años para impulsar las velas de las embarcaciones en el río Nilo. Entre los años 1700 y 1800, se utilizó para moler granos y bombear agua en Europa. En 1890, se construyó lo que se considera como la primera turbina eólica para generar electricidad en Estados Unidos [1]. Durante los siguientes años los diseños de las turbinas eólicas han evolucionado, aumentando sus dimensiones y capacidad de generación.

La energía eólica representa una de las fuentes energéticas más limpias y con mayor potencial y madurez en el mercado en lo que respecta a las energías alternativas, con un total de 600 GW de capacidad instalada mundialmente [2]. Sin embargo, los avances y estudios de las tecnologías requeridas para una mayor implementación de aplicaciones eólicas son limitados por una gran problemática: la fuente de generación de los generadores eólicos es muy impredecible y presenta momentos de efectividad específicos.

Dicha situación afecta de forma drástica los tiempos de cumplimiento de los proyectos y al mismo tiempo muestran una dependencia indeseable a la hora de estudiar esta fuente. Esta problemática afecta de forma directa a varios niveles de la industria y la academia, impidiendo un proceder adecuado en las operaciones con estas fuentes de generación, así como el costo de los equipos requeridos para obtener dichas variables, en caso de que sea posible obtenerlas.

Todo lo anterior refleja la necesidad práctica de un emulador de una fuente de viento que brinde la posibilidad de interactuar con los sistemas eólicos en un entorno diferente, en el que su carácter impredecible disminuya en comparación a una instalación de campo. Este sistema le permitiría tanto a un profesor como estudiante acceder a una herramienta útil para el estudio de nuevas técnicas de control o capacitaciones de alto nivel, por ejemplo.

De esta manera, el siguiente proyecto busca obtener una independencia con respecto al método convencional de estudio de las fuentes de generación eólicas, para que así, se pueda trabajar en los diferentes proyectos referentes al tema teniendo siempre a la mano las condiciones necesarias gracias al uso del emulador y la curva de viento requerida en cada proceso.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar e Implementar un emulador de viento mediante motor DC, con el fin de obtener una fuente de potencia mecánica para aerogeneradores eólicos.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

**OE1.** Diseñar e implementar un software de procesamiento de información de series de viento y generación de señales de control para el motor.

**OE2.** Implementar circuitos electrónicos de potencia para conexión Motor-Controlador.

**OE3.** Construir una Interfaz de control HMI para el control del motor DC.

**OE4.** Validar el software y la conexión de potencia con motor mediante pruebas experimentales.

## 3. DELIMITACIONES

### 3.1. ALCANCES

- Será posible controlar el arranque y el modo de operación del motor DC como emulador de viento.
- Será capaz de procesar la información de los sensores de voltaje y corriente para el control del torque del motor DC.
- Los circuitos de potencia acoplados serán capaces de recibir las señales de control del DSP para ser amplificadas y así gobernar al motor DC.
- Los circuitos de potencia acoplados serán capaces de recibir las señales de voltaje y de corriente entregadas por los sensores y enviarlas al DSP para realizar acciones de control.
- Los circuitos de potencia estará en la capacidad de soportar los niveles máximos de potencia proporcionados por el motor de 2.5 kW.
- La interfaz será capaz de recibir una curva de viento para su posterior procesamiento de la información para ser entregada al DSP.
- Dentro de la interfaz será visible el comportamiento de velocidad, corriente y voltaje en tiempo real del motor DC.
- A través de la interfaz no será posible llevar a motor a una zona de operación riesgosa para el mismo.
- Se realizarán pruebas de funcionamiento a cada componente del sistema de forma independiente (Código en DSP y circuito de potencia) y de forma conjunta (DSP-Circuito de potencia-Motor).
- Se verificará el funcionamiento del control que realiza el sistema implementado mediante una prueba con motor DC y freno electromagnético

### 3.2. LIMITACIONES

- El software implementado tendrá un límite de datos posibles para ingresar y simular, dado por el rendimiento y capacidad de la DSP.

- Las variables medidas serán únicamente corriente y voltaje, variables como el torque y la velocidad serán estimadas en el software.
- Solo se disponen de dos circuitos de potencia, con los cuales se realizan las mediciones de corriente y tensión.
- La capacidad de estos circuitos estará restringida a la potencia máxima del motor de prueba.
- Solo se contará con el software MATLAB para el diseño de la interfaz.
- La verificación del funcionamiento del emulador solo se llevará a cabo con los motores disponibles.

### **3.3. ENTREGABLES**

- Montaje final.
- Simulación del sistema en Simulink.
- Interfaz de control para el motor DC.
- Póster.
- CD:
  - Informe final.
  - Archivo del Póster.
  - Software.
  - Presentación final.
  - Video.



#### 4. ESTADO DEL ARTE

Las investigaciones sobre desarrollo y estrategias que permitan el crecimiento de la energía eólica en el mundo son alentadoras, en ellas juega un papel importante la diversificación geográfica en la que se suman nuevas regiones como América Latina y África [3], y donde Colombia tiene un potencial eólico de 30 GW de capacidad instalable [4]. Las posibilidades de una mayor expansión en países en desarrollo están sujetas a ciertos retos tales como mayor confiabilidad y disponibilidad, menores costos de operación y mantenimiento, alcanzar de manera efectiva la vida útil de diseño y lograr una interconexión amigable con el sistema eléctrico a costos competitivos y condiciones confiables [5]. Un aspecto importante en la incorporación de aerogeneradores a un sistema eléctrico es el alto grado de no determinismo que presenta la energía proveniente del viento. Este factor hace que los sistemas que implementan turbinas eólicas requieran diversos estudios para determinar la viabilidad de un proyecto y su eficiencia.

En el marco investigativo y experimental de las tecnologías en energía eólica, se presentan ciertas limitaciones debido a la alta dependencia de la naturaleza: comportamiento del viento de acuerdo a la temporada del año y ubicación geográfica de las turbinas eólicas, por lo cual se ha buscado desarrollar una plataforma experimental controlable que permita simular entornos y comportamientos de aerogeneradores, brindando independencia de los recursos eólicos naturales a través de la emulación de los perfiles de viento de una zona en particular.

Con lo anterior, es posible optimizar los recursos necesarios para la investigación relacionada a este campo al disminuir la infraestructura civil, eléctrica y mecánica que se requiere para una prueba debido a los altos costos de un sistema eólico de prueba real. A su vez, ayuda a acortar los tiempos de ejecución de las pruebas puesto que se reduce el carácter variable de la fuente de generación y produce nuevos espacios en los que los sistemas eólicos pueden ser mejorados aumentando su inclusión en los sistemas eléctricos actuales.

Muchos de los estudios realizados sobre emuladores de aerogeneradores a la fecha son basados en motores de corriente continua [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12] y motores de inducción [13], [14]. Los motores de corriente continua (DC) son mayormente utilizados debido a su facilidad de implementación y control [9]. Además de su relación directa entre el torque del motor y corriente de rotor [6] por lo que cuando se utiliza un motor DC de excitación separada las técnicas de control son de voltaje o control de corriente de campo para obtener las características de la turbina eólica [12].

En [8], [10] se utiliza un motor DC de excitación separada con un controlador proporcional integral (PI) porque es rápido y fácil de sintetizar e implementar, en el que el emulador de [8] utiliza el valor de la velocidad de rotación de la máquina y genera un valor de par de referencia como salida. Mientras que en [10] se utiliza el valor del par y genera un valor de velocidad de referencia como salida.

Ambos estudios se centran en un esquema de control único mientras que [9] propone dos sistemas de control diferentes (velocidad y par) para así aumentar la flexibilidad del sistema; en este sistema se utiliza un sistema de generación de doble alimentación. Además, muestra la curva de par-velocidad en tiempo real durante el proceso de operación y lo compara con una turbina real, proceso que se visualiza a través de una interfaz. El emulador está basado en un sistema que utiliza un procesador digital de señales y un motor DC de excitación separada de 4.2 kW.

Los emuladores de turbinas eólicas han evolucionado como una herramienta para el estudio del proceso de conversión de potencia e incrementar la calidad de la conversión de potencia de un sistema de energía eólica [12]. En [6] se utilizó un controlador proporcional integral diferencial (PID) para el motor DC, con el que se descubrió que una típica falla del controlador PID clásico: saturación y/o wind-up, era un problema importante ya que el integrador no olvida ni descuida un gran error temporal, y hace que su salida se desvíe en gran medida en una dirección durante un largo período de tiempo.

También, si existen condiciones donde persiste un pequeño error durante un largo período de tiempo el integrador acumulará este error y su salida intentará corregirlo incluso si las condiciones que originaron el error han pasado. Si no es posible mantener la señal de error en el integrador a un valor bajo, el integrador puede tener un impacto negativo en la efectividad del control. Para solucionar este problema se limitó la entrada de la señal de error al integrador a un 10% de su valor real, para así evitar que el integrador se sature por errores transitorios, pero esta solución no aborda el problema del wind-up [6]. Las pruebas realizadas al emulador se realizaron bajo dos tipos de perfil de viento: baja velocidad y velocidad variable o turbulento, con lo cual se obtuvo que la inercia de la turbina es un factor importante en el seguimiento de la potencia de salida óptima de una turbina eólica.

Por otra parte, como método para regular la entrada de voltaje del motor DC en [7],[8], [11], [12] y [13] implementaron un convertidor DC-DC para simplificar su alimentación y control, permitir un mejor manejo de la potencia y aumentar la seguridad y eficiencia. En [7], [11] y [12], por ejemplo, utilizan un convertidor tipo Buck donde llega la señal PWM y la de la fuente de alimentación DC que luego alimenta al motor DC.

Para propósitos de este proyecto, se usará un motor DC para simular el perfil de viento controlando su velocidad angular a partir de mediciones de voltaje y de corriente y controlando la salida del motor en función de un convertidor DC-DC, el cual envía, a través de un procesador digital de señales o DSP, una señal de tipo PWM para controlar el motor en variaciones de ciclo de trabajo. El control fue basado en un doble lazo de retroalimentación Maestro-Eslavo donde el primer lazo controla la velocidad y el segundo el par o torque, lo anterior permitiendo un control más rápido y preciso del motor ante los cambios en el set point deseado.

## 5. DESCRIPCIÓN DETALLADA

Para la elaboración del emulador de viento, en primera instancia se realizó la caracterización de la máquina de potencia a utilizar. El software que se seleccionó para realizar la correcta emulación del viento será un procesador digital de señales o DSP, el cual es un sistema basado en microprocesadores con los cuales es posible realizar operaciones a muy alta velocidad. Se llevó a cabo la adecuación de los circuitos de potencia con los cuales se adquieren las mediciones de tensión y corriente necesarias para realizar el control sobre la máquina, y además estos circuitos permiten la conexión entre DSP y motor. Conjuntamente se desarrolló el código para la implementación del sistema de control, el cual permitirá la emulación de los perfiles de viento a partir de una señal de control de tipo PWM, la cual modifica el ciclo útil de una señal periódica cuadrada variando el ancho del pulso generado. A partir de esta señal será posible modular la entrada del motor y así controlar su velocidad. Con los parámetros de máquina encontrados fue posible simular su comportamiento a diferentes condiciones, y con ello calcular controladores apropiados para realizar las acciones de control que permitirán la emulación. Adicionalmente, se diseñó una interfaz de usuario para facilitar el manejo del sistema. Por último, se hicieron pruebas para comprobar el correcto funcionamiento del sistema, colocando el mismo a diferentes situaciones de carga.

### 5.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MÁQUINA DC

La primera etapa en el desarrollo del proyecto fue la caracterización de la máquina DC disponible en el laboratorio de máquinas eléctrica de la Universidad del Norte. La caracterización mencionada consistió en una serie de pruebas que llevan a determinar de forma experimental los parámetros eléctricos y mecánicos de la máquina DC. Para este proyecto es necesario conocer la resistencia de armadura ( $R_a$ ), inductancia de armadura ( $L_a$ ), resistencia de campo ( $R_f$ ), inductancia de campo ( $L_f$ ), el momento inercial ( $J$ ), el coeficiente fricción ( $B$ ) y las constantes eléctricas ( $K$  y  $K_f$ ).

#### 5.1.1. Determinación de los parámetros del circuito de armadura

Para el cálculo de los parámetros del circuito de armadura se realizó una prueba basada en la ley de Ohm, alimentando el circuito del motor DC de alta potencia que se utilizó a lo largo de todo el proyecto con tensiones de DC y AC, para identificar tanto la resistencia de armadura como la inductancia de armadura, a partir de mediciones de voltajes y corrientes. Para el cálculo de la inductancia se utilizó la definición de la reactancia en corriente alterna  $X_l = 2\pi fL$ , la definición de impedancia y la resistencia encontrada en la prueba DC, donde  $f$  es la frecuencia del sistema y  $L$  es la inductancia [15].

Prueba en DC		Prueba en AC	
Voltaje [V]	2.32	Voltaje [V]	15.98
Corriente [A]	1.002	Corriente [A]	1.5
$R_a$ [ $\Omega$ ]	2.315	Impedancia [ $\Omega$ ]	10.7
		$L_a$ [mH]	27.6

Tabla 1. Parámetros del Circuito de Armadura

### 5.1.2. Determinación de los parámetros del circuito de campo

Para el cálculo de los parámetros del circuito de armadura se realizó una prueba basada en la ley de Ohm, alimentando el circuito del motor DC que se usará en todo el proyecto con tensiones de DC y AC, para identificar tanto la resistencia de campo como la inductancia de campo, a partir de mediciones de voltajes y corrientes. Al igual que para el circuito de armadura se utilizó la definición de reactancia e impedancia para encontrar la resistencia e inductancia de campo respectivamente [15].

Prueba en DC		Prueba en AC	
Voltaje [V]	167.6	Voltaje [V]	100
Corriente [A]	0.3	Corriente [A]	2.17E-03
Rf [Ω]	559	Impedancia [Ω]	46083
		Lf [mH]	122230

Tabla 2. Parámetros del Circuito de Campo Paralelo

### 5.1.3. Determinación del momento de inercia y coeficiente de fricción

Se calculó la inercia del rotor haciendo uso de la geometría, masa obtenida con la balanza y medidas del rotor del motor DC del proyecto. El momento de inercia J de un cuerpo alrededor de un eje dado es una medida de su inercia rotacional: cuanto mayor sea el valor de J, más difícil será cambiar el estado de rotación del cuerpo [16]. Se encontró el momento de inercia del rotor aproximando esta pieza a un cilindro rígido. Basándose en su definición, el momento de inercia de un cilindro está dado por:

$$J = 0,5 * M * R^2$$

Ecuación 1

	Letra representativa	Valor de la constante
Masa [Kg]	<i>M</i>	5.348
Radio [m]	<i>R</i>	0.0342
Inercia [Kg*m <sup>2</sup> ]	<i>J</i>	0.00313

Tabla 3. Momento de Inercia

Para el coeficiente de fricción viscosa se desarrolló una estimación basados en la ecuación diferencial que representa al torque inducido en el motor, considerando los estados estacionarios del modelo de las máquinas DC, donde usando un cálculo de potencia convertida máxima (Verdadera potencia mecánica entregada por el motor) y a velocidad nominal (3600 RPM). Con esto se logra obtener un valor estimado de la fricción viscosa para cada valor de voltaje. Para determinar el valor a utilizar en el modelo de la máquina DC, se

realizó un promedio entre los pares desarrollados con valores de voltaje típicos para la representación de la curva de viento, los cuales rondaran el voltaje nominal de la máquina.

Voltaje [V]	Par Viscoso [N/RPM]
200	9.068E-05
210	0.000109
220	0.000115
Promedio	0.000105

Tabla 4. Par Viscoso

#### 5.1.4. Determinación de las constantes K y Kf

Para la determinación la constante K se partió de la fórmula que relaciona este valor con el número de conductores, los polos y la cantidad de caminos de corriente, asumiendo que la forma del rotor es imbricada, la cual está dada por la ecuación 2.

$$K = \frac{ZP}{2\pi a}$$

Ecuación 2

Donde Z o número total de conductores se obtiene por la ecuación 3.

$$Z = 2CNc$$

Ecuación 3

	Letra representativa	Valor de la constante
<i>Numero de Bobinas</i>	C	30
<i>Número vueltas por Bobina</i>	N <sub>c</sub>	1
<i>Número total de Conductores</i>	Z	60
<i>Polos</i>	P	2
<i>Caminos de corriente</i>	a	2
<i>Constante de Proporcionalidad</i>	K	9.55

Tabla 5. Momento de Inercia

Luego tomando los datos de la curva de magnetización se encontró impedancia mutua del circuito de campo y de armadura, y partiendo de este dato y la velocidad de la máquina se calculó la inductancia mutua entre los circuitos, la cual es proporcional a K por Kf [15].

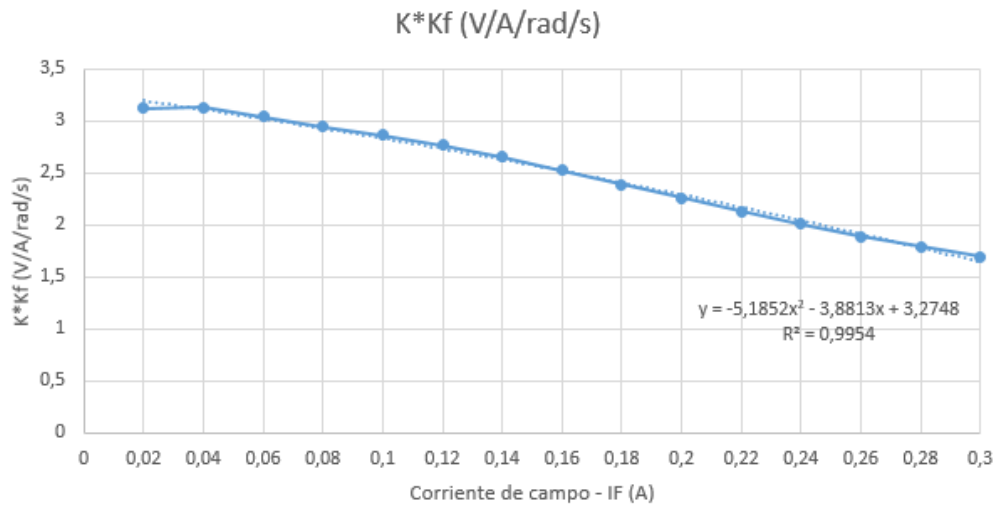


Ilustración 1. Relación K\*Kf

Dada esta relación y teniendo el valor de K para todos los casos, se pudo calcular el valor de Kf para cada corriente de campo correspondiente.

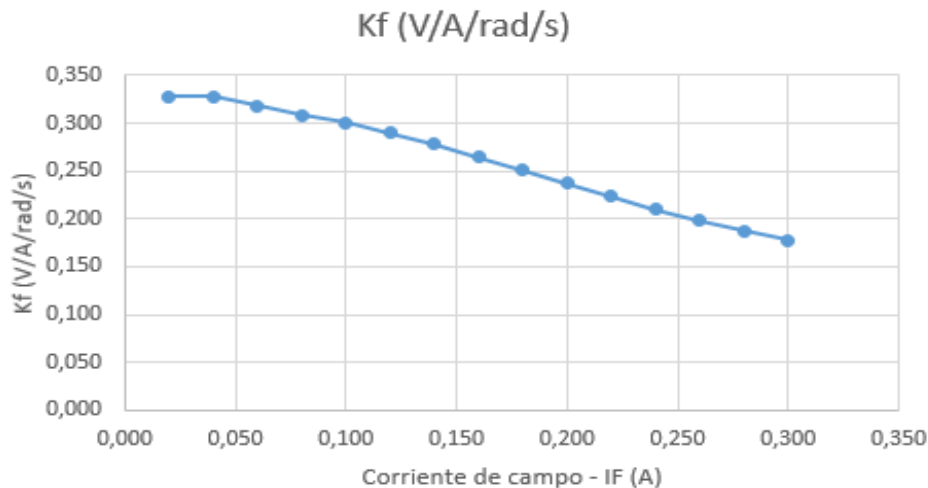


Ilustración 2. Valores de Kf vs If

Debido a que la máquina de alta potencia a utilizar está conectada en derivación, fue necesario en la codificación del software de control tener una función que a partir de la corriente de campo If calculada se pudiera obtener los distintos valores de Kf.

A partir de los datos de Kf obtenidos con las pruebas anteriores se construyó una regresión para encontrar una función para determinar este parámetro. Al realizar esta regresión se obtuvieron varios análisis con los cuales se pudo determinar si la regresión se ajustaba adecuadamente a los datos reales.

Grados de libertad		Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor Crítico de F
Regresión	1	0.0377	0.0377	1322.172	1.833E-14
Residuos	13	0.0004	2.852E-05	0,000109	
Total	14	0,038		0,000115	

Tabla 6. Análisis de Varianza o ANOVA

El primero de estos estudios es el análisis de varianza o ANOVA, en el cual se evalúa la importancia de uno o más factores al comparar las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles [17]. Al analizar el valor crítico de F, se puede observar que este es mucho menor al valor alfa típico que se utiliza en este tipo de pruebas, que en nuestro caso escogimos en de 5%.

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	0.352782335	0.002901586	121.5825927	2.96219E-21
IF (A)	-0.58020866	0.015956595	-36.36168371	1.83276E-14

Tabla 7. Prueba T Student

El siguiente análisis aplicado fue la prueba T Student, con la que fue posible demostrar que los valores de los coeficientes de la regresión realizada sean efectivamente valores distintos a cero. Esto se puede comprobar cuando las probabilidades de que este evento ocurra se acercan a cero. Como se muestra en la Tabla 7, las probabilidades de que alguno de los coeficientes realmente sea nulo está muy por debajo del alfa aceptable de 5%, lo cual indica que el modelo de regresión utilizado es correcto.

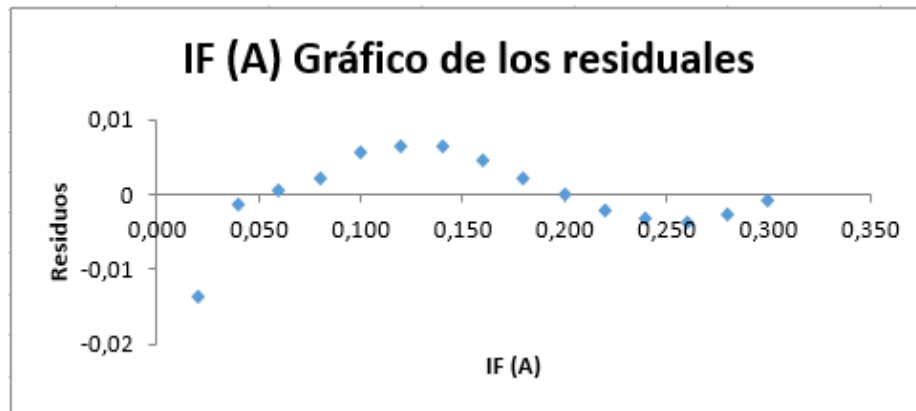


Ilustración 3. Residuos

Por último se analizó el comportamiento de los residuos entre los datos reales y los calculados con la fórmula obtenida con la regresión. Si estos no presentan ningún tipo de conducta se puede corroborar que son debidos únicamente a errores aleatorios. Para nuestro estudio, a pesar de tener un visible comportamiento sinusoidal en los residuos, se concluyó que este error se debía a la forma de la toma de datos, y por ende no afectaba de mayor manera al rendimiento del modelo. Con base a estas pruebas se comprobó que con

esta regresión lineal, la formula obtenida se ajustaba lo suficiente para calcular los valores de Kf necesarios.

## 5.2. IMPLEMENTACIÓN CIRCUITO DE POTENCIA

Se utilizaron tres circuitos de potencia: el circuito conversor DC-DC para el control del motor, circuito acondicionador del sensor de voltaje y circuito acondicionador del sensor de corriente. Fue necesario realizar una calibración previa de los sensores anteriormente mencionados antes de realizar el montaje.

Para ensamblar y acoplar todos los circuitos primero fue necesario conocer los valores nominales de corriente del motor y de la DSP, para escoger los elementos de protección más adecuados y así brindarle al montaje los niveles de seguridad requeridos.

### 5.2.1. Calibración de los sensores de corriente y tensión a las condiciones actuales

Se realizaron las pruebas para la calibración de los sensores utilizando el motor de baja potencia. Para estas pruebas se colocaron los sensores a distintas entradas de voltaje y corriente y se realizó la medición de la traducción de estos valores a un voltaje de salida, observados a través de un multímetro. Esto con el fin de confirmar que la relación de transformación de estos sensores fue constante.

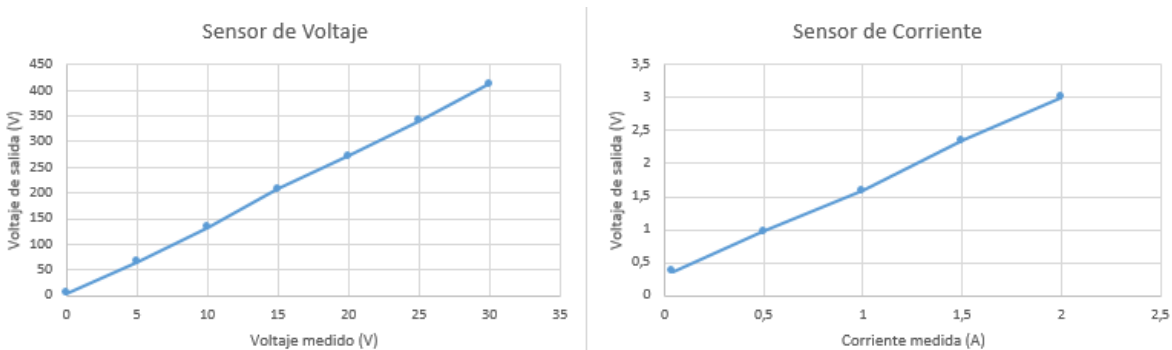


Ilustración 4. Curvas de Relación Sensores

Conociendo los valores de las mediciones y la relación de transformación se pudo determinar la desviación que poseen las medidas analógicas tomadas entrar al software con respecto a los valores reales censados. A partir de esto se procedió a buscar constantes de calibración por el método de tanteo, las cuales fueron empleadas en el código para obtener de manera más precisa la medición necesaria para el control de la velocidad.

```
I_motor_DC = 0.001595*((int)Adc2Result.ADCRESULT8-2034);  
Vdc        = 0.130*((int)Adc1Result.ADCRESULT0-1660);
```

Ilustración 5. Ecuaciones de Ajuste

### 5.2.2. Conexión entre los circuitos de potencia, sensores y DSP

Se realizaron las interconexiones entre los circuitos de potencia y la DSP dentro de una caja de protección 40 x 35 x 20 cm, cumpliendo las normativas de seguridad requeridas como el



uso de un calibre adecuado para cada sección del montaje, para la sección de potencia y de alimentaciones, en función de los límites de corriente de los circuitos del convertor DC/DC, se escogió un calibre 14 AWG que maneja niveles similares de corriente a los solicitados por el Motor DC en nominal. Además de esto se colocaron borneras interconexiones para tener mejor visión de las conexiones y así poder tener mayor seguridad sobre los integrados y el funcionamiento general del sistema.

Con respecto a los elementos de protección, se utilizaron fusibles a la entrada de la fuente de tensión y a la salida que va hacia el motor. Los fusibles se seleccionaron de 10 amperios ya que la corriente máxima que puede recibir el motor es de 6,5 amperios. Además se colocaron en estas entradas luces piloto que encenderán cuando se tenga el voltaje nominal del motor. La alimentación de los circuitos, y las señales digitales y de potencia que entregan estos se midieron a través de borneras.

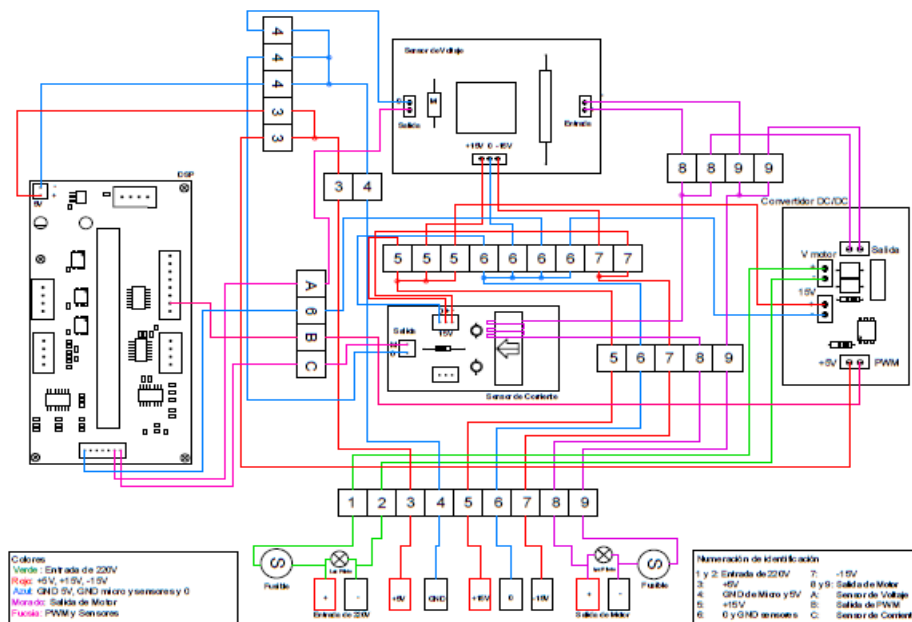


Ilustración 6. Esquema de Conexiones

### 5.3. DESARROLLO DE CÓDIGO EN DSP

En primera instancia se construyó un código que permite realizar la emulación del viento deseado con un motor DC de baja potencia (Motor de imán permanente), con el cual se realizaron las primeras pruebas de funcionamiento. Para la realizar estas pruebas se configuraron los pines analógicos y digitales del DSP como entradas y salidas, las cuales reciben y envían las señales necesarias para poder ejercer el control sobre el motor.

Posteriormente, tomando el código desarrollado para el motor de baja potencia, se ajustaron con los parámetros pertenecientes a la máquina de alta potencia y se realizó una modificación de los parámetros de control. Por seguridad se llevó a cabo una simulación previa en Simulink para corroborar el buen funcionamiento del código con esta última máquina antes de realizar la validación final.

### 5.3.1. Configuración de los pines digitales y analógicos de la DSP

Dentro del código base para realizar el control de los motores se seleccionaron los pines necesarios para poder suministrar al circuito conversor DC-DC la señal de salida que contiene la señal de control PWM generada, y los pines de entrada para adquirir los datos analógicos de las mediciones realizadas con los sensores de tensión y corriente.

```
// PWM pins for electronic converter:
/* Configure ePWM pins using GPIO regs: GPIO functionality GPIO6-GPIO11: ePWM 4-5-6: 4A,
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO6 = 1; // Configure GPIO6 as EPWM4A;
// WATCH OUT!!: IT IS NECESSARY A JUMPER IN THE "connectivity mux" IN THE CONCERTO BOARD
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO7 = 1; // Configure GPIO7 as EPWM4B
```

Ilustración 7. Pines para Señal PWM

```
I_motor_DC = 0.001595*((int)Adc2Result.ADCRESULT8-2034); // ADC2 A0; En la placa: primer pin del conector ADC: A
Vdc = 0.130*((int)Adc1Result.ADCRESULT0-1660); // ADC1 A0; En la placa: segundo pin del conector ADC:B
```

Ilustración 8. Pines para Sensores

### 5.3.2. Desarrollo de código para máquina de baja potencia

Con base a una versión de un código general para un motor de imanes permanentes de baja potencia proporcionada por uno de nuestros asesores, se calcularon los valores necesarios para el realizar el control de velocidad de esta máquina. Estos valores corresponden a la Resistencia de armadura del motor, la cual se calculó a partir de la prueba de rotor bloqueado, y la constante de fuerza contra electromotriz K, la cual para esta máquina se calcula a partir de los datos de velocidad y tensión que se obtienen mientras la máquina se comporta como un generador. A partir de estos parámetros, la caída de tensión que se presenta en los circuitos de potencia y las mediciones realizadas de tensión y corriente se estima la velocidad de la máquina, dato que permitirá utilizar los controladores PI para obtener la señal requerida de PWM, con la cual es posible ajustar la velocidad del motor y lograr la simulación de la curva de viento. Esta velocidad es calculada mediante la siguiente formula.

$$W = (V_{dc} * DC - R_a * I_{dc} - U_{igbt})/K$$

Ecuación 4

Donde W es la velocidad calculada de la máquina,  $V_{dc}$  el voltaje medido, DC el ciclo útil de la señal PWM,  $R_a$  la resistencia del circuito de armadura,  $I_{dc}$  la contra electromotriz corriente medida,  $U_{igbt}$  la caída de tensión en los circuitos y K la constante de fuerza contra electromotriz.

Constantes de la Máquina	Valor de la constante
$R_a$ [ $\Omega$ ]	166.667
$K$ [ $V*s/rad$ ]	2.792

Tabla 8. Parámetros del Motor de Baja Potencia

Los parámetros de control de este código no fueron cambiados ya que, con las constantes iniciales, el motor se comportaba de manera adecuada. Además no fue posible diseñar un modelo dinámico adecuado para representar el motor de baja potencia, y por ello no se podía determinar de manera apropiada un controlador óptimo para el mismo.

### 5.3.3. Desarrollo de código para máquina de alta potencia

Basándonos en el código para la máquina de baja potencia, se actualizaron los valores requeridos a los obtenidos en la caracterización del motor de alta potencia, y además se modificó la forma de obtención de las corrientes dentro del código. Dado que este es un motor DC conectado en derivación, la corriente que mide el sensor no corresponde únicamente a la corriente de armadura, la cual es necesaria para realizar el control de la máquina. La corriente medida tiene una componente que se utiliza en el circuito de campo del motor, por ello es necesario realizar la estimación de este parámetro para calcular la corriente requerida. Teniendo la aproximación de la corriente de campo del motor, es posible calcular además el parámetro  $K_f$  necesario para la estimación de la velocidad. Luego a partir del dato de la medición de tensión y corriente calculada se estima la velocidad de la máquina, mediante la fórmula utilizada para la máquina de baja potencia, dato que permitirá utilizar los controladores PI para obtener un porcentaje equivalente de la señal PWM, con la cual es posible ajustar la velocidad del motor y lograr la simulación de la curva de viento.

Esta máquina al ser de mayor capacidad necesita parámetros de control diferentes a los de la máquina de baja potencia. Por ello se recurrió a teoría de control para cálculo de un controlador adecuado para el modelo dinámico de la máquina, basando en el comportamiento de la máquina en la simulación previamente elaborada [18].

## 5.4. SIMULACIÓN Y CONTROL DEL MOTOR DC

A partir de las ecuaciones representativas del motor DC y de los coeficientes calculados, se logra obtener un sistema dinámico en Simulink que nos muestra el mismo comportamiento que el observado por el motor durante las pruebas, permitiéndonos poder hacer una representación del motor para simulaciones virtuales a la hora de desarrollar la teoría de control para el cálculo de los coeficientes de ganancia y de constante de tiempo para el control de velocidad del motor.

Constantes de la Máquina	Valor de la constante
$R_f$ [ $\Omega$ ]	559
$R_a$ [ $\Omega$ ]	2.29
$L_f$ [H]	122.229
$L_a$ [H]	0.02842
$K'$ [V*s/rad]	1.224
$B$ [N*m*s/rad]	0.00344
$J_m$ [Kg*m <sup>2</sup> ]	0.00274

Tabla 9. Contantes utilizadas en la Simulación

Las ecuaciones dinámicas del motor DC para el modelo de Simulink que fueron utilizadas son las presentadas a continuación:

$$V_t = E_a + R_a * I_a + L \frac{dI_a}{dt}$$

Ecuación 5

$$V_t = R_f * I_f + L \frac{dI_f}{dt}$$

Ecuación 6

$$E_a = K * \Phi * w$$

Ecuación 7

$$\Phi = K_f * I_f$$

Ecuación 8

$$I = I_f + I_a$$

Ecuación 9

$$T_m = K * \Phi * I_a$$

Ecuación 10

$$T_m - T_d = J \frac{dw}{dt} + B * w$$

Ecuación 11

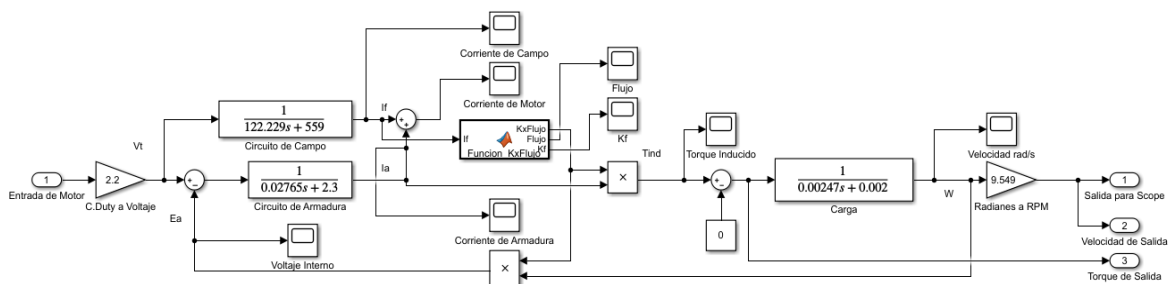


Ilustración 9. Modelado del Motor DC

Para ello se recurrió a un modelo de 2 lazos de retroalimentación negativo tipo Maestro-Escavo, basados en referencias de velocidad para el maestro y de par para el esclavo, lo anterior buscando una mejor respuesta y estabilidad para el sistema gracias a la rapidez de la respuesta por parte del lazo esclavo, todo ello haciendo uso en ambos lazos con controladores Proporcionales-Integrales (PI). Para el cálculo de los parámetros de los controladores se hizo uso del método FIT-3 [18]. En este método se busca hacer una aproximación válida de primer orden para una función de transferencia de orden superior, calculando los parámetros principales del modelo de primer orden como son la ganancia, la constante de tiempo  $Tao$  y el tiempo muerto. El método permite la obtención del modelo de primer orden gracias a la relación entre la entrada, la cual fue un paso escalón, y la salida del sistema, la cual fue una respuesta sub-amortiguada, mostrando de esta forma la posibilidad de la aproximación.

```

function [Kp,Taop,t0]=fit3(C)
% C - La primera entrada del mux será la salida del sistema
% La segunda entrada del mux será la entrada del sistema
% ts - Step Time Sample: i.e., the sample corresponding to the time at which the step test is initiated
a=size(C);
y=0;
for j=1:1:a(1)
    if C(j,2)==0 && y==0
        ts=3;
        y=1;
    end
end
dm=C(end,3)-C(ts-1,3); %Step Change in Signal m (%CO)
dc=C(end,2)-C(ts,2); %Change in signal c (%TO)
Kp=dm/dm; %Gain
c1=C(ts,2)+0.283*dm; c2=C(ts,2)+0.632*dm;
if C(end,2)>C(ts,2)
    for j=ts:size(C,1)
        if C(j,2)<c1 && (c1<C(j+1,2))
            t1=interp(C(j:j+1,2),C(j:j+1,1),c1);
        end
        if C(j,2)<c2 && (c2<C(j+1,2))
            t2=interp(C(j:j+1,2),C(j:j+1,1),c2);
        end
    end
else
    for j=ts:size(C,1)
        if C(j,2)>c1 && (c1>C(j+1,2))
            t1=interp(C(j:j+1,2),C(j:j+1,1),c1);
        end
        if C(j,2)>c2 && (c2>C(j+1,2))
            t2=interp(C(j:j+1,2),C(j:j+1,1),c2);
        end
    end
end
Taop=(3/2)*(t2-t1); %Time Constant
t0=t2-Taop-C(ts,1); %Dead Time
fprintf('Valor de ganancia es de %f \n',Kp);
fprintf('Valor de Taop es de %f \n',Taop);
fprintf('Valor de Tiempo muerto es de %f \n',t0);
Kc_prime=Taop/(Kp*(2*t0));
Taoi_prime=Taop;
Tao_d_prime=t0/2;
Kc=Kc_prime*(1+(Tao_d_prime/Taoi_prime));
Taoi=Tao_d_prime+Taoi_prime;
Ki=Kc/Taoi;
fprintf('Valor de ganancia integradores de %f \n',Ki);
fprintf('Valor de const. de tiempo integrador es de %f \n',Taoi);

```

Ilustración 10. Código FIT 3

$$\frac{\text{Salida}}{\text{Entrada}} = \frac{Kp * e^{t0}}{Tp * s + 1}$$

Ecuación 12

A partir de estos valores, a partir de la teoría de control del libro de Smith y Corripio [18], se puede hacer uso de los valores de ganancia y constante de tiempo calculados para la obtención de las constantes de los controladores, los cuales son, la ganancia del controlador proporcional y, la ganancia y la constante de tiempo del controlador integral, a partir de las siguientes ecuaciones:

$$Kc' = \frac{Tp}{Kp * 2 * t0}$$

Ecuación 13

$$Ti' = Tp$$

Ecuación 14

$$Td' = \frac{t0}{2}$$

Ecuación 15

$$Kc = Kc' \left( 1 + \frac{Td'}{Ti'} \right)$$

Ecuación 16

$$Ti = Td' + Ti'$$

Ecuación 17

$$Ki = \frac{Kc}{Ti}$$

Ecuación 18

Una vez que se calcularon los valores de los controladores, a través de Simulink se buscó modelar los controladores para el modelo de motor DC. A continuación se presenta el diagrama de bloques del sistema de control general del modelo eólico.

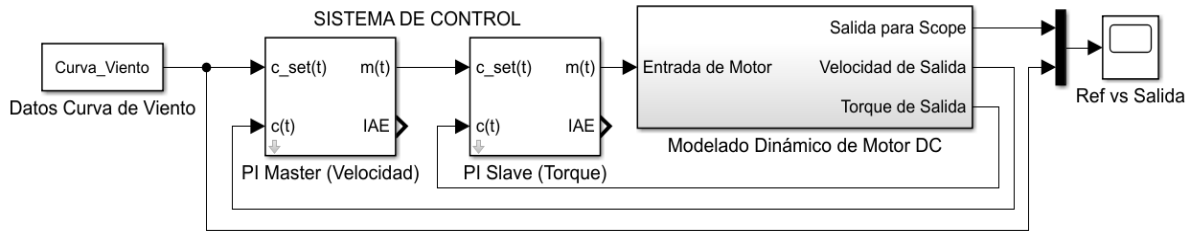


Ilustración 11. Sistema de Control

## 5.5. DESARROLLO DE INTERFAZ DE USUARIO EN MATLAB

Se desarrolló una interfaz gráfica con el fin de servir de intermediario entre el usuario y el programa principal de control ubicado en el DSP. A través de esta era posible introducir los datos de los perfiles de viento que se desean emular con el motor digitándolos como velocidades o porcentaje de la PWM. Además era posible realizar un control manual de los parámetros del sistema. Adicionalmente, la interfaz permite observar el comportamiento en tiempo real del motor a través de gráficas de corriente, voltaje y velocidad. Con estos datos se permite validar el correcto funcionamiento del código desarrollado y el enlace con la DSP.

Para la construcción de esta interfaz fue necesario un proceso de planeación de diseño, donde se seleccionó la forma de adquisición de datos, así como se definió la forma apropiada para la presentación de los datos de salida al usuario de destino.

### 5.5.1. Elementos de la interfaz y diseño gráfico

Se seleccionaron las variables necesarias para ser mostradas, como lo son la velocidad estimada del motor, la curva viento y los valores de tensión y corriente medidos. Se decidió colocar estos datos en forma de gráficas variantes en el tiempo, las cuales permiten comprender y analizar los datos de manera rápida.

Teniendo definidas las variables y la forma en que se presentarán estos datos dentro de la interfaz, se plasmó un diseño el cual permite la interacción e ingreso de los datos requeridos, y posibilita la visualización de los mismos.

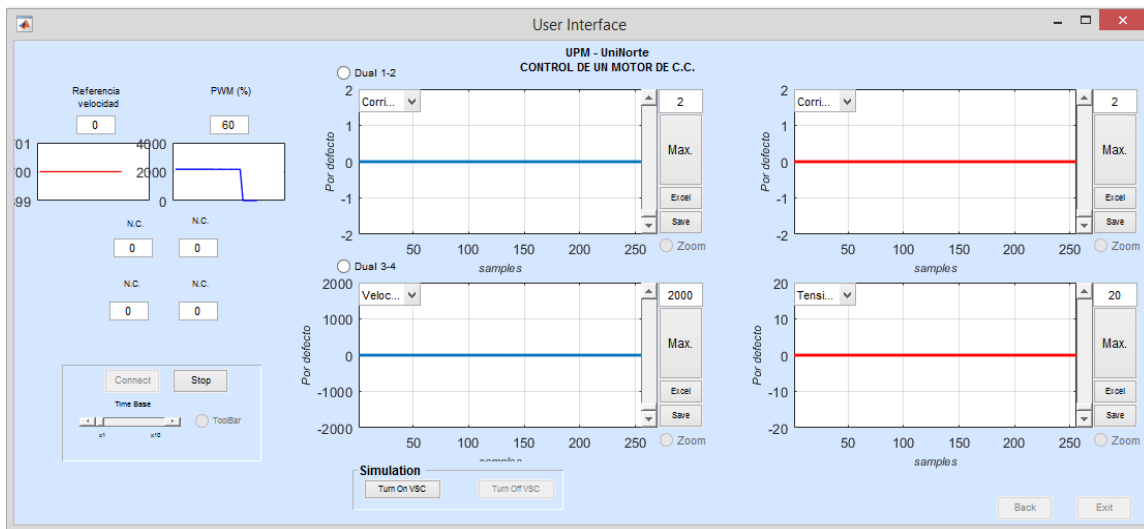


Ilustración 12. Interfaz Gráfica de Usuario

## 5.5.2. Codificación de la interfaz

Esta interfaz de usuario, además de permitir observar los datos medidos y calculados de manera más adecuada, está bajo un régimen de simulación que permite el control y variación de distintos componentes del sistema, como es el ciclo útil de la señal PWM y el Set Point de la velocidad que entra al sistema de control. Esto es posible dada a la adquisición y transferencia de estos datos desde MATLAB hasta el entorno de la programación del DSP, llamado Code Composer. Además dentro de la interfaz es posible cambiar los pines de medición de las señales de voltaje y corriente, observar dos gráficas superpuestas en un mismo axis y guardar los datos tomados en un documento tipo Excel. La conexión de la interfaz de usuario a Code Composer se realizó mediante una serie de casos basados en los estados de los botones dentro de la interfaz de usuario.

A la interfaz era necesario ingresar los valores de las curvas de viento en m/s, pero debido a la codificación era necesario transformar estos valores a RPM, por ello fue necesario la obtención de una ecuación representativa de revoluciones por minuto en función de la velocidad de viento. Para encontrar dicha ecuación se recurrió a la relación de potencia entregada por la turbina y la relación de potencia entregada por el motor en función del torque [10]. Para ello primero se buscó un grupo de referencias de turbina con igual valor nominal de potencia entregada que el motor que se usará para emular el viento, luego de ello se asumió que el valor del coeficiente de potencia de la turbina rondará en sus valores nominales, entre el 47 y el 42 por ciento, y que la eficiente del motor en términos de potencia mecánica será del 76 por ciento de la potencia eléctrica entregada por el motor. Finalmente, usando las suposiciones anteriores se obtuvo la función descrita en la ecuación 6, con las relaciones deseadas

$$vel = \sqrt[3]{\frac{2 * (Vt * I * \%PWM * n) * \omega}{\rho * \pi * R^2 * Cp}}$$

Ecuación 19

	Letra representativa	Valor de la constante
Voltaje en Terminales [V]	$Vt$	220
Corriente del Motor [A]	$I$	1.5A – 4.5
Ciclo Útil [%]	$PWM$	100-70
Eficiencia del Motor DC [%]	$n$	47
Densidad del aire [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho$	1.225
Radio Promedio de Rotor de turbina [m]	$R$	2.2
Coficiente de Potencia[%]	$Cp$	42 - 47
Velocidad angular del motor DC	$\omega$	-
Velocidad de viento de entrada	$vel$	-

Tabla 10. Valores para transformación de la Velocidad del Viento

## 6. PRUEBAS, RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1. VERIFICACIÓN DE CONEXIÓN INTERFAZ Y DSP

Teniendo el montaje adecuado tanto para la máquina de baja como para la de alta potencia, se procedió a verificar la correcta conexión entre DSP y la interfaz de usuario manejada. Para esto se recurrió a la ventana Expressions que maneja el software Code Composer, la cual permite la visualización de las variables dentro de la interfaz que están cambiando a medida que se maneja el sistema. Utilizando únicamente el pin que produce la señal PWM se realizaron distintas variaciones tanto en el ciclo útil de la PWM como en la velocidad consigna que buscará el sistema de control, y se comprobó que el software efectivamente recibiera dichos cambios en estas señales.

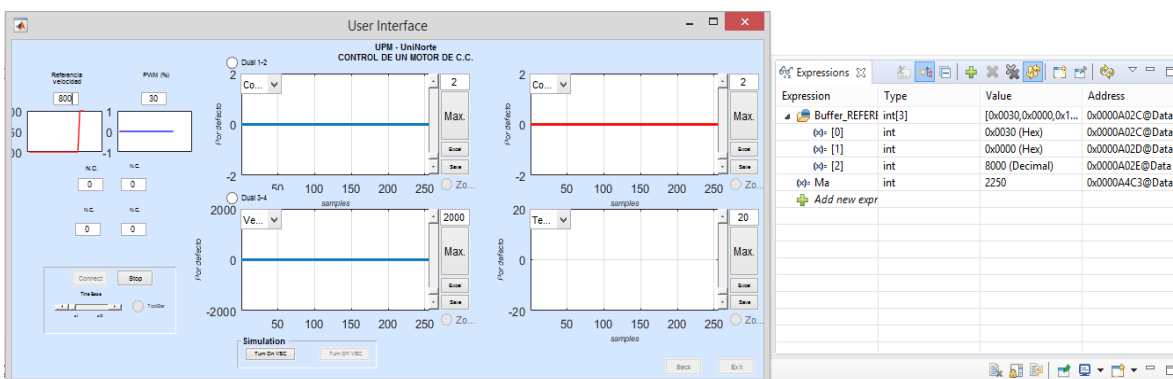


Ilustración 13. Conexión entre interfaz de usuario y DSP

Con esto es posible validar el correcto funcionamiento de la conexión entre el software manejado en Code Composer y la interfaz de usuario desarrollada en MATLAB.

### 6.2. VERIFICACIÓN DE LA SEÑAL PWM

Para comprobar que el sistema es capaz de brindar un voltaje en terminales deseado en función del envío de un ciclo de trabajo definido por el usuario en el software, se realizó una prueba tanto la para la máquina de baja como en la de alta potencia.

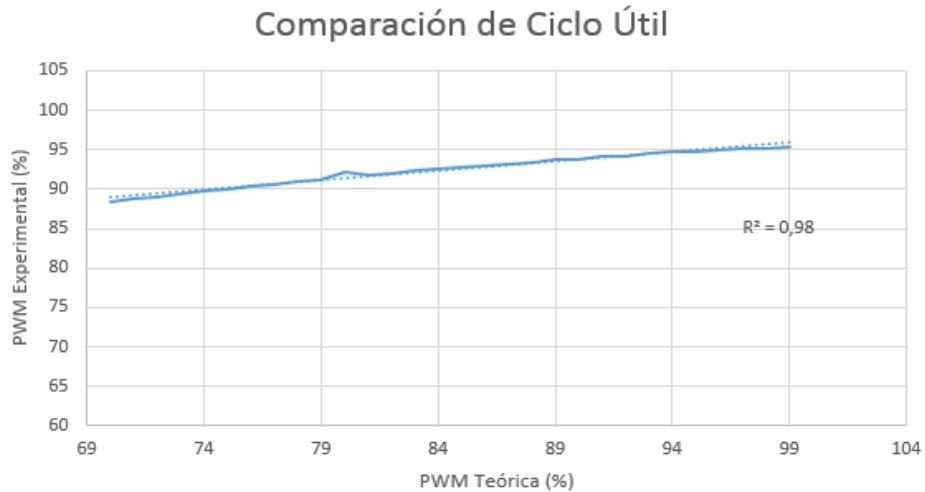
Para esta prueba, haciendo uso de la interfaz, se ingresaron diferentes ciclos de trabajo para variar la salida de tensión del motor DC en función de su tensión nominal de 220V. Para esta prueba se tomaron 30 mediciones con variaciones en la PWM del 1% desde empezando en 100% hasta llegar al 70% de la misma.

Estas medidas se contrastaron con el ciclo útil real a la salida del convertor DC-DC. Para determinar el valor del ciclo útil que realmente llegaba a la máquina, se utilizó la relación entre el voltaje medido en terminales y el voltaje utilizado para alimentar el convertor. Para comprobar esta premisa se llevó a cabo la siguiente prueba de hipótesis.

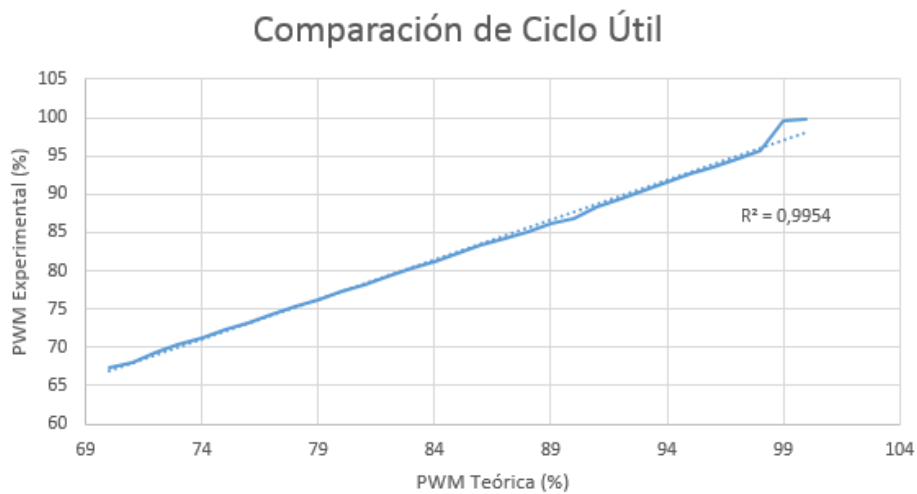
H0: El ciclo útil generado se ve correctamente reflejado en el voltaje que recibe el motor.

H1: Existe una diferencia considerable entre el ciclo útil deseado y el ciclo útil entregado.





*Ilustración 14. Comparación del Ciclo Útil en Máquina de Baja Potencia*



*Ilustración 15. Comparación del Ciclo Útil en Máquina de Alta Potencia*

Partiendo de estas mediciones se procedió a realizar pruebas estadísticas con la herramienta Stargraphics para corroborar que realmente los datos obtenidos tengan la menor desviación posible entre sí. Primero se ejecutó un análisis de varianza para analizar si hay diferencias significativas entre las medidas realizadas.

Comparación	Sigma1	Sigma2	F-Ratio	P-Valor
PWM medida / PWM teórica	9,649	9,09212	1,12625	0,7468

*Tabla 11. Verificación de Varianza*

Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95,0% de confianza.

Luego se realizó una prueba T Student para comparar las medias de las dos muestras. En este caso, la prueba se ha construido para determinar si la diferencia entre las dos medias de los datos es igual a 0,0 versus la hipótesis alterna de que la diferencia no es igual a 0,0. Con esta prueba el valor P calculado fue de 0,271059. Ya que este valor no es menor que 0,05 no se puede rechazar la hipótesis nula.

Con esto fue posible validar que la hipótesis nula previamente planteada es acertada, y así comprobar la correcta correspondencia entre la PWM generada con el código y el ciclo útil que percibe el motor en sus terminales.

### 6.3. CARACTERIZACIÓN DE VELOCIDADES

Con esta prueba se comprobó la relación entre las velocidades desarrolladas con el ciclo útil generado por el proyecto y las velocidades que se obtienen con un control manual sobre el voltaje de la máquina de alta potencia.

Para los datos de la máquina basada en control manual se tiene que tener en cuenta que la determinación del valor del ciclo útil que realmente llegaba a la máquina se obtuvo a través de la relación entre el voltaje medido en terminales y el voltaje utilizado para alimentar el convertidor.

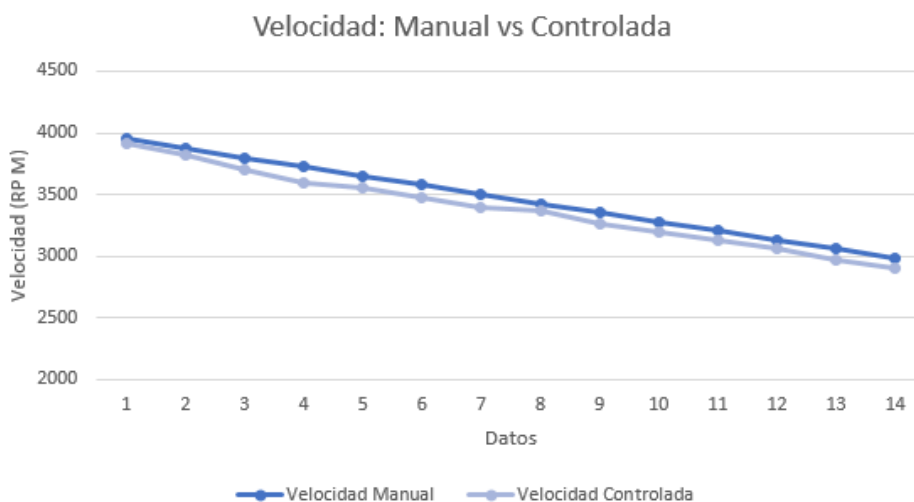


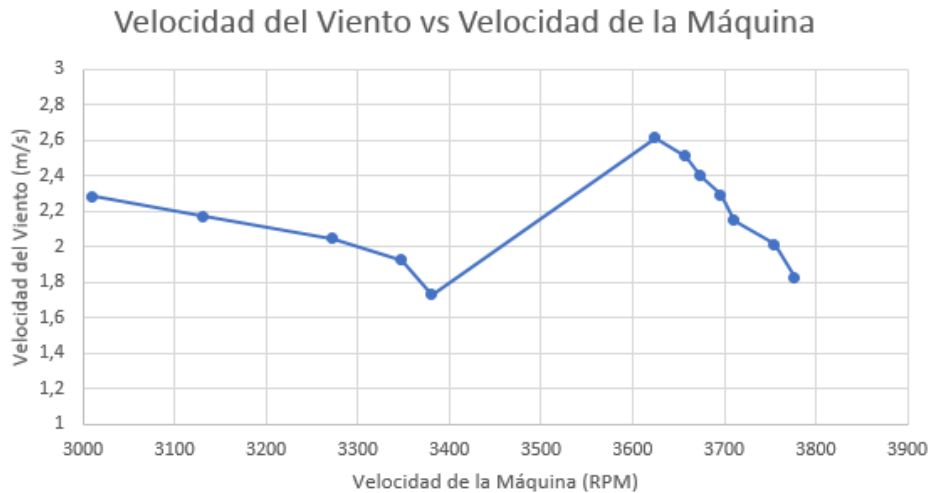
Ilustración 16. Comparación entre Velocidades

Como se puede observar en la gráfica de la ilustración 16, al superponer los valores de velocidad con PWM generada y con variación manual, estos valores poseen una mínima desviación entre sí. Se obtiene una relación de prácticamente 1 entre estas mediciones de velocidad, y no se supera el 3,34% de error entre estos datos. Por lo cual fue posible corroborar que la máquina en cuestión de velocidad está respondiendo acorde a los valores que se ingresan con el software, por ende, el sistema de emulación y de envío de PWM a través de la interfaz funcionan de manera adecuada

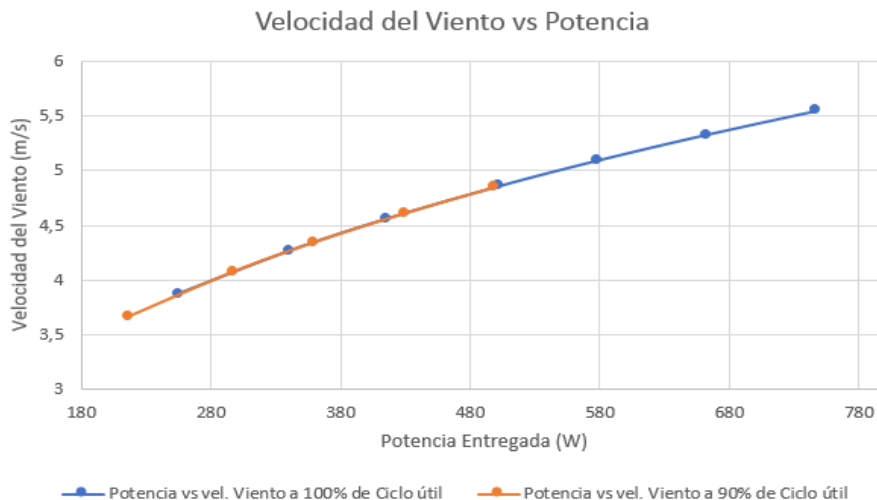
## 6.4. PRUEBAS DE CARGA

Para esta prueba de funcionamiento se conectó el sistema a un freno electromagnético que actuó a modo de carga mecánica variable para comprobar que el sistema sea capaz de resistir cambios súbitos de carga. Estas pruebas confirman los verdaderos límites alcanzados en función de los logros y metas cumplidas en los incisos anteriores.

Para esta prueba se realizaron las conexiones necesarias del motor DC de alta potencia controlado al freno electromagnético, manteniendo un ciclo de trabajo constante, se varió la corriente entregada al motor en pasos de 0.5 amperios a través del incremento de tensión en el freno magnético. Con este se realizaron los siguientes cambios en la carga para demostrar que el sistema soporta cambios hasta 4.5 amperios con un ciclo útil del 100% y de 3.5 amperios para el 90% de ciclo útil.



*Ilustración 177. Velocidad del Viento y Velocidad de la Máquina*



*Ilustración 188. Velocidad del Viento y Potencia*

A partir de las mediciones de velocidad y el cálculo del torque ejercido, se pudo determinar la velocidad del viento asociada a cada nivel de carga. Con esto se pudo describir una curva

característica de viento contra la velocidad de la máquina. Como es posible observar en la ilustración 17, la velocidad del viento desarrollada se comporta sin una tendencia definida, al igual que el viento en su estado natural. Asimismo, se construyó una curva de velocidad del viento contra la potencia entregada por el motor, donde se puede distinguir que a medida que el viento toma una mayor intensidad, la potencia entregada por la máquina aumenta.

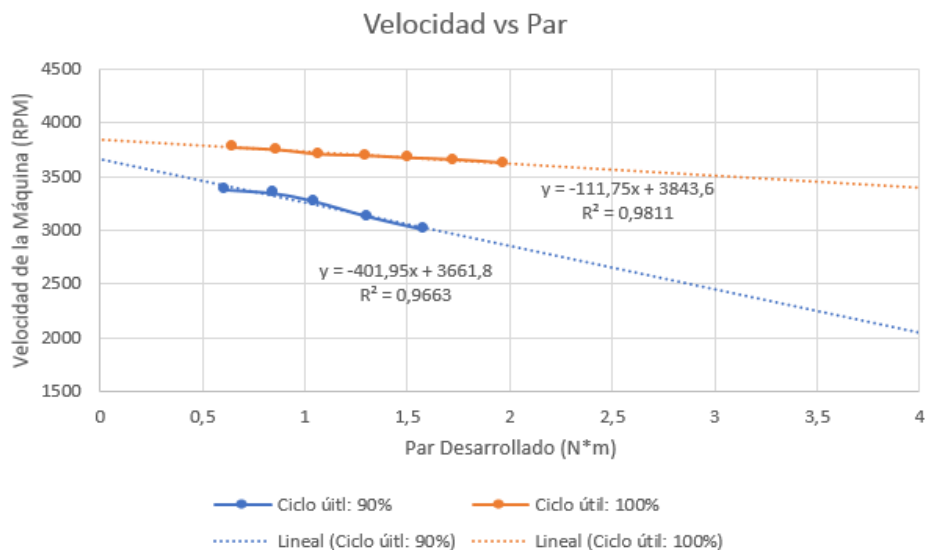


Ilustración 199. Velocidad de la Máquina y Par Desarrollado

Además fue posible encontrar las curvas par-velocidad a los diferentes ciclos útiles en los que se realizaron las prueba, y a partir de estos datos se realizó una línea de tendencia de carácter lineal, con la cual es posible observar el comportamiento que tendrían los datos de ser posible llevar el sistema del proyecto mayores niveles de carga.

Como se puede observar a partir de lo anterior se comprueba que el sistema tiene la capacidad de soportar niveles de carga aceptables entregada al motor, pero que requiere de un mejor control de los componentes del sistema para un aumento considerable en la carga al motor controlado.

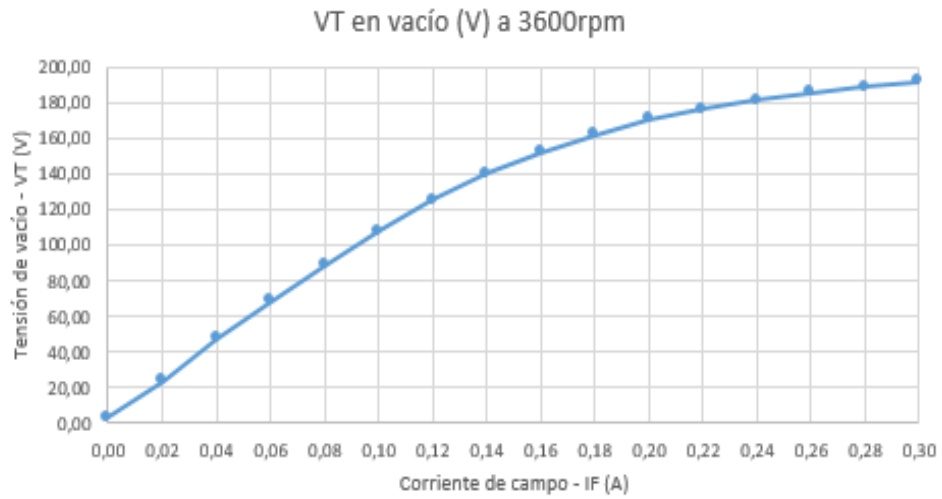
## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Partiendo de los resultados obtenidos con este proyecto, podemos concluir que el control de las máquinas, partiendo de sus parámetros más fundamentales como lo son el voltaje y corriente, es una tarea necesaria para mejorar eficiencia en las investigaciones relacionadas con fuentes renovables, en particular con fuentes eólicas. El procesamiento de la información a partir de microcontroladores es particularmente eficiente para tareas que requieren alto rendimiento y rápida respuesta ante cambios en las señales que se están adquiriendo. Los circuitos electrónicos de potencia formaron parte esencial de la adquisición de los datos para la realización del control de la máquina, ya que estos presentan características de reacción casi instantánea ante cambios mínimos en los valores de entrada sean de voltaje o de corriente. El convertidor DC-DC tuvo varias fallas a causa de los diodos disponibles que eran de baja velocidad desincronizándose de los tiempos de switcheo del IGBT, dicho problema solo se hacía presente cuando el integrado trabaja en sus condiciones nominales; a causa de ello fue necesario cambiar el diseño básico del circuito, y la adecuación de sus componentes para que este soportara tensiones, corrientes y cambios en frecuencia más altos y agresivos. El control dinámico de las máquinas tuvo que ser adecuado para poseer una curva de estabilización suave, brindando un tiempo de estabilización rápido con una sobre elongación baja; de esta manera se asegura un continuo seguimiento de la curva de referencia, sin poner en riesgo la integridad, tanto del sistema de conexiones, como del propio motor DC. La adición de la interfaz de usuario fue en última instancia muy importante para el manejo manual de las consignas y los valores más iniciales del sistema de control, además que permitió observar el comportamiento de las variables más significativas dentro del proyecto. De las pruebas de funcionamiento podemos concluir que el sistema construido y diseñado fue eficiente y cumplió en mayor parte con las características necesarias para la realización de este proyecto.

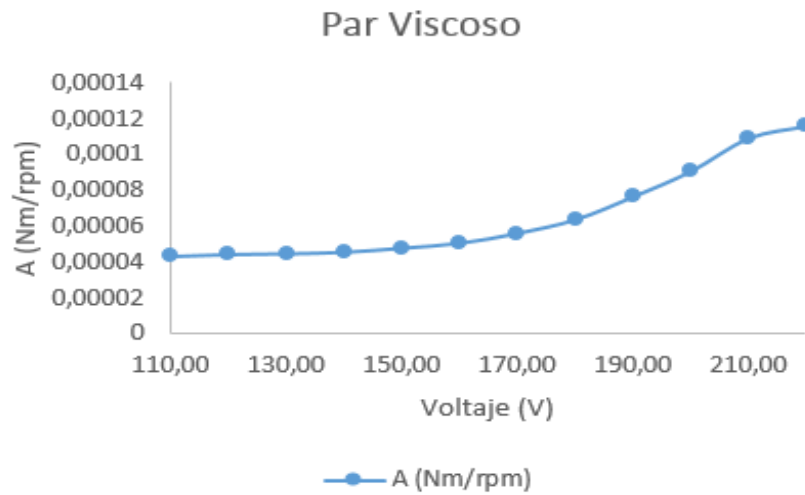
## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Edition, "Wind and solar power systems: design, analysis, and operation," *Choice Rev. Online*, vol. 43, no. 06, pp. 43-3410-43-3410, 2013.
- [2] World Wind Energy Association, "World Wind Energy Association – Wind Power Capacity Worldwide Reaches 600 GW, 53,9 GW added in 2018," *Press Releases Statistics*, 2019. [Online]. Available: <https://wwindea.org/blog/2019/02/25/wind-power-capacity-worldwide-reaches-600-gw-539-gw-added-in-2018/>.
- [3] WWEA, "World Wind Energy Association – Wind Power Capacity reaches 539 GW, 52,6 GW added in 2017," 2018. [Online]. Available: <https://wwindea.org/blog/2019/02/25/wind-power-capacity-worldwide-reaches-600-gw-539-gw-added-in-2018/%0Ahttps://wwindea.org/blog/2018/02/12/2017-statistics/>.
- [4] J. Sáenz v, "El rezago de Colombia en energías renovables | ELESPECTADOR.COM," *El Espectador*, 2018. [Online]. Available: <https://www.elespectador.com/economia/el-rezago-de-colombia-en-energias-renovables-articulo-748703>.
- [5] R. Borja Díaz, "Tendencia tecnológica Energía eólica," *Boletín IIE*, pp. 54–57, 2013.
- [6] T. Hardy and W. Jewell, "Emulation of a 1.5MW wind turbine with a DC motor," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–8, 2011.
- [7] L. Benaouinate, M. Khafallah, A. Mesbahi, and A. Martinez, "Development of a useful wind turbine emulator based on permanent magnet DC motor," *2017 14th Int. Multi-Conference Syst. Signals Devices, SSD 2017*, vol. 2017–January, no. 3, pp. 44–48, 2017.
- [8] S. Kouadria, S. Belfedhal, E. M. Berkouk, and Y. Meslem, "Development of real time Wind Turbine Emulator based on DC Motor Controlled by PI regulator," *Eighth Int. Conf. Exhib. Ecol. Veh. Renew. Energies*, 2013.
- [9] W. Li, D. Xu, W. Zhang, and H. Ma, "Research on wind turbine emulation based on DC motor," *ICIEA 2007 2007 Second IEEE Conf. Ind. Electron. Appl.*, no. 3, pp. 2589–2593, 2007.
- [10] A. Mahdy, S. M. El-Hakim, and H. H. Hanafy, "Small wind turbine emulator with separately excited DC motor using analog electronic circuit," pp. 243–243, 2012.
- [11] A. S. Satpathy, "Development of Control Scheme for a Stand-alone Wind System," pp. 9–12, 2012.
- [12] حمیدی ح. م., "Modelling and Simulation of Wind Turbine Emulator using DC Motor," vol. 6, no. 2, p. 103, 1393.
- [13] G. Dc, "Escuela politécnica nacional," 2018.
- [14] D. Felipe and B. Sandoval, "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE EMULADOR DE UNA TURBINA EOLICA MEDIANTE EL ACOPLE DE UN MOTOR Y GENERADOR," 2016.
- [15] S. Chapman, *Máquinas Eléctricas*, Quinta Edi. Mc Graw Hill, 2012.
- [16] Y. Freedman and S. Zemansky, *Física universitaria*. Addison -Wesley, 2009.
- [17] U. de Barcelona, "Análisis De La Varianza Con Un Factor (Anova)," *Anova*. 2015.
- [18] C. A. Smith and A. B. Corripio, *Control Automático de Procesos*, Primera. 1991.

## 9. ANEXOS



Anexo 1. Curva de Magnetización



—●— A (Nm/rpm)

Anexo 2. Par Viscoso